

**2023년도
울산쇠부리
복원사업
연구보고서**

울산광역시 북구문화원장 귀하

본 보고서를
‘2023년도 울산쇠부리 복원실험 연구’의
최종보고서로 제출합니다.

2023.12.16.

울 산 쇠 부 리 복 원 사 업 단

SOEBURI





CONTENTS

I. 머리말	15
--------------	----

II. 실험 목적 및 방법

1. 실험 목적	21
2. 실험 방법	22
3. 실험단 구성	23

III. 실험 준비

1. 가마의 구조	31
2. 실험매뉴얼	37
3. 실험 준비과정	
1) 원료, 첨가제, 연료 준비	39
2) 가마 보수	41

IV. 실험 내용

1. 실험 과정	
1) 준비 점검	55
2) 연료, 원료, 첨가제 장입	56
3) 온도 변화	58
4) 출탕	61
5) 실험 종료	63
2. 실험 결과	
1) 생산품 및 가마 내 형성물	64
2) 가마의 변화	69

V. 맺음말	75
--------------	----

부록

1. 실험 기록	81
2. 2023 울산 쇠부리 제철복원 실험의 금속학적 분석 및 고찰	87
3. 2022년 울산쇠부리기술 골구멍 예비실험 보고서	135
4. 자문위원 의견서	147
5. 실험고고학으로 본 울산지역 석축형제철로(울산쇠부리가마)의 선철 생산기술 연구	157

우리 울산의 철의 역사를 담은 유일무이한 문화자산, 쇠부리



박 원 희
북구문화원 원장

야윈 몸을 양상한 나무 지팡이에 의지한 채 뒷마루에 걸터 앉은 노인. 쇠상놈이라 천대 받던 그의 거친 삶은 노인의 얼굴에 새겨진 주름살과 뒤틀린 손마디로 짐작할 수 있었습니다. 하지만 여든이 넘은 노구에도 반짝이는 눈빛만은 보는 이를 긴장시키기에 충분했었고 이윽고 노인의 입을 통해 흘러나오는 소리는 우리 울산의 철의 역사를 담은 유일무이한 문화적 자산이 되었습니다.

불매대장 최생원. 故 최재만 옹이 짧은 시절 업으로 삼았던 쇠부리는 사라졌으며 그 기술 또한 기록조차 남아 있지 않았습니다. 후대에 그 기술이 산업도시 울산의 소중한 산업역사가 될 것이니 기록하고 남겨야 한다는 생각을 그 누구도 갖질 못했으니 말입니다. 그럼에도 전통제철기술인 쇠부리만은 반드시 복원하여야 한다는 일념으로 ‘울산쇠부리소리’의 노랫말과 쇠부리의 흔적이 남은 곳이라면 누구든, 어느 곳이든 달려가 묻고, 기록하여 그 발품을 한 권의 책으로 엮은 故 권병탁 교수의 노고 그리고 전통 제철을 연구하는 연구자와 장인 마지막으로 누가 시키지 않아도 스스로 나서서 지역 문화를 지키고 이어가는 울산쇠부리소리보존회 회원들의 희생으로 이제 아홉 번째 실험을 성공적으로 진행하였고 그 결과를 토론하고 분석하여 보고서를 엮게 되었습니다.

8년간의 여정을 통해 석축형 제련로인 울산쇠부리가마를 축조하여 선철을 생산하는 조선 후기 제철 기술 복원에 다다르게 되었으며 이는 국내에서는 유일한 사례이며 참여한 학자분들의 학회 보고를 통해 국내외 제철분

야에도 지속적으로 보고되고 있습니다. 지난 8월에는 문화재청이 선정하는 ‘2024 미래무형유산 발굴·육성사업’에 선정되어 그 가치를 대내외적으로 인정받는 계기가 되었습니다.

이는 어려운 여건 속에서도 변함없는 지원을 해 주신 박천동 북구청장님과 북구의회 김정희 의장님, 이상헌 국회의원님 그리고 울산광역시 시의원님과 북구의회 의원님들의 지지와 응원이 있었기에 가능하였으며, 1,000℃를 넘나드는 쇠부리 불꽃을 그 보다 더 뜨거운 열정으로 이겨낸 이남규 단장님, 이태우 단장님 그리고 연구원 여러분, 울산쇠부리소리보존회 조정모 회장님을 비롯한 회원여러분, 마지막으로 울산 시민여러분들께 감사의 마음을 전하고자 합니다.

2023년 12월

울산광역시 북구문화원장 박 원 희

우리의 쇠부리 문화! 미래 무형유산으로 지켜나가자!!



박 천 동
울산광역시 북구청장

한 그릇의 맛있는 음식이 우리의 식탁에 오르기까지 요리사가 재료준비부터 조리과정까지 수없이 많은 과정을 거쳐야 하듯이 쇠부리제철기술 복원실험도 그와 비슷한거 같습니다.

가마에서 쏟아지는 선철이 판장쇠를 메우는 그 순간을 만들기 위하여 박원희 문화원장님, 이남규, 이태우 공동단장님, 신경환, 이은철, 김권일, 권용대, 강성귀 연구원님 그리고 울산쇠부리소리보존회 회원님들과 자문위원님들, 국립중원문화재연구소, 울산문화재연구원, 금속기술연구소 관계자분 이렇게 많은 분들이 원료 준비부터 가마보수 등 각 과정에서 아낌없는 수고와 노력이 있었기에 가능한 일이라는 것을 잘 알고 있습니다.

여러분의 노고와 관심이 없었더라면 울산쇠부리제철기술 복원사업은 명맥을 잇지도 못한채 문헌속에서만 우리 문화의 가치를 확인하여야 했을 것입니다. 인류의 역사와 문명의 중심에 울산북구가 선두 있음을 명백히 보여주는 쇠부리문화는 우리가 보전·전승해야할 중요한 지역자원일 것입니다.

‘미래 무형유산 발굴·육성 사업’에 당당히 선정되어 재정적 지원뿐만 아니라 기술전승을 체계화할 수 있는 좋은기회를 가지게 된 것은 올해의 성과중에 하나라는 생각이 듭니다.

쇠부리기술, 쇠부리소리, 쇠부리축제 등 복합제철문화로써의 울산쇠부리문화를 융합하여 쇠부리문화를 전국에 알릴 수 있는 기회의 발판이 되었으면 합니다.

점점 복원사업이 가시화되고 있어 복원실험의 성공이 눈앞으로 다가온 것 같습니다. 올해의 성공적인 판장쇠 매뉴얼 완성에 기쁨과 감사의 박수를 보내드리며 2024년도 ‘구충당 이의립 토철제련법’의 체계적인 매뉴얼 작업에 매진해 주시길 부탁드립니다.

과거와 현대를 연결하는 매개체로서의 중요한 역할을 하고 있는 “울산쇠부리복원사업단”에게 성공적인 복원실험의 마무리를 부탁드립니다. 끊임없는 노력에 격려와 감사의 박수를 드립니다. 감사합니다.

2023년 12월

울산광역시 북구청장 박 천 동

북구의 전통과 특색이 담긴 고유의 문화유산 ‘울산쇠부리’



김정희
울산광역시 북구의회
의장

여러분, 안녕하십니까.

한 해를 마무리하는 소중한 시기에 ‘2023년도 울산쇠부리복원사업 결과 보고서’ 발간을 진심으로 축하드립니다.

그동안 울산쇠부리 문화를 보존하고 전승하기 위해 끊임없이 연구하며 눈부신 성과를 내고 계신 박원희 문화원장님, 공동단장이신 울산쇠부리소 리보존회 조정모 회장님과 한신대학교 이남규 명예교수님, 연구가 차질 없이 진행될 수 있도록 아낌없이 지원해주시는 박천동 구청장님, 그리고 여러 연구원님 및 자문위원님을 포함해 2023년도 결과보고서 발간을 위해 애써 주신 모든 관계자분들께 격려와 감사의 인사를 전합니다.

울산쇠부리복원사업은 2016년 고대 원통형 제련로 구조 복원 실험을 시작으로 조선 후기 구충당 이의립 선생의 ‘토철제련법’을 복원하며 국내 최초로 선철 쇳물을 출탕하여 판장쇠를 성공적으로 생산했으며, 지금까지 총 9 차례에 걸친 실험을 통해서 안정적으로 쇳물을 생산할 수 있게 되었습니다.

또한, 지난 8월에는 문화재청의 ‘2024년 미래 무형유산 발굴·육성 사업’에 울산쇠부리기술이 선정되면서 더욱 효율적이고 체계적인 연구가 가능할 수 있게 되었습니다.

이 모든 성과는 수많은 분들의 연구와 실험, 피 땀 어린 노력들이 있었기에 이룰 수 있었습니다.

이와 더불어, 불매꾼들이 제철 작업 중 불렀던 노동요인 ‘울산쇠부리소리’의 국가무형문화재 등재를 기원하는 음악제와 민속예술제 공연이 성공적으로 진행되어 조상들의 지혜와 예술을 가까이에서 체험하며 우리의 정체성을 다시금 깨닫고, 많은 시민들이 쇠부리를 더 친근하게 느낄 수 있는 계기가 되었습니다.

지금까지 해 오신 것처럼, 울산쇠부리기술 복원에 대한 보고서를 지속적으로 발간하여 과학적이고 객관적인 자료를 확보해 나가는 것은 우리 지역 쇠부리문화의 유구한 역사와 정신을 잇기 위한 후손들의 과업이라고 생각합니다.

앞으로도 우리 복구의 전통과 특색이 담긴 고유의 문화유산 ‘쇠부리기술’의 가치를 잘 보존하여 세계적으로 널리 알릴 수 있기를 희망하며, 저와 우리 북구의회도 쇠부리 문화의 전통 계승과 발전을 위해 지속적인 관심과 지원을 아끼지 않겠다는 약속을 드립니다.

다시 한 번 ‘2023년도 울산쇠부리복원사업 결과보고서’ 발간을 진심으로 축하드리며, 울산쇠부리 복원을 위해 애쓰시는 모든 분들께 깊은 존경과 감사의 말씀을 드립니다.

끝으로, 남은 한해 마무리 잘 하시길 바라며 새해 복 많이 받으십시오. 감사합니다.

2023년 12월

울산광역시 북구의회 의장 김 정 희



머리말

I. 머리말

한민족이 고중세 중국의 명멸하는 여러 제국들에 지혜롭게 혹은 용맹스럽게 대응하면서 피땀어린 노력을 기울인 결과, 동북아시아에서 지속적으로 민족국가를 유지하여 현재의 대한민국에까지 이르게 되었다. 우리가 부단하게 내적 성장을 이루면서 외세에 대항할 수 있었던 데에는 여러 가지 역량이 작용했겠지만 그 가운데에서도 자체적으로 생산하고 사용하던 철의 힘이 무엇보다 큰 비중을 차지하였던 사실을 일반적으로 크게 인식하고 있지는 못하고 있는 듯 하다. 이는 자료가 부족하고 전통 기술은 거의 대부분 단절되어 버린 철의 그 다양하고 복잡한 역사에 대해 아직도 연구가 크게 부족한 때문이라 할 수 있을 것이다.

고대에는 삼국이 경쟁적으로 생산을 확대해 중상위층의 무덤에 과잉으로 철기를 부장할 정도로 철 문화를 발전시켰으나 그 이후에는 이 부문이 점차 쇠퇴의 길로 접어들었다고 할 수 있다. 고려시대에는 철소(鐵所)를 중심으로 낮은 신분의 노동자들에 의해 철생산이 이루어졌으며, 이후 유교적 관념이 지배적이던 조선시대에도 사농공상(士農工商)의 이념에 따라 제철업은 말업(末業)으로 여겨지면서 당시 국가의 정책은 철장제(鐵場制), 철장도회제(鐵場都會制), 각읍체납제(各邑採納制) 등의 시행착오적 철생산 및 수취 방식을 채택하는 가운데 철산업은 발전을 도모하기는 커녕 점차 쇠퇴하여 갔다. 그러던 중 양란(兩難)을 겪고 난 17세기 중기 단계에 이의립(李義立)이 울산의 철장을 새롭게 개발하고 석축형제철로(울산 쇠부리가마) 방식에 의한 철생산이 크게 확대되어 울산-경주 일대가 조선시대 후기 제철에 있어 중심적 위치를 점하게 되었다. 이후 그러한 철생산 활동은 지속되어 조선시대 말기와 일제강점기를 거쳐 현대에까지 그 명맥을 유지해 왔다. 하지만 현재 이 지역 특성의 제철기술이 단절되어 잊혀진지 오래이고, 남한지역에서는 최대규모였던 달천광산도 급속하고 무분별한 도시개발에 밀려 현대의 갱도를 중심으로 한 일부만이 공원으로 보존되어 있을 뿐이다.

우리나라 산업의 핵심지라고 할 수 있는 울산지역에 이와 같은 고대~현대의 저명한 철산지가 존재하고 있었음을 재인식할 필요가 있다. 늦어도 조선시대 중기 이후부터 이 지역 특유의 ‘석축형제철로’를 이용하여 상당한 양의 선철을 생산하는 가장 주목 받는 철산지였고, 이 지역의 철이 전국은 물론 적어도 경상도의 많은 지역들에서 사회경제적 발전이 이루어질 수 있는 물질적 기초였다는 점은 아무도 부인하지 못할 것이다. 하지만 이러한 이 지역 철의 역사와 제철기술은 우리나라 역사학과 고고학에서 제대로 다루어지지 못하였고, 경제사학 분야의 권병탁(權丙卓) 선생에 의해 다양한 부문의 정보와 지식들이 채록되고 그것이 논고화되면서 관련 학계에 인지되기 시작하였다(권병탁 1972·2004).

다만 그러한 권병탁 선생의 열정적 연구는 사회경제사적 시각에서 이루어져 현재 ‘미래문화유산’으로 인정받기 시작하여 완전한 제철기술적 복원이 절실히 요구되고 있는 ‘울산쇠부리’의 공학적이고 과학적인 기술정보의 부분을 제대로 파악하기 어려웠던 한계가 있었던 점은 일본의 경우와 크게 대비된다¹⁾. 그러한 점에서 현재 실시하고 있는 제철복원실험은 여러가지 어려운 상황에서 극복해야 할 과제가 그만큼 많은 것도 사실이다.

울산시 북부의 급속한 도시개발에 의해 ‘달천철장’ 대부분의 지역이 아파트화 되어 가던 2005년부터 울산쇠부리축제추진위원회에서 추진하는 쇠부리축제가 개최되고 그에 관련된 학술회의가 진행되어 왔으며, 2016년부터 울산쇠부리복원사업단을 구성하여 이 지역의 특성에 맞는 제철복원실험을 진행하여 왔다.

석축형제철로로 조업을 실시하는 울산쇠부리복원사업단은 울산 북구의 무형유산 단체인 ‘울산쇠부리소리보존회’가 중심이 되고 학계의 이 분야 전문가, 제철장인 및 행정담당자들이 함께하는 민관학(民官學)의 거버넌스를 구성하여 운영되고 있으며 지난 8년간 혼연일체가 되어 단절된 이 지역의 쇠부리기술을 되찾기 위한 제철복원실험에 적극적으로 매진하여 왔다. 그 결과 여러 시행착오를 경험하는 가운데 사라진 ‘석축형제철로’의 구조와 세부적 기술요소들을 복원하는데 많은 진전을 이루었다.

초기의 3년간은 고대의 원통형방식으로 괴련철을 생산하는데 주력하였고, 4년차부터는 이 지역 특유의 ‘석축형제철로’를 축조하여 선철을 생산하는 조업을 실시하였다. 울산쇠부리축제와 함께 실시되는 이 실험은 2019년까지 울산북구청 마당에서 행하여지다가 2020년부터는 축제와 함께 달천철장으로 장소를 옮겨 현재에 이르고 있으며, 그 결과들은 매해 보고서로 작성되어 대외적으로 그 내용을 상세히 소개하고 있다.

2023년에는 3년간 지속적으로 사용하였던 가마 내부의 벽을 대대적으로 수리하여 높이를 270cm에서 250cm로 내리고, 내벽의 상향각도가 내경하듯이 되어 있던 데에서 직선형으로 수정하였으며, 송풍구 부분의 석재 교체와 약간의 변형을 시도하는 등 이전과는 몇 군데에서 차이를 보이는 변화를 추구하여 실험을 진행하였다.

1) 일본의 경우는 동경제대 공대 교수였던 다와라 구니이치(倭國一)가 공학적 방식으로 철저히 조사하면서 아주 세밀한 기술적 요소까지도 정밀하게 기록해 놓은 덕분에 일본 다다라(たたら)제철기술이 온전히 복원되어 현재도 지속적으로 전통적 제철작업이 성공적으로 진행되고 있는 것이다(倭國一1933).

이러한 제철복원실험은 기획단계→준비단계→실행단계→정리분석단계→보고 및 평가단계를 거치게 되는데 기획과 진행에는 김권일·권용대·강성귀, 준비단계와 본실험 실행단계에서는 이태우 명예 회장·박실 부회장을 위시한 ‘울산 쇠부리소리보존회’ 회원분들의 열성어린 노력이 있었다. 다양한 제철관련자료 분석에는 금속기술연구소의 신경환 소장·이재용 부장 두 분이 담당해 주셨고, 이은철 장인은 이러한 전체 일정에 직접 참여하시면서 많은 조언을 해주셨다. 학술자문위원으로는 김구한(울산대학교 아산리더십연구원 연구교수, 울산광역시 문화재위원)·김성태(안성주물 대표)·문재범(전 국립중원문화재연구소 소장)·성정용(충북대학교 고고미술사학과 교수)·소배경(삼강문화재연구원 부장)·신상용(울산대학교 첨단소재공학부 교수)·심재연(한림대학교 한림고고학연구소 연구교수)·조대연(전북대학교 고고문화인류학과 교수)·최영민(아주대학교도구박물관 학예연구사)·한지선(국립문화재연구원 학예연구사) 등 각 분야 전문가 열 분이 수고해 주셨다. 그리고 행정·진행에는 김성철·정주연·강정(울산광역시북구청문화체육과), 김경곤·류희영(울산광역시북구문화원), 정재화·김문주(울산 쇠부리축제추진위원회) 등 여러분이 맡아서 수고해 주셨다. 그 외에 김남석(대목장), 정낙현·곽병문(국립중원문화재연구소), 이지은(국립경주박물관)·정민성(충북대학교 대학원), 정경화(중부고고학연구소), 양경민(한신대학교 대학원), 장한열·방재식(영남대학교 대학원) 등이 진행을 도왔고, 울산쇠부리소리보존회, 시민11명이 풀무작업을 맡아주었으며, 사진 촬영은 문화재전문 사진작가이신 오세운님이 담당해주셨다. 이 모든 분들께 심심한 사의를 표한다.

뿐만 아니라 이러한 복원실험을 수 년간 원활히 이루어지도록 노력해 주신 울산북구문화원의 박원희 원장(겸 울산쇠부리축제 추진위원장)님께도 깊은 감사를 드린다.

그리고 이 모든 실험작업이 가능하도록 물심양면으로 적극 지원해주고 계신 울산광역시 울산광역시북구의 박천동 구청장님과 울산광역시 북구의회 김정희 의장님께도 감사의 마음을 전한다.

II

실험 목적 및 방법

1. 실험 목적
2. 실험 방법
3. 실험단 구성

II. 실험 목적 및 방법

1. 실험 목적

달천철장을 중심으로 한 울산지역에는 약 2천년에 걸친 제철산업의 역사성이 문헌·고고·민속 등을 통해 확인되고 있다. 달천철장이 소재한 울산광역시 북구에서는 이러한 전통문화유산인 ‘울산쇠부리 문화 복원사업’을 지속적으로 추진해 오고 있으며, 2016년도 ‘울산쇠부리 고대 원통형로 복원실험’을 시작으로 연차적 기술복원 실험연구를 진행해 오고 있다. 지금까지 모두 9차에 걸쳐 실험이 진행되었는데, 제1~2차는 고대 원통형로 기술복원을 통한 괴련철 생산, 제3~4차는 분광 원료의 선철 제련 및 방형 가마에서의 선철 제련 가능성 타진을 위한 예비실험 성격으로 진행되었으며, 제5~9차는 본격적인 조선후기 울산쇠부리 선철 제련기술 복원실험으로 진행하였다. 이 실험들의 결과는 모두 보고서로 작성되어(이남규 외 2016·2018a·2018b·2019·2021·2022) 울산쇠부리 기술사 연구자료로 활용되고 있다.

울산쇠부리에 대한 연구는 1960년대부터 경제사 연구를 위한 민속·지표조사의 형태로 이루어져 오다가, 1990년대 이후 울산 달천광산·중산동·천상리·입암리·둔기리·방리·천전리·삼정리, 경주 모화리·용명리 등의 제철유적 발굴조사를 통해 본격적인 고고학 및 금속공학적 연구가 이루어지게 되었다. 고대의 경우 기왕의 연구를 통해 원통형 제련로에서 철광석을 제련해 괴련철을 생산하는 기술체계가 어느 정도 규명이 되었으며, 이러한 기술은 울산뿐만 아니라 전국 대부분 지역에서 공유했던 것으로 파악되고 있다. 고려시대 제철기술과 관련된 유적은 아직 울산지역에서는 조사되지 않았으며, 충주를 중심으로 한 충북지역에서 평면 타원형 혹은 말각장방형 제련로가 조사되어, 이전시기 원통형을 벗어나는 새로운 구조의 제련로 및 이와 연계된 제련기술의 존재 가능성이 제시된 바 있다(최영민·이현진 2020, 강성귀·김권일 2022a·2022b)다.

조선시대 후기가 되면 달천광산을 중심으로 한 울산 및 가까운 청도·경주에서는 다른 지역에서 볼 수 없는 아주 독특한 제철기술이 성행하게 된다. 그것은 바로 1657년경 구충당 이의립 선생에 의해 개발되고 1910년경까지 그 후손들에 의해 운영된 것으로 알려진 ‘토철 제련법’이다. 이 기술은 달천광산에서만 산출되는 특이한 형태의 광석인 토철(土鐵)에서 유래된 것으로, 이 토철을 제련했던 제철로가 바로 울산 쇠부리가마 혹은 석축형제철로(石築型製鐵爐)이다(김권일 2009·2014·2020, 신경환 외 2015).

울산쇠부리기술은 1910년경 달천광산이 일제에 강탈당하면서 점차 소멸되어져 이제는 그 명맥이 끊어져 버리게 되었다. 하지만 1960~70년대 권병탁 교수의 자료 수집과 연구를 시작으로, 1990년 이후 각종 제철유적의 발굴조사를 통해 그 본형(本形)과 중요성이 점점 부각되게 되었다. 이후 여러 연구자들의 노력으로 울산쇠부리기술의 실체가 서서히 드러나게 되었다. 본 실험연구는 이처럼 명맥이 끊어진 울산쇠부리기술을 복원해 소중한 지역의 전통기술유산을 보존·복원 및 전승·활용하는데 그 목적이 있다.

2. 실험 방법

이번 실험의 목적은 조선후기 울산쇠부리기술 중 토철을 제련해 선철을 생산하는 기술을 복원하는 것이다. 울산 대안동 쇠부리가마를 모델로 한 실험로에서 토철 형태의 분광을 제련해 용융상태를 거친 선철을 1본이 6매로 이루어진 판장쇠바탕에 흘러 들어가게 해 선철 판장쇠를 생산하고자 한다. 다만 대안동 쇠부리가마는 크기가 너무 커 실험장의 규모 등 제반조건이 맞지 않기 때문에 이를 절반 크기로 축소한 실험로를 제작하였다. 지난 실험과 다른 점은 판장쇠바탕의 탕도에 해당되는 중간까지 부분에 1매의 판장쇠가 생산할 수 있도록 설계해 1회 출탕에 모두 7매의 판장쇠가 생산될 수 있도록 했으나 본 실험에서는 중간까지 부분을 제외하고 6매의 판장쇠가 생산될 수 있도록 했다는 점이다. 석축의 규모 및 풀무의 크기는 가마 크기에 연동하기 때문에 전반적인 조정이 필요하였으나 최대한 유적에서의 현상을 복원하는 방향으로 진행하였다.

조선후기 울산쇠부리에서는 달천철장에서 채취한 토철을 사용하였으나 현재 달천광산은 울산광역시 기념물 제40호로 지정되어 있어 토철을 채취할 수 없다. 이에 기존의 강원도 양양산 철광석을 파쇄한 분광(粉鑛)을 선별해 사용하였다. 풀무는 2019년도까지 인력송풍으로 운용해 왔으나 2020년도부터는 코로나19의 여파로 인해 비대면으로 진행하게 되어 기계송풍과 겸용할 수 있도록 하였고 이는 이번 제9차 실험도 마찬가지이다. 생산된 판장쇠에 대해서는 2021년도에 1차 판장쇠 분리실험, 제8차 실험일인 2022년 5월 13일에 2차 분리실험, 8월 13일에 3차 분리실험을 진행한 바 있다. 2·3차 판장쇠 분리실험은 제5~8차 실험에서 출탕된 판장쇠 중 전시 목적의 각 1본씩을 제외한 나머지를 대상으로 하였다. 이러한 내용은 각각의 보고서에 부록으로 수록하였다.

실험단에서는 실험 기획 및 준비, 진행, 결과물 수습 등의 전 과정을 기록하였으며, 원료·생산품·파생품 등에 대해서는 시료를 채취해 금속분석을 진행하였다. 이러한 내용들을 정리·분석해 본 보고서

를 작성해 울산쇠부리기술을 규명하는 연구도서로 남기고자 한다.

3. 실험단 구성

이번 울산쇠부리기술 복원실험 및 보고서 작성과 관련하여, 예산은 울산광역시 북구(북구청장 박천동)에서 울산광역시 북구문화원(원장 박원희)을 통해 지원하였으며, 공동단장 이남규·이태우를 비롯한 8명의 연구원과 6명의 연구위원단 및 10명의 자문위원단으로 구성되었다. 실험의 준비와 진행은 울산쇠부리소리보존회 회원들이 맡아 주었으며, 대학·대학원 학생 및 관련기관의 전공 연구자들이 다수 참여해 실험에 많은 도움을 주었다. 특히 국내 제철기술 연구의 중추적 역할을 맡고 있는 국립중원문화재연구소(전 소장 문재범)에서는 양양산 철광석 분광을 지원해 주었으며, 소속 연구진들은 실험 준비 및 진행 과정에 참여해 많은 도움을 주었다.

이번 제9차 실험연구에 참여한 인원 현황은 아래와 같다(참여 당시 직함).

- 사업총괄 : 박원희(울산광역시 북구문화 원장)
- 단 장 : 이남규(책임연구원, 한신대학교 한국사학과 명예교수)
이태우(울산쇠부리소리보존회 명예회장)
- 연구원 : 신경환(공동연구원, 금속기술연구 소장)
이은철(공동연구원, 한국야철문화연구 소장)
김권일(공동연구원, 신라문화유산연구원 학예연구실장)
권용대(공동연구원, 울산문화재연구원 부장)
강성귀(공동연구원, 한국문화재단 연구원)
이재용(금속기술연구소 부장)
- 연구위원 : 강진희(울산광역시 북구의회 의원)
(가나다순) 권오걸(울산광역시 북구 행정지원국장)
김상태(울산광역시 북구의회 의원)
김성철(울산광역시 북구 문화체육과장)
윤석원(울산쇠부리축제 추진위원회 위원)
정상태(울산쇠부리축제 추진위원회 위원)
- 학술자문위원 : 김구한(울산대학교 아산리더십연구원 연구교수, 울산광역시 문화재위원)
김성태(안성주물 대표)
문재범(전 국립중원문화재연구 소장)
성정용(충북대학교 고고미술사학과 교수)
소배경(삼강문화재연구원 부장)

신상용(울산대학교 첨단소재공학부 교수)
심재연(한림대학교 한림고고학연구소 연구교수)
조대연(전북대학교 고고문화인류학과 교수)
최영민(아주대학교도구박물관 학예연구사)
한지선(국립문화재연구원 학예연구사)

○ 행정·지원 : 정주연·강 정(울산광역시 북구 문화체육과)

김경곤·류희영(울산광역시 북구문화원)

정재화·김문주(울산쇠부리축제 추진위원회)

○ 사진촬영 : 오세윤(문화재전문 사진작가)

○ 실험참여 : 공창해, 권오윤, 김경진, 김복순, 김상욱, 김원수, 김정호, 노병동, 류경수, 박금열
박대용, 박 실, 박영춘, 서경숙, 서영교, 양진하, 윤귀철, 이정자, 이심결, 전선례
정복녀, 정수영, 조귀오, 조정모, 지상길, 하출식, 한태경(울산쇠부리소리보존회)
정낙현·곽병문(국립중원문화재연구소), 이지은(국립경주박물관)
정민성(충북대학교 대학원), 정경화(중부고고학연구소)
양경민(한신대학교 대학원), 장한열·방재식(영남대학교 대학원)
금교일, 김도훈, 김태현, 박주혁, 이종섭(시민)

보고서 발간의 기획과 집필·편집은 공동단장 이남규의 책임 하에 진행되었다. 실험 준비는 울산쇠부리소리보존회(명예회장 이태우) 회원들이 맡아 주었으며, 연구단에서 이를 감리하고 기록하였다. 연간 실험 일정과 당일의 실험매뉴얼 및 업무분장은 각각 <표 1~3>에 나타내었으며, 전반적인 진행 사항은 권용대와 강성귀가 기록 및 취합하였다. 보고서의 작성은 이남규·김권일·권용대·강성귀가 각 파트를 분담하여 집필·편집하였고, 최종적으로 이남규가 교정·감수하였다. 실험 과정 및 결과물에서 채취된 시료 28점에 대해서는 신경환·이재용이 금속학적 분석 및 고찰을 맡아 주었다.

〈표 1〉 2023년 울산쇠부리복원실험 연간 일정표

구 분	일 정		세부내용	담당		비 고
				연구단	보존화·사무국	
매뉴얼	가마구조 설계 조업매뉴얼	2023/ 02/04(토)	쇠부리가마 구조 설계 조업매뉴얼 확정	김권일, 권용대, 강성귀	—	
황토 점토	황토 등 재료 준비	03/04(토)	가마 축조용 황토(여주) 3톤백 가마 축조용 소형 황토블록 재료준비	—	박실·정재화	울산쇠부리 소리보존회
	황토블럭 제 작	03/05(일)	가마 축조용 소형황토블럭 흙반죽	김권일, 권용대, 강성귀		
	황토블럭 제 작	03/09(목) ~03/10(금)	가마축조용 소형황토블록 제작 (621개 내외)	—	박실, 정재화	울산쇠부리 소리보존회
연료	잡탄 입고 목탄 입고	03/17(금)	가마건조용 잡탄 구매(600kg) 가마건조용 목탄(대탄) 구매(200kg)	—	박실, 정재화	울산쇠부리 소리보존회
가마	가마 보수 풀무 보수	03/18(토) ~03/19(일)	가마 내벽 정리 가마 벽체 상부 100cm 조성	전원	박실, 정재화	울산쇠부리 소리보존회
		03/25(토) ~03/26(일)	가마 벽체 상부 100cm 조성, 풀무 보수	전원	박실, 정재화	울산쇠부리 소리보존회
	가마 미장 판장쇠바탕 바람골설치	04/01(토) ~04/02(일)	벽체 내부 100cm 조성 완료 가마 내벽 1차 미장(2cm) 판장쇠바탕 내틀 제작 목제 바람골 제작, 골구멍 석재 준비 작업 후 소결 건조(04/04(화)~06(목))	전원	박실, 정재화	울산쇠부리 소리보존회
		04/08(토) ~04/09(일)	가마 내벽 2차 미장(2cm) 골구멍 설치, 예비광석 세척 작업 후 소결 건조(04/11(화)~13(목))	전원	박실, 정재화	울산쇠부리 소리보존회
	가마 미장 방습 시설	04/15(토) ~04/16(일)	가마 내벽 3차 미장(완료), 방습시설(노상 포함) 설치, 예비광석 선별 등 완료	전원	박실, 정재화	울산쇠부리 소리보존회
	내벽 코팅	04/24(월) ~05/07(금)	가마 내벽 코팅 및 소결	이태우	박실, 정재화	울산쇠부리 소리보존회
연료	목탄 입고	04/28(금)	실험용 목탄 입고	이태우	박실, 정재화	울산쇠부리 소리보존회
가마	앞창 설치	05/07(일)	앞창 설치	김권일		울산쇠부리 소리보존회
실험	실험 준비	05/11(목)	13:00 이동식 판장쇠바탕 제작 풀무(송풍기) 등 최종 점검	이남규, 이은철, 이태우	박실(보존회), 정재화 등	제19회 울산쇠부리 축제
	실험 준비	05/12(금)	09:00 실험 준비 13:00 판장쇠 정리 및 전사방안 검토 15:30 점화식, 가열 16:00 준비회의 18:00 고유제	전원		
	실험	05/13(토)	08:00 온도계 설치 및 조업 개시 자문위원 개별의견서	전원 (학술자문단)		
	정리·체험	05/14(일)	09:00 앞창 개방, 생산품 및 부산물 1차 정리 13:00 연구단 회의	전원		
정리 평가	앞창 절개 생산품 정리 및 기록 평가회의	07/01(토) ~07/02(일)	앞창 절개 생산품 및 부산물 정리 가마 및 정리내용 기록 연구단 평가회의	전원	박실, 정재화	

구 분	일 정		세부내용	담당		비 고
				연구단	보존회·사무국	
보고서	보고서 작성	06/12(월) ~10/31(화)	보고서 원고 작성, 도면·도판 편집	보고서 담당자	—	
분석	금속분석		금속분석 및 보고서 작성	신경환, 이재용	—	
평가	평가회의	11/20(월)	2023년도 제9차 본 실험 평가회의 2024년도 미래무형유산 발굴·육성사업 및 울산쇠부리복원사업 기획회의	전원	박실, 정재화	
보고서	보고서 편집 및 교열	11/20(월) ~12/15(수)	종합보고서 편집·교열·감수	보고서 담당자	정재화	
보고회	종합보고회	12/16(토)	2023 울산쇠부리복원사업 최종보고회	전원 자문위원	박실, 정재화	울산쇠부리 소리보존회

〈표 2〉 울산쇠부리복원실험 업무 분장(실험당시 소속)

No	업무	성명	성별	세부역할	소속	비고
1	실험 총괄 (2)	이남규	남	실험 총괄	한신대학교	공동단장
2		이태우	남		울산쇠부리소리보존회	
3	실험 진행 (2)	김권일	남	실험 진행	신라문화유산연구원	노 구조·매뉴얼
4		정낙현	남	진행 보조	국립중원문화재연구소	
5	조업 담당(1)	이은철	남	골편수	한국야철문화연구소	기술 관리
6	조업 지원 (2)	김상욱	남	골편수 보조	울산쇠부리소리보존회 (이하 보존회)	
7		박금열	남	골편수 보조		
8	철광석 작업 (2)	조기오	남	쇠대장	울산쇠부리소리보존회	
9		류경수	남	쇠꾼		
10	숯 작업 (3)	김원수	남	숯대장	울산쇠부리소리보존회	
11		공창해	남	숯꾼		
12		권오윤	남	숯꾼		
13	송풍 관리 (기계송풍-4)	박 실	남	불매대장	울산쇠부리소리보존회	
14		김정호	남	불매꾼		
15		정수영	남	불매꾼		
16		김복순	여	불매꾼		
17	송풍 관리 (인력송풍-18)	노병동	남	불매꾼		
18		박대용	남	불매꾼		
19		박영춘	남	불매꾼		
20		이경자	여	불매꾼		
21		이심결	여	불매꾼		
22		전선례	여	불매꾼		
23		금교일	남	불매꾼	시 민	
24		김도훈	남	불매꾼		
25		김태현	남	불매꾼		
26		박주혁	남	불매꾼		
27		이종섭	남	불매꾼		

No	업무	성명	성별	세부역할	소속	비고
28	울산 쇠부리 소리	서경숙	여	소리꾼	울산쇠부리소리보존회	
29		서영교	남	소리꾼		
30		조정모	남	소리꾼		
31		하출식	남	소리꾼		
32		한태경	여	소리꾼		
33	기록 총괄 (2)	권용대	남	실험 진행, 기록	울산문화재연구원	공동연구원
34		강성귀	여	조업기록 총괄	한국문화재재단	공동연구원
35	온도 기록 (3)	이지은	여	온도기록	충북대학교 대학원	
36		정민성	남	온도기록 보조	충북대학교 대학원	
37		장한열	남	온도기록 보조	충북대학교 대학원	
38	장입량 기록 (3)	정경화	여	장입량기록	중부고고학연구소	
39		양경민	남	장입량기록 보조	한신대학교 대학원	
40		방재식	남	장입량기록 보조	영남대학교 대학원	
41	사진 촬영(1)	곽병문	남	사진촬영	국립중원문화재연구소	
42	금속분석 (2)	신경환	남	시료채취 및 분석	금속기술연구소	공동연구원
43		이재용	남	시료채취 및 분석	금속기술연구소	연구보조원
44	공양 (2)	양진하	여	공양	울산쇠부리소리보존회	식사/간식
		정복녀	여			
45	행정관리 (4)	김경곤	남	행정총괄	북구문화원	
46		정재화	남		울산쇠부리축제 추진위원회	
47		류희영	여	행정사무	북구문화원	
48		김문주	여		울산쇠부리축제 추진위원회	
49	학술자문위원 (10)	성정용	남	실험 학술자문	충북대학교	자문의견서
50		신상용	남	실험 학술자문	울산대학교	
51		조대연	남	실험 학술자문	전북대학교	
52		심재연	남	실험 학술자문	한림대학교	
53		한지선	여	실험 학술자문	국립문화재연구원 고고연구실	
54		김구한	남	실험 학술자문	울산대학교	
55		최영민	남	실험 학술자문	아주대도구박물관	
56		김성태	남	실험 학술자문	안성주물	
57		문재범	남	실험 학술자문	국립중원문화재연구소	
58		소배경	남	실험 학술자문	삼강문화재연구원	
59	전문가 촬영 (2)	오세윤	여	작품사진 촬영	문화재 사진작가	
60		박재영	남	영상 촬영	제이와이프로덕션	

III

실험준비

1. 가마의 구조
2. 실험매뉴얼
3. 실험 준비과정

III. 실험 준비

1. 가마의 구조

조선후기 울산쇠부리가마는 양 측면에 석축이 설치된 제련로에서 분광 형태의 토철을 목탄으로 제련해 선철 판장쇠를 대량생산하는 것이 가장 큰 특징이다. 그 구조에 대해서는 기왕의 연구(권병탁 2004, 김권일 2009·2014)에 의해 개략적인 연구가 진행되어 있으며, 조업방식으로는 2회 조업을 통해 각각 반환원괴와 환원괴를 생산한다는 견해가 제시된 바 있다(신경환 외 2015). 이후 2019년도 제 5차 실험보고서를 통해 한 번의 조업에서 곧바로 선철을 생산했을 가능성이 제시되고(이남규 외 2019), 이를 심화한 정식 논문에서는 5가지 검토자료가 제시되면서 그 가능성이 검증되었다.

북한 회령 인근의 전거리 제철로의 구조 및 생산 내용, 울산 대안동 쇠부리가마의 벽체가 석축 상부보다 돌출된 점, 2018~2019년의 제4~5차 실험에서 높이 220·250cm의 가마에서 분광을 제련해 쇳물을 유출시켜 선철을 생산한 점, 일본 타타라제철(たたら製鐵)과 가고시마(鹿児島縣)지역 석조제철로(石造製鐵爐)와의 노 구조 및 조업방식의 차이점·유사점 비교 검토 등이 그 근거자료로 제시되었다(김권일 2020). 즉 토철과 같은 분광은 고로(高爐) 형태가 아니어도 선철 생산이 가능하다는 점이 확인되었고, 이후 실험은 한 번의 조업에서 곧바로 선철 판장쇠를 생산하는 것으로 확립되었다.

〈표 3〉 2019~2023년도 울산쇠부리 복원실험 개요

구분	제5차	제6차	제7차	제8차	제9차	비고
	2019.05.10~12	2020.10.09.~11	2021.10.22~24	2022.05.13~15	2023.05.12~14	
가마 내경(cm)	80	상부 50~70, 중부 70~90, 하부 40~60	6차와 동일	6·7차와 동일	중·상부 70~90 하부 40~60	
가마 외경(cm)	160	상부 90~110, 중부 150 하부 150~170	6차와 동일	6·7차와 동일	6~8차와 동일	
가마 높이(cm)	250	250	6차와 동일	270	250	가마바닥 기준
광석 장입량(kg)	380	310	300	200	250	
목탄 장입량(kg)	1380(630-750)	1,150(390-660-100)	1,050(430-600-20)	1,060(540-420-100)	1,100(500-500-100)	장입총량(광석 장입 개시 전·후 종료 후)
황토 장입량(kg)	—	—	—	—	—	
패각 장입량(kg)	60	30	—	—	—	
슬래그 장입량(kg)	—	22	28	20	19	
마사토 장입량(kg)	—	—	—	16	—	
장입 비율 광석/목탄/황토·슬 래그/패각(마사토)	1/3.63/0.16	1/3.7/0.071/0.097	1/3.5/0.093	1/3.5/0.093	1/4.4/0.076	목탄 장입 종량 기준
	1/1.97/0.16	1/2.13/0.071/0.097	1/2.0/0.093	1/2.1/0.1/0.08	1/2.0/0.076	광석 장입개시 후 ~광석 장입 종료 전
		1/2.45/0.071/0.097	1/2.067/0.093	1/2.6/0.1/0.08	1/2.4/0.076	광석 장입 개시 후 ~조업 종료 전
송풍 시간(분)	856	677	762	720	748	
광석 장입시간(분)	537	470	514	314	412	
평균 최저온도(℃)	1,165	1,121	1,156	1164.5	1,146	광석 장입 개시 후 전체
평균 최고온도(℃)	1,267	1,266	1,252.6	1264.5	1,282	광석 장입 개시 후 전체
평균 온도(℃)	1,219	1,191	1,190	1211.4	1,222	광석 장입 후 안정온도부터의 평균
조업 개시	08:30	09:10	08:55	08:25	08:08	
송풍 개시	09:15	09:10	09:07	08:30	08:40	
광석 장입 개시	11:06	11:10	11:46	11:34	11:32	
목탄 장입 개시	08:33	06:30	08:55	08:25	08:08	
슬래그 장입 개시	—	11:12	11:49	11:36	11:29	
마사토(패각) 장입 개시	11:07	11:25	—	11:36	—	
철재 배출 시작	17:02	13:34	16:52	14:53	14:43	1차 14:43, 2차 16:40
선철 출탕 시작	17:02	14:39	15:10	15:33	15:23	1차 15:23, 2차 17:30
광석 장입 종료	20:03	19:00	20:20	16:48	18:24	
목탄 장입 종료	20:03	20:18	20:39	18:56	20:00	
패각 장입 종료	19:03	18:42	—	—	—	
황토(마사토) 장입 종료	—	—	—	15:40	—	
슬래그 장입 종료	—	15:40	15:32	16:50	16:27	
송풍 종료	23:31	20:27	21:49	20:30	21:08	
배재구 개방	2019.5.12	2020.10.11	2021.12.12	2022.6.19	2023.7.1	
철재 배출량(kg)	100.4	131.15	69.25	58.65	23.6	잡쇠구멍+골구멍 유출 슬래그
철 생산량(kg)	83.85	72.25	84.25	49.63	155.75	(유출 선철 23.55 +노 내 생성물 132.2)
철 회수율(%)	22.07	23.3	28.08	24.82	62.3%	(유출 선철 9.42%, +노 내 생성물 52.88%)
생산품의 함탄량 (%C)	3.85~4.50 공정선철	3.53~4.18 아공정선철	3.9~4.4 공정선철	4.07~4.4 공정선철	2.9~3.9 아공정선철	

이러한 연구성과를 반영하여 제9차 실험로(가마)의 구조를 설계하였다. 가마는 석축과 가마, 앞창(초롱구멍·잡쇠구멍 포함), 송풍시설, 판장쇠바탕 등으로 구성하였으며, 규모는 울산 대안동 쇠부리터 가마를 1/2로 축소한 것으로 설정하였다. <표 4>에서 보는 바와 같이 대안동 가마는 내면 기준 길이 204cm, 너비 120~168cm, 잔존높이 250cm이지만, 이 크기를 그대로 적용할 경우 실험에 소요되는 비용과 시간, 인원이 과다하기 때문에 현실적으로 불가능하다. 따라서 절반 크기로 줄이는 것으로 결정하였으며, 이 외 구조와 관련된 다양한 부분은 기 발굴된 유적 및 연구성과를 참고하였다.

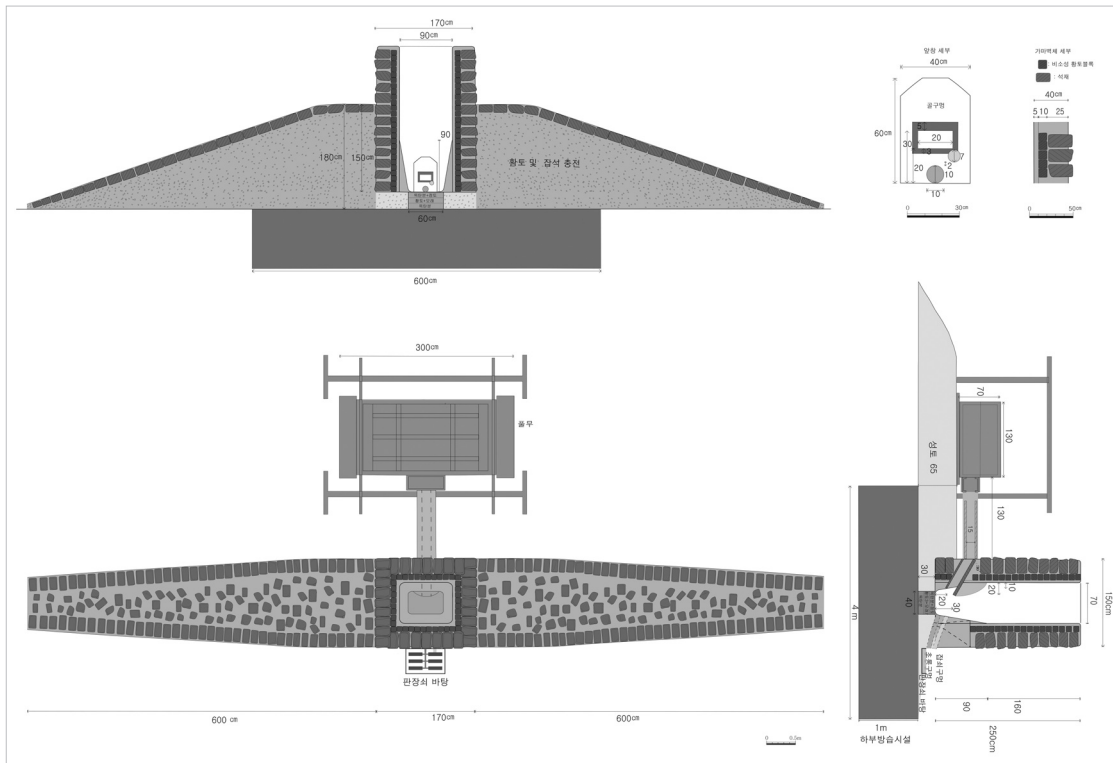
<표 4> 울산 대안동 쇠부리터 가마의 제원

구분	규모(cm)		풀무터 (cm)	배재구 (cm)
	석축	가마		
현황	길이	1,500	204	730
	너비	430	120~168	150~175
	높이(깊이)	160	250	60
	벽체 두께	10	골구멍 20cm	-

석축은 대안동 쇠부리터의 경우 15m에 달하지만 실험장 여건상 규모를 축소하여 가마 좌·우 길이를 각각 565cm로 하였는데, 이는 가마 외경이 170cm이므로 석축 전체 길이는 13m가 되도록 하였다. 대안동 가마 석축의 최대 너비는 중앙부의 430cm인데, 중앙부 앞부분이 함몰된 상황도 있고, 실험장에서는 이를 그대로 구현해 내기 어려워 가마 너비와 동일한 150cm로 하였다. 가장자리를 석재로 쌓고 내부에 잡석과 흙을 채워 넣는 것으로 설정하였으며, 높이는 가마가 있는 중앙부 최대높이가 150cm가 되도록 해 양단으로 갈수록 낮아져 지면과 닿도록 하였다.

가마의 하부구조는 방습시설과 가마 바닥(爐床)으로 구분할 수 있다. 방습시설은 하층-목탄분(10cm), 중층-황토+마사(3:7, 10cm)로 하였고, 바닥에 해당되는 상층(노상)은 고온 목탄분+점토(1:1, 10cm)를 약간의 수분을 섞어 조성하였다. 점토는 청도산으로 하였으며, 골구멍에서 앞창 쪽으로 약간 경사지도록 조성하고 중앙부에 오목한 홈을 설치해 출탕 후 하강한 슬래그층이 잔존할 공간을 마련하였다.

가마는 앞에서 밝힌 바와 같이 울산 대안동 쇠부리가마를 1/2 크기로 축소하는 것으로 설계하였는데, 1/2 크기는 길이와 너비가 각각 105cm, 80cm가 되지만 내벽 점토의 침식 20~30cm 감안해 180×140cm로 상정하고 이를 1/2로 축소해 내벽의 길이 90cm, 너비 70cm로 복원·설계하였다. 좀 더 세부적으로 기술하면, 가마의 평면형태는 장방형이고, 외면은 길이 170cm, 너비 150cm, 내면은 길이 90cm, 너비 70cm로 조성하였다. 다만 노상 90cm 지점에서부터 80° 각도로 내려갈수록 좁아지도록 하여, 노상면은 길이 60cm, 너비 40cm가 되도록 하였다. 가마 벽체의 두께는 하부에서 중부까지는 위로 갈수록 좁아지는데, 하부 50cm, 중부 40cm이고 그 상부는 중부와 동일하다. 이번 실험 가마 구조의 가장 큰 특징은 지난 6~8차 실험의 경우, 상부 90cm 지점에서부터 상단으로 갈수록 내경이 좁아지도록 하였으나 이번 실험에서는 5차와 같이 중부와 상부를 그대로 직립하도록 한 것이다.



〈그림 1〉 가마 설계도

온도센서가 설치될 위치의 벽체는 얇게 조성하는데, 벽체 조성 시 직경 10cm의 나무막대 및 온도센서를 꽂았다가 벽체 조성 후 제거하는 방법으로 하였다. 벽체의 구축은 석축 중앙에 30cm 크기의 석재와 점토를 층층이 쌓아 방(房) 모양 조성하고, 안쪽에 10×10×15cm 크기의 비소성 황토(+내화토) 블록을 쌓고, 내면에 내화점토를 5cm 두께로 미장하기로 하였다.

초롱구멍과 잡쇠구멍은 가마의 앞창에 설치되는데, 앞창은 가마 앞쪽에 높이 60cm, 너비 40cm의 오각형으로 조성하고 좌·우에 소성벽돌을 세운 다음 상면에 이맷돌(불목돌)을 설치하는 것으로 설계하였다. 앞창의 두께는 벽체 상단에서 하단으로 갈수록 얇게 해 초롱구멍 부분은 10cm 이하가 되도록 하였으며, 반건조 점토를 이용해 앞창을 설치하고 초롱구멍(출탕구)과 잡쇠구멍(배재구)을 설치하도록 하였다. 초롱구멍은 노상과 연결해 약 15°로 경사지게 설치하며 직경은 10cm가 되도록 해 관장쇠바탕으로 연결해 쇳물을 출탕할 수 있도록 하였다. 잡쇠구멍은 초롱구멍 2cm 상단 우측에 직경 7cm 크기로 제작하는 것으로 설계하였으며, 노상에서는 15.5cm 위가 된다.

송풍시설은 풀무와 바람골(바람골의 노 벽체 관통부는 골구멍)로 구분되는데, 풀무는 길이 300cm, 너비 130cm, 높이 70cm(내부 용적 278×115×65cm) 크기의 기존 풀무를 그대로 설치하였으나, 앞에서 밝힌 바와 같이 기계송풍기와 병용하였다. 풀무가 원활하지 않다는 문제가 있어 실험 전 풀무 내면의 양단 마찰부를 깎아내고, 들숨·날숨 2개의 숨구멍을 12×12cm에서 12×16cm로 확장하였다. 이에 따라 골구멍의 크기도 새로 설계하였는데, 바람골과 연결부는 15×15cm, 노 내부 관입단부는 15×20cm

판장쇠바탕은 탕도를 기준으로 좌·우 3매씩 6매가 생성되도록 하였고, 2022년도와 달리 탕도 부분에 조성한 1매의 판장쇠를 생략하여 1회 출탕에 모두 6



〈표 5〉 실험로의 제원

2) 판장외 무게 계산식 : 몸체 $3 \times 4 \times 22 = 264 \text{cm}^3$, 위·아래 삼각봉 $1 \times 3 \times 22 \times 1/2 = 33 \times 2 \text{EA} = 66 \text{cm}^3$, 좌우 삼각봉 $1 \times 3 \times 4 \times 1/2 = 6 \times 2 \text{EA} = 12 \text{cm}^3$, 네 귀틀이 사각봉 $1 \times 1 \times 3 \times 1/3 = 1 \times 4 \text{EA} = 4 \text{cm}^3$, 총 $346 \text{cm}^3 \times 7.87 \text{g/cm}^3 = 2723 \text{g}$.

6매로 이루어진 판장쇠바탕 1본에서는 모두 16,338kg【2,723kg×6매】의 선철이 생산될 예정이며, 총 생산 목표는 65,352kg【16,338kg×4본】이다.

판장쇠바탕 2본은 벤토나이트+마사 주물사로, 2본은 자체제작 주물사(대안동 점토+황토+미사 등으로 제작해 소결)로 계획하였으며, 벤토나이트+마사 2본은 이동식으로, 자체제작 주물사 2본은 고정식으로 하였다. 고정식은 이번에 처음 시도하는 것으로, 앞창 초롱구멍과 연결해 10mm 두께의 원목 합판을 사방에 돌려 제작해 위·아래는 개방되는 구조이다. 이동식은 지난 실험에서와 같이 10mm 두께의 원목 합판으로 사방과 바닥을 제작하고, 합판 바닥 및 주물사에 공기구멍을 조성하도록 하였다.

1본에 6매가 조성되는 판장쇠는 중간에 홈을 두어 파쇄가 용이하도록 하였으며, 냉각 후 판장쇠의 용이한 분리를 위해 벤토나이트(점토)+목탄분+신나(4:95:1)를 약간 섞어서 판장쇠바탕의 탕도 및 판장쇠면에 도포하도록 하였다. 이렇게 제작된 판장쇠바탕은 벧짚에 불을 붙여 건조시키고 토치를 이용해 추가로 수분을 제거하도록 하였다.

2. 실험매뉴얼

제3·4차 예비실험에서 선철 생산의 가능성을 확인하였고, 제5차 실험에서는 9차례 선철을 가마 밖으로 출탕시켰다. 제6~8차 실험에서는 안정적으로 선철을 생산하였다. 제9차 실험은 제8차 실험의 연장선상에서 선철 생산실험을 계속 진행하며 그 결과를 바탕으로 울산쇠부리 선철 생산 조업매뉴얼 수립을 목적으로 선철 판장쇠 생산 계획을 수립하였다. 원료는 4mm 이하 크기의 분광을 선별하여 사용한다.

가마는 제6~8차 실험에서 사용된 가마를 재사용하되 하부 150cm까지는 실험 중 고열에 의해 용융된 내벽과 비소성 점토블록을 제거한 후 보수하여 재사용한다. 가마 상부는 기존 내경하던 것을 직립하는 것으로 변경하여 상부 100cm는 재 축조한다.

송풍시설은 발포무와 기계송풍을 병행하되 주로 기계송풍을 하며 필요 시 발포무를 사용한다. 골구멍은 선철 출탕 시 선철이 냉각되는 것을 방지하기 위해 송풍방향은 가마 바닥과 초롱구멍을 향하도록 한다.

앞창 중앙부 바닥에는 초롱구멍을 지름 10cm의 원형으로 뚫고, 잡쇠구멍은 이보다 10.5cm 정도 높은 우측에 설치³⁾하며, 잡쇠구멍을 통해 철재 및 선철의 형성이 확인되면 초롱구멍을 통해 출선하는 것으로 한다. 가마 바닥에 용융선철이 형성되면 비중이 낮은 철재는 그 위에 부유하게 되는데, 선철이 10cm 정도 형성되었을 시 골구멍으로 슬래그가 역류할 우려가 있기 때문에 이 때를 선철의 유출 시점으로 한다. 선철은 초롱구멍 앞에 만들어진 판장쇠바탕에 모아 굳힌 다음 수습하기로 한다. 판장쇠 1본의 크기는 16,338kg⁴⁾으로 4회 출탕하는 것으로 한다.

실험은 아래 <표 6>과 같이 실험매뉴얼을 작성해 이에 따라 진행한다.

실험 전날 5월 12일 15:00 고유제를 지내고, 15:30에 점화를 해 실험 당일까지 예열하기로 한다. 13일 7:30 대탄 장입을 시작하고, 만장입 후 송풍을 시작으로 본격적인 실험을 시작한다. 온도는 목탄을 만장입한 상태로 평균온도 1,200℃ 이상을 1시간 이상 유지하여야 하며, 가마 내의 평균온도가 1,250℃ 이상 상승 또는 하부온도가 1,300℃ 이상 상승되면 첨가제 1kg씩 15분 간격으로 25회 장입하고, 첨가제 장입 2분 후 분광을 장입한다. 분광은 매 10kg씩 15분 간격으로 25회 장입한다.

목탄은 장입구에서 20cm 깊이를 유지하면서 대탄을 사용하여 가마 내부를 예열하며 첨가제와 분광 장입 전 소탄 40kg을 장입하여 목탄 사이의 공극을 줄여준다. 첨가제와 분광이 장입된 이후에는 대탄 20kg-중탄 20kg을 번갈아 각 14회·11회 장입하는 것을 원칙으로 한다. 다만 가마 내부의 분위기 등 실험환경에 따라 목탄의 크기를 조절할 수 있다. 분광과 첨가제의 장입을 종료한 2시간⁵⁾ 후까지 연료(목탄) 100kg을 5회 분할하여 장입하면서 송풍을 더하여 가마 내부의 원료를 완전히 환원시키고, 가마 하부에 잔류하는 선철과 슬래그를 제거하는 것으로 실험을 마무리한다.

3) 초롱구멍의 중심부를 기준으로 잡쇠구멍의 중심까지를 측정하였다.

4) 판장쇠 무게 계산식 : 몸체 $3 \times 4 \times 22 = 264\text{cm}^3$, 위·아래 삼각봉 $1 \times 3 \times 22 \times 1/2 = 33 \times 2EA = 66\text{cm}^3$, 좌우 삼각봉 $1 \times 3 \times 4 \times 1/2 = 6 \times 2EA = 12\text{cm}^3$, 네 귀퉁이 사각뿔 $1 \times 1 \times 3 \times 1/3 = 1 \times 4EA = 4\text{cm}^3$, 총 $346\text{cm}^3 \times 7.87\text{g/cm}^3 = 2,723\text{g}$.

5) 제6~8차 실험 결과, 가마 내부의 선철을 출탕한 후 2시간이 경과한 시점에 다음의 선철의 출탕을 진행하는 것이 효과적이었다.

첨가제는 제6차 실험에서 배출된 유출재⁶⁾를 1cm 정도 크기로 파쇄하여 1kg씩 소분하여 사용하였다. 11시간 44분 동안 원료(분광) 250kg, 연료(목탄) 1,240kg(만장입 640·분광 장입동안 500·분광 장입 후 100kg), 첨가제(유출재) 25kg을 장입하며, 분광이 장입되는 동안 원료:연료:첨가제의 비율은 1.0:2.0:0.1로 한다. 실험 중 매뉴얼 변경이 불가피한 경우 연구원의 요청 및 책임연구원(이남규)의 승인에 의해 변경할 수 있도록 한다.

실험기록은 원료·연료·첨가제·온도 기록 담당자가 미리 표를 작성하여 실험현장에서 기재하며 실험 후 정리해 제출한다. 온도계는 제6~8차 실험과 동일한 위치에 설치한다. 가마 앞면(앞창쪽) 하부에 2개, 뒷면(골구멍쪽) 중간부 2개, 앞면과 뒷면 상부에 각 1개씩 총 6개를 설치한다. 그리고 실험기록의 정확성을 기하기 위해 기록자들이 공동으로 볼 수 있는 시계를 준비한다.

〈표 6〉 2023년 울산쇠부리복원실험(제9차) 실험매뉴얼

날짜	시간	조업 내용	비고
2023년 5월 12일 (금)	09:00~18:00	• 실험 준비	• 준비사항 체크
	13:00~15:00	• 판장쇠 정리, 전시방안 검토	
	15:00~15:30	• 고유제	• 박원희 원장 주관
	15:30~	• 점화, 가마 예열	
	16:00~17:00	• 실험 최종 점검회의	• 이남규 단장 주관
2023년 5월 13일 (토)	07:30~08:00	• 조업 준비사항 점검 및 목탄 만장입 • 송풍 개시	
	11:00~19:14	- 원료 장입(분광 총 250kg) - 분광 총 250kg, 가마 내 평균온도 1,250℃ 이상, 하부 온도 1,300℃ 이상 상승 시, 11:32 최초 10kg 장입(잔량 240kg), 이후 평균 15분 간격으로 매 10kg씩 24회에 걸쳐 17:32까지 240kg 장입, 6시간 동안 장입 예상. 원료는 나무삽으로 투입 - 목탄 장입(1,240kg—만장 640kg, 광석 개시 후 600kg) - 분광 장입 전 상단까지 대탄 장입, 분광 장입 직전 소탄 장입, 약 640kg 만장(잔량 600kg), 분광 장입 후 11:34부터 평균 15분 간격으로 대탄 20kg—중탄 20kg씩 번갈아 각각 14회, 11회에 걸쳐 17:34까지 500kg 장입, 6시간 동안 장입 예상. 이후 약 1시간 40분 동안 100kg 장입(20분 간격 대탄 5회 장입) - 첨가제 장입(슬래그 25kg) - 분광 장입 전 11:30부터 평균 15분 간격으로 매 1kg씩 25회 장입, 17:30까지, 6시간 동안 장입 예상 - 분광 장입 개시 후 6시간 2분 경과 후 원료·첨가제 장입 종료, 1시간 40분 동안 목탄 장입과 송풍 지속	- 평균 1,250~1,300℃ 책임연구원 판단 하에 분광 장입 개시. - 분광 장입 개시 후 분광/목탄/첨가제 비율을 1.0/2.0/0.1 유지. - 가마 상단에서 20cm 이하를 유지하면서 장입, 장입 간격무게 등은 변동되겠지만 비율은 그대로 유지.
2023년 5월 14일 (일)	09:00~12:00	- 실험 결과물 확인 및 평가회의 - 결과물 확인 및 정리 - 사진촬영, 노트, 기록 정리 - 실험장 전시 및 관람 해설 - 분석시료 선정, 파생품 및 생산품 일부 - 앞창 개방 - 가마 내 변화 관찰 위해 앞창 일부 개방	6월 10일(토)~11일(일) - 생성물 수습 및 정리
	13:00~17:00	• 실험장 정리 및 해산(13:00~17:00)	

6) 유출재는 2020년도 제6차 복원 실험의 유출재를 1cm 크기로 파쇄하여 사용하였다. 제6차 실험에서는 첨가제로 폐각과 제5차 실험 유출재가 사용되었다

3. 실험 준비과정

1) 원료, 첨가제, 연료 준비

(1) 원료

원료인 철광석은 2022년 제8차 복원실험 후 보관해둔 양양산 철광석 분광 250kg을 사용하기로 결정하였다. 그리고 예비용으로 2017~2020년까지 사용 후 보관해둔 정선산 255kg을 세척→풍력 선광→자력 선광→방습 포장하였다.

4월 9일(일요일) 오전 달천철장 실험장 동편에서 정선산 철광석을 세척 선광하였다. 철광석에 포함된 불순물을 제거해 주는 1차 작업이다. 선광시설은 길이 300cm, 너비 45cm, 높이 30cm의 부력선광기를 이용하였다. 15kg씩 포장된 철광석을 부력선광기⁷⁾에 올린 후 물을 강하게 분사하면서 삼과 쇠갈퀴 등으로 골고루 세척하였다. 세척한 철광석은 수습 후 햇볕에 바로 건조하였다.

4월 10일(월요일) 세척 선광한 철광석 건조와 더불어 풍구를 이용하여 2차 선광 작업을 실시하였다. 풍구 선광은 바람을 이용하여 철 함량이 낮고 미세한 입자를 분리하였다.



〈그림 3〉 철광석 세척 작업



〈그림 4〉 철광석 건조 작업

7) 1차(2016년도) 실험 준비과정에서 철광석 세척을 위해 부력선광기를 제작하였고, 이후 현재까지 실험에 계속 사용하고 있다.

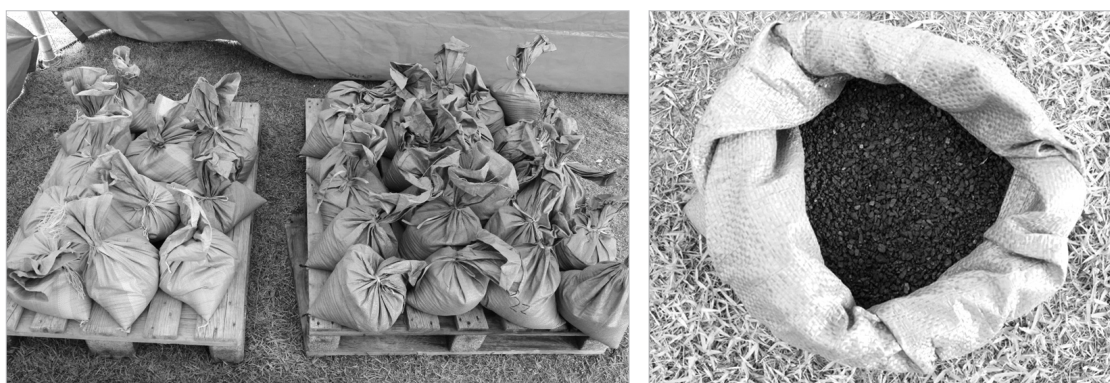
풍구 선풍을 마친 철광석은 3차 자력선풍을 실시하였다. 자력선풍을 거친 분광은 모래주머니에 10kg 단위로 포장하여 보관하였다. 실험장에는 분광 총 350kg(양양산 250kg, 정선산 100kg)을 준비해 두었다.

〈표 7〉 울산 쇠부리 복원실험 제4~9차 제련 복원실험 철광석

구분	제4차(2018. 05.11~13)	제5차(2019. 05.10~12)	제6차(2020. 10.09~11)	제7차(2021. 10.22~24)	제8차(2022. 05.13~15)	제9차(2023. 05.12~14)
준비량(kg)	400	382	470	430	300	350 (250/100)
장입량(kg)	300	380	310	300	200	250
광석 산지	정선 신예미광산	정선 신예미광산	정선 신예미광산	양양산	양양산	양양산/ 정선 신예미광산
크기	4mm 이하 분광	4mm 이하 분광	4mm 이하 분광	4mm 이하 분광	4mm 이하 분광	4mm 이하 분광
배소 여부	×	×	○	○	×	×

(2) 첨가제

첨가제는 2022년 제8차 실험 후 보관해둔 슬래그를 사용하기로 하였다. 2020년 제6차 실험에서 출탕된 슬래그를 1~2cm 크기로 파쇄하여 1kg 단위로 모래주머니 25개(25kg)에 담아 준비해 놓았다.



〈그림 5〉 정입물 준비

(3) 연료

연료인 목탄은 강원도 원주 고려참숯에서 참나무 백탄을 구입하였다. 목탄 크기는 15cm 길이의 대탄, 10cm 길이의 중탄, 5cm 길이의 소탄으로 주문하였다.

5월 2일(화요일) 주문한 목탄 대탄 1,300kg, 중탄 400kg, 소탄 300kg이 도착하였다. 10kg 단위로 포장되어 있어서 크기별로 구분해 두었다. 복원실험 진행 시에는 목탄 크기별로 중량에 맞추어 대바구니에 담아 장입하였다.



〈그림 6〉 목탄 분류 작업

2) 가마 보수

제6~8차 실험에 사용하였던 가마의 내벽과 비소성 점토블록을 제거하여 다시 축조하기로 하였고, 기존 내경하던 가마 상부는 직립하는 것으로 결정하였기 때문에 상부 100cm는 재 축조하기로 하였다. 가마의 보수는 시간 순으로 정리하였다.

(1) 비소성 점토블록 제작

3월 4~10일 가마 축조용 비소성 점토블록 621개를 제작하였다. 황토:마사토:모래를 1:1:0.2의 비율로 배합 반죽하여 비닐 등으로 덮어 1주일 숙성 시킨 후 제작하였다. 블록의 크기는 15×10×10cm이다.



〈그림 7〉 황토블록 제작

제6차 실험 점토블록 제작 시 사용한 사각형 나무틀에 점토를 꼼꼼히 채운 후 찍어내는 방식으로 제작하여 그늘에서 말렸다.

(2) 석재 채취

석재는 재축조하는 가마 상부의 100cm와 하부 90cm의 좁아지는 부분에 30cm 정도 크기의 비교적 큰 석재를 사용하며, 점토블록 사이에는 10cm 이하의 작은 석재를 사용할 계획이다.



〈그림 8〉 채취된 석재

1톤 트럭의 약 1/3 정도 분량으로 석재를 채취하여 실험장의 한쪽 구석에 쌓아두었다.

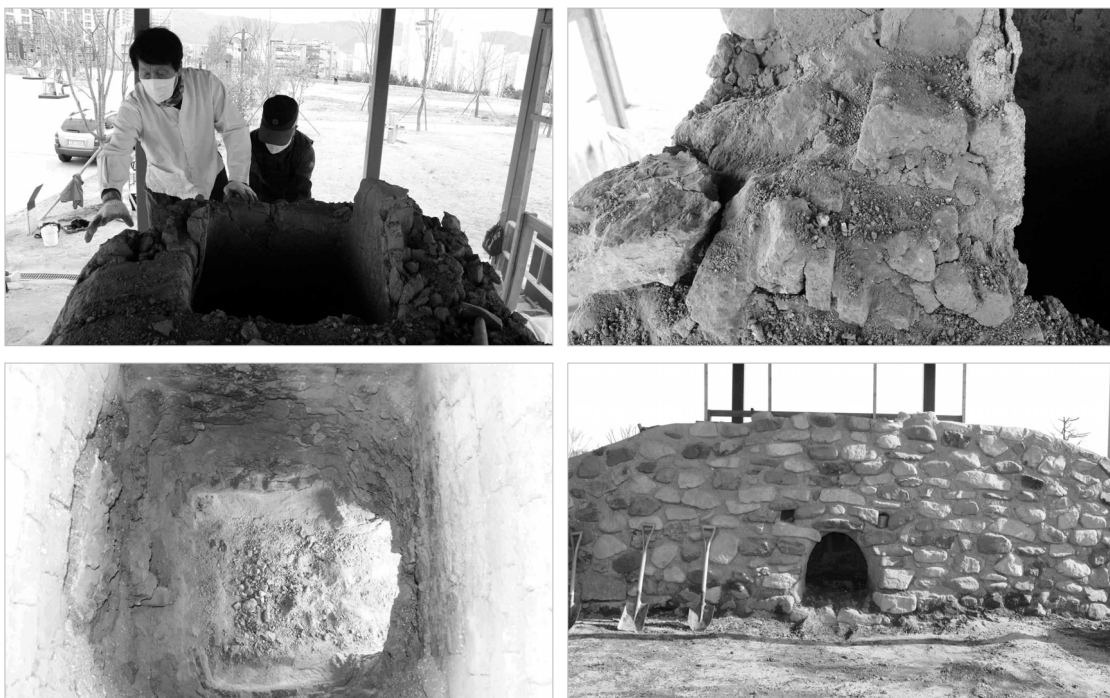
(3) 가마 보수 및 축조

3월 18일부터 본격적인 가마 보수가 진행되었다. 우선 석축 상부로 돌출된 120cm⁸⁾는 상부에서 하부로 수평 제거를 진행하였다. 이 때 벽체의 횡단면을 살펴보면, 외벽에서부터 할석-점토블록-미장된 내벽의 경계가 뚜렷한 것을 확인하였다.

하부 150cm는 할석을 돌려 만든 방모양은 그대로 활용하고 그 내부의 비소성 점토블록과 점토 미장벽을 제거하기로 하였다. 우선 미장된 내벽을 껍질 벗기듯이 벗겨낸 후 점토블록을 들어냈다. 상부는 그 경계가 명확하였고 잘 분리되었다. 바닥에서 90~100cm 정도 높이의 내벽은 점토미장이 용융되면서 단단하게 유리질화되었고 잘 분리되지 않아 전기 드릴로 여러 번 깎 후 분리하였다. 드러난 점토블록의 일부는 흑색 또는 흑갈색으로 경화된 것을 확인 할 수 있었다. 점토블록이 제거된 가마 내벽의 할석은 마치 석곽을 쌓은 듯했고 석재 사이에 보강되었던 점토로 인해 서로 접착력이 좋은 상태로 남아 있었다.

가마 내벽과 점토블록을 모두 제거한 후 가마 하부에서부터 보수를 시작하였다. 가마 바닥에서 90cm 높이까지는 10°각도로 넓어진다. 바닥 중심부를 고정하고 바닥과 벽의 경사각을 고려한 고정틀을 만들어 하부를 축조하고자 하였다. 목재를 이용하여 길이 60cm, 너비 40cm, 높이 50cm의 모형을 제작하였다. 모형을 가마 바닥 중심부에 놓고 그 바깥에 점토블록을 쌓아 형태를 만들었으며 점토블록과 외벽 석재 사이에는 큰 할석, 작은 할석과 점토를 채워넣었다. 이렇게 쌓아올린 하부 90cm는 내면이 계단상으로 넓어지는 형태를 띤다. 바닥에서 90~150cm는 직선으로 쌓아올렸으며, 내부는 점토 미장을 위해 5cm의 여유를 두었다.

8) 제8차 실험의 가마 높이는 270cm 였기 때문에 석축 상부로 120cm가 돌출되어 있었다.



〈그림 9〉 가마 상부 및 내벽 제거 과정(좌상: 상부 제거 광경, 우상: 가마벽 단면, 좌하: 용융내벽, 우하: 상부 제거 후 전경)

점토는 점토블록과 동일한 황토:마사:모래를 1:1:0.2의 비율로 배합해 물을 넣어 섞었다. 이후 성인 남성 3~4명이 발로 밟고, 손으로 두드리거나 바닥에 내려치는 방식으로 점성을 높였으며, 점토 사이의 공기를 제거해 주었다. 점토블록 또는 석재를 쌓을 때 사용하기에 적당한 크기로 뭉쳐 놓았다.



〈그림 10〉 점토 만드는 과정(모래:마사:황토 혼합→손으로 두드리려 공기층 제거→적당한 크기 만들기)

점토블록의 쌓기는 바닥에 점토덩어리를 깔고 황토물칠을 한 점토블록을 그 위에 올려놓았으며, 블록과 블록 사이, 블록의 상·하면에 점토를 채웠고 손 또는 목재 망치로 두드리려 점토 사이의 공기층을 제거함과 동시에 접착력을 높여 주었다.



〈그림 11〉 하부 내벽 보수(1:가마 모형틀, 2:블록 황토물칠, 3:바닥에 블록깔기, 4:모형을 놓고 블록 쌓기, 5:계단식 블록 쌓기, 6:하부미장)

상부 100cm는 직립하는 것으로 설계하였기 때문에 기존 상부가 안으로 좁아지는 벽체를 완전히 제거한 후 다시 축조하였다. 상부는 내벽에 점토블록을 쌓아 모양을 만든 후 외부에 석재를 붙이는 방식으로 축조를 진행했다. 그런데, 30cm 정도 높이까지 쌓았을 때 건조되지 않은 가마 벽은 석재의 무게를 이기지 못하고 벽체가 밖으로 밀려나는 현상이 발생했다. 더 높이 벽체를 축조할 수 없었고 자연 건조를 진행하였다. 이렇게 일정 높이까지 축조해 건조하는 방식으로 상부 벽체 축조를 완료하였다.

내벽 미장은 총 3차 실시하기로 하였다. 1차는 두께 3cm, 나머지 2회는 각 1cm 두께로 미장한 후 건조목을 이용하여 가마 벽을 건조시키기로 하였다. 미장점토는 내화성을 높이기 위해 내화점토인 벤토나이트를 구입하였고, 마사는 가는 체로 쳐 준비하였다. 1차 미장토는 마사:벤토나이트를 6:1의 비율로 배합하여 진행하였으나 자연 건조한 결과, 모래성분이 부족하다는 의견이 제시되었다. 이후 마사:모래:벤토나이트를 5:1:1→8:2:1→4:1:0.5→6:1:1의 비율로 가마 내부의 위치 및 건조 상태 등을 고려해 사용하였다.

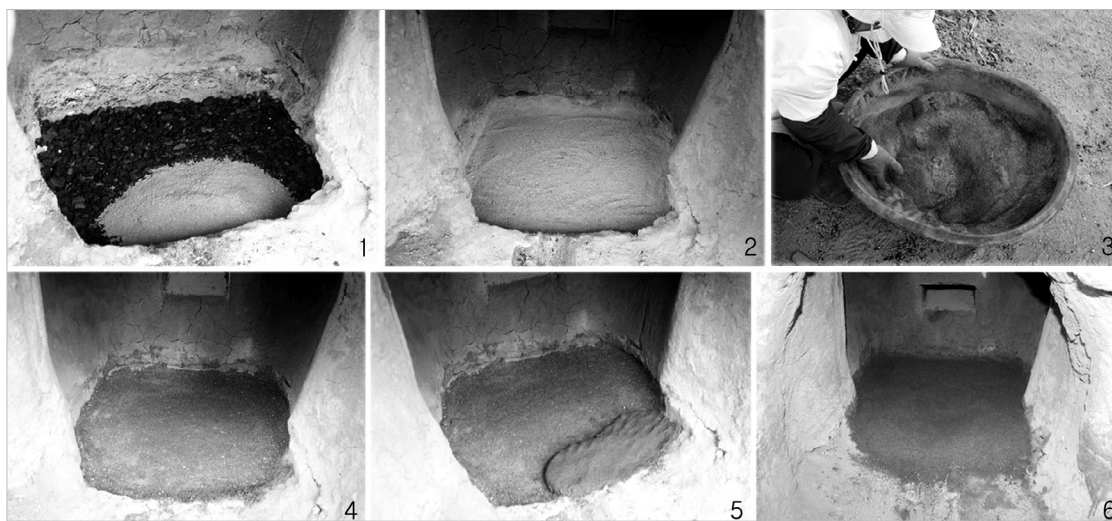
2차 미장 후 자연건조를 실시하였는데 가마 벽의 갈라짐이 심했으며 일부는 가벼운 망치질로 미장부가 벗겨졌다. 벗겨지는 가마 벽은 제거하였고 마사:가는 모래:벤토나이트를 6:1:1의 비율로 반죽하여 다시 미장하였다. 3차는 황토:청도 점토:굵은 모래를 1.5:1.5:2의 비율로 배합하여 미장토를 만들었고, 미장토와 점토블록의 접착력을 높이기 위해 손을 두드리거나 나무 목봉을 이용하여 두드려 주었다.



〈그림 12〉 상부 축조과정(1:황토몰칠과 점토 놓기, 2:점토 위에 석재놓기, 3:점토블록 올리기, 4:점토블록 쌓기, 5:점토블록+석재 쌓기, 6:축조 후 전경)

3차 미장 후 가마 벽을 관찰한 결과, 점토블록과 미장벽이 분리되는 부분이 확인되었다. 분리된 부분을 제거한 후 물을 좀 더 섞어 점성이 강한 점토를 만들어 다시 미장을 실시하였고, 실험 당일까지 갈라지거나 박리된 가마 벽은 지속적으로 보수하였다.

방습시설은 3차 가마 내벽의 미장을 완료한 후 하부에서부터 목탄분 10cm-황토:모래 3:7의 비율로 10cm를 깔았으며, 최상단은 목탄분:점토를 1:1 비율로 배합 반죽해서 가마 바닥을 설치하였다.



〈그림 13〉 방습시설 설치(1:목탄분, 2:모래+황토, 3:목탄분+점토 섞기, 4~6: 최상단 및 가마 바닥 설치(목탄분:점토 1:1 비율))

(4) 송풍시설

송풍은 기계송풍과 발풍무를 병행하기로 하였다. 기계 송풍기는 제7·8차 실험과 동일한 기계를 사용하였고, 풀무는 다시 점검하고 보수하였다.

① 풀무 점검

풀무의 상판을 들어내고 내부를 관찰하여 몇 가지 보수 및 개선을 진행하였다.

첫째, 입풍구와 출풍구가 좁아 풀무를 밟아도 풀무에서 빠져나가는 바람의 양이 적은 것으로 판단되었다. 따라서 입풍구 및 출풍구의 크기를 현재 12.5cm의 방형에서 길이 16cm, 너비 12.5cm의 장방형으로 조정하였다.



〈그림 14〉 풀무 점검과정(1:상판 들어내기, 2~4:풀무통 양단 갈아내기, 5:중앙 고정목 천 제거, 7~9:송풍구 보수)

둘째, 풀무통의 중앙부에는 가로목이 고정되어 있고 그 위에 천을 올려놓았다. 상판과 부딪혀 손상되는 것을 방지하는 목적으로 추정되나 천의 마찰력 때문에 풀무 밟기가 힘들었다. 때문에 천을 제거하고 고정목 상부에 얇은 철판을 씌워 사용하였다. 셋째, 풀무를 밟을 때 상판이 내려오는 과정에서 풀무통의 양단벽을 긁거나 부딪치는 것이 감지되었다. 그로인해 밟는 속도가 느려지고 힘든 것으로 판단되었다. 풀무통의 양쪽 단벽 내면의 목재를 글라이드로 조금 갈아내고 마연하였고, 상판의 모서리부분도 조금 갈아냈다. 점검 및 보수 후 풀무 밟기는 훨씬 수월했다.

기계 송풍기는 풀무의 송풍구 측면과 연결하였고, 송풍구와 골구멍은 목재로 제작된 방형의 바람구멍과 가죽으로 연결하였다. 목재 바람구멍은 골구멍을 통해 가마 내부의 상황을 관찰하기 위해 여닫이가 가능한 관찰구를 뚫어 가마 내부의 송풍이 원활하지 않을 때마다 열고 관찰하였다.

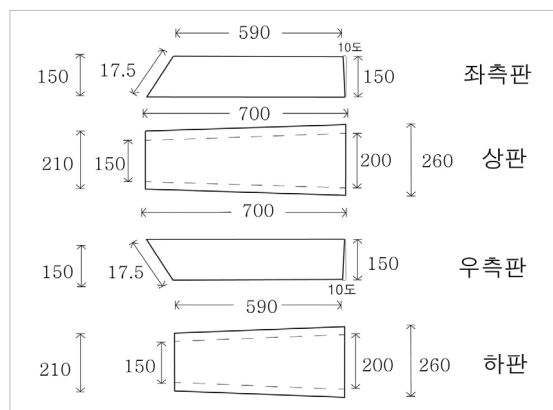


〈그림 15〉 풀무와 가마 연결(좌:풀무 송풍구, 중:바람구멍 연결, 우:기계 송풍기 연결)

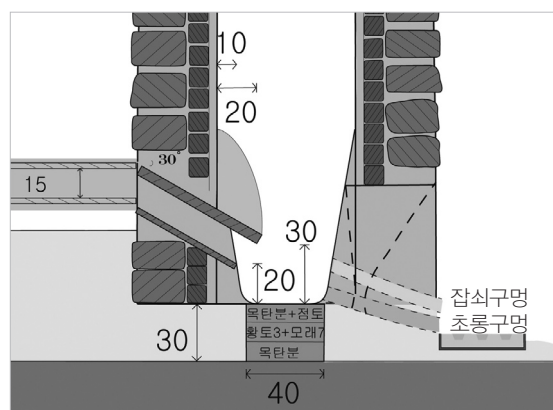
② 골구멍 축조

골구멍은 30°각도로 벽체에 삽입되며, 상판은 20cm, 하판은 10cm 가마 내부로 돌출되는 형태이다. 골구멍을 통해 유입된 바람이 위로 상승해 가마 벽을 용융시키는 것을 방지하고 가마 바닥으로 송풍될 수 있도록 상판을 더 돌출시켰다. 또한 바람구멍과 연결되는 부분은 한 변 15cm의 방형이며, 가마 벽체를 통과하는 부분은 사다리모양으로 내부로 갈수록 넓어지고 가마 내부에서는 너비 20cm, 높이 15cm의 장방형을 이룬다. 이는 취입된 바람이 가마 내부에 넓게 퍼질 수 있도록하기 위함이며 제5~8차 실험보다 5cm 넓어졌다.

골구멍 축조 석재는 구들장을 사용하기로 하였으나 가로와 세로의 크기가 불규칙하며, 상·하면은 울퉁불퉁하여 설계된 방향으로 송풍이 어려운 것으로 판단하였다. 따라서 화강암을 〈그림 16〉의 설계대로 석물공장에서 재단하였다. 바람구멍에서 가마 내부까지 길이는 70cm이며, 석재는 ‘표’자형으로 겹쳐지는 부분을 감안하여 상하판은 5cm 더 넓게 재단하였다.

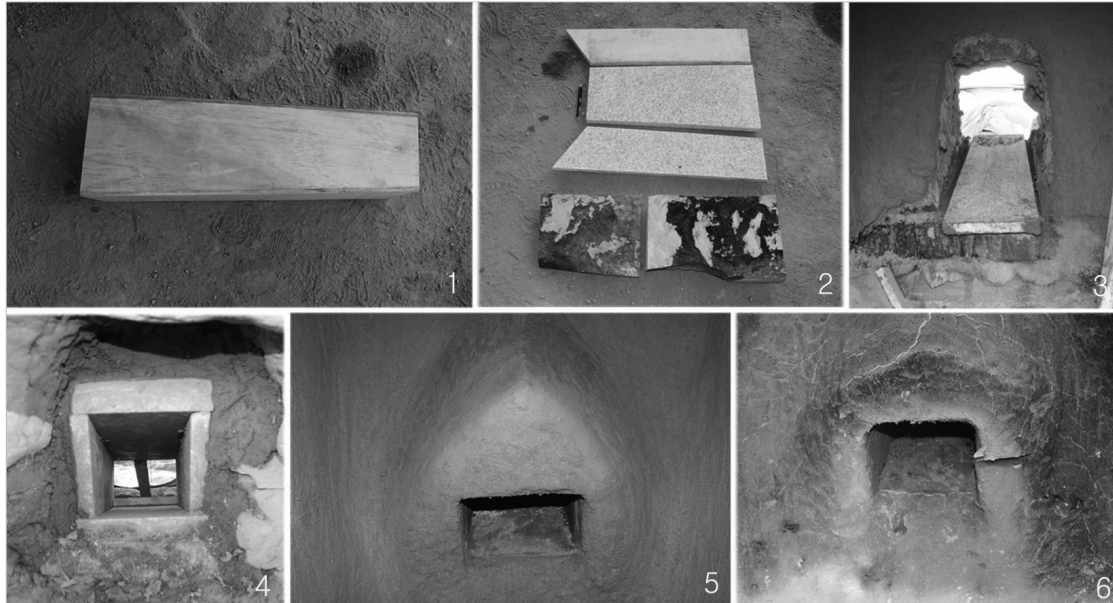


〈그림 16〉 골구멍 석재 재단 설계도



〈그림 17〉 골구멍 설계도

골구멍의 각도를 30°로 측정한 후 먼저 하부 석재를 놓았다. 골구멍 목형틀을 그 위에 고정하였고 목형틀 좌우측과 상부에 석재를 고정하였다. 이후 목형틀은 제거하였다. 내벽으로 돌출된 석재는 점토로 보강하였다.



〈그림 18〉 골구멍 축조 과정(1:목형틀, 2:화강암 판석, 3:하판 설치, 4:가마 외부에서 본 모습, 5:가마 내부에서 본 모습, 6:건조 후 가마 내부에서 본 모습)

(5) 앞창

앞창의 잔존상태는 양호한 편이다. 제6차 실험에 축조한 앞창을 보수하였다. 앞창은 양측면에 석재를 쌓아올리고 상단에는 불목돌을 올려 견고하였다. 내부에 잔존하는 생성물을 끄집어내는 과정에서 하부 및 양측면의 점토 일부가 박리되었다. 앞창의 설치는 가마 내벽 보수와 골구멍 축조 및 가마 하부의 방습시설을 마무리한 후 가장 나중에 진행하였다. 크기는 높이 60cm, 너비 40cm이며, 형태는 아치형이다. 우선 양측면은 점토로 미장하였으며 최하단은 비소성 점토블록을 쌓았고 앞창 전면에는 점토반죽과 비소성 점토블록을 혼용하여 막음하였다.

앞창의 두께는 상부가 40cm이며, 하부로 내려오면서 차츰 좁아지고 초롱구멍에서 가장 얇은 5cm로 설계하였으나 앞창의 높이가 낮아 두께를 측정하면서 축조를 할 수 없었다. 전체 20cm 정도 두께로 축조하였고, 초롱구멍에는 5cm 정도로 얇게 축조하였다.



〈그림 19〉 앞창 축조과정

앞창의 하부 중앙, 즉 가마 바닥과 같은 높이에는 지름 10cm의 원형 초롱구멍을 뚫었고, 그 우측 10.5cm, 위쪽 10.5cm 지점에 지름 7cm의 잡쇠구멍을 뚫었다. 잡쇠구멍과 초롱구멍 사이에는 출탕구로 잡쇠가 넘치지 않도록 점토를 이용한 턱을 조성하였으며, 잡쇠구멍 앞에는 잡쇠가 빠져나가는 별도의 구(溝)를 조성하였다. 초롱구멍과 판장쇠바탕 사이에는 15° 경사지게 출탕구를 연결하였다.

실험 중 초롱구멍과 잡쇠구멍은 토제 봉을 이용하여 막았다가 출탕 또는 출재 시 제거하는 것으로 하였다.

(6) 판장쇠바탕

본 실험에서는 가마 내부의 선철이 잔존하지 않고 완전히 출탕하는 것으로 계획하였다. 원료 장입이 완료된 후 2시간 이상 목탄 장입과 송풍만 한 채로 가마 내부의 원료를 완전히 환원시키기로 하였다. 환원된 원료를 출탕한 후 실험을 종료하기로 하여 정해진 원료의 양만 장입하는 것으로 결정하였다. 선철 출탕은 4회 진행하는 것으로 결정하였다.

판장쇠바탕은 제8차 실험에서 판장쇠 6매를 좌우 대칭되게 배치하고 탕도에 1매를 설계하여 모두 7매의 판장쇠가 생산되는 것으로 설계를 했지만 본 실험에서는 좌우 대칭으로 배치한 판장쇠 6매를 생산하는 것으로 변경하였다. 1본의 무게는 16.338kg으로, 2.723kg⁹⁾짜리 판장쇠 6매이다. 판장쇠 1개의 크기는 윗면-길이 24cm, 너비 6cm, 아랫면-길이 22cm, 너비 4cm, 높이 3cm이며, 바탕에서 분리가 쉽게 되도록 하부로 갈수록 좁아지게 약간의 경사를 주었다. 또한 각 판장쇠의 중간부위, 즉 12cm 간격의 아랫면에 ‘凹’면을 주는 방식으로 <그림 2>와 같이 판장쇠바탕 설계도면을 작성하였다.

주물사는 2가지를 사용하여 각 2본을 제작하는 것으로 하였다. 2본은 벤토나이트:가는 모래를 3:7의 비율로 섞어 제작하였다. 대안동에서 채취한 점토를 등글게 뭉쳐 약간 소성하여 수분을 제거하였고, 이것을 다시 부서 황토와 4:1 비율로 섞어 사용한 것 2본을 제작하였다.

판장쇠바탕의 제작은 5mm 정도 두께의 목판으로 바닥과 사방을 제작하였다. 바닥은 일정한 간격으로 구멍을 뚫어 가스가 빠져나갈 수 있도록 하였다.

도형제는 목탄가루에 벤토나이트 5%를 섞은 후 신나 등에 휘발성 물질에 반죽하여 사용하기로 하였으나 제작 상태가 양호하여 도형제는 따로 사용하지 않았다.

판장쇠바탕의 제작은 다음과 같다.

- 가. 판장쇠 바탕틀에 주물사 채우기
- 나. 주물사 사이의 기공이 없도록 고르기
- 다. 판장쇠틀 놓기
- 라. 주물사에 판장쇠틀이 고정될 수 있도록 나무망치나 납작한 철제 망치로 쳐 고정시키기
- 마. 판장쇠틀 주변에 빈 공간이 생기지 않게 주물사를 채운 후 납작한 도구로 다지기
- 바. 판장쇠틀에 손잡이용 못 박기
- 사. 가루와 물을 뿌려 판장쇠틀 주변의 주물사를 단단하게 하기
- 아. 판장쇠틀을 좌우로 조금씩 움직여 위로 뺄 수 있는 공간 만들기
- 자. 나무못을 잡고 판장쇠틀 제거하기
- 차. 판장쇠틀 제거과정에서 틀어진 부분 보수하기

9) 판장쇠 무게 계산식 : 몸체 $3 \times 4 \times 22 = 264 \text{cm}^3$, 위·아래 삼각봉 $1 \times 3 \times 22 \times 1/2 = 33 \times 2EA = 66 \text{cm}^3$, 좌우 삼각봉 $1 \times 3 \times 4 \times 1/2 = 6 \times 2EA = 12 \text{cm}^3$, 네 귀퉁이 사각뿔 $1 \times 1 \times 3 \times 1/3 = 1 \times 4EA = 4 \text{cm}^3$, 총 $346 \text{cm}^3 \times 7.87 \text{g/cm}^3 = 2,723 \text{g}$.



〈그림 20〉 판장쇠바탕 제작 과정(1:판장쇠바탕틀, 2:주물사, 3~8:판장쇠바탕 제작과정)

판장쇠바탕은 선철 출탕 전 출탕구 앞으로 이동시켜 출탕구와 높이를 맞춰 위치시켰고, 판장쇠바탕과 출탕구 사이의 공간은 점토반죽을 메워 빈 공간이 없도록 고정시켰다.



〈그림 21〉 판장쇠바탕 설치

IV

실험내용

1. 실험 과정
2. 실험 결과

IV. 실험 내용

1. 실험 과정

1) 준비 점검

5월 12일 담당업무 분장에 따라 업무를 나누어 맡았으며, 원활한 실험 진행을 위해 준비상황들을 점검하였다. 실험 진행에 필요한 물품은 실험장 배치도에 맞게 재료들을 위치시켰다. 가마의 앞창을 기준으로 우측에는 원료와 첨가제, 좌측에는 연료를 준비해 놓았다. 우측 앞쪽에는 조업기록과 온도 측정을 위한 기록대를 배치하였고, 실험장 좌측에는 별도의 전시 공간을 마련하였다. 원료는 4mm 크기 분광 350kg을 10kg 단위로 준비하였고, 첨가제는 제6차 실험에서 유출된 슬래그 25kg을 1kg씩 자루에 담아 준비하였다. 목탄은 대탄 1,300kg, 중탄 400kg, 소탄 300kg을 10kg의 박스로 나누어 준비하였다. 송풍기와 바람구멍, 바람구멍과 골구멍을 연결하여 송풍상황을 점검하였고, 온도계를 설치하였다. 안정적인 실험의 진행 및 무사기원을 바라며 고유제를 올렸고, 이후 점화하여 가마의 예열을 시작하였다.



〈그림 22〉 고유제 및 점화

2) 연료, 원료, 첨가제 장입

5월 13일 08:08~08:25까지 17분 동안 320kg의 대탄을 장입하였다. 목탄 만장입 후 8:30부터 기계 송풍¹⁰⁾을 시작하였다. 09:13부터 가마 내부의 온도가 1,200℃까지 상승되는 시점까지 대탄을 계속 장입하고, 송풍을 지속하였다. 10:52까지 대탄 20kg씩 8회 추가 장입하였다. 앞창으로 열이 방출되는 것을 방지하기 위해 앞쪽에 목탄을 예열해 놓았다. 송풍 시작 50분 후 평균온도 1,000℃이상 빠르게 상승하였다. 송풍시작 2시간 20분이 지난 10:50경 하부는 1,300℃, 중부는 1,200℃까지 상승하였다.

원료는 가마 내부의 온도가 1,000℃이상 1시간 이상 유지하여야 하며, 평균온도 1,200℃이상, 하부의 평균온도 1,300℃이상, 중부의 평균온도 1,250℃이상 상승 시 장입하기로 계획하였다.



〈그림 23〉 송풍(좌-풀무땀기, 우-송풍기 여닫이 사용)

11:30 가마 내부의 평균온도가 1,170℃이고, 하부의 평균온도 1,237℃, 앞(1~3번) 1,213℃, 뒤(4~6번) 1,127℃에 이르러 11:32에 분광 10kg을 첫 장입하였다. 이후 전체 평균 17분 간격으로 매 10kg씩 장입하였다. 12:57 온도가 30℃ 정도 떨어져 이때 장입간격이 25분 정도 소요되었다. 이후부터는 평균 14분의 장입 간격을 유지하면서 18:24까지 250kg의 분광을 모두 장입하였다.

선철 출탕은 최초 분광 장입 4시간 후 출탕하는 것으로 회의를 통해 결정하였다. 따라서 평균 17분 간격으로 장입된 분광은 1차 선철 출탕 전까지 130kg이 장입되었다. 2차와 3차 출탕은 2시간 간격으로 출탕하는 것으로 결정되었고 2차 선철 출탕은 최초 분광 장입 6시간 7분이 지난 17:39에 출탕되었다. 이때까지 분광 220kg이 장입되었다. 이후 18:24까지 평균 21분 간격으로 분광 10kg씩 3회 추가 장입하여 총 250kg을 장입하였다.

첨가제는 첫 원료 장입 3분 전인 11:29 슬래그를 1kg 첫 장입하였다. 이후 14:58까지 같은 방식으로 1kg씩을 장입하였다. 15:00경 1차 선철 출탕 준비와 잡쇠구멍 개방을 진행하면서 15:27(29분 후)에 첨가제를 장입하게 되었다. 이때까지 첨가제는 14kg이 장입되었다. 이후 첨가제는 1kg씩 5회 추가 장입되었다. 잡쇠구멍이 계속 막히는 현상이 발생하였고, 슬래그가 묻어나오지 않아 16:27 마지막 첨가제 장입 후 중지하였다. 첨가제의 총 장입량은 19kg이다. 분광 250kg 장입대비 슬래그 19kg의 장입 비율은 1:0.08이다.

10) 송풍은 기계 1시간 30분, 발풀무 30분을 번갈아 가면서 상황에 따라 적절하게 조절하기로 계획하였다. 목탄 만장입 후 기계송풍을 시작하였으며, 이후 발풀무와 기계송풍을 실시하였다. 13:48부터는 기계송풍만으로 조업을 진행하였다.



〈그림 24〉 첨가제와 원료 장입

연료(참나무 백탄)는 예열을 위한 초기 장입에 대탄 320kg을 사용하였다. 그리고 분광 장입 전까지 대탄 160kg(20kg씩 8회), 이어서 소탄 20kg을 장입하였다. 소탄은 대탄 사이의 공극을 메워 목탄 사이로 분광이 빠지는 것을 방지하기 위함이다.

분광 장입 개시 시점부터 연료, 첨가제, 분광의 장입 순서는 목탄 20kg, 첨가제(슬래그) 1kg과 분광 10kg 순으로 하였다. 목탄은 대탄 20kg, 중탄 20kg을 번갈아 장입하는 것을 원칙으로 하였으며, 가마 내부의 분위기에 따라 목탄의 크기를 조절하기로 하였다. 분광 장입량 대비 목탄은 2배의 비율로 장입을 계획하였다.

11:32 분광 첫 장입 이후 대탄 20kg, 이후 중탄 20kg을 반복적으로 장입하였다. 가마 내부의 온도 상승이 필요했던 16:56~17:39까지는 대탄만 3회 장입하였다. 18:03경에는 온도가 안정적으로 유지되어 중탄 20kg, 대탄 20kg을 장입하였다.

원료와 첨가제의 장입이 완료된 이후에는 대탄 20kg씩 5회 100kg을 장입하면서 송풍을 지속하여 가마 내의 분광을 완전히 환원시켜 출탕하는 것으로 매뉴얼을 설정하였다. 이에 따라 18:44~20:00까지 대탄 20kg씩 총 100kg을 장입하였다.



〈그림 25〉 목탄 장입

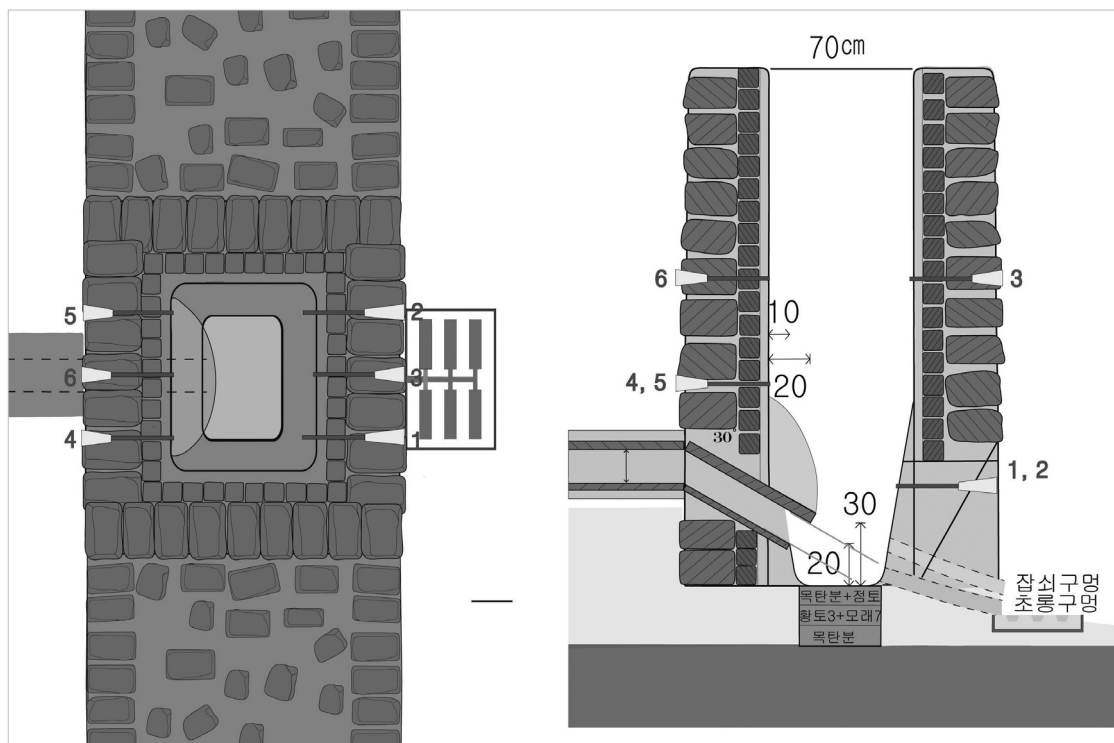
목탄은 예열을 위한 첫 장입 08:08부터 마지막 장입 20:00까지 11시간 52분 동안 총 1,100kg을 장입하였다. 예열을 위해 500kg, 분광을 장입하는 동안 500kg, 분광 장입 후 100kg을 장입하였고, 이

중 대탄이 860kg, 중탄 200kg, 소탄 40kg이 사용되었다. 목탄 크기별 비율은 대탄:중탄:소탄이 1:0.23:0.05이다. 분광을 장입하는 동안 목탄은 대탄 280kg, 중탄 200kg, 소탄 20kg으로 비율은 1:0.71:0.07이다.

본 실험에서는 08:30 기계 송풍을 시작으로 가마 내부의 목탄을 자연 연소시키기 위해 앞창에 구멍을 여러 곳 뚫은 21:10까지 총 조업시간은 12시간 40분이다. 목탄의 첫 장입 08:08부터 마지막 장입인 20:00까지 11시간 52분 동안 원료 250kg, 연료 500kg, 첨가제 19kg을 장입하였으며, 장입비율은 1:4.4:0.076이다. 분광이 첫 장입된 11:32부터 마지막 장입까지는 사용된 목탄은 500kg으로 이때의 원료:연료:첨가제의 장입비율은 1:2.0:0.76이다. 분광 장입 개시 후부터 조업 종료 전까지의 장입비율은 1:2.4:0.076이다.

3) 온도 변화

온도계는 본체와 6개의 센서로 구성되었으며, 온도센서의 위치는 상·중·하부로 구분된다. 하부는 앞창 좌측(1번)·우측(2번), 중부는 골구멍 좌측(4번)·우측(5번), 상부는 앞창 상부(3번)와 골구멍 상부(6번)에 설치하였으며, 각각에 1~6번의 번호를 부여하였다. 가마 바닥을 기준으로 온도센서의 높이는 하부가 50cm, 중부 100cm, 상부는 150cm에 위치한다. 온도센서의 설치 위치는 <그림 26>과 같다.

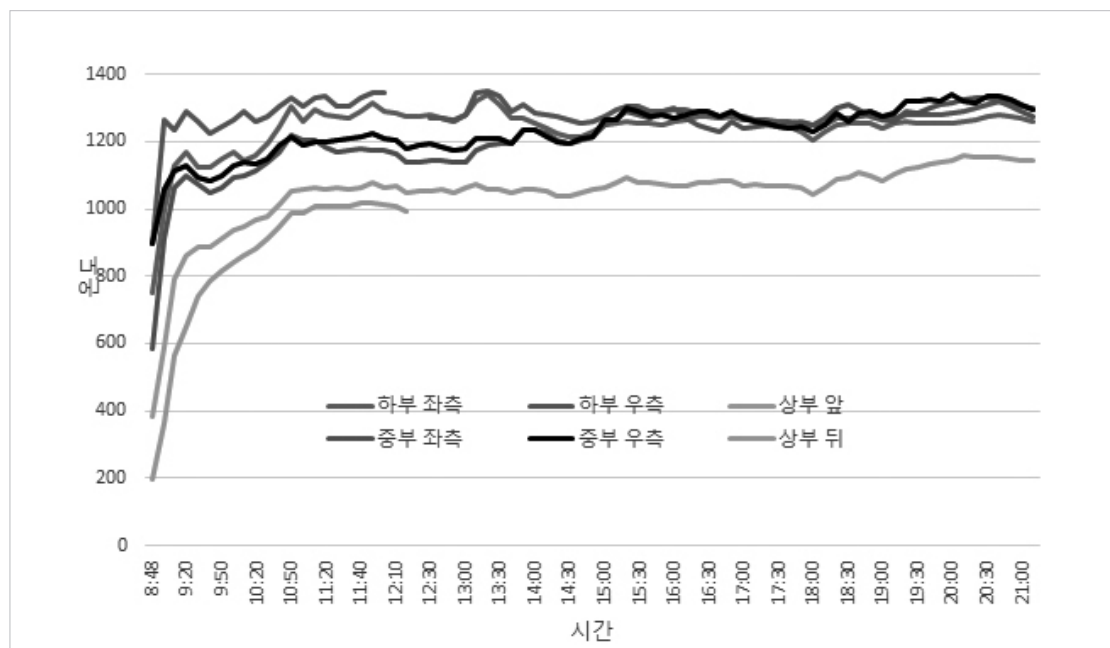


<그림 26> 온도센서 설치 위치

온도센서가 설치되는 지점의 벽체 보수 시 지름 10cm의 막대기를 쫓았다가 벽체 보수 완료 후 제거하고 그 위치에 센서가 가마 내벽으로 1cm 정도 돌출되도록 삽입하였다. 온도계 설치하는 실험 전 5월 12일 진행하였다. 5월 13일 송풍이 시작된 8:40부터 21:10까지 총 12시간 30분 동안 10분 간격으로 가마 내부의 온도 변화를 기록하였다. 온도 변화는 <그림 28>의 그래프로 표시하였다.



<그림 27> 온도센서 설치 모습(좌:앞창쪽, 중:골구멍쪽, 우:설치모습)



<그림 28> 온도 변화 그래프

목탄이 초기 장입 된 후 8:40에 풀무를 밟아 송풍을 시작하였다. 8:50부터는 기계송풍과 발풀무를 동시에 진행해 가마의 온도를 높이려고 하였다. 송풍시작 40분 경과한 9:17에 하부와 중부의 온도가 1,000℃ 이상으로 상승하였다. 하부의 1번 온도는 1,243℃, 2번은 1,303℃로 온도차가 100℃ 이상을 보였다. 가마 하부에 쌓인 목탄 재로 인해 송풍이 원활하지 않은 것으로 판단하여 잡쇠구멍과 초롱구멍을 열어둔 채로 송풍하여 재를 가마 밖으로 제거해 주었다. 또한 잡쇠구멍을 점토로 막음하여 하부 온도 균형을 맞추고자 하였다.

이후 송풍은 기계송풍으로 전환하였다. 10:40 가마 내부의 평균온도는 1,180℃이며, 하부와 중부의 온도는 1,226℃를 기록하였다. 이 상태를 1시간 유지한 후 광석을 장입하는 것으로 결정하였다.

11:32 첫 광석이 장입되었고, 이 때 평균온도는 1,171℃, 하부는 1,288℃로 고온을 기록하였으나, 중부는 1,190℃로 상대적으로 낮았다.

광석이 장입된 이후 안정온도부터 센서 위치별 온도의 특징을 살펴보면 다음과 같다.

상부의 평균온도는 1,275℃를 기록하였다. 1번은 1,262.6℃, 2번은 1,287.4℃로, 하부 좌우측의 평균 온도는 20℃로 크게 차이나지 않았다. 1번은 광석장입 시 1,271℃를 기록한 후 줄곧 1,280℃의 안정적인 온도를 유지하였다가 14:00경부터 온도가 하강하기 시작하였고 14:30에는 1,213℃까지 하강하였다. 이후 온도는 다시 회복되기 시작하였고 15:20 1차 출탕시점에는 1,258℃로 회복한 후 실험 종료시점까지 평균 1,257℃를 유지하였다. 2번은 광석 장입시점 1,306℃를 기록하였고, 14:00까지 평균 1,310℃로 높게 유지하다가 14:00 하강하기 시작하였고 14:40에 1,253℃를 기록하였다. 15:20 1차 출탕시점에는 1,305℃로 회복하였다. 2차 선철 출탕 이후 18:00경 1,248℃까지 하강하였으나, 이후 종료시점까지는 1,270~1,300℃사이로 안정적인 온도를 유지하였다.

중부의 평균온도는 1,249℃를 기록하였다. 4번은 1,242.5℃, 5번은 1,256.4℃로 좌우측의 평균온도는 14℃로 차이가 거의 없었다. 4번은 광석 장입시점 1,173℃로 높지 않았으나 서서히 상승하여 13:00경 1,207℃를 기록하였고, 16:00에 1,298℃까지 상승하였다. 이후 조금씩 하강하여 2차 출탕 전 17:10경 1,241℃까지 하강하였고 다시 상승하기 시작하여 완료시점에는 1,300℃를 기록하였다. 5번은 광석 장입시점 1,207℃를 기록하였다. 14:50까지 1,175~1,217℃ 사이에서 상승과 하강을 반복하다가 15:00경 1,266℃를 기록하였고 1차 출탕시점(15:20)에는 1,298℃를 기록하였다. 이후 온도는 조금씩 하강하여 18:00경 1,232℃를 기록하였고 다시 상승하여 19:20부터는 평균 1,320℃의 높은 온도를 유지한 채 완료하였다.

상부는 6번 온도계가 광석 장입 후 12:10경 고장으로 더 이상 기록할 수 없었다. 3번은 10:50경 1,054℃를 기록한 후 18:30까지 평균 1,065℃로 낮은 온도를 기록하였고, 18:30 이후 약간씩 상승하여 1,090℃에서 1,156℃까지 기록되었으나 고장난 6번 온도계를 제외하며 가장 낮은 온도를 기록하였다.

위치별 온도를 살펴보면 다음과 같다.

앞창쪽 온도는 광석장입시점 1,273·1,306℃으로 안정적이었으며, 13:30경 1,340·1,350℃까지 잠깐 상승, 14:00~14:30까지 하강하여 1,213·1,253℃를 기록하였고, 18:00경 2차 선철 출탕 이후 잠시 하강한 것을 제외하면 1,250~1,300℃ 사이의 안정적인 온도를 유지하였다.

골구멍쪽 온도는 광석장입시점 1,173·1,207℃로 높지 않았으나 지속적으로 상승하였고 15:20~16:00경에는 1,298℃로 크게 상승하였다. 이후 5번은 줄곧 그 온도를 유지하였고, 4번은 하강한 후 18:20경부터 1,290℃의 온도를 기록하였다.

1차 선철 출탕 이후부터 앞창의 온도는 큰 변화없이 조금씩 하강하였고, 골구멍쪽은 온도가 큰 폭으로 상승한 후 조금씩 상승하여 골구멍과 앞창의 온도가 역전되는 구간이 되었다.

본 실험의 평균온도는 1,222℃이고, 평균 최저온도는 1,146℃로 첫 광석 장입 30분 경과 한 시점이

며, 평균 최고온도는 1,282℃로 실험 종료 30분 전이다. 앞창 하부의 평균온도는 1,275℃, 골구멍쪽 하부 평균온도는 1,249.5℃를 기록하여 26℃ 정도의 온도차이를 보였다.

동일한 위치에 온도를 측정하였던 2020~2022년 제6~8차 실험의 온도 변화와 비교하였을 때 평균 온도는 제6차와 제7차에 비해 32℃, 8차 보다는 11℃ 높았다.

하부온도는 제6차(1,300℃) 보다 25℃, 제7차(1,296℃) 보다 21℃, 8차(1,281℃) 보다 6℃ 낮았다. 중부온도는 제6차(1,256℃) 보다 6℃, 제8차(1,291℃)보다 41℃ 낮고, 제7차(1,248℃) 보다 2℃ 높았다.

4) 출탕

(1) 1차 출탕

08:30 조업 전 회의에서 최초 분광 장입 4시간 후 1차 출탕, 이후 2시간 간격으로 2·3차 출탕을 계획하였다. 10:03 골구멍 관입부 상단 보강점토가 녹아내려 2/3 정도 막고 있었다. 골구멍이 1/3 정도만 열려 있어서 송풍에 방해되므로 10:50 슬래그를 제거하였다. 11:12 기계 송풍량을 올려 온도상승 유도하였다.

11:32 분광 장입 개시가 이루어지고 12:13 노벽 용융으로 골구멍 80% 정도 막고 있어서 슬래그를 제거하였다. 이후 13:37, 14:40 골구멍 막힘 현상이 발생하여 쇠창으로 뚫었다. 14:30 잡쇠구멍 뚫어서 노 내부를 관찰하였다. 슬래그와 선철이 묻어 나와 노 하부에 선철 형성된 것으로 판단되었다.

14:43~15:02 잡쇠구멍으로 1차 슬래그 배출을 진행하였다. 점성이 높아 유동성 좋지 않으며, 선철 방울 확인되었다. 슬래그 배출은 거의 이루어지지 않았다. 15:02 판장쇠바탕을 설치하였으며, 15:23 선철 출탕이 이루어졌다. 유동성이 낮고 판장쇠바탕 전체를 채우지 못하였다. 현재까지 분광은 총 130kg, 첨가제 13kg이 장입되었다.



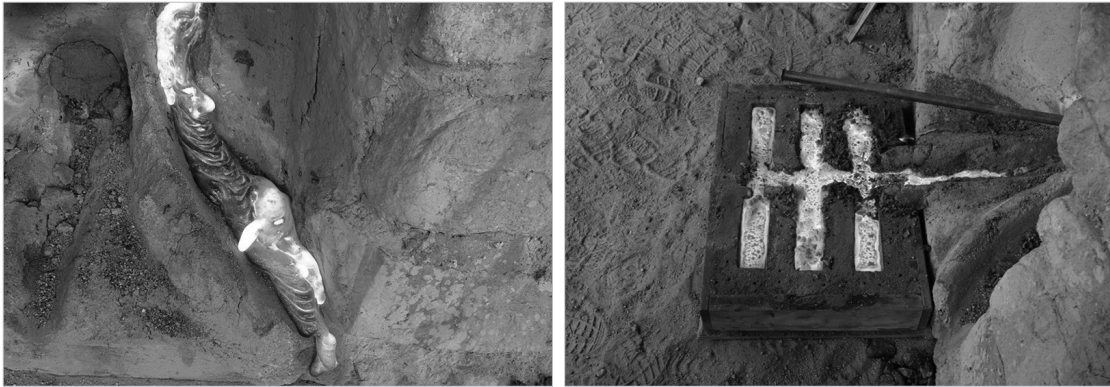
〈그림 29〉 슬래그 배출과 1차 선철 출탕

(2) 2차 출탕

15:13 초롱구멍으로 슬래그와 함께 선철이 혼합된 상태로 일부 배출되었다. 15:33 초롱구멍을 점토로 막았다. 15:35, 16:10, 16:32, 16:46, 17:02 골구멍 개방하여 슬래그를 제거하였다. 16:40~16:50 잡쇠구멍을 뚫으려고 시도하였으나 막혀 있어서 앞창 하단부에 다른 구멍을 뚫었다. 16:59 새로 뚫은 잡쇠구멍으로 유동성 없는 슬래그 일부가 유출되었다.

17:16 판장쇠바탕을 설치하고, 17:30~17:39 초롱구멍 개방하여 2차 선철 출탕이 진행되었다. 유동성은 양호하였으나 판장쇠바탕 전체를 채우지 못하였다. 현재까지 분광은 총 220kg, 첨가제 총 19kg이 장입되었다.

2차 출탕시 슬래그 배출이 양호하지 못하여 17:54 다시 잡쇠구멍을 뚫었다. 18:18 잡쇠구멍으로 선철이 소량 유출되었다. 19:30 골구멍으로 슬래그 역류현상 확인하고 잡쇠구멍을 뚫고자 하였다. 쇠창에 유동성 없는 슬래그만 묻어 나오고 유출은 되지 않았다. 19:42 잡쇠구멍으로 소량의 선철이 유출되었다. 19:50 골구멍으로 슬래그 역류 현상이 계속되었다. 20:15 판장쇠바탕 설치하였다.



〈그림 30〉 슬래그 배출과 2차 선철 출탕

20:29 초롱구멍을 뚫고 3차 출탕 시도하였으나 선철이 냉각되면서 앞창 내벽 전체가 단단하게 굳어버렸다. 앞창 여러 곳을 뚫어보았으나 3차 선철 출탕은 진행하지 못하였다. 21:06 회의를 진행하여 실험 종료 후 앞창 해체 시점 선철괴를 끄집어 내는 것으로 결정하였다. 현재까지 분광은 총 250kg, 첨가제 총 19kg이 장입되었다.



〈그림 31〉 슬래그 배출과 3차 선철 출탕 준비

5) 실험 종료

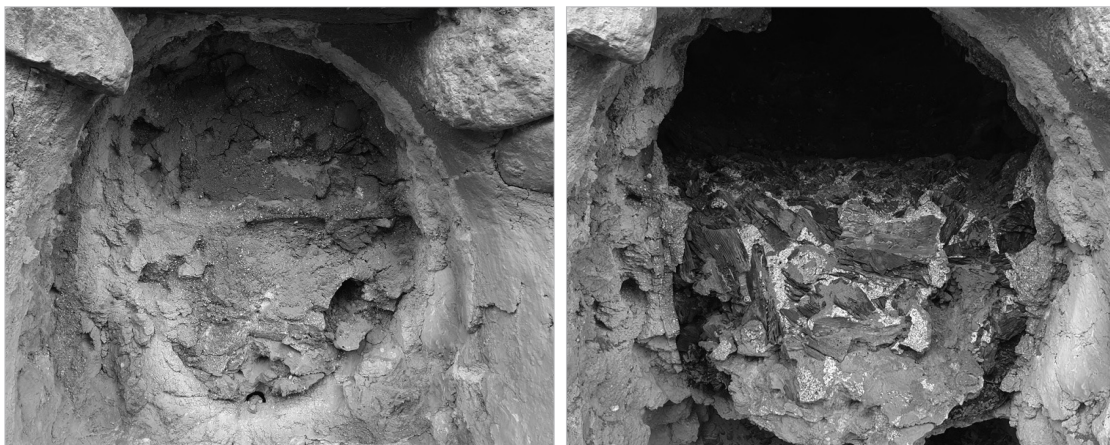
5월 13일(금요일) 21:08 온도계를 제거하고 송풍도 중지하였다. 노 내부에 남아 있는 목탄은 자연연소 시켰다.

5월 14(일요일) 가마 상단과 네 벽면이 부분적으로 갈라져 있었다. 특히 동·서쪽 내벽 중앙부에 금이 심하게 가 있었다. 골구멍 안쪽은 용융되어 녹아 내린 상태였다. 가마 내부에서는 목탄이 아직 연소되고 있었다. 가마 내부에 목탄이 완전히 연소되지 않아 앞창을 개방할 수 없었다. 전날 출탕된 판장쇠와 슬래그에 대한 1차 관찰 기록 후 정리작업을 하였다.



〈그림 32〉 실험 종료 후 앞창과 골구멍

7월 1일(토요일) 노 상단에서 210cm 아래까지 목탄이 하강하였다. 목탄이 거의 다 연소된 것으로 볼 수 있다. 앞창 하단을 먼저 개방하였다. 남아있는 목탄과 슬래그가 혼재된 상태로 쌓여 있었다. 잡쇠·초롱구멍 끝에는 선철이 굳은 상태로 남아 있었다. 대형 함머드릴로 가마 내 하부 퇴적물을 분리하였다. 가마 내부에는 슬래그와 목탄, 벽면은 슬래그가 용착된 상태로 남아있었다. 벽면 일부에서는 녹아내린 흔적이 관찰된다. 가마 바닥에 깔았던 굵은 모래는 녹지 않고 그대로 잘 남아있었다.



〈그림 33〉 실험 종료 후 앞창 제거

2. 실험 결과

1) 생산품 및 가마 내 형성물

2023년 5월 13일(토요일) 진행된 실험에 대한 결과물은 다음날인 5월 14일(일요일) 출탕 선철과 유출된 슬래그를 관찰하였고, 7월 1·2일(토·일요일) 앞창을 해체하고 내부의 생성물을 끄집어 내 관찰하였다. 선철은 5월 13일 11:32 분광 첫 장입 후 3시간 51분이 지난 15:23에 1차(분광 130kg 장입), 6시간이 지난 17:30~17:40에 2차(분광 90kg 장입) 출탕하였다. 7시간 57분이 지난 19:30부터 3차(분광 30kg 장입) 출탕을 위해 초롱구멍을 뚫기 시작하였다. 1시간 30분 동안 출탕을 위해 여러 가지 방법을 시도하였으나 선철은 출탕되지 않았다. 가마 내부에 선철이 잔존하는 것을 확인하였으며, 앞창 해체 일에 가마 내부의 생성물을 끄집어 내 정리하는 것으로 결정하고 실험을 마무리하였다.

실험 중 분광 총 장입량은 10kg씩 25회 총 250kg이다. 출탕된 선철의 무게는 23.55kg이며, 가마 내부 혼합물은 132.2kg으로 생산품은 총 155.75kg이다.

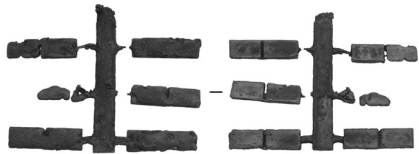
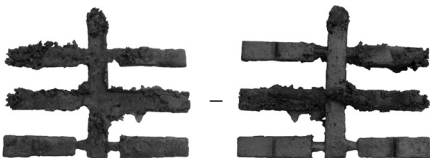
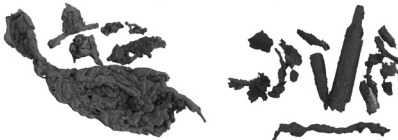
선철의 출탕 상황을 보면, 1차 출탕에서는 판장쇠바탕을 모두 채우지 못했다. ②번¹¹⁾은 판장쇠 말단을 채우지 못했고, ④번은 일부만 채워진 상태이다. 각 판장쇠는 수축공으로 가운데가 약간 높고, 가장자리가 낮아지는 단면형태 상원하방형을 이룬다. 2차 출탕은 1차 보다는 유동성이 좋았으나 용탕이 충분하지 못해 계획한 규격을 형성하지 못했지만 판장쇠바탕을 모두 채웠다. 중복 출탕으로 요철이 심하며 각 판장쇠는 중앙부가 함몰 수축되어 가장자리가 돌출된 'ㅼ'자형을 이룬다. 2차 슬래그 배출 시 잡쇠구멍으로 소량의 선철이 출탕되었다. 선철의 세부 특징은 아래의 <표 8>에 정리하였다.

슬래그는 선철이 출탕되기 전 우선 출재구를 통해 배출되었다. 슬래그는 점성이 강하고 유동성이 떨어지는 상태로 배출되었으며, 가마 밖으로 유출되는 동시에 선철 방울들이 불꽃을 내며 튀었다. 색조는 녹색을 띠는 회색의 유리질 슬래그이며 슬래그 내부에는 선철 방울들이 포함되어 있었다.

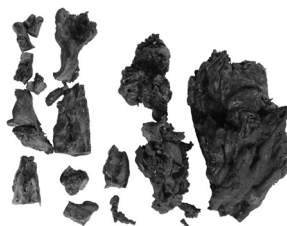
골구멍을 통해서 12차례 슬래그를 제거하였다. 초기 골구멍 슬래그는 골구멍으로 사용된 석재 일부가 녹아내리면서 석재에 포함된 알칼리 산화물들이 백색을 띠며 용착된 상태로 제거되었다. 골구멍 용손 이후에는 가마 내부의 슬래그와 유사한 양상이었다. 슬래그의 세부 특징은 아래의 <표 9>에 정리하였다.

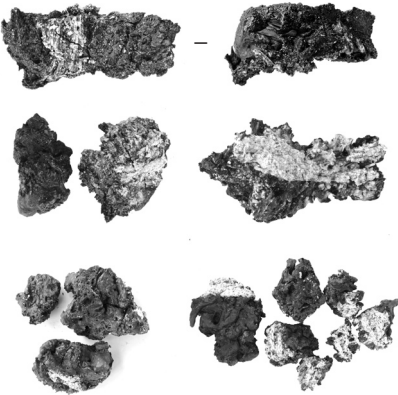
11) 판장쇠의 번호는 출탕구를 위쪽으로 높은 상태로 우측에서 좌측으로, 초롱구멍 가까운 쪽에서 먼 쪽으로 부여하였다.

〈표 8〉 출탕 및 유출 선철 현황

생성물 명칭	크기	특징	사진
1차 출탕	길이 39.0cm 너비 50.0cm 두께 2.5cm 무게 8.45kg	④를 제외한 아래면은 대체로 형태를 갖춤 - 윗면은 탕도와 판장쇠 모두 수축공으로 중앙부 볼록함 - 용탕이 충분하지 못해 계획한 규격(두께)을 형성하지 못함 - 윗면에 얇은 산화물 찌꺼기 잔존	
2차 출탕	길이 41.0cm 너비 50.0cm 두께 2.0~2.3cm 무게 12.75kg	- 용탕이 충분하지 못해 계획한 규격을 형성하지 못함 - 아랫면 ②④⑥은 형태 양호, 나머지 ①③④ 판장쇠 아래윗면 겹침 출탕으로 요철 심함 - 윗면 냉각 시 수축으로 중앙부가 함몰 수축이 심함 - 산화물 찌꺼기 잔존 - 기타 다수의 유출상 판형 잔존	
2차 출재구 유출 선철	길이 43.0cm 너비 3~12.5cm 두께 3.0cm 무게 2.75kg	- 잔탕 유출, 8개의 비슷한 잔탕편 잔존 - 출탕구쪽 약간 넓고 좁아지다가 다시 넓어지는 형태 0.5~1.5cm 너비의 유출상 뚜렷함 - 수 십 차례 출탕으로 형성 - 내부의 수축공 다수 확인	

〈표 9〉 슬래그 현황

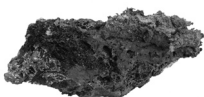
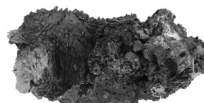
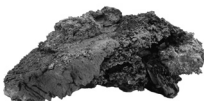
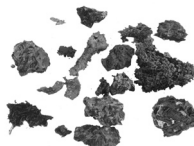
생성물 명칭	무게(kg)	특징	사진
1차 유출재	7.6	- 색조 녹색을 띠는 회색, - 선철방울 슬래그 내 포함됨	
2차 유출재	2.85	1차보다 온도 높음	

생성물 명칭	무게(kg)	특징	사진
골구멍 슬래그 골구멍 용손 시	7.8	• 대부분 흰색의 SiO_2 용융물 확인 - 송풍관에 사용된 석재 용융 • 골구멍 석재 Na_2O, K_2O 등 알칼리 산화물이 흡착되어 용융반응	
골구멍 슬래그 골구멍 용손 이후	5.35	• 유출재와 유사함 • 선철방울 슬래그 내 포함됨	

7월 1일 앞창 해체작업을 실시하였다. 앞창은 출탕을 위해 뚫었던 구멍이 잔존했지만 상태는 양호했다. 가마 내부의 생성물은 바닥에 전반적으로 선철이 얇고 평평하게 pool을 형성하였는데 초롱구멍쪽으로 집중되어 있었다. 그 상부에는 슬래그 및 목탄 혼합물이 엉켜 골구멍 하부까지 채워져 있었고, 이 혼합물 사이에 구슬형·부정형·판형 등의 소형 선철괴들이 박혀있었다. 생성물은 가마 하부의 방습시설을 제거한 후 생성물을 하강시켜 수습하려했으나 가마벽의 유리질화와 슬래그의 용착으로 잘 분리되지 않았다. 드릴을 이용하여 가마 벽과 분리시킨 후 중앙부의 중심 철괴를 하강 시킨 후 가마 밖으로 끄집어냈다.

철괴는 그대로 관찰이 불가능하여 앞창을 기준으로 중앙부, 중앙부+앞쪽, 우측, 좌측으로 구분하였다. 가마 내부에 잔존하는 생성물은 일괄 수습하였다. 가마 내 생성물의 세부 특징은 아래의 <표 10>에 정리하였다.

〈표 10〉 가마 내부 철괴 수습 현황

생성물 명칭	크기(cm)	무게 (kg)	특징		가마 내 반응대	사진사진
① 중앙부 중심철괴	길이 44 너비 16 두께 18	24.4	•아랫면에는 점토 바닥 3cm 정도 부착 •윗면 슬래그 형성 •아랫면 선철 방울들 곳곳 잔존	고탄소 • 침탄괴(목탄+선철+ 환원괴) • 위쪽은 탄소함량 낮고, 아래쪽으로 갈수록 탄소함량 높음 • 온도가 낮아 환원되지 못함 • 목탄결 사이 침투하고 있는 선철 잔존 • 선철방울 다수 잔존 • 부정형의 얇은 소형 선철괴 결합 덩어리 잔존 • 선철 방울 결합된 상태 잔존	적하대 용융대	
② 중앙부 앞쪽철괴	길이 38.0 너비 17 두께 15	10.85	• 초롱구멍 뚫었던 흔적 • 가마 벽 용융으로 초롱구멍 막은 단면 확인 • 판상 또는 부정형의 소형 선철괴 결합 덩어리 형태 • 목탄결 사이 침투 선철 잔존			
③ 우측 철괴	길이 40 너비 19 두께 8	21.85	•아랫면에는 점토 바닥 3.5cm 정도 부착되어 있음 •두께 1cm의 선철 Pool 형성 • Pool 상부 목탄결 침투·판형·부정형·구슬형 소형 선철괴 결합			
④ 좌측 하단철괴	길이 16 너비 13 두께 5	4.95	• 목탄+선철방울들이 서로 결합된 상태		적하대	
⑤ 중앙부 하단철괴 (전체)	편 다수	22.0	• 선철 방울 박힌 슬래그덩어리 • 색조 회색	• 슬래그 사이에 박힌 구슬형태 선철 방울 잔존 • 선철방울 클러스트 ¹²⁾ 형성	슬래그대	
⑥ 중앙부 및 하부	길이 21 너비 19 두께 11	18.05	• 회색의 슬래그대 • 선철 방울 박힘		슬래그대	

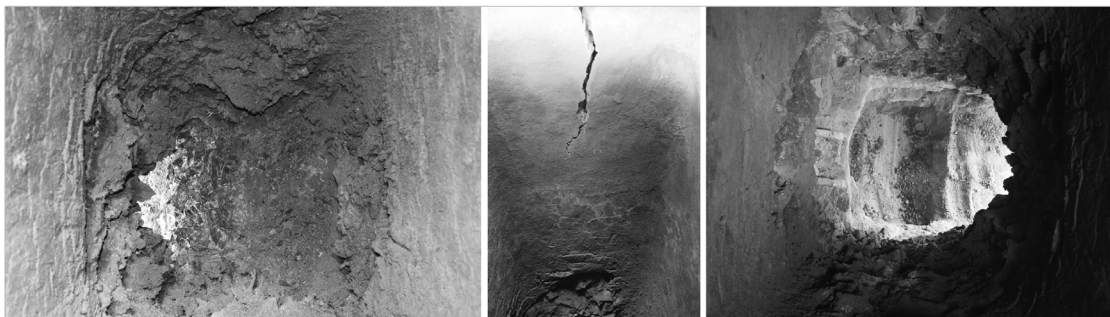
12) 상호 작용을 통하여 새로운 지식과 기술을 창출할 수 있도록 기업·대학·연구소 등을 모아놓은 지역을 이르는 말로, 본 실험에서는 선철방울들을 모아놓은 형태를 의미한다.

생성물 명칭	크기(cm)	무게 (kg)	특징	가마 내 반응대	사진사진
⑦ 중앙부 및 상부	다수	24.2	• 목탄, 반응용철괴, 목탄결 사이 침투 선철 등		
⑧ 상부	길이 14 너비 5 두께 2	2.05	• 융착대 7점, 벽체쪽 슬래그 6점 • 융착대는 광석의 반응용되어 표면 접착이 일어남- 부정형	융착대	
⑨ 하부 전체 잔편	하부 잔존물	3.85	• 상부 파괴 선별 후 바닥에 남은 잔편들 • 크고 작은 선철방울, 침탄 선철, 목탄결 사이 침투 선철, 침탄이 완전하지 않은 선철괴 등 잔존		
총 중량		132.2			

2) 가마의 변화

앞에서 설명한 바와 같이 이번 실험의 당초 계획에서는 4차례 선철을 유출시키는 것으로 계획하였으나 실제 2차례만 출탕이 가능하였다. 1~2차는 무난하게 출탕시켰으나 3차 출탕은 출탕구 부분의 냉각된 선철을 쇠파 등으로 뚫지 못해 결국 출탕시키지 못하였다. 따라서 당시 가마 내부의 상황이 그대로 남아 있을 것으로 예상되어 이에 대한 관찰을 실시하였다.

앞창을 제거한 후 가마 내부는 골구멍(송풍구)까지 생성물이 차올라 냉각된 상태였다. 최상부의 비연소 목탄 등을 정리한 후 생성물은 모두 5개의 층으로 구분할 수 있는데, 먼저 가장 상부의 I 층은 노벽에서 용융되어 흘러내린 벽체 점토덩이와 미용융 슬래그 등이 중앙부 기준 약 16cm 두께를 형성하고 있다. II 층은 슬래그+목탄층으로, 중앙부 기준 약 37cm의 두께를 형성하고 있다. III 층은 철+슬래그+목탄이 혼재되어 15cm 정도 두께를 이루는 층으로, 철은 저탄소 반환원괴 상태이다. IV 층은 노상 위에 형성된 두께 1cm 정도의 선철층으로, 용선이 형성되었다가 냉각되어 전체적으로 얇은 판 모양을 띤다. 골구멍 앞에서부터 출탕구 방향으로 약 45cm까지 형성되어 있다. 그 아래 V 층은 노상(고운 목탄분+점토+미사 혼합물)이 열을 받아 소결된 양상이다.



〈그림 34〉 실험 후 가마 내부(좌-생성물 수습 전, 중-뒷벽, 우-생성물 수습 후)



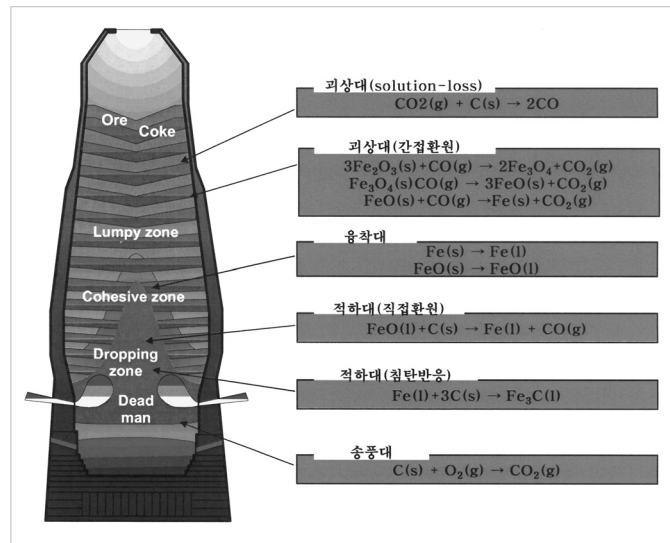
〈그림 35〉 실험 후 앞창 개방

선철을 생산하는 현대 금속제련공학에서의 노 내 반응은 철광석→괴상대→용착대→적하대→송풍대로 구분된다. 전통 제철과는 다소 차이가 있을 수 있으나 용선이 생성된 IV층에서 적하대 반응이 일어

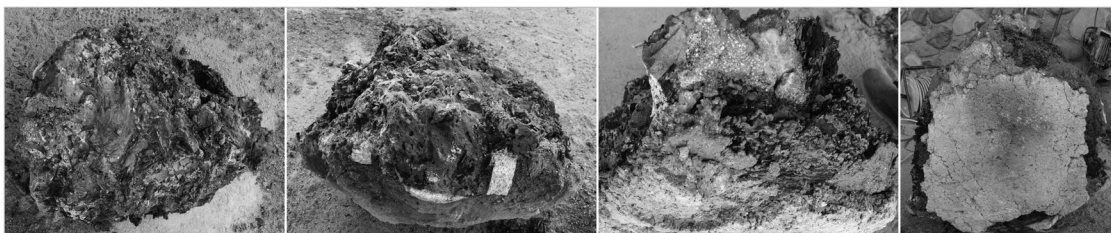
났으며, Ⅲ층은 간접환원이 진행 중인 괴상대에서 멈춘 것으로 판단되며, Ⅲ층 아랫면 일부에서는 철 성분이 바늘 혹은 구슬 모양으로 관찰되는 점으로 보아 용착대 반응이 진행 중이던 것으로 판단된다.

관찰 결과를 종합해 보면, 3차 출탕을 시도했던 당시 가마 바닥에는 두께 1cm 정도의 용선이 형성되어 있었으며(Ⅳ층), 그 상층에는 침탄 및 환원 반응이 진행 중이었고(Ⅲ층) 또 그 상층에는 광석에서 철과 슬래그가 분리되는 간접환원의 괴상대 반응이 일어났던 것으로 정리

할 수 있다. 만일 지속적인 송풍이 진행되었다면 Ⅱ·Ⅲ층 역시 환원 및 침탄 반응을 거쳐 용선이 형성될 수 있었을 것으로 추정된다. 하지만 실험 당시 예상했던 것보다 용선의 양은 많지 않았음을 알 수 있다. 한편 중앙부 좌측에는 용착대에서 적하대로 넘어가는 단계의 것으로 보이는 주먹 크기의 형성물이 확인되었는데, 세부적으로는 용착대+적하대(용적대→용융대) 반응이 일어난 것으로 판단되었다. 이번 실험에서 이러한 단계별 반응 결과가 실물로 확인된 것은 고무적인 성과라 할 수 있고, 향후 실험에서 중요한 검토 자료가 될 것으로 예상된다.



〈그림 36〉 현대 고로 노 내 장입물의 주요반응
(국립중원문화재연구소·경원텍주식회사 2020)



〈그림 37〉 가마 내부 생성물 현황(순서대로; 앞면-측면-단면-아랫면)

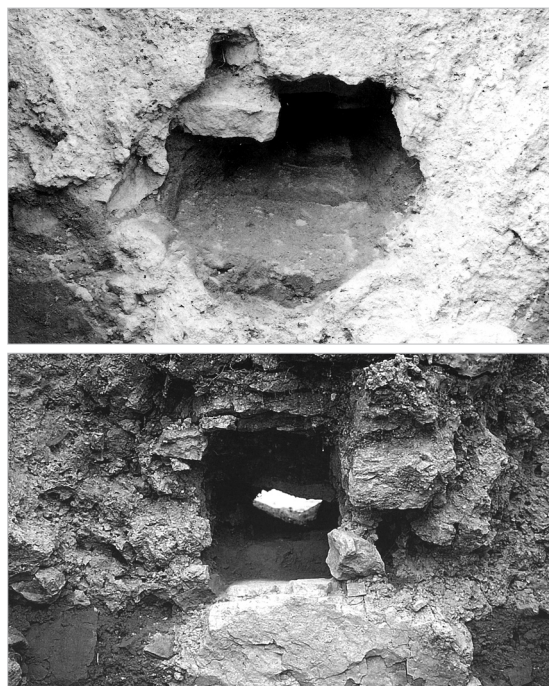
한편 가마 내부의 벽체 변화를 살펴보면 다음과 같다. 먼저 뒷벽은 상단 120cm부터 아래로 크랙이 발생했는데, 상하보다는 좌우가 심하다. 143~200cm 구간에 용융이 집중되어 있으며, 전체적으로 높이 20cm, 횡방향 50cm 범위에 심각한 용융이 발생하였다. 우벽은 상단 122cm부터 크랙이 발생하기 시작했으며, 133~172cm 구간에 집중적으로 벽체 내면이 용융되었다. 횡방향으로는 역시 50cm 범위에 해당되며, 172cm 아래에도 노벽 용융대+슬래그가 형성되어 있다. 좌벽은 상단 114cm부터 크랙이 발

생했으며, 130~165cm까지 집중적으로 용융이 발생하였다. 횡방향으로는 40cm 범위이다. 앞벽은 상단 112cm부터 크랙이 발생하기 시작했으며, 127cm부터 앞창까지 용융이 심하다.

이와 같이 가마 벽체의 내부 미장면은 대체로 상단에서 아래로 120cm 구간에서부터 갈라짐 현상, 즉 크랙이 발생하기 시작하였으며, 130~170cm 구간에서 고온에 의한 벽체 미장점토의 용융현상이 집중되어 나타났다. 특히 골구멍(송풍구) 상단에 해당되는 뒷벽 143~200cm 구간에 용융이 집중되어 있으며, 횡방향 50cm 범위, 아래위 20cm 범위에서 가장 심하게 나타났다.

이러한 벽체 내면 미장점토의 용융현상은 두 가지 측면에서 생각해 볼 수 있는데, 하나는 용융 범위가 대체로 가마의 보수 범위와 일치한다는 것이다. 이전 실험이 종료된 후 가마를 보수할 때 용융이 심한 부분의 미장부를 뜯어내고 새로이 미장을 하였는데, 그 부분이 동일하게 용융되는 것이다. 이 구간이 고온의 영향을 가장 심하게 받는 곳이기도 하고, 새로이 보수하는 과정에서 상단부 벽체 및 내벽 미장부와 미장 시 접합(결속)이 제대로 이루어지지 않기 때문이기도 하다.

또 한 가지는 뒷벽 골구멍 위쪽의 용융이 가장 심한 이유가 풀무로부터 송풍에 의해 골구멍으로 유입된 바람이 가마의 중앙부와 앞창 쪽으로 원활하게 환류되지 않고 장입물에 부딪혀 뒷벽을 타고 올라가게 되어 그 부분의 고온용융 현상이 현저해지는 것으로 판단된다. 즉 골구멍의 가마 내 관입부가 깊을수록 바람을 중앙부 및 앞창 쪽으로 환류시키는 것이 유리한 것으로 판단된다. 하지만 유적에서 골구멍 석재가 가마 내부로 돌출된 사례는 아직 발견되지 않았다(그림 38 참조). 이에 대해 연구단 내에서도 당초 내부로 돌출되지 않았다는 견해와 돌출되도록 설치했지만 조업 시 고온에 의해 용융되어 유적에는 남아 있지 않다는 견해가 맞서고 있다. 이를 확인하기 위해 본 보고서의 부록에 수록한 바와 같이 2022년 골구멍 예비실험을 실시했는데, 예비실험에서는 본 실험과 달리 골구멍 석재를 가마 내부로 돌출되도록 하지 않고, 벽체 내면부와 동일한 면까지만 조성하였다. 실험 결과 골구멍 및 주변의 용융은 현저하지 않았으나, 뒷벽 골구멍 상단부의 용융은 이번 실험과 유사한 정도로 용융되었다. 이에 대한 해석도 아직 일치된 견해가 도출되지 않고 있어 향후 추가적인 검토가 필요한 상황이다.



〈그림 38〉 모화리(위) 및 용명리(아래) 가마의 골구멍



〈그림 39〉 실험 후 골구멍 주변 벽체 현황(좌-우벽, 중-좌벽, 우-골구멍 위)

가마 내부의 생성물을 수습하면서 노상과 골구멍 사이 벽체 내면은 대부분 뜯겨져 나가, 하부구조 25~30cm 상부에서부터 벽체면이 잔존한다. 가마 내부에 전반적으로 용융부 표면은 자갈색을 띠며 중간 중간 석영질로 보이는 흰색이 섞여 있다. 단면은 회백색이고 좌우측 내면부 1~3cm 두께에는 입자가 거칠며, 벽체 미장과정의 이전 단계 미장면에 해당되는 그 안쪽면은 회색을 띠며 입자가 곱다. 즉 벽체 미장 단계의 점토 성분이 조업 후 노벽에 그대로 반영됨을 알 수 있다.

화강암 대리석을 이용해 설치한 골구멍 주변은 좌우 모두 13cm 높이까지 정리작업으로 인해 용융 내벽이 모두 탈락된 상태였고, 골구멍 석재의 가마 내 관입부 역시 조업 후 생성물 수습과정에서 절개되어 백색 단면이 드러나 있었다. 골구멍 경사면의 약 3/4까지(골구멍 안쪽 28cm) 슬래그가 역류해 용착되어 있으며, 좌·우측 하단 슬래그가 단면부까지 용착되어 있고 골구멍 상부 석재 우측에도 용융면이 형성된 점으로 보아 이 부분들은 조업 종료 전 용융된 것으로 추정된다. 골구멍 석재의 용융 현상은 조업 성과와 직결되는 매우 중요한 부분이기 때문에 유적에서의 현상과 실험 결과의 면밀한 비교검토가 필요하다. 그 결과를 통해 실험에 사용할 골구멍 석재의 준비가 필요할 것이다.



〈그림 40〉 실험 후 골구멍 석재(상) 및 하부(우) 현황

2023년도 울산쇠부리 복원사업 연구보고서



매음말



V. 맺음말

이번 철제련실험은 기본적으로 앞서의 제6~8차 실험에서 사용된 가마를 재사용하되 연구자들간의 논의를 통해 이견(異見)들을 조정하여 구조상 부분적인 변화를 꾀하였다. 이견들 중 가장 큰 요소는 노의 높이에 관한 것으로서 일단 기존의 270cm에서 20cm 낮추어 250cm로 하기로 하였다. 이는 이보다 더 낮추자는 견해도 있었으나, 노내에서 토철이 환원되어 선철이 되기 위해서는 적어도 이 정도의 높이가 필요하다고 판단하는 견해가 더 많았기 때문이다. 그리고 하부 150cm까지는 용융된 내벽과 점토블록을 보수하여 재사용하였고, 가마 상부는 기존의 내경 방식에서 직립형태로 변경하여 상부 100cm는 재축조하였다. 그리고 미장토는 마사토·모래·벤토나이트를 배합비를 조절해 사용하였다.

송풍은 풀무방식과 기계방식을 병행하였다. 송풍은 08:08에, 분광 철 장입은 11:32에 시작되었고, 이후 원료는 전체 평균 17분 간격으로 매 10kg씩 장입되었다.

기계 송풍을 시작으로 가마 내부의 목탄을 자연 연소시키기 위해 앞창에 구멍을 여러 곳 뚫은 21:10까지 총 조업시간은 12시간 40분이다. 목탄의 첫 장입 08:08부터 마지막 장입인 20:00까지 11시간 52분 동안 원료 250kg, 연료 500kg, 첨가제 19kg을 장입하였으며, 장입비율은 1:4.4:0.076이다.

본 실험에서 가장 중요한 부분이 되는 선철의 출탕작업은 15:23에 첫 출탕이 이루어졌는데, 유동성이 낮아 판장쇠바탕 전체를 채우지 못하였고 17:30에 실시된 2차 선철 출탕은 유동성은 양호하였으나 판장쇠바탕 전체를 채우지는 못하였다. 이후 20:29에 초롱구멍을 뚫고 3차 출탕을 시도하였으나 선철이 냉각되면서 앞창 내벽 전체가 단단하게 굳어버려 추가적인 출탕이 곤란하게 되었다.

결과적으로 실험 중 분광을 10kg씩 25회 총 250kg 장입하여 출탕 선철 23.55kg, 가마 내부 혼합물 132.2kg을 얻어 생산품은 총 155.75kg에 달하지만 기대했던 출탕이 온전히 이루어지지 못한 점에 대해서는 다각적인 분석과 고찰이 필요하다.

이러한 현상은 노내에 선철의 형성이 충분히 이루어지지 못하였고 그로 인해 노바닥 부분의 온도도 내려가 출선(出銑)이 이루어지는 초롱구멍 부분이 굳어졌기 때문으로, 이는 또한 고온과 바람의 영향으로 송풍구에 변형이 생기고 그로 인해 노바닥 앞부분으로의 송풍이 원활히 이루어지지 못한 결과로 보여진다.

따라서 본 실험에서 노의 높이를 낮추고 노벽 상부를 직선으로 한 점이 적절했는지 심도 있게 논의해 보아야 할 것 같고, 그 외에 대대적인 보수로 인해 노내부의 건조가 충분히 되지 못했을 가능성 및 송풍구 상태의 변화가 준 영향 등에 대해서도 면밀한 검토가 필요해 보인다.

이처럼 앞선 실험들에 비해 선철 출탕의 횟수 및 선철의 상태가 좋지는 못하였지만, 이러한 결과에 대한 원인을 철저히 분석하고 문제점을 차후의 실험에서 해결해 나아가면서 보다 신뢰할 수 있는 표준메뉴얼의 작성이 가능해질 것으로 기대된다.

이번 울산쇠부리 복원실험은 민관학(民官學)의 거버넌스에 의해 결성된 ‘울산쇠부리복원사업단’의 구성원들이 혼연일체가 되어 진행되었다는 점에 무엇보다 큰 특징이 있다(Ⅱ장 3절 참조). 아마도 이러한 인적 구성으로 현재 단절되어 있는 국가적 차원의 무형유산을 적극적으로 복원하려는 사례가 본 사업단 외에 또 있는지 궁금하다. 그리고 이와 같은 사업단은 8년간 동고동락하면서 허심탄회하게 상호 소통하는 가운데 유기적인 협력체제를 갖추게 된 점은 무엇보다 큰 장점이라 할 수 있다.

2024년부터는 문화재청이 지원하는 미래무형유산 개발 정책 프로그램에 따라 새로운 방식의 조사와 연구 및 제철복원실험이 이루어질 예정이다. 이러한 과정이 원활히 잘 이루어져 ‘울산쇠부리기술’이 지방문화유산 단계를 거쳐 국가문화유산으로 조속히 지정될 수 있도록 본 사업단은 최선의 노력을 경주할 예정이다.

● ● ● 참고문헌

- 권병탁, 1972, 「한국경제사특수 연구」, 영남대학교출판부
- 권병탁, 2004, 「한국 산업사 연구」, 영남대학교출판부.
- 김권일, 2009, 「영남지역 조선시대 製鐵文化의 기초적 연구-石築型 製鐵爐의 설정-」, 『嶺南考古學報』31, 嶺南考古學會.
- 김권일, 2014, 「고고학적으로 본 석축형제철로의 조업방식」, 「조선시대 울산 쇠부리의 조업방식」, 울산쇠부리축제 추진위원회·한국철문화연구회.
- 김권일, 2020, 「석축형제철로(石築型製鐵爐)의 조업방식 재고」, 「신라문화유산연구」, 신라문화유산연구원.
- 강성귀·김권일, 2022a, 「한국 철 제련복원실험의 비교분석 연구」, 「동아시아 제철기술 비교 연구논문집 II」, 국립중앙문화재연구소.
- 강성귀·김권일, 2022b, 「선철 생산기술」, 「기술의 고고학」, 제46회 한국고고학 전국대회, 한국고고학회.
- 신경환·김권일·최영민, 2015, 「석축형제철로(石築型製鐵爐)의 조업방식 연구」, 「야외고고학」, 제22호, 한국매장문화재협회.
- 신경환·이남규·황호순·이재용·손지원, 2020, 「전통제련 기술공정의 물리화학적 해석연구(1차년) 보고서」, 국립중앙문화재연구소·경원텍주식회사.
- 이남규·김권일·강성귀, 2016, 「2016년도 울산쇠부리 고대 원형로 복원실험 연구보고서」, 울산쇠부리축제 추진위원회·울산쇠부리 복원사업단.
- 이남규·이태우·김권일·이은철·최영민·강성귀, 2018a, 「2017 울산쇠부리 제철기술복원실험 연구보고서」, 울산광역시 북구문화원·울산쇠부리복원사업단.
- 이남규·이태우·이은철·최영민·강성귀, 2018b, 「2018년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험 연구보고서」, 울산광역시 북구문화원·울산쇠부리 복원사업단.
- 이남규·이태우·신경환·김권일·이은철·강성귀·권용대·이민아, 2019, 「2019 울산쇠부리 제철기술 복원실험 연구보고서」, 울산광역시 북구문화원·울산쇠부리 복원사업단.
- 이남규·이태우·신경환·김권일·이은철·권용대·강성귀·이재용·이민아, 2021, 「2020 울산쇠부리복원사업 연구보고서」, 울산광역시 북구문화원·울산쇠부리복원사업단.
- 이남규·이태우·신경환·이은철·김권일·권용대·강성귀·이재용·이지은, 2022a, 「2021 울산쇠부리 복원사업 연구보고서」, 울산광역시 북구문화원·울산쇠부리복원사업단.
- 이남규·이태우·신경환·이은철·김권일·권용대·강성귀·이재용, 2022b, 「2022년도 울산쇠부리 복원사업 연구보고서」, 울산광역시 북구문화원·울산쇠부리복원사업단.
- 최영민·이현진, 2020, 「중세 제련기술 복원 실험 결과 보고」, 『科技考古研究』26, 아주대학교 박물관·인문과학연구소·디지털역사연구센터.
- 表國一, 1933, 「古來の砂鐵製鍊法」, 丸善株式會社.

부록

1. 실험 기록
2. 2023 울산 쇠부리 제철복원 실험의 금속학적
분석 및 고찰
3. 2022년 울산쇠부리기술 골구멍 예비실험 보고서
4. 자문위원 의견서
5. 실험고고학으로 본 울산지역 석축형제철로의 선철
생산기술 연구

1 실험 기록

제9차 울산쇠부리 복원실험 기록지(2023년 5월 13일)

시간	조업내용	목탄(kg)				광석(분광) (kg)		첨가제 (슬래그)(kg)		비고
		대탄	중탄	소탄	총량	투입량	총량	투입량	총량	
8:08 ~29	• 목탄 만장입	320			320					
8:40	• 송풍시작									
8:48	• 골구멍·잡쇠구멍 점토 막음 - 송풍중지									
8:50	• 기계송풍과 발풀무 동시 진행									
9:10	• 노 하부 잔존 재(灰) 배출위해 초롱구멍·잡쇠구멍 개방									
9:14	• 초롱구멍·잡쇠구멍 점토벽돌 막음 - 벽돌 사이 불꽃 확인									
9:15	• 목탄 장입	20			340					
9:17	• 풀무밟기 중단 - 1·2번 온도 차 100℃ 이상, 초롱구멍 하부에 형성된 재 온도상승 방해요인 으로 추정, 재를 노 밖으로 제거 후 초롱구멍·잡쇠구멍 개방 상태로 송풍									1번온도계 1,160℃ 2번온도계 1,270℃
9:22	• 목탄 장입	20			360					
9:32	• 목탄 장입	20			380					
9:45	• 목탄 장입 • 잡쇠구멍 점토 막음 - 잡쇠구멍 막음으로 1번쪽 온도 상승 효과	20			400					1번온도계 1,123℃ 2번온도계 1,224℃
10:01	• 목탄 장입	20			420					
10:03	• 노벽 갈라진 틈 점토 보수 • 골구멍 개방 - 상단 2/3 보강점토 용융, 골구멍 막음 - 하단 1/3 구멍 송풍 진행 - 가마 아래쪽 송풍된 바람 바닥 치고 여러 갈래로 갈라져 분산될 것으로 추정									
10:12	• 목탄 장입	20			440					
10:35	기계송풍 차단 / 발풀무 개시									
10:39	• 목탄 장입	20			460					
10:40	• 하중위의 평균온도 1,226℃ - 1시간 유지 후 광석 장입예정									
10:50	• 골구멍 개방 - 보강점토 용융, 골구멍 대부분 막음 - 송풍중지→슬래그 제거→기계송풍 재개									

시간	조업내용	목탄(kg)				광석(분광) (kg)		첨가제 (슬래그)(kg)		비고
		대탄	중탄	소탄	총량	투입량	총량	투입량	총량	
10:52	•목탄 장입	20			480					
11:12	•송풍량 올려 온도상승 시키기									
11:10	•목탄 장입			20	500					노 예열목탄 장입 완료
11:27	•목탄 장입 - 대탄 사이 간격 좁힘, 광석 환원되 지 않고 하강 방지 - 11:10 소탄 장입 후 하중위의 평균 온도 하강 - 1,258℃→1,249℃→1,237℃			20	520					
11:29	•첨가제(슬래그) 장입							1	1	
11:32	•광석 장입					10	10			
11:45	•목탄 장입	20			540			1	2	
11:49	•광석 장입					10	20			
11:56	•목탄 장입		20		560					
11:58	•첨가제(슬래그) 장입							1	3	
12:00	•광석 장입					10	30			
12:10	•2번 온도계 손실									
12:13	•목탄 장입	20			580					
12:13	•골구멍 개방 - 노벽 슬래그 용융 → 슬래그 제거									
12:18	•첨가제(슬래그) 장입							1	4	
12:20	•광석 장입					10	40			
12:21	•광석 장입									
12:27 ~30	•6번 온도계 뽑아 2번으로 이동									
12:28	•목탄 장입		20		600					
12:31	•첨가제(슬래그) 장입							1	5	
12:33	•광석 장입					10	50			
12:46	•목탄 장입	20			620					
12:49	•첨가제(슬래그) 장입							1	6	
12:50	•초롱구멍 상부 노벽 용융-초롱구멍 막음. •불꽃 없음									
12:51	•광석 장입					10	60			
12:57	•풀무 밝기 -송풍상태 양호									• 온도 30℃ 정도 떨어져 풀무밝기→ 온도 상승
13:12	•목탄 장입		20		640					
13:14	•첨가제(슬래그) 장입							1	7	
13:16	•광석 장입					10	70			
13:26	•목탄 장입	20			660					

시간	조업내용	목탄(kg)				광석(분광) (kg)		첨가제 (슬래그)(kg)		비고
		대탄	중탄	소탄	총량	투입량	총량	투입량	총량	
13:29	• 첨가제(슬래그) 장입							1	8	
13:30 ~37	• 광석 장입(13:31) • 골구멍 개방 - 보강점토 용융으로 상부 막음→슬래그 제거					10	80			
13:48	• 목탄 장입		20		680					
13:50	• 첨가제(슬래그) 장입							1	9	
13:50 ~54	• 기계송풍 전환, 풍량 높임 - 풀무밟기처럼 불꽃 양호									
13:52	• 광석 장입					10	90			
13:55 ~ 14:05	• 노벽보수									
14:05	• 목탄 장입	20			700					
14:08	• 첨가제(슬래그) 장입							1	10	
14:10	• 광석 장입					10	100			
14:18	• 목탄 장입		20		720					
14:20	• 첨가제(슬래그) 장입							1	11	
14:22	• 광석 장입					10	110			
14:23	• 풀무 밟기 -기계송풍으로 13:50부터 온도 하강									
14:30	• 잡쇠구멍 열어 내부 관찰 - 쇠창에 슬래그+선철 묻어 나옴 - 잡쇠구멍으로 슬래그 일부 흘러나옴 - 1차 거품형 슬래그 일부 배출 후 남겨둠 - 하부에 선철형성된 것으로 추정									
14:40	• 골구멍 개방 -슬래그 제거									
14:43	• 목탄 장입	20			740					
14:45	• 첨가제(슬래그) 장입							1	12	
14:56	• 목탄 장입		20		760					
14:47	• 목탄 장입					10	120			
14:48	• 첨가제(슬래그) 장입							1	13	
14:43 ~ 15:02	• 잡쇠구멍 1차 슬래그 제거 - 잡쇠구멍 슬래그 막혀 쇠창으로 뚫음 - 슬래그 점성 높고 유동성 낮음, 슬래그 속 선철방울 튼									
15:00	• 광석 장입					10	130			
15:02	• 판장쇠바탕 설치 -15:30 출탕예정									
15:10	• 목탄 장입	20			780					
15:20	• 중부온도가 하부 온도 역전									
15:23	• 1차 선철 출탕 - 유동성 낮음, 판장쇠바탕 덜 채워짐									

시간	조업내용	목탄(kg)				광석(분광) (kg)		첨가제 (슬래그)(kg)		비고
		대탄	중탄	소탄	총량	투입량	총량	투입량	총량	
15:26	• 슬래그 장입									
15:27	• 첨가제(슬래그) 장입							1	14	
15:29	• 광석 장입					10	140			
15:30	• 초롱구멍으로 슬래그와 선철 혼합된 상태로 유동성 떨어지게 출탕									
15:33	• 초롱구멍 점토로 막음	20			800					
15:34	• 목탄 장입									
15:35	• 골구멍 개방 -슬래그 제거									
15:36	• 첨가제(슬래그) 장입							1	15	
15:38	• 광석 장입					10	150			
15:41	• 목탄 장입		20		820					
15:43	• 첨가제(슬래그) 장입							1	16	
15:45	• 광석 장입					10	190			
15:56	• 목탄 장입	20			840					
15:57	• 첨가제(슬래그) 장입							1	17	
15:59	• 광석 장입					10	170			
16:10	• 골구멍 개방 -슬래그 제거									
16:12	• 목탄 장입		20		860					
16:14	• 첨가제(슬래그) 장입							1	18	
16:16	• 광석 장입					10	180			
16:24	• 목탄 장입	20			880					
16:27	• 첨가제(슬래그) 장입 종료							1	19	
16:29	• 광석 장입					10	190			
16:32	• 골구멍 개방 -슬래그 제거									
16:38	• 목탄 장입		20		900					
16:46	• 광석 장입 • 골구멍 개방 -슬래그 제거					10	200			
16:40 ~50	• 잡쇠구멍 개방 - 슬래그 잡쇠구멍 막음 - 쇠창 1개 굽기 정도 잡쇠구멍 뚫었으나 슬래그 묻어나오지 않음 - 잡쇠구멍 하위에 다른 구멍 뚫기									
16:56	• 목탄 장입	20			920					
16:54 ~59	• 새로 뚫은 잡쇠구멍으로 유동성 없는 슬래그 소량 유출									
16:58	• 광석 장입					10	210			
17:02	• 골구멍 개방 -슬래그 제거									
17:16	• 목탄 장입 • 판장쇠바탕 설치	20			940					2차 출탕준비
17:19	• 광석 장입					10	220			

시간	조업내용	목탄(kg)				광석(분광) (kg)		첨가제 (슬래그)(kg)		비고
		대탄	중탄	소탄	총량	투입량	총량	투입량	총량	
17:30 ~40	• 초롱구멍 개방 시작 • 2차 선철 출탕 – 유동성 양호, 판장바탕 채우지 못함									
17:39	• 목탄 장입									
17:41	• 광석 장입 – 3차 출탕 20:30 예정	20			960					
17:54	• 2차 출탕 시 슬래그 출탕 양호하지 않음, 잡쇠구멍 다시 뚫음 – 3차 판장쇠를 제작(이동식)					10	230			
18:03	• 목탄 장입									
18:06	• 광석 장입		20		980					
18:18	• 잡쇠구멍으로 선철 소량 출탕					10	240			
18:22	• 목탄 장입	20			1000					
18:24	• 광석 장입 완료					10	250			
18:44	• 목탄 장입	20								• 대탄100kg 장입 노 내 광석 환원
18:59	• 골구멍 뚫기									
19:00	• 목탄 장입	20			1060					
19:00 ~ 19:30	• 회의									
19:20	• 목탄 장입	20			1080					
19:30	• 골구멍 개방 -슬래그 역류 확인 • 잡쇠구멍 뚫어 슬래그 유출 시도									
19:35	• 잡쇠구멍 뚫음 -슬래그 유출되지 않음, 쇠창에 유동성 없는 슬래그 묻어나옴									
19:40	• 목탄 장입	20			1100					
19:42	• 잡쇠구멍 계속 뚫음 -소량의 선철 출탕									
19:50	• 골구멍 개방 -슬래그 역류로 송풍 어려움									
20:00	• 목탄 장입	20								
20:15	• 판장쇠바탕 설치									
20:29	• 3차 선철 출탕 시도 – 초롱구멍 뚫기 시작 – 초롱구멍 선철 냉각되어 뚫리지 않음									
20:39	• 초롱구멍 상위 아래쪽, 사선으로 구멍 뚫어 선철 출탕 시도→출탕되지 않음									
20:43	• 초롱구멍 뚫리지 않는 긴급상황회의 – 초롱구멍하단부 바닥에서 뚫기 시도→출탕되지 않음									
20:52	• 잡쇠구멍 상위 구멍 뚫기 시도→ 슬래그, 선철 출탕되지 않음									

시간	조업내용	목탄(kg)				광석(분광) (kg)		첨가제 (슬래그)(kg)		비고
		대탄	중탄	소탄	총량	투입량	총량	투입량	총량	
20:59 ~ 21:05	• 잡쇠구멍 하위 구멍 뚫기 시도→ 슬래그, 선철 출탕되지 않음									
21:06	• 여러 가지 시도에도 선철출탕 안됨, 긴급회의진행 - 6월 앞창 해체 시 선철괴 꼬집어내 는 것으로 결정 - 앞창 상단 150cm 정도 해체 시도									
21:08	• 조업중단, 온도계 철거									
총장입량		860	200	40	1,100		250		19	
• 총 조업시간(08:08~21:08)										

2 2023 울산 쇠부리 제철복원 실험의 금속학적 분석 및 고찰

신경환(금속기술연구소 소장)

이재용(금속기술연구소 부장)

I. 분석대상 시료의 성격

1. 분석대상 시료의 성격

울산쇠부리 제9차 복원실험 결과에 대한 금속학적인 분석에 사용된 시료의 성격은 <표 1>과 같이 총 28개이며 시료 채취는 위치와 성격별로 구분하여 설정하였다. 송풍관의 용손원인을 확인하고자 용손주변부에서 4점의 시료(23U-1, 23U-2, 23U-3, 23U-4)가 수습되었다.

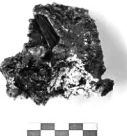
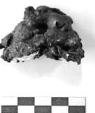
그리고 조업과정에서 채취된 2점의 초기유출재 시료(23U-5, 23U-6) 및 2점의 유출 선철(23U-7, 23U-8)과 1차 출탕 선철(23U-9A, 23U-9B) 2점 및 2차 출탕 선철(23U-10A)와 2차 출탕 철재(23U-10B, 23U-10C) 2점의 시료가 각각 수습되었다. 이와 더불어 출탕구 철재(23U-11) 및 출탕구 선철(23U-12), 출재구 철재(23U-13) 및 출재구 선철(23U-14)시료가 각각 1점씩 수습되었다.

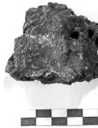
그리고 구형선철(23U-15)과 형성물 상부에 잔존하는 미환원 철광석(23U-16)시료가 각각 1점씩 수습되었고 노체 해체 후 노상에 잔존하는 슬래그/선철혼합괴를 파쇄하는 과정에서 앞쪽 중간층 철재(23U-17), 출재구쪽 철재(23U-18), 형성물 상부 철재(23U-19), 좌측하부 환원괴(23U-20) 및 노바닥 침투형성물(23U-21) 시료가 각각 1점씩 수습되었다.

송풍관 상부 노벽부의 용손을 확인하고자 송풍관 상부 용융부(23U-22)와 상부 40cm지점의 집중 용손 시료(23U-23)가 각각 1점씩 수습되었다.

이에 부가하여 안성주물 용범재료(23U-24) 및 노내벽 미장에 사용된 청도점토(23U-25)시료가 각각 1점씩 수습되었다.

〈표 1〉 분석대상 시료의 성격

시료번호	명칭	채취위치	크기(cm)			무게(g)	사진
			길이	너비	높이		
23U-1	용손 철재1	송풍관 주변 (초기)	8.5	6.5	4.0	126	
23U-2	용손 철재2	송풍관 주변 (중기)	8.5	8.0	2.7	98	
23U-3	용손 철재3	송풍관 주변 (후기)	5.0	3.0	2.0	25	
23U-4	용손 철재4	송풍관 주변 (후기)	9.5	6.0	4.0	118	
23U-5	유출재1	배재구앞	10.5	10.0	7.0	379	
23U-6	유출재2	배재구앞	10.5	8.0	3.0	347	
23U-7	유출 선철1	배재구앞	4.4	1.2	0.7	7	
23U-8	유출 선철2	배재구앞	7.5	4.2	0.7	75	

시료번호	명칭	채취위치	크기(cm)			무게(g)	사진
			길이	너비	높이		
23U-9A	출탕 선철1	1차 출탕	23.5	2.4	1.0	86	
23U-9B	출탕 철재1	1차 출탕	8.0	5.0	2.2	190	
23U-10A	출탕 선철2	2차 출탕	16.1	5.2	1.8	166	
23U-10B	출탕 철재2	2차 출탕	4.8	3.5	2.5	41	
23U-10C	출탕 철재3	2차 출탕	6.0	3.5	3.0	34	
23U-11	철재1	출탕구	4.0	3.0	2.0	21	
23U-12	선철1	출탕구	13.0	9.5	2.5	461	
23U-13	철재2	출재구	6.0	5.0	3.5	110	

시료번호	명칭	채취위치	크기(cm)			무게(g)	사진
			길이	너비	높이		
23U-14	선철2	출재구	10.5	6.0	5.0	493	
23U-15	구형선철	노내	1.5	1.0	1.0	7	
23U-16	미환원 철광석	상부	7.5	3.5	3.3	76	
23U-17	철재3	앞쪽 중간	10.5	7.5	6.0	261	
23U-18	철재4	출재구	8.5	5.0	4.0	111	
23U-19	철재5	상부	16.5	9.5	4.5	616	
23U-20	형성물 1	좌측 하부	4.0	3.3	2.5	24	
23U-21	형성물 2	노바닥 침투	4.0	2.5	1.0	10	

시료번호	명칭	채취위치	크기(cm)			무게(g)	사진
			길이	너비	높이		
23U-22	송풍관 용융 철재	송풍관 상부	5.0	5.0	4.5	130	
23U-23	노벽 용융부	송풍관쪽	7.5	6.0	4.5	166	
23U-24	안성주물 주물사 (혼합사)	실험전	-	-	-	-	
23U-25	청도 점토	실험전	-	-	-	-	

II. 분석 방법

시료의 조직분석에는 금속현미경(Nikon MA200)을, 조직의 정성분석에는 주사전자현미경(SEM)-에너지분산분석기(EDX) 분석(hitachi SU-1500)을, 정량분석에는 X선형광분석(XRF) 및 C/S분석을 활용하였다. 미세조직의 경도 측정은 마이크로 비커스 경도기(Mitutoyo HV-112)를 활용하였다.

조직분석을 위한 시편 제작과 분석절차는 다음과 같다. 먼저, 유물에서 채취된 분석시료는 대부분 소형이기 때문에 작업의 편의를 위해 Acrylic Resin으로 Mounting하였다.

Mounting된 시편은 Polishing 과정에서 #400~#1,200까지 3~4단계의 연마지로 연마한 다음, 3 μ m 및 1 μ m Diamond Compound로 미세하게 연마해 시편을 완성하였다.

이 시편을 나이탈 용액(질산 3%, 에탄올 97%)으로 부식시켜 조직이 확연히 구분되게 하였고, Nikon MA200 금속현미경을 이용해 미세조직을 관찰한 후 특이조직에 대하여 주사전자현미경(hitachi SU-1500)을 통해 재조사하였다.

SEM촬영을 위해서 코팅기(HITACHI E1010)를 이용해 시편의 표면을 코팅하였다. SEM에서 관찰

된 각 조직에 대해서 EDX분석기를 사용하여 조직 내 성분을 파악하였다.

X선형광분석을 통한 시료의 정량적 분석을 위해서는 유물에서 채취된 시료를 먼저 Gyrat Grinder로 분쇄하였다. 이렇게 얻어진 시편가루를 200메쉬의 체로 걸러 50 μm 이하의 분말로 만들고, 이를 150 $^{\circ}\text{C}$ 건조기에서 90분 동안 건조시켰다. 시료분말, Flux(Li3B4O7) 및 Binder(C80, H159O53B)를 5:2:3의 비율로 섞어 알루미늄 캡에 넣고 40톤의 압력으로 압축시켜서 Pressed Pellet를 완성하였다.

III. 분석결과

1. 송풍관 용손(23U-1,2,3,4)

1.1 용손철재1 (23U-1)의 분석결과

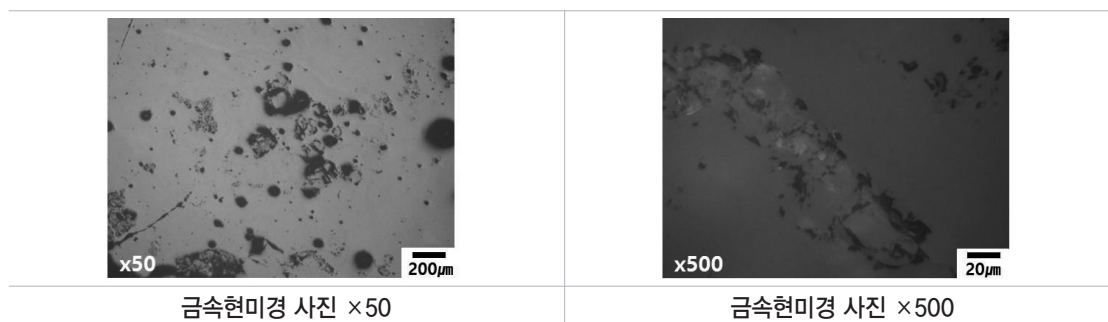
1) 시료의 채취

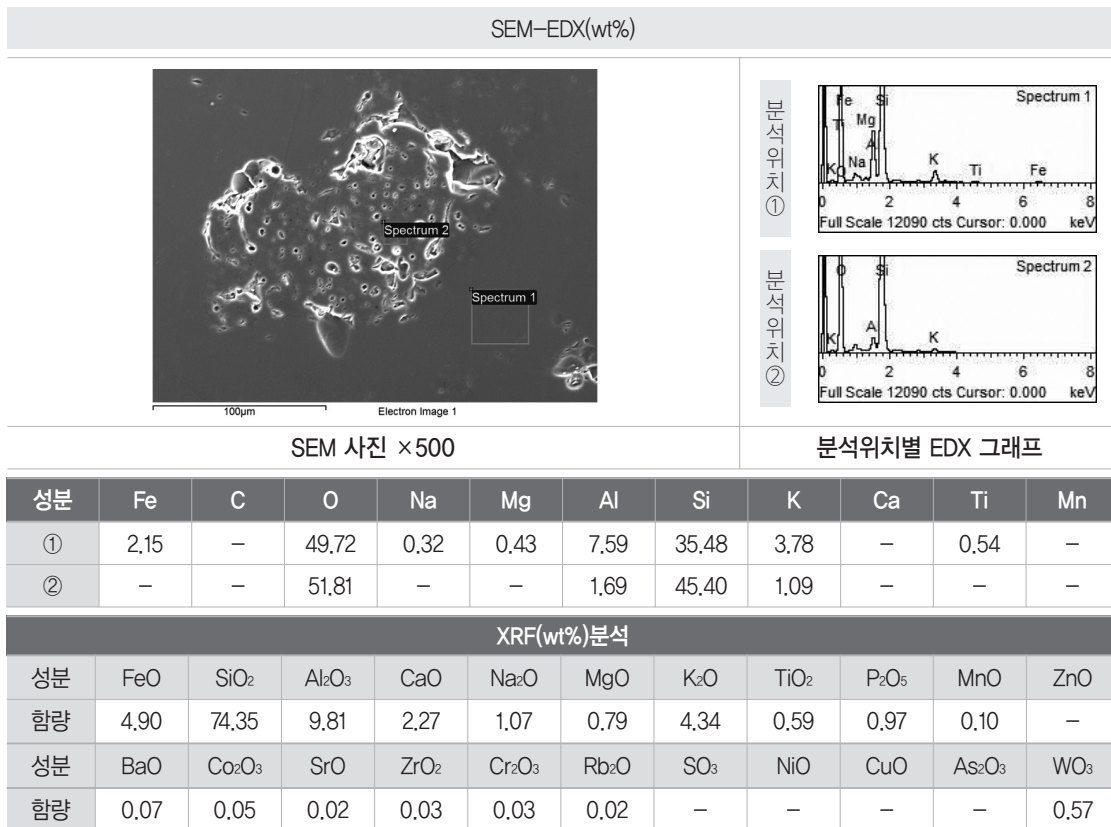


〈사진 1〉 용손철재1 (23U-1)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 2〉 용손철재1 (23U-1)의 분석결과





송풍관 용손물 철재(23U-1)의 XRF분석결과 주성분이 (74.35%SiO₂+9.81%Al₂O₃)로서 일반적인 점토질 성분으로 구성되어 있었으며 특이한 사항은 알칼리 산화물(4.34%K₂O+1.07%Na₂O)이 함유되어 있었다.

용손물의 현미경조직은 슬래그상을 보이고 있으며 이에 대한 SEM-EDX분석결과에 의하면 기지조직(Spectrum-①)은 점토질성분으로서 XRF분석과 같으며 Spectrum-②의 특이조직은 규사질 성분을 보이고 있었다.

1.2 용손철재2 (23U-2)의 분석결과

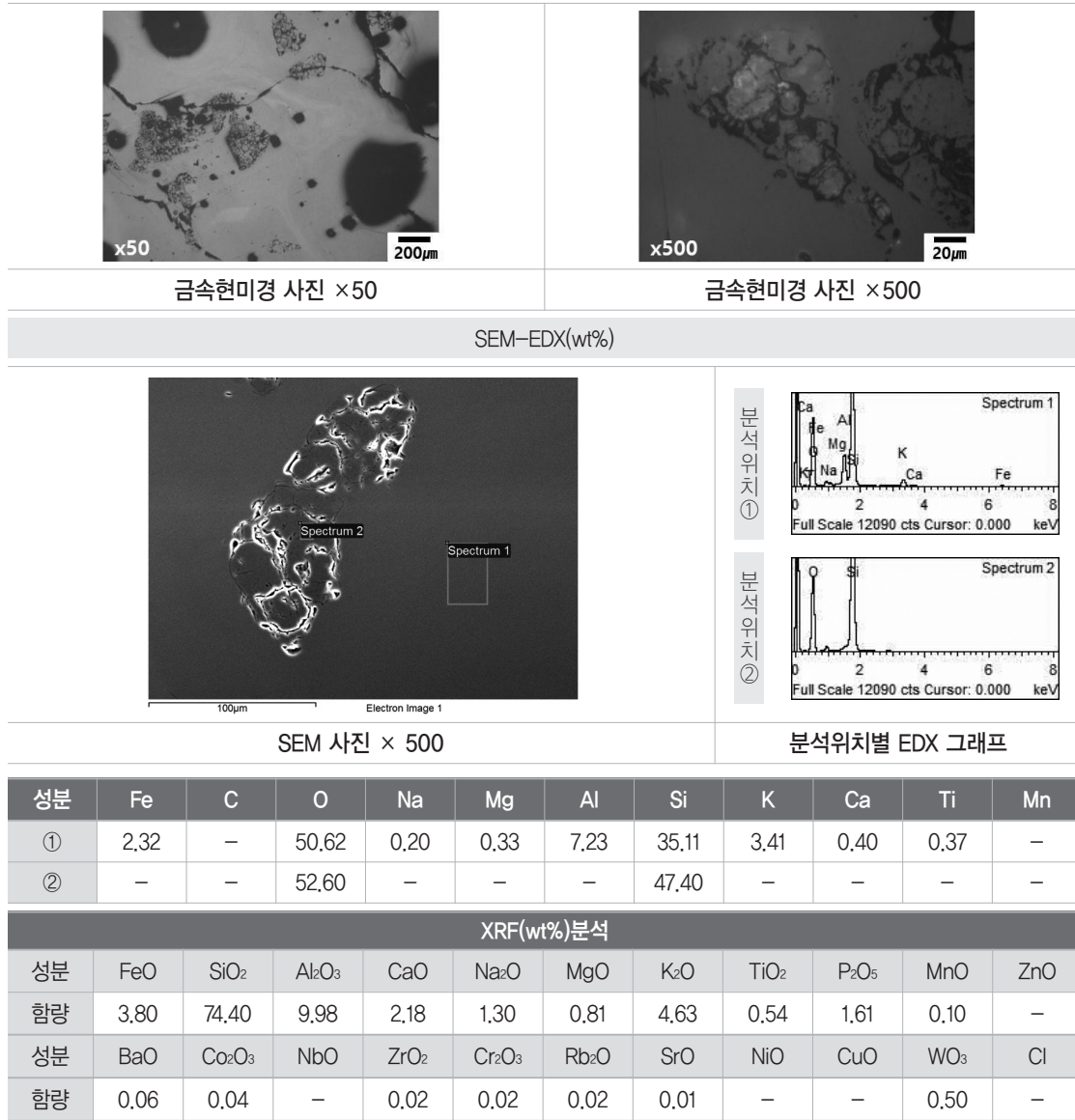
1) 시료의 채취



〈사진 2〉 용손철재2 (23U-2)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 3〉 용손 철재2(23U-2)의 분석결과



송풍관 용손물(23U-2)의 XRF분석결과 주성분이 (74.40%SiO₂+9.98%Al₂O₃)로서 일반적인 점토질 조성을 갖고 있으며 특이한 조성은 알카리 산화물(4.63%K₂O)이 잔존하고 있는 것이다.

용손물의 현미경 조직은 용융슬래그상이며 이에대한 SEM-EDX분석 결과에 의하면 기지조직은 점토질 조성상과 유사하고 특이조직(Spectrum-②)은 대부분 규사질의 주성분을 나타내고 있었다.

1.3 용손철재3 (23U-3)의 분석결과

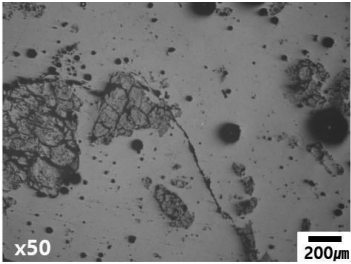
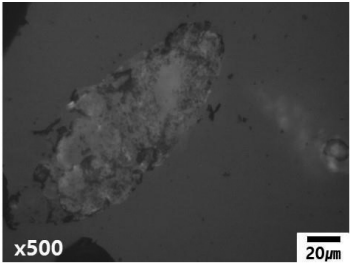
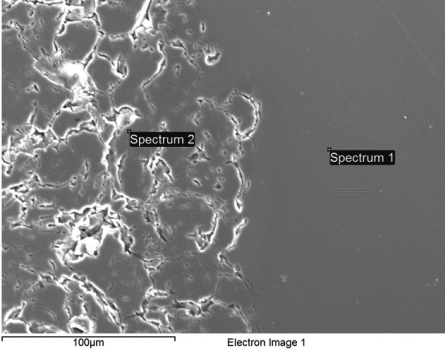
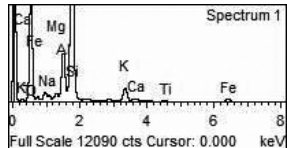
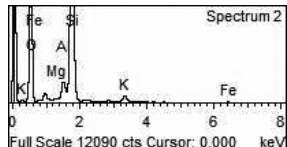
1) 시료의 채취



〈사진 3〉 용손철재3 (23U-3)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 4〉 용손 철재3(23U-3)의 분석결과

	
금속현미경 사진 ×50	금속현미경 사진 ×500
SEM-EDX(wt%)	
	분석위치 ①  분석위치 ② 
SEM 사진 ×500	분석위치별 EDX 그래프

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	4.11	—	50.06	0.11	0.90	6.80	32.77	4.27	0.66	0.32	—
②	1.06	—	51.76	—	0.25	2.17	42.84	1.92	—	—	—

XRF(wt%)분석											
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
함량	23.03	51.72	7.74	4.13	1.87	4.92	3.27	0.46	1.20	0.62	—
성분	BaO	Co ₂ O ₃	NbO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	SrO	WO ₃	Cl
함량	0.05	0.09	—	0.02	0.02	0.02	—	—	0.02	0.83	—

송풍관 용손철재(23U-3)의 XRF분석결과 주성분이 (51.72%SiO₂+7.74%Al₂O₃)로서 전형적인 점토질 조성을 나타내고 있었다.

용손 철재의 현미경조직은 일반적인 슬래그상이었으며 이에 대한 SEM-EDX분석에서 기지조직은 점토질과 유사(Spectrum-①)하며 특이조직(Spectrum-②)은 대부분 규사질로 나타났다.

1.4 용손철재4 (23U-4)의 분석결과

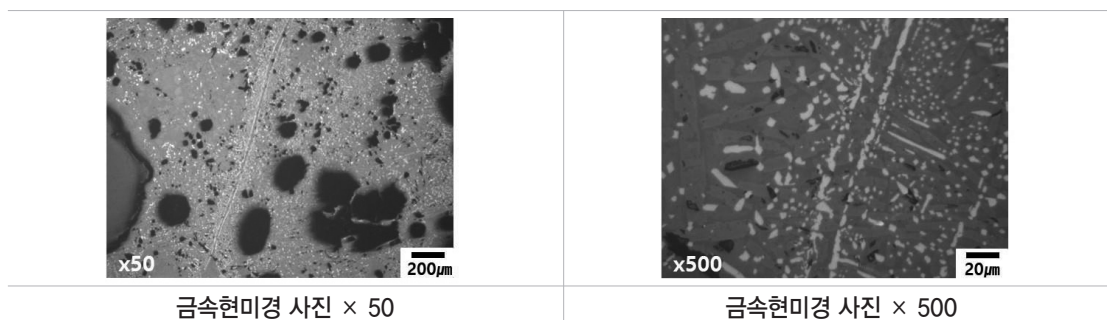
1) 시료의 채취

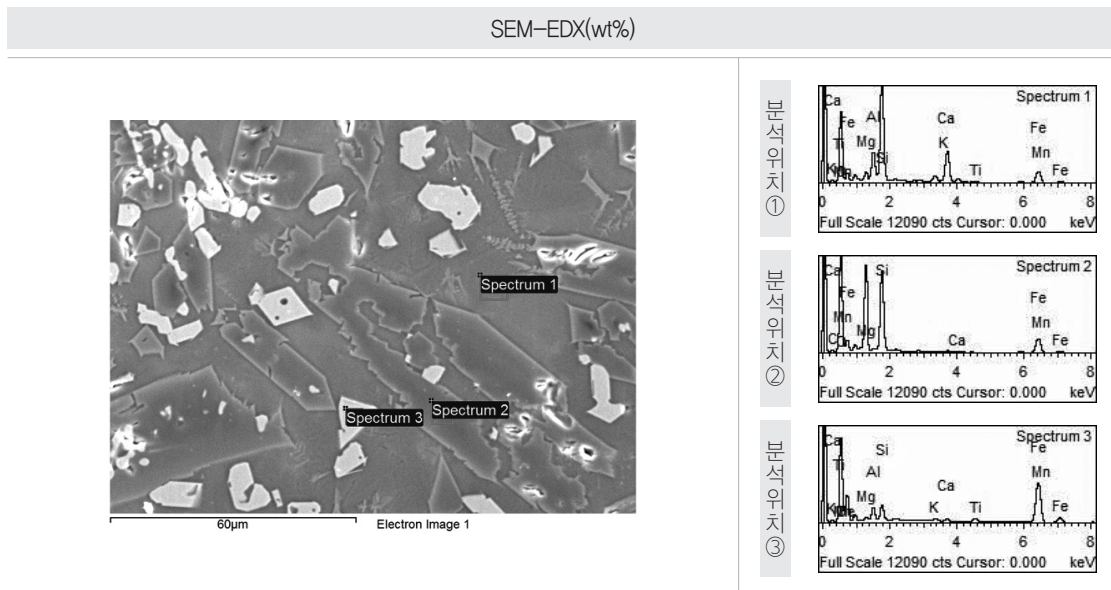


사진 4) 용손철재4 (23U-4)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 5〉 용손철재4 (23U-4)의 분석결과





SEM 사진 × 1000												분석위치별 EDX 그래프											
성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn												
①	16.52	—	41.60	—	1.63	4.94	20.38	1.96	11.77	0.52	0.68												
②	20.25	3.71	39.14	—	18.07	—	17.18	—	0.47	—	1.18												
③	57.31	—	30.77	—	0.87	3.12	3.46	0.75	0.79	2.25	0.67												

XRF(wt%)분석											
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
함량	33.49	35.11	4.44	7.36	0.51	13.56	1.88	0.74	1.02	1.32	—
성분	BaO	Co ₂ O ₃	SrO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	WO ₃	Cl
함량	—	0.09	0.02	0.03	—	0.01	0.06	—	—	0.36	—

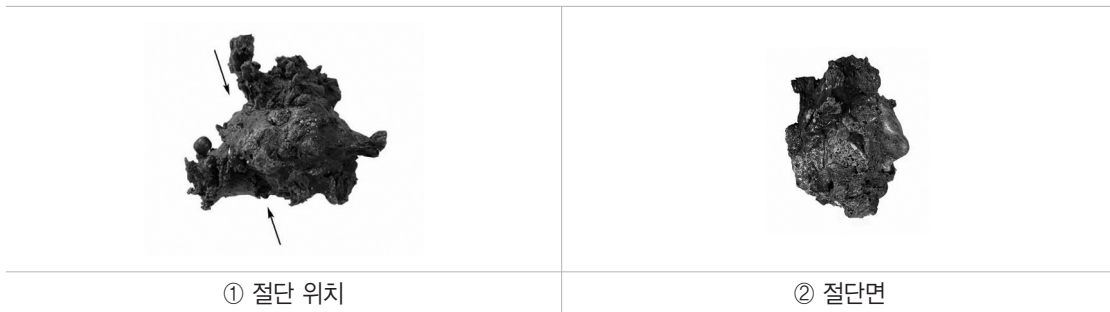
용손철재(23U-4)의 XRF분석결과 조제성분(13.56%MgO+7.36%CaO)를 함유하고 있으며 주성분은 Wüstite(33.49%FeO)으로 구성되어 있어서 복원실험에 사용되는 철광석의 조성을 나타내고 있다.

철재의 현미경조직은 용융된 슬래그상이며 조직내에 Wüstite가 다량 석출(Spectrum-③)되어 있으며 염기성 산화물로서 MgO도 다량 검출되고 있었다.

2. 유출 형성물

2.1 유출재1 (23U-5)

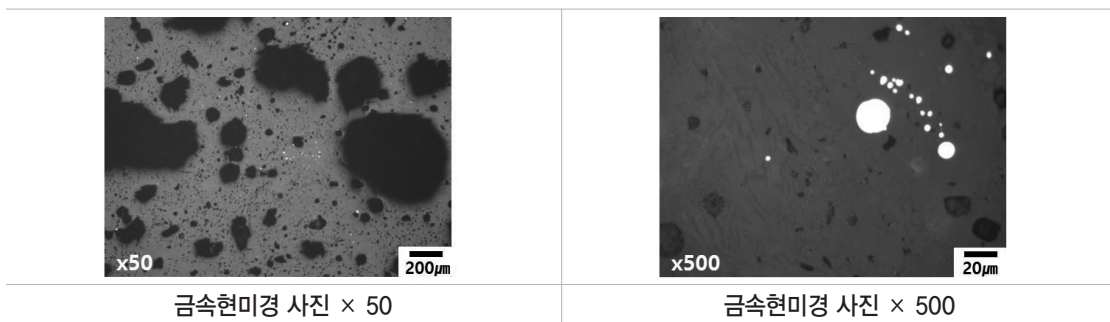
1) 시료의 채취



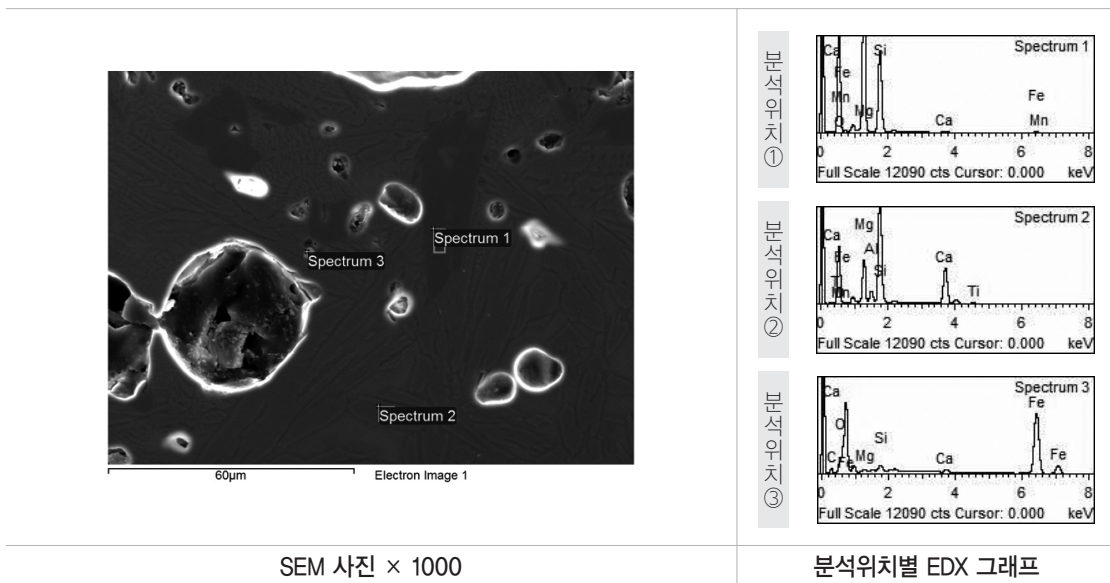
〈사진 5〉 유출재1 (23U-5)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 6〉 유출재1 (23U-5)의 분석결과



SEM-EDX(wt%)



성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	2.14	—	44.22	—	31.10	—	20.87	—	0.68	—	1.00
②	0.93	—	44.81	—	9.32	2.21	24.73	—	16.57	0.73	0.66
③	86.78	5.79	4.15	—	0.63	—	1.41	—	1.24	—	—

XRF(wt%)분석											
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
함량	4.29	46.65	6.26	15.28	0.50	18.71	3.01	1.13	0.34	1.98	—
성분	BaO	Co ₂ O ₃	SrO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	WO ₃	Cl
함량	—	0.11	0.07	0.04	0.02	0.01	0.13	0.03	—	1.45	—

초기 유출재1(23U-5)의 XRF분석결과(18.71%MgO+15.28%CaO)를 다량 함유하는 것으로 미루어 양양산 철광석 성분과 유사한 유출재이다.

유출재의 현미경 조직은 기지조직은 슬래그 조직이지만 다량의 탄화물(Fe-C)을 Spectrum-③에서 형성되어 있음을 확인 할 수 있었다.

2.2 유출재2 (23U-6)

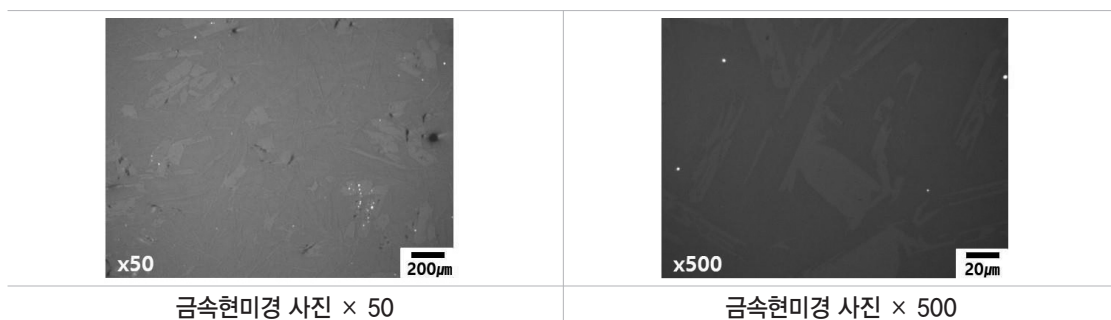
1) 시료의 채취



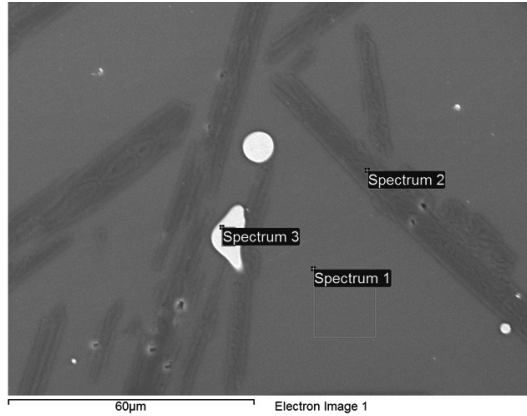
〈사진 6〉 유출재2 (23U-6)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

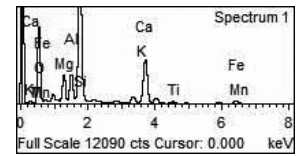
〈표 7〉 유출재2 (23U-6)의 분석결과



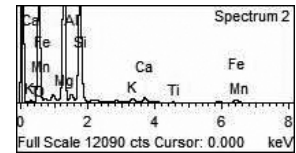
SEM-EDX(wt%)



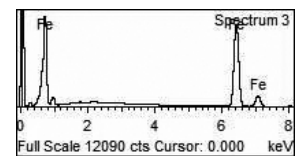
분석위치 ①



분석위치 ②



분석위치 ③



SEM 사진 × 1000

분석위치별 EDX 그래프

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	4.00	—	44.02	—	4.55	4.13	23.81	1.83	15.06	0.88	1.73
②	4.73	—	44.03	—	24.46	1.13	21.18	1.01	1.66	0.21	1.58
③	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

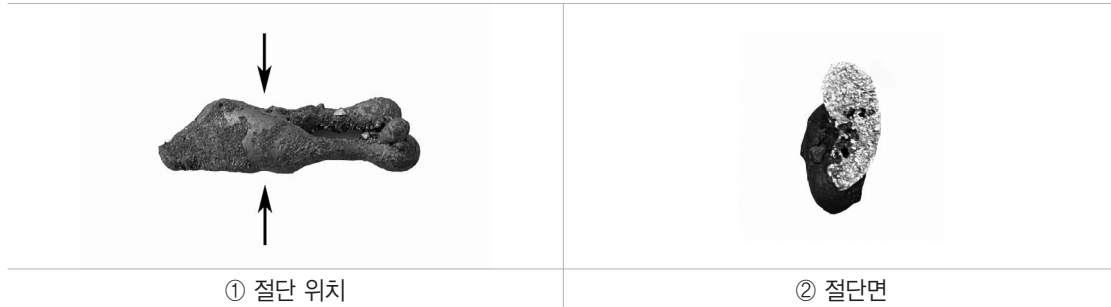
XRF(wt%)분석

성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
함량	6.52	46.78	6.06	12.33	0.45	20.78	2.82	1.16	0.35	2.17	—
성분	BaO	Co ₂ O ₃	SrO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	WO ₃	Cl
함량	—	0.04	0.04	0.04	0.02	0.01	—	—	—	0.44	0.01

유출재2(23U-6)의 XRF분석결과 (20.78%MgO+12.33%CaO)를 다량 함유하여 양양산 철광석의 조성을 갖고 있었다. Wüstite(FeOx)가 낮아서 고염기성 슬래그에 대한 탈산효과가 나타나고 있으며 현미경조직은 비교적 균일한 슬래그가 형성되어 있으며 특이조직으로 SEM-EDX에서 MgO와 CaO가 다량 함유되어 있었다.

2.3 유출 선철1 (23U-7)

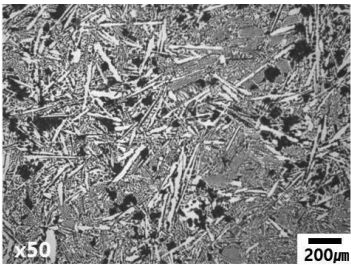
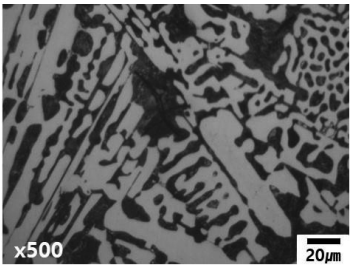
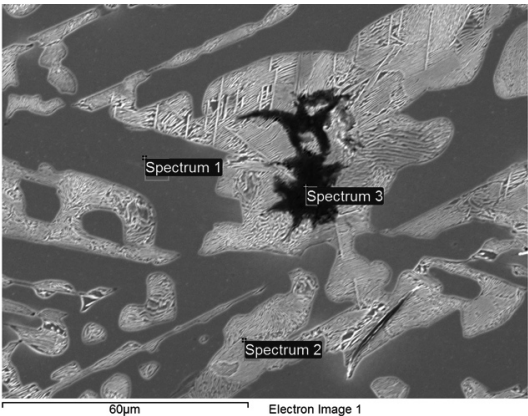
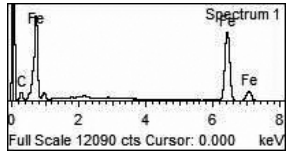
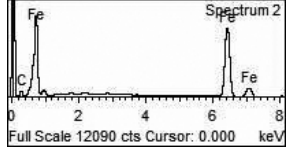
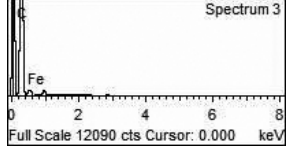
1) 시료의 채취



〈사진 7〉 유출 선철1 (23U-7)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 8〉 유출 선철1(23U-7)의 분석결과

	
금속현미경 사진 × 50	금속현미경 사진 × 500
SEM-EDX(wt%)	
	분석위치 ①  분석위치 ②  분석위치 ③ 
SEM 사진 × 1000	분석위치별 EDX 그래프

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	70.78	9.22	—	—	—	—	—	—	—	—	—
②	93.64	6.36	—	—	—	—	—	—	—	—	—
③	2.43	97.57	—	—	—	—	—	—	—	—	—

C/S(wt%)		
성분	C	S
조성	3.6	0.030

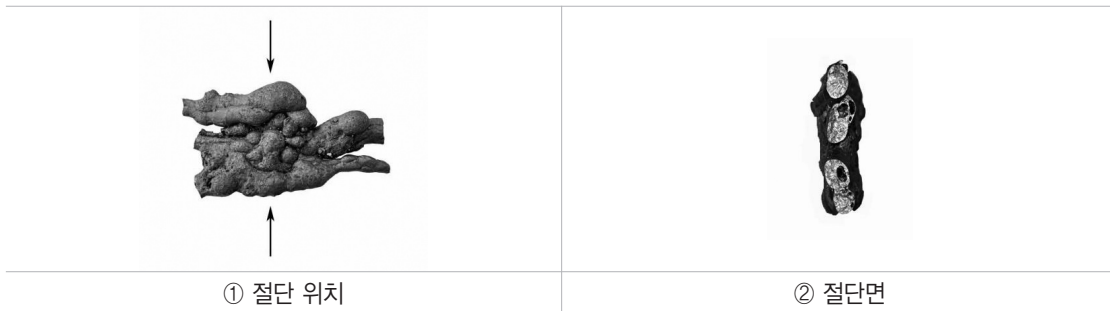
경도(HMV)				
회수	1	2	3	평균
Pearlite	205	208	199	204
Cementite	924	902	907	911

유출선철1(23U-7)의 현미경조직은 백주철의 기지조직에 Cementite가 석출되어 있는 Ledeburite 조직이다. 이에 대한 SEM-EDX 분석에서 기지조직은 Fe_3C 가 주성분이고 입계에는 흑연(Graphite)이 석출되고 있다. C/S분석결과 3.6%C로 아공정 선철의 조성을 갖고 있다.

현미경 경도는 Pearlite가 HMV204이고 Cementite가 HMV911로 나타나서 백주철의 조직임을 증명해 주고 있다.

2.4 유출선철2 (23U-8)

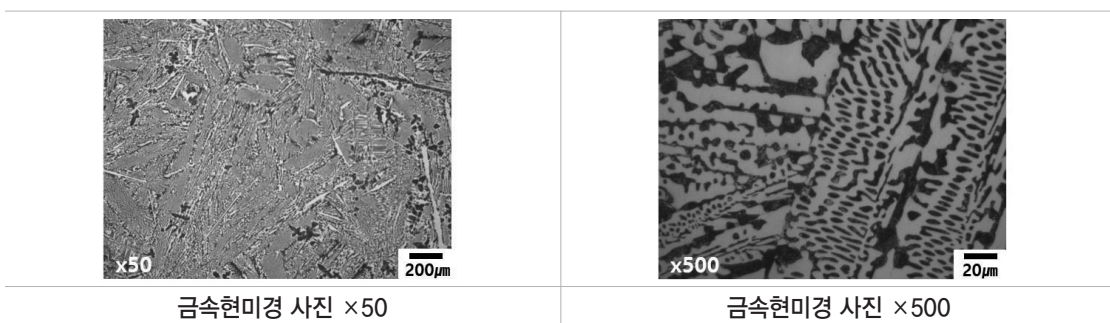
1) 시료의 채취

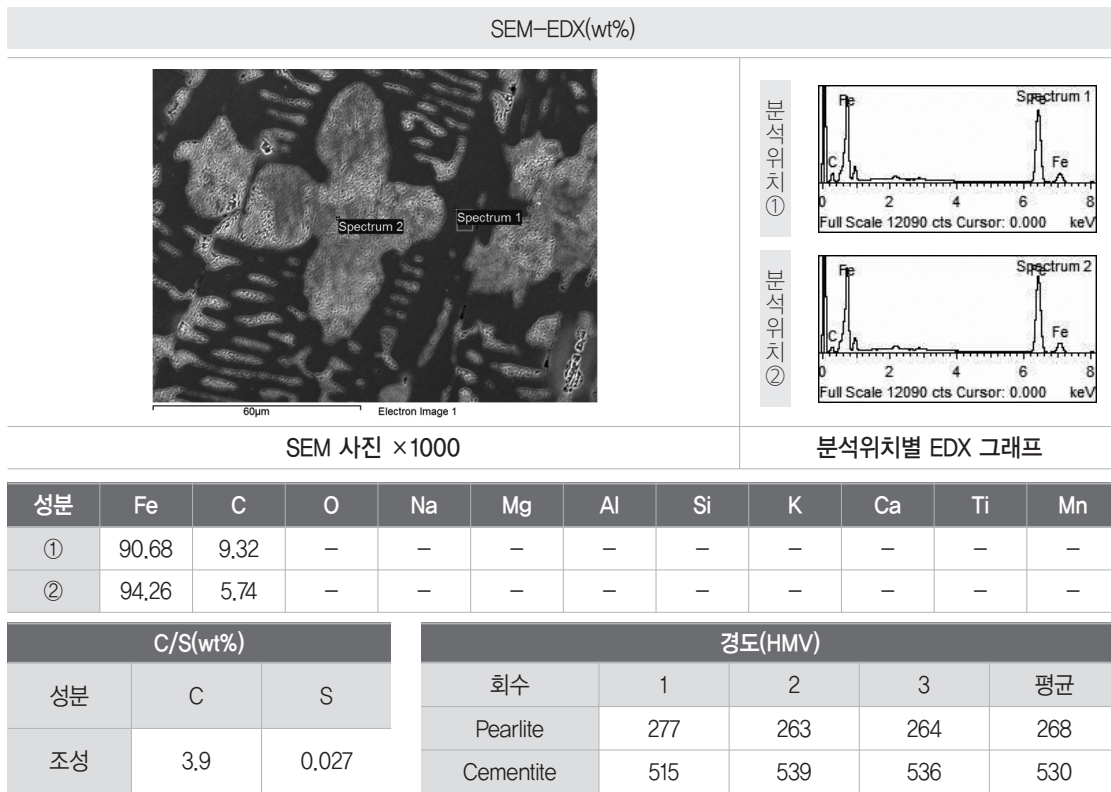


〈사진 8〉 유출선철2 (23U-8)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 9〉 유출선철2 (23U-8)의 분석결과





유출선철2(23U-8)의 현미경조직은 백주철의 기지조직에서 Fe_3C 가 석출되는 조직이며 SEM-EDX 분석에서는 Fe_3C 가 입계를 통하여 성장되어 Ledeburite 조직의 선철을 형성하고 있다. C/S분석결과 3.9%C로서 공정 선철의 조성을 갖는다. 현미경 경도는 Pearlite가 HMV268이고 Cementite가 HMV530로 나타나서 백주철의 조직의 경도분포를 나타내고 있다.

3. 출탕 형성물

3.1 출탕 선철1 (23U-9A)

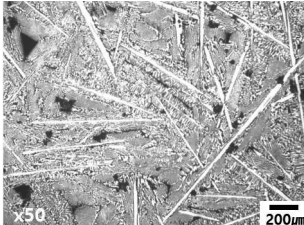
1) 시료의 채취



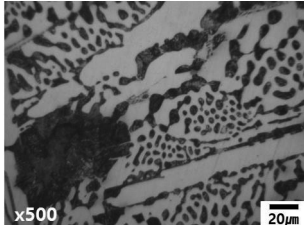
〈사진 9〉 출탕 선철1 (23U-9A)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 10〉 출탕 선철1 (23U-9A)의 분석결과

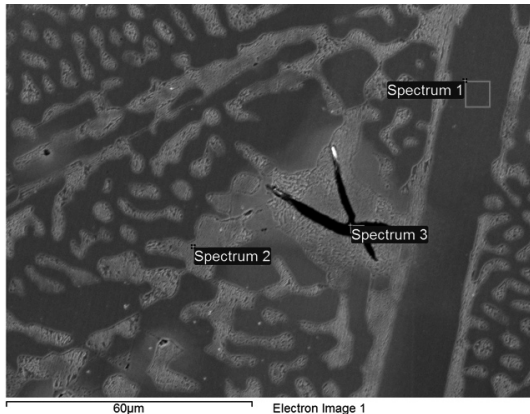


금속현미경 사진 × 50



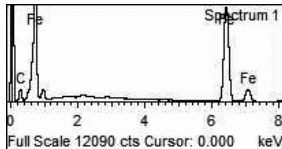
금속현미경 사진 × 500

SEM-EDX(wt%)

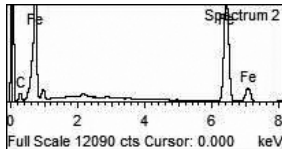


SEM 사진 × 1000

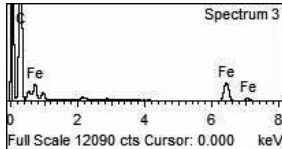
분석위치 ①



분석위치 ②



분석위치 ③



분석위치별 EDX 그래프

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	90.91	9.09	—	—	—	—	—	—	—	—	—
②	93.49	6.51	—	—	—	—	—	—	—	—	—
③	22.58	77.42	—	—	—	—	—	—	—	—	—

C/S(wt%)

성분	C	S
조성	3.5	0.013

경도(HMV)

회수	1	2	3	평균
Pearlite	352	349	341	347
Cementite	930	919	912	920

출탕시 채취한 선철1(23U-9A)의 현미경 조직은 선철 기조직으로서 입계에 탄화물(Fe_3C)이 석출되어 Ledeburite 조직을 형성하고 있었다. SEM-EDX 분석에서는 Spectrum-①,②에서 Fe_3C 가 형성되어 있고 Spectrum-③에서는 Cementite가 흑연화되는 것을 볼 수 있었다. C/S분석에서는 탄소의 조성은 3.5%C로서 아공정 선철을 보여주고 있다.

현미경 경도는 Pearlite가 HVM347이고 Cementite가 HVM920로 나타나서 백주철의 조직임을 증명해 주고 있다.

3.2 출탕 철재1 (23U-9B)

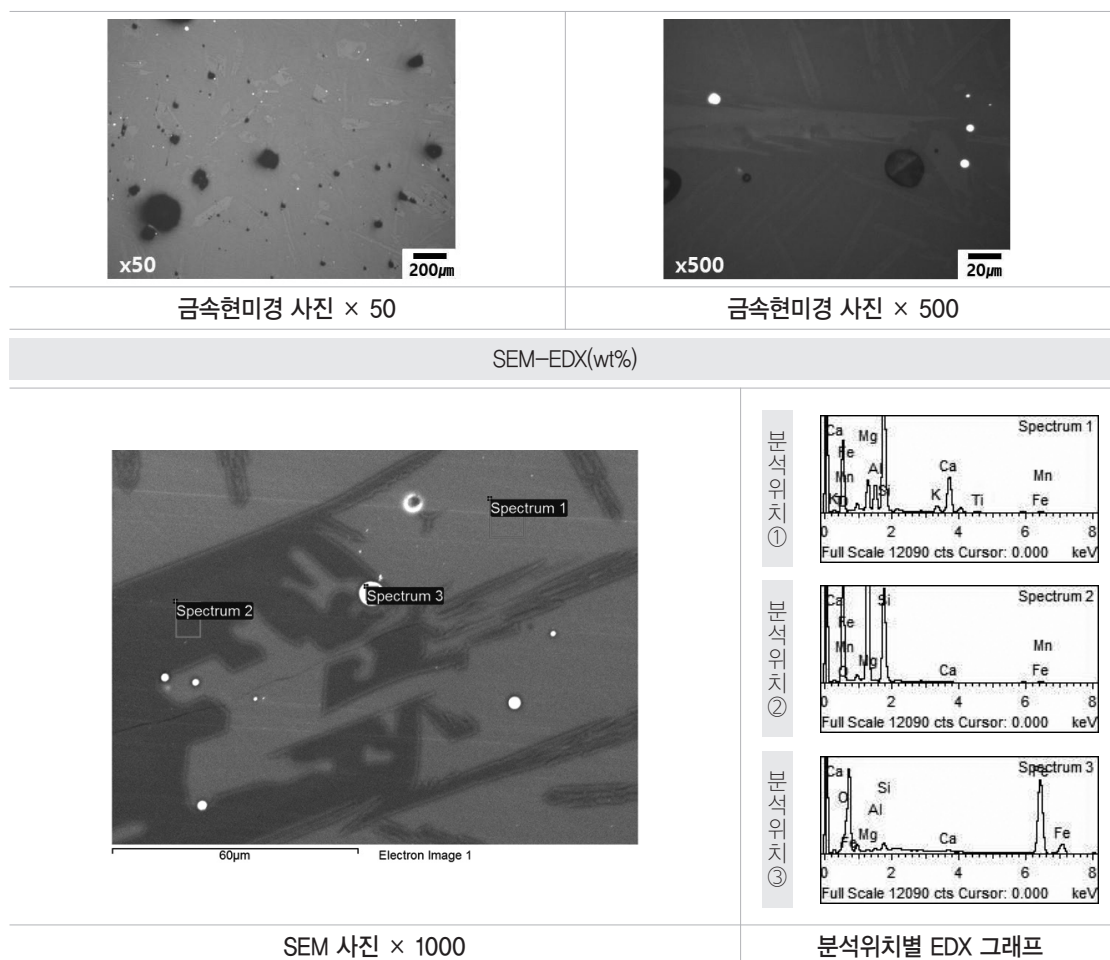
1) 시료의 채취



〈사진 10〉 출탕 철재1 (23U-9B)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 11〉 출탕 철재1(23U-9B)의 분석결과



성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	2.22	—	45.12	—	5.68	4.39	24.61	2.02	13.87	0.78	1.32
②	2.74	—	43.49	—	31.31	—	20.95	—	0.51	—	0.98
③	92.58	—	3.87	—	0.57	0.49	1.85	—	0.65	—	—

XRF(wt%)분석											
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
함량	4.41	49.73	6.74	12.06	0.56	19.26	3.17	1.19	0.10	1.98	—
성분	BaO	Co ₂ O ₃	SrO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	WO ₃	Y ₂ O ₃
함량	—	0.04	0.05	0.04	0.02	0.01	0.07	0.01	0.01	0.55	0.00

출탕 철재1(23U-9B)의 현미경조직은 기지조직이 유리질 슬래그 상이며 SEM-EDX분석에서는 CaO와 MgO이 다량 편석되어 있어서 양양산 철광석의 성분을 나타내고 있다. XRF분석에서도 SiO₂ 주성분의 슬래그에서 MgO와 CaO 산화물이 다량 함유 되어 있다.

3.3 출탕 선철2 (23U-10A)

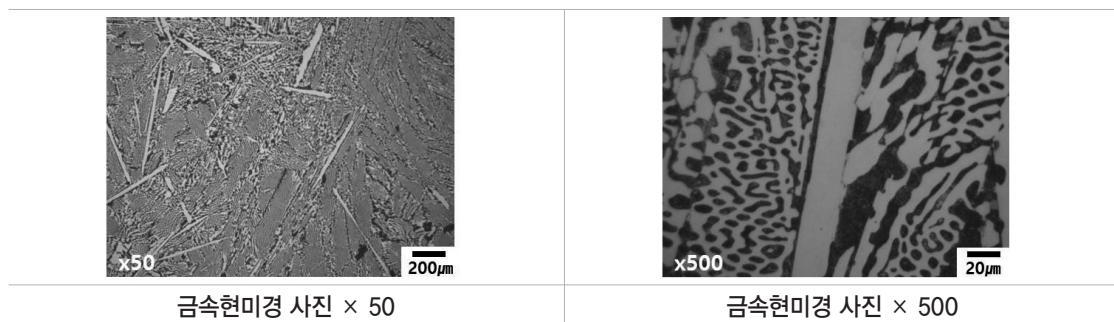
1) 시료의 채취

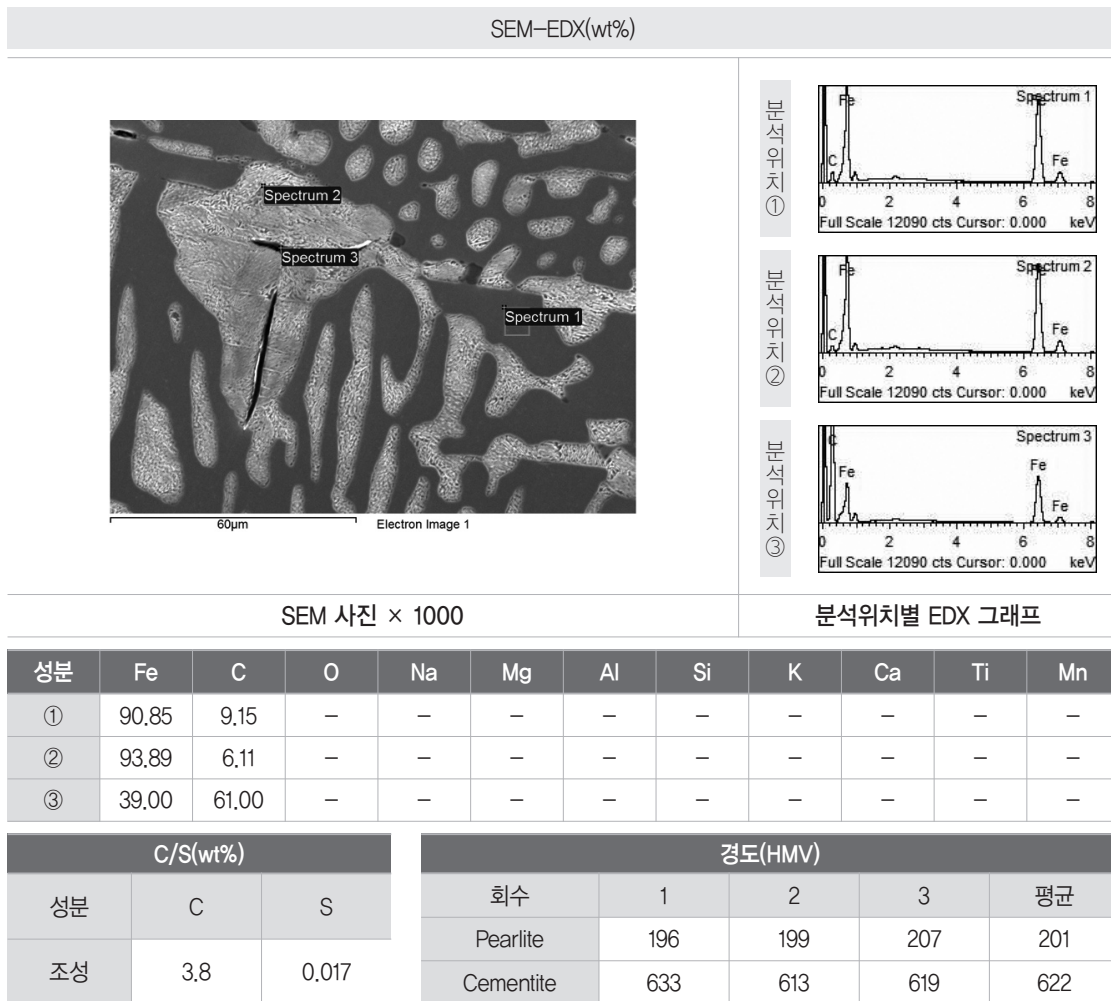


〈사진 11〉 출탕 선철2 (23U-10A)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 12〉 출탕 선철2 (23U-10A)의 분석결과





출탕선철2(23U-10A)의 현미경조직은 선철의 기지조직으로서 입계에 탄화물(Fe_3C)이 석출되어 Ledeburite 조직을 형성하고 있다. SEM-EDX분석에서는 Spectrum-①,②는 탄화물이 석출되어 있고 Spectrum-③에서는 Cementite가 석출되어 있다.

C/S분석에서는 3.8%C로서 공정 조성에 가까운 성분이며 공정선철의 조성이다.

현미경 경도는 Pearlite가 HMV201이고 Cementite가 HMV622로 나타나서 백주철의 조직임을 증명해 주고 있다.

3.4 출탕 철재2 (23U-10B)

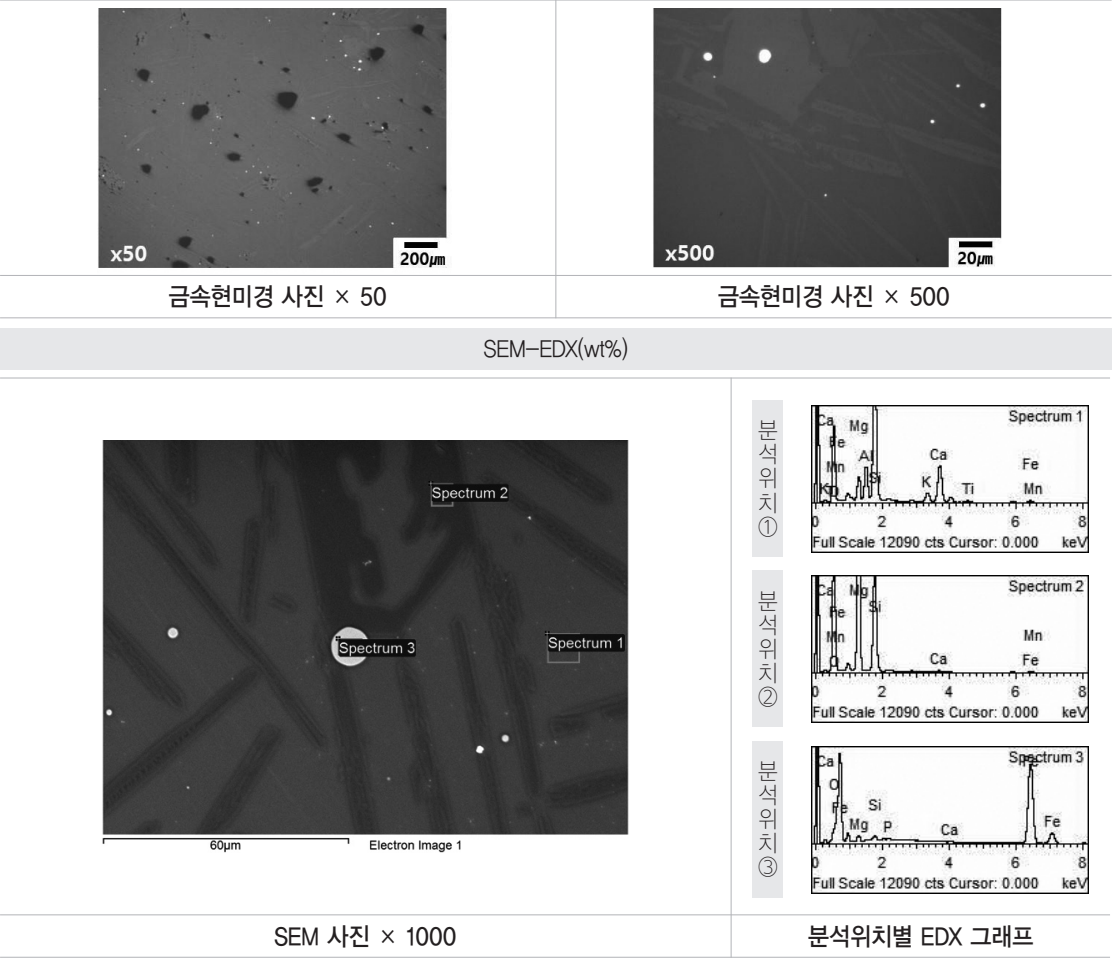
1) 시료의 채취



〈사진 12〉 출탕 철재2 (23U-10B)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 13〉 출탕 철재2 (23U-10B)의 분석결과



성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	P	Ti	Mn
①	2.74	—	44.64	—	3.99	5.25	25.40	2.74	13.07	—	1.29	0.89
②	2.24	—	43.54	—	31.36	—	21.10	—	0.52	—	1.24	—
③	93.26	—	3.39	—	1.88	—	1.06	—	0.27	—	—	—

XRF(wt%)분석											
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
함량	4.11	49.08	6.25	13.74	0.52	19.65	2.81	1.10	0.07	1.90	—
성분	BaO	Co ₂ O ₃	SrO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	WO ₃	Y ₂ O ₃
함량	—	0.04	0.05	0.03	0.02	0.01	0.09	0.01	—	0.52	0.00

출탕철재2(23U-10B)의 현미경조직은 유리질 슬래그상이 기지조직으로 형성되어 있으며 간헐적으로 구상의 Wüstite(FeOx)가 산재하고 있다.

SEM-EDX분석에서는 기지조직은 (CaO·SiO₂), (MgO·SiO₂)의 복합산화물이며 장주상의 조직에서도 같은 조성을 보여주고 있고 구형의 산화물은 Wüstite로 밝혀지고 있다.

XRF분석에서도 (MgO·SiO₂), (CaO·SiO₂)의 복합 산화물을 형성하고 있다.

3.5 출탕 철재3 (23U-10C)

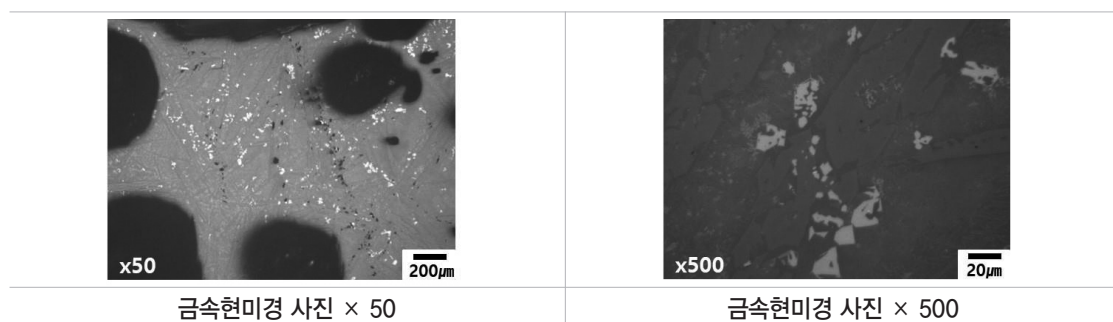
1) 시료의 채취

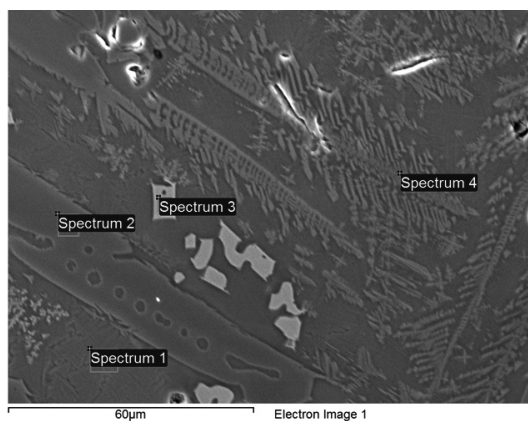


〈사진 13〉 출탕 철재3 (23U-10C)의 절단면 위치와 절단면

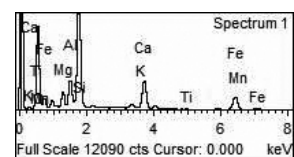
2) 분석결과

〈표 14〉 출탕 철재3 (23U-10C)의 분석결과

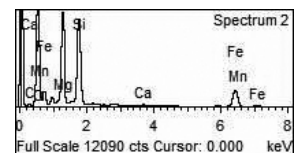




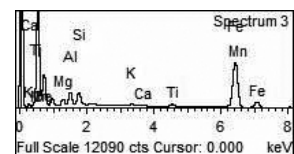
분석위치 ①



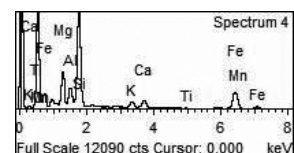
분석위치 ②



분석위치 ③



분석위치 ④



SEM 사진 × 1000

분석위치별 EDX 그래프

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	16.95	—	42.16	—	2.91	4.34	20.86	1.30	10.18	0.48	0.83
②	21.15	3.50	39.64	—	17.72	—	16.88	—	0.35	—	0.76
③	59.07	—	31.13	—	1.60	2.65	2.67	0.43	0.49	1.47	0.50
④	23.05	—	40.67	—	7.43	3.2	19.73	1.88	2.80	0.22	1.00

XRF(wt%)분석

성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
함량	31.05	39.25	5.80	7.19	0.72	10.13	2.45	0.81	0.27	1.20	—
성분	BaO	Co ₂ O ₃	SrO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	WO ₃	NbO
함량	—	0.10	0.04	0.04	—	0.01	0.05	—	—	0.90	—

출탕철재3(23U-10C)의 현미경조직은 전형적인 슬래그상이지만 XRF분석에 의하면 Wüstite(FeOx)가 주성분을 형성하고 MgO와 CaO와 같은 염기성 성분이 석출되어 있다.

SEM-EDX분석에서 Wüstite가 많은 슬래그(Spectrum-③)와 Wüstite가 낮은 슬래그(Spectrum-①, ②, ④)로 구분되고 있다.

4 철재 형성물

4.1 철재1 (23U-11)

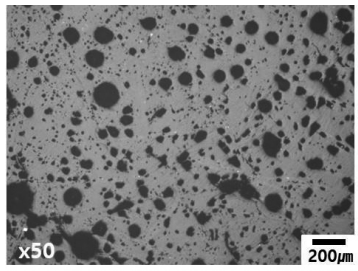
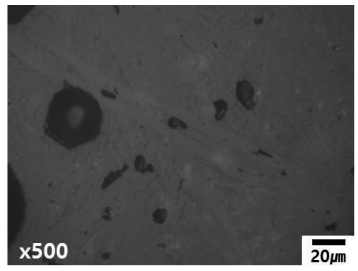
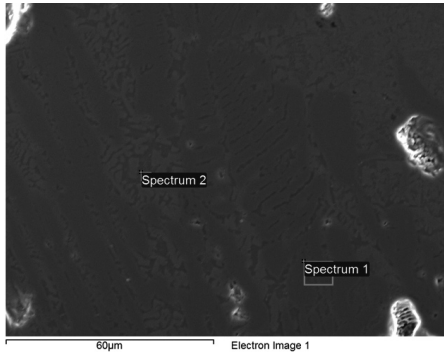
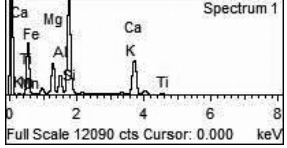
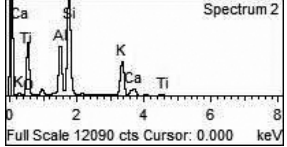
1) 시료의 채취



〈사진 14〉 철재1(23U-11)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 15〉 철재1(23U-11)의 분석결과

	
금속현미경 사진 ×50	금속현미경 사진 ×500
SEM-EDX(wt%)	
	분석위치 ①  분석위치 ② 
SEM 사진 × 1000	분석위치별 EDX 그래프

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	0.95	—	44.91	—	7.10	3.99	23.29	0.82	17.51	0.81	0.62
②	—	—	45.59	—	—	10.11	25.04	14.83	3.47	0.96	—

XRF(wt%)분석											
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
함량	2.82	44.19	5.98	23.95	0.44	16.15	2.32	1.05	0.22	1.69	—
성분	BaO	Co ₂ O ₃	NbO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	WO ₃	Y ₂ O ₃
함량	—	0.06	0.14	0.05	0.02	0.01	0.16	—	—	0.78	—

철재1(23U-11)의 현미경조직은 기지조직은 슬래그상이며 조직내부에 다량의 기공이 형성되어 있고 장주상의 슬래그상이 나타난다. SEM-EDX로 분석 결과 SiO₂, CaO, MgO산화물로 밝혀지고 있었다. XRF분석에서는 SiO₂, CaO, MgO 산화물로 나타나고 있으며 특히 FeO함량이 매우 낮은 것으로 미루어 탈산이 충분히 일어난 것임을 알 수 있겠다.

4.2 철재2 (23U-13)

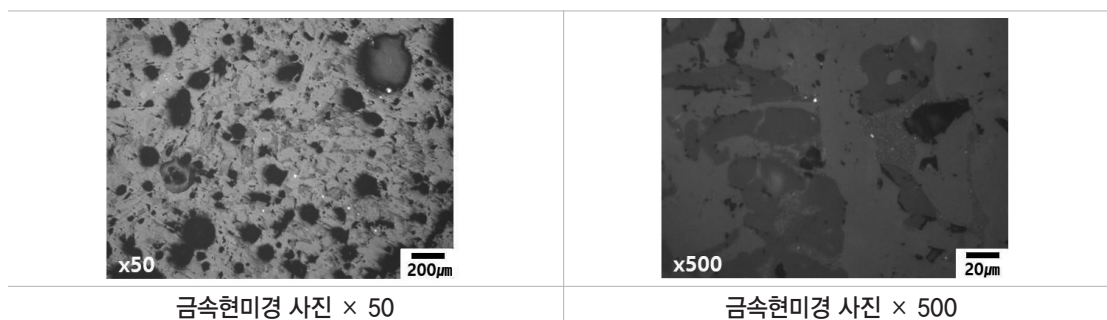
1) 시료의 채취



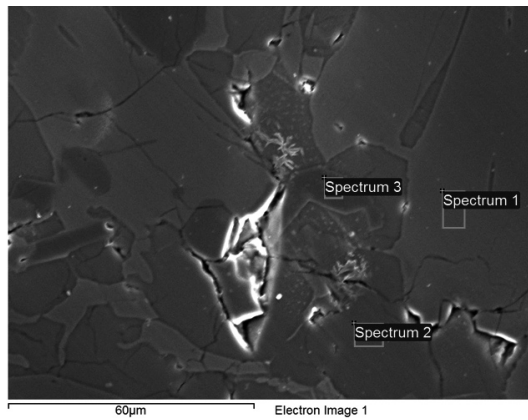
〈사진 15〉 철재2 (23U-13)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

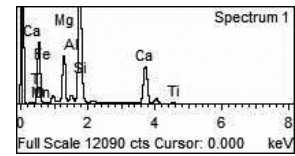
〈표 16〉 철재2 (23U-13)의 분석결과



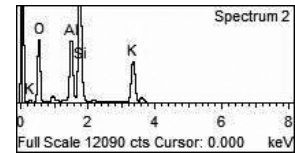
SEM-EDX(wt%)



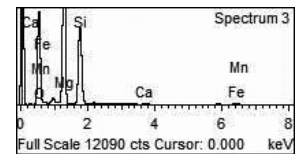
분석위치 ①



분석위치 ②



분석위치 ③



SEM 사진 × 1000

분석위치별 EDX 그래프

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Mn
①	0.85	—	44.55	—	9.70	1.37	25.50	—	—	16.56	0.60	0.88
②	—	—	44.33	—	—	11.50	26.85	—	17.33	—	—	—
③	3.87	—	42.92	—	30.06	—	20.92	—	—	0.58	—	1.65

XRF(wt%)분석											
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
함량	4.36	47.18	8.37	16.07	0.71	15.26	3.66	1.03	0.13	1.85	—
성분	BaO	Co ₂ O ₃	SrO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	WO ₃	Cl
함량	0.07	0.06	0.08	0.04	0.02	0.01	0.16	0.02	—	0.89	—

철재2(23U-13)의 현미경조직은 일반적인 슬래그상이나 다량의 구상개재물이 산재하고 있으며 이 개재물에 대한 SEM-EDX분석에서는 (CaO·SiO₂), (MgO·SiO₂)의 염기성의 산화물로 밝혀지고 있다.

이 슬래그의 XRF분석에서도 (CaO·SiO₂), (MgO·SiO₂)가 주성분을 이루고 있었고 FeO가 매우 낮은 것으로 미루어 슬래그의 탈산이 잘 이루어진 것으로 보인다.

4.3 철재3(23U-17)

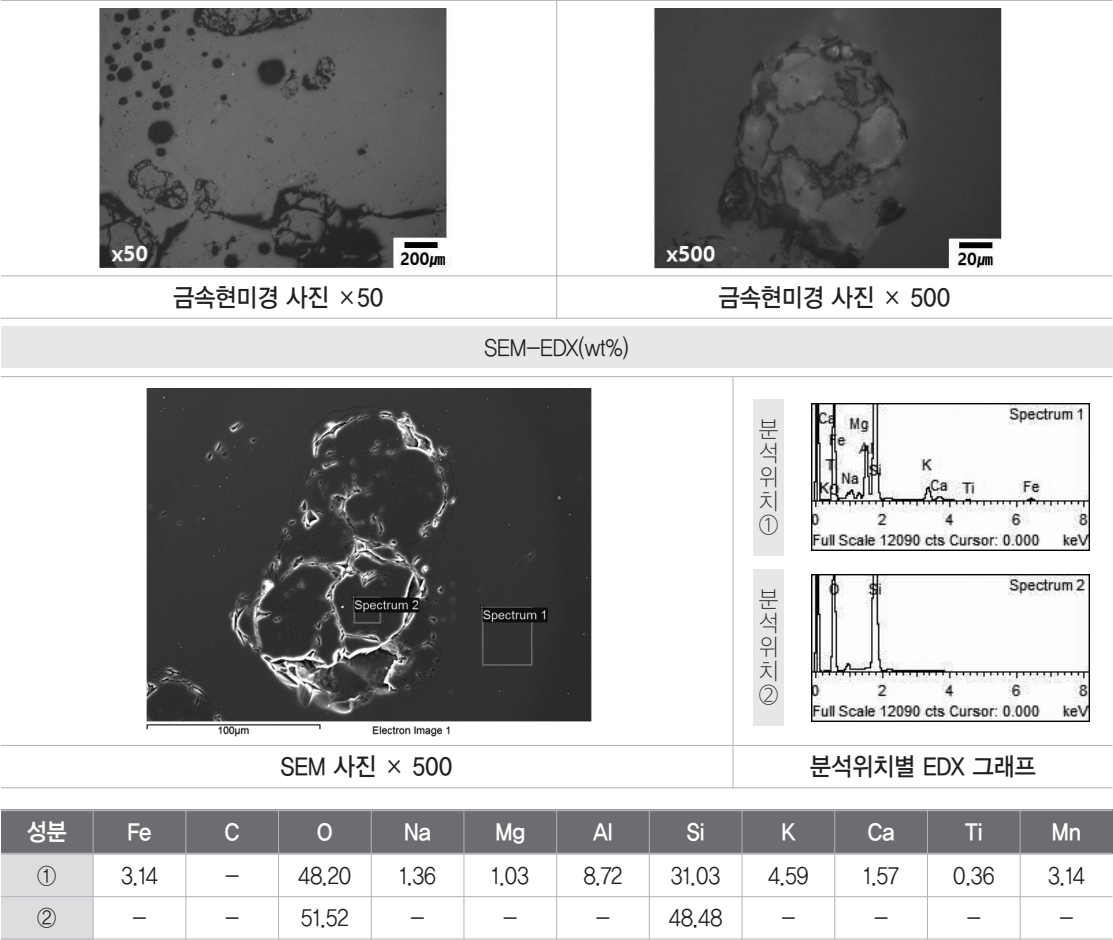
1) 시료의 채취



〈사진 16〉 철재3 (23U-17)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 17〉 철재3 (23U-17)의 분석결과



XRF(wt%)분석											
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
함량	4.33	72.91	10.76	1.73	1.94	1.44	5.27	0.53	0.10	0.17	—
성분	BaO	Co ₂ O ₃	SrO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	WO ₃	NbO
함량	0.02	0.05	0.02	0.03	0.02	0.03	—	—	—	0.64	—

철재3(23U-17)의 현미경조직은 일반슬래그 기지조직에서 대형개재물이 편석되고 있으며 이 대형개재물의 SEM-EDX분석에서는 SiO₂가 주성분이며 주변의 소형개재물은 알카리 산화물(K₂O)로 나타내고 있다.

슬래그의 XRF분석에서는 점토질(72.91%SiO₂+10.76%Al₂O₃)을 주성분으로 구성되고 철산화물과 알카리 산화물도 편석되어 있다.

4.4 철재4 (23U-18)

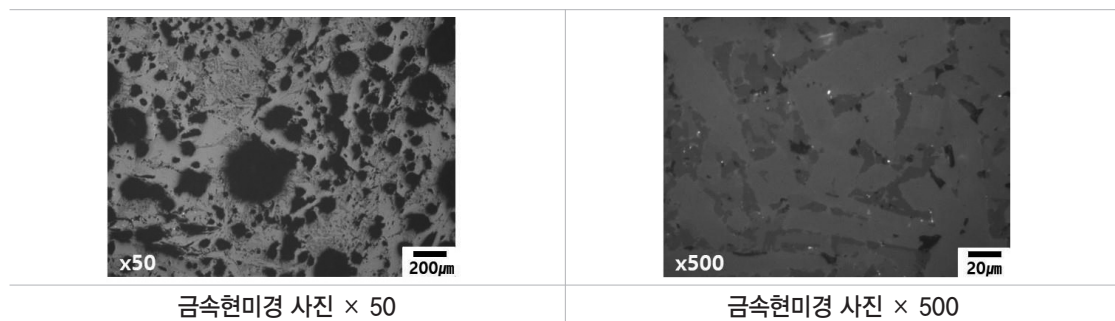
1) 시료의 채취



〈사진 17〉 철재4 (23U-18)의 절단면 위치와 절단면

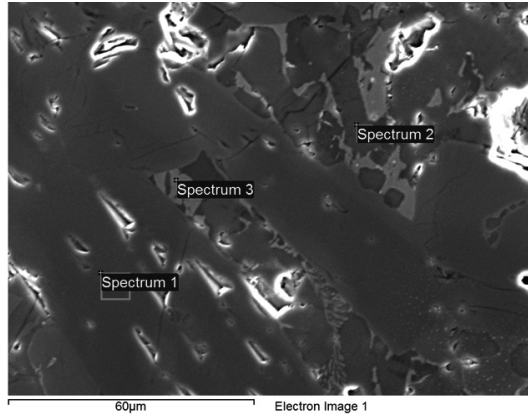
2) 분석결과

〈표 18〉 철재4 (23U-18)의 분석결과

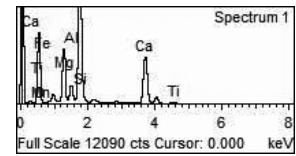


금속현미경 사진 × 50

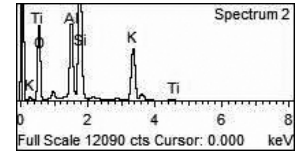
금속현미경 사진 × 500



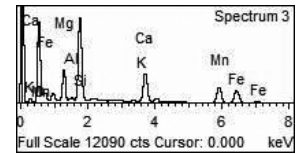
분석위치 ①



분석위치 ②



분석위치 ③



SEM 사진 × 1000

분석위치별 EDX 그래프

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Mn
①	0.49	—	44.83	—	9.14	2.56	24.48	—	—	17.30	0.68	0.52
②	—	—	45.01	—	—	11.72	25.64	—	17.33	—	0.30	—
③	14.73	—	35.61	—	6.50	0.39	16.31	—	0.41	10.49	—	15.57

XRF(wt%)분석

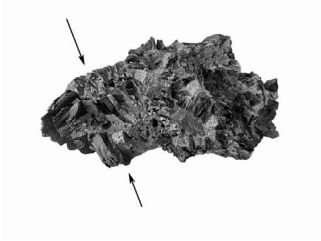
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
함량	6.13	46.27	7.50	15.11	0.67	16.96	3.25	1.02	0.26	1.85	—
성분	BaO	Co ₂ O ₃	SrO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	WO ₃	NbO
함량	—	0.06	0.07	0.02	0.03	0.01	0.13	—	—	0.66	—

철재4(23U-18)의 현미경조직은 일반 슬래그상 기지조직을 구성하고 있다. 다량의 구형 기공과 장 주상의 기지조직과 장주상 사이 석출조직을 볼 수 있다. 기지조직은 SiO₂와 CaO산화물이 주성분이며 석출조직의 어두운 조직은 SiO₂와 K₂O산화물이 주성분을 형성하고 일부 밝은 회색조직에서 MnO, CaO가 높게 나타나는 Wüstite조직이 나타난다.

XRF분석에서는 (MgO·SiO₂), (CaO·SiO₂)가 주성분을 형성하고 있었다.

4.5 철재5 (23U-19A)

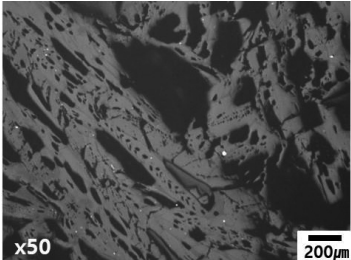
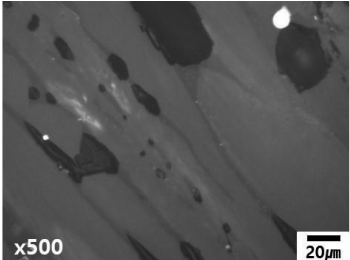
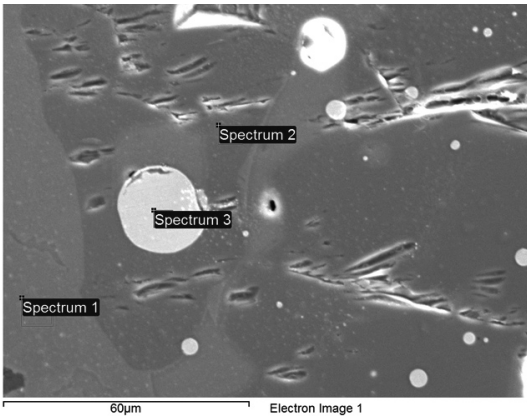
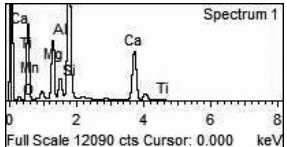
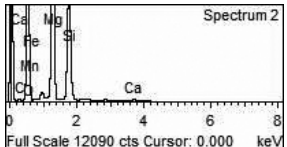
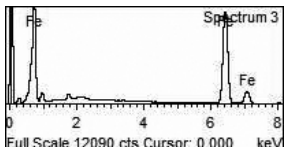
1) 시료의 채취

	
① 절단 위치	② 절단면

〈사진 18〉 철재5 (23U-19A)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 19〉 철재5 (23U-19A)의 분석결과

	
금속현미경 사진 × 50	금속현미경 사진 × 500
SEM-EDX(wt%)	
	분석위치 ①  분석위치 ②  분석위치 ③ 
SEM 사진 × 1000	분석위치별 EDX 그래프

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Mn
①	—	—	44.66	—	9.28	3.08	24.67	—	—	16.98	0.80	0.53
②	0.52	4.15	43.48	—	43.48	—	19.82	—	—	0.59	—	0.60
③	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

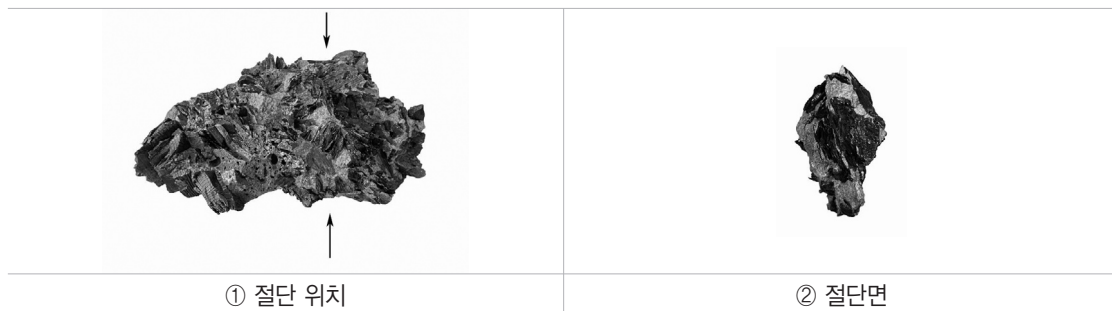
XRF(wt%)분석											
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
함량	0.70	47.23	6.91	16.51	0.48	22.23	2.11	0.95	0.54	1.14	—
성분	BaO	Co ₂ O ₃	SrO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	PbO	WO ₃
함량	0.06	0.03	0.05	0.04	0.02	0.01	0.18	—	—	—	0.80

철재5(23U-19A)의 현미경조직은 일반 슬래그상 기지조직에서 편상의 개재물이 산재하고 있었으며 SEM-EDX분석에서는 기지조직은 (CaO·SiO₂), (MgO·SiO₂)의 산화물로 구성되어 있었으며 개재물은 MgO·SiO₂가 주성분을 형성하고 있었다.

XRF분석에서는 (MgO·SiO₂), (CaO·SiO₂)가 주성분을 형성하고 있었다.

4.6 철재6 (23U-19B)

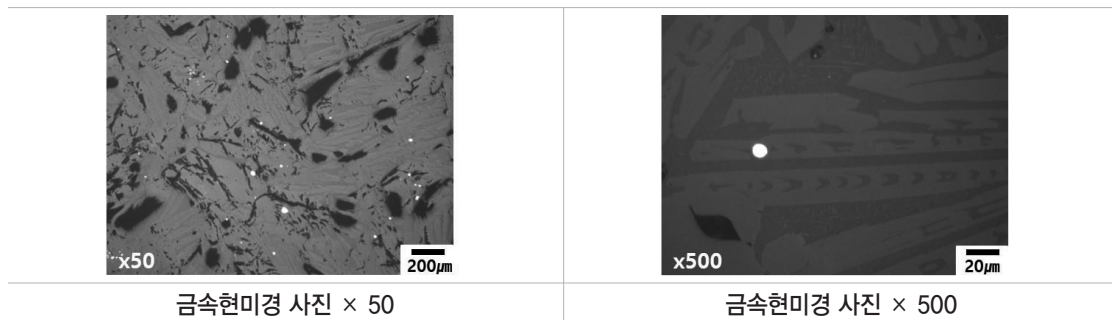
1) 시료의 채취



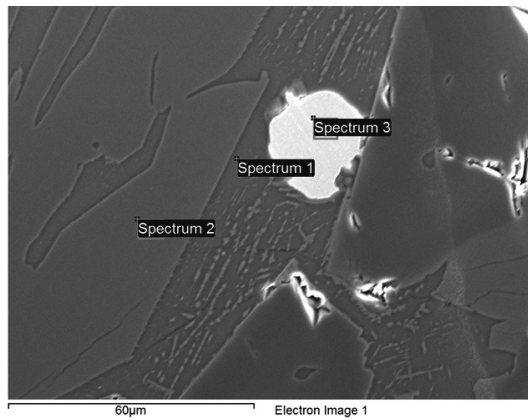
〈사진 19〉 철재6 (23U-19B)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

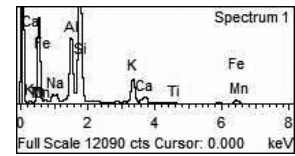
〈표 20〉 철재6 (23U-19B)의 분석결과



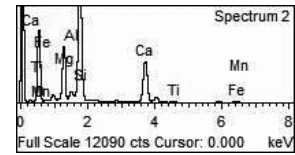
SEM-EDX(wt%)



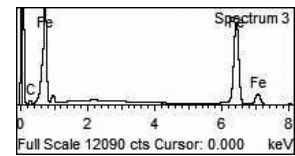
분석위치 ①



분석위치 ②



분석위치 ③



SEM 사진 × 1000

분석위치별 EDX 그래프

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Mn
①	4.90	—	45.55	0.79	—	10.21	26.42	—	8.02	2.27	0.75	1.08
②	2.45	—	44.61	—	9.56	1.28	24.96	—	—	15.47	0.66	0.99
③	95.31	4.69	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

XRF(wt%)분석

성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
함량	5.95	47.95	6.95	11.27	0.63	20.05	2.80	1.07	0.05	2.10	—
성분	BaO	Co ₂ O ₃	SrO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	WO ₃	Y ₂ O ₃
함량	—	0.07	0.04	0.04	0.03	0.01	0.09	—	—	0.90	—

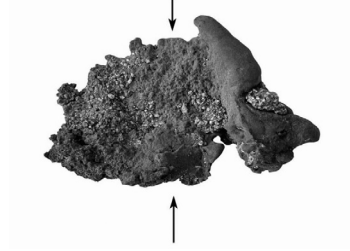
철재6(23U-19B)의 현미경조직은 일반 슬래그상 기지조직에서 장주상의 개재물이 형성되어 있고 SEM-EDX분석에서 개재물은 (CaO·SiO₂), (MgO·SiO₂)로 구성되고 간헐적으로 Fe₃C가 석출되어 있었다.

XRF분석에서는 기지조직은 (MgO·SiO₂), (CaO·SiO₂)가 주성분을 형성하고 철산화물은 비교적 미량으로 편석되어 있었다.

5.선철 형성물

5.1 선철1 (23U-12)

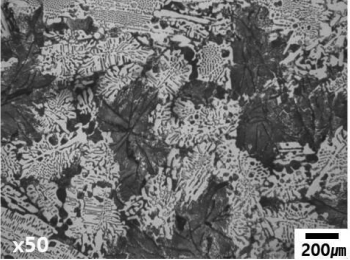
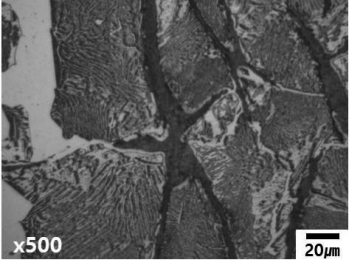
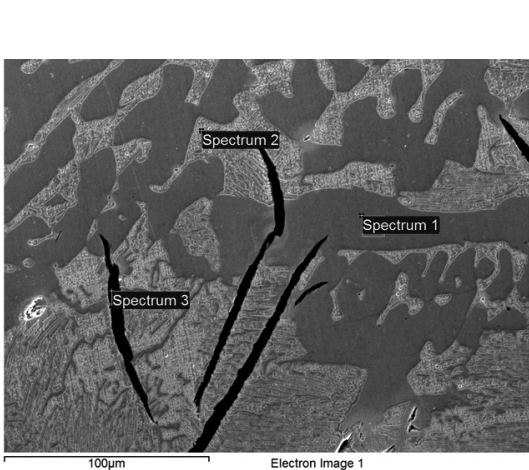
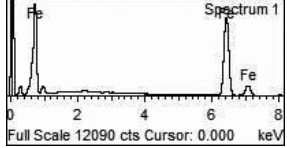
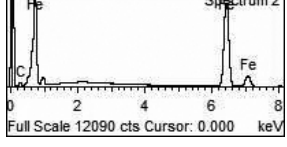
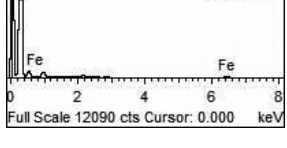
1) 시료채취

	
① 절단 위치	② 절단면

〈사진 20〉 선철1 (23U-12)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 21〉 선철1 (23U-12)의 분석결과

	
금속현미경 사진 × 50	금속현미경 사진 × 500
SEM-EDX(wt%)	
	분석위치 ①  분석위치 ②  분석위치 ③ 
SEM 사진 × 500	분석위치별 EDX 그래프

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Mn
①	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
②	95.72	4.28	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
③	4.04	95.96	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

C/S(wt%)			경도(HMV)				
성분	C	S	회수	1	2	3	평균
조성	3.5	0.010	Pearlite	236	234	229	233
			Cementite	704	728	744	725

선철1(23U-12)의 현미경조직은 Pearlite 기지조직에서 입계에 Cementite(Fe_3C)와 Graphite가 석출되어 있다. SEM-EDX분석(Spectrum-③)에서 Graphite가 석출된 것을 확인할 수 있다.

C/S분석결과 3.5%C로서 아공정 선철의 조성을 갖고 있었다.

현미경경도 분석결과 Pearlite는 HMV233와 Cementite는 HMV725의 평균경도는 갖는 것으로 나타났다.

5.2 선철2 (23U-14)

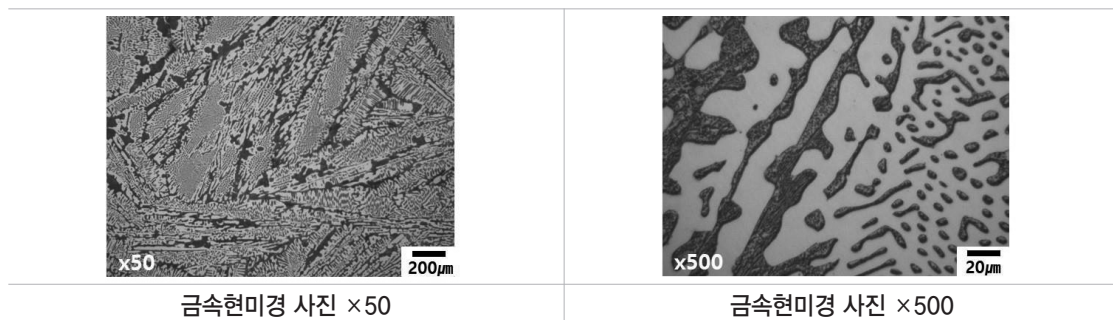
1) 시료의 채취

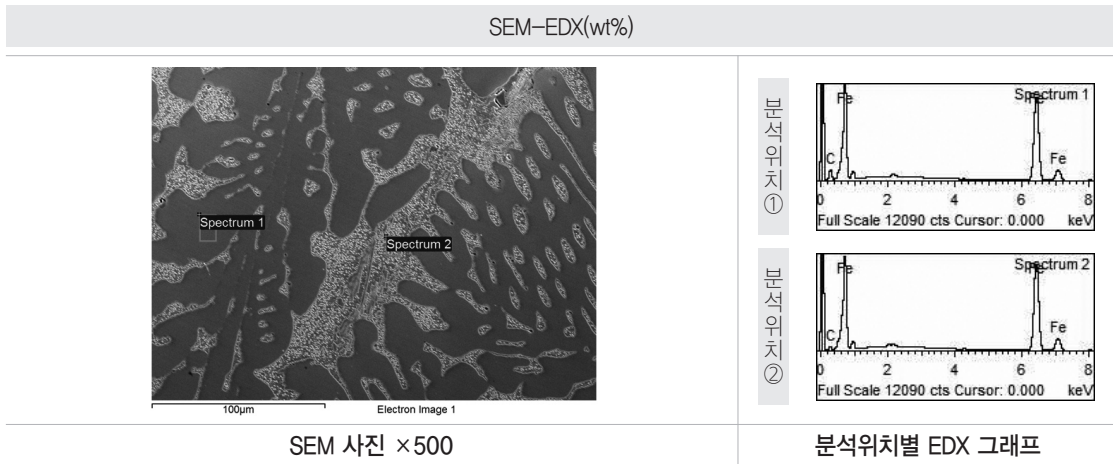


〈사진 21〉 선철2 (23U-14)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 22〉 선철2 (23U-14)의 분석결과





성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Mn
①	90.89	9.11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
②	96.63	3.37	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

C/S(wt%)		
성분	C	S
조성	2.9	0.023

경도(HMV)				
회수	1	2	3	평균
Pearlite	189	192	197	193
Cementite	692	685	676	684

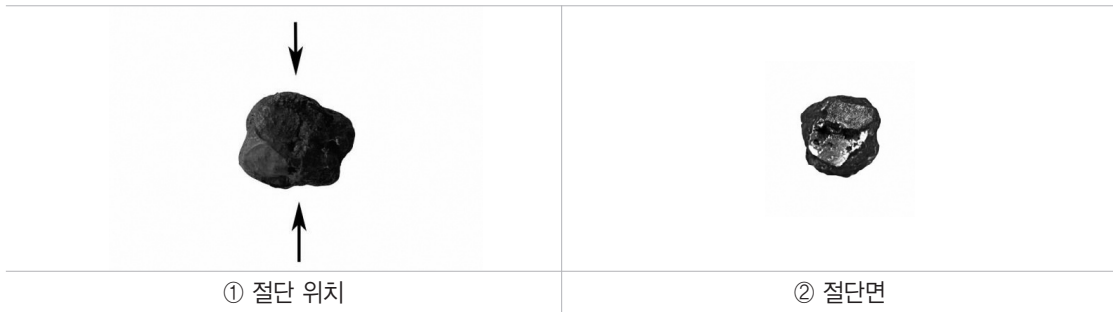
선철2(23U-14)의 현미경 조직은 Pearlite기조직에 Cementite가 석출하는 Ledeburite 조직이다. SEM-EDX분석에서는 같은 형상이며 Graphite 석출조직은 볼수가 없다.

C/S분석에서는 2.9%C로서 아공정선철의 조성을 갖고 있으며 선철조성에서 탄소함량이 낮아서 흑연이 형성되지 않았다.

현미경경도 분석결과 Pearlite는 HMV193과 Cementite는 HMV684의 평균경도는 갖는 것으로 나타났다.

5.3 구형선철(23U-15)

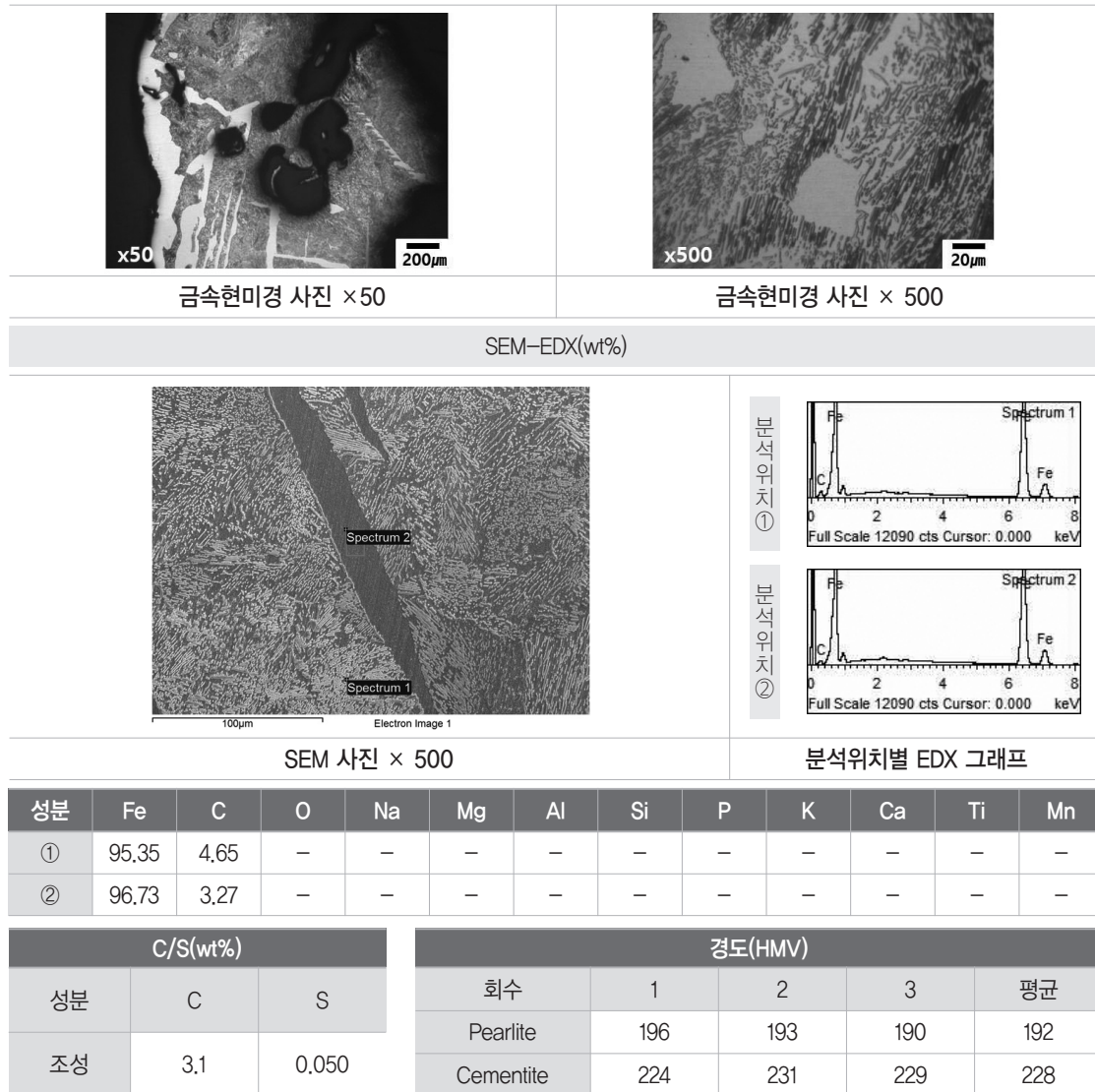
1) 시료의 채취



〈사진 22〉 구형선철 (22U-15)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 23〉 구형선철 (23U-5)의 분석결과



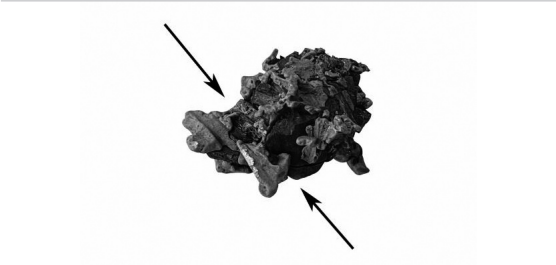
선철방울에서 형성된 구형선철(23U-15)의 현미경조직은 Pearlite기지에 Cementite(Fe_3C)가 석출하는 조직이다. SEM-EDX분석에서도 같은 형상이다.

C/S분석결과 3.1%C의 아공정 선철의 조성을 가지고 있으며 현미경 경도에서는 Pearlite는 HMV192와 Cementite는 HMV228의 평균경도는 갖는 것으로 나타났다.

이 선철방울 등은 괴상대→용착대→용적대(선철방울)에서 단계적으로 형성되고 있다고 볼 수 있다.

5.4 형성물1 (23U-20)

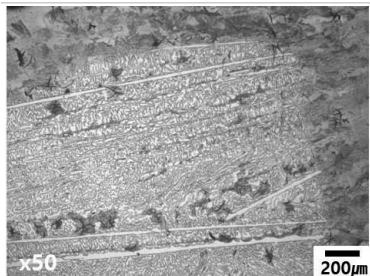
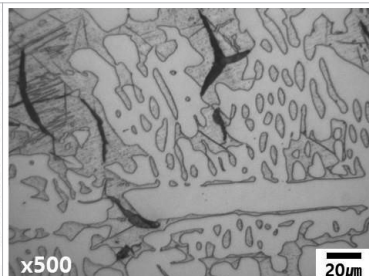
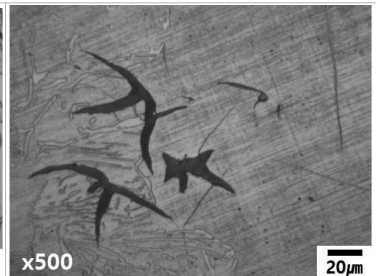
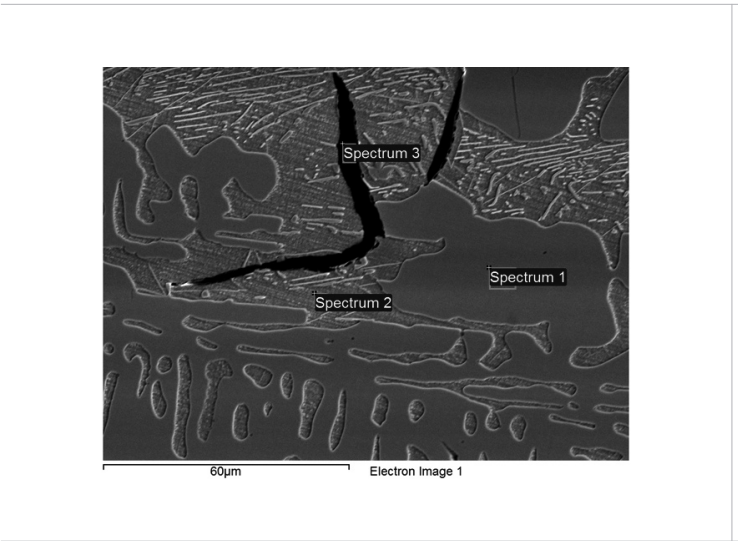
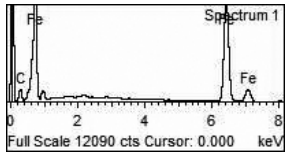
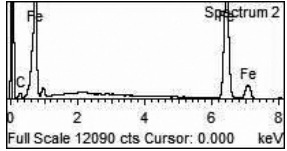
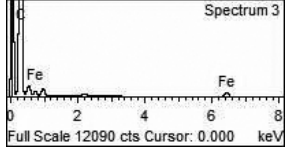
1) 시료의 채취

	
① 절단 위치	② 절단면

〈사진 23〉 형성물1 (23U-20)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 24〉 형성물1 (23U-20)의 분석결과

 금속현미경 사진 × 50	 금속현미경 사진 × 500	 금속현미경 사진 × 500
SEM-EDX(wt%)		
 SEM 사진 × 1000	분석위치 ①  분석위치 ②  분석위치 ③  분석위치별 EDX 그래프	

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Mn
①	90.80	9.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
②	96.11	3.89	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
③	6.62	93.39	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

C/S(wt%)		
성분	C	S
조성	2.01	0.010

경도(HMV)				
회수	1	2	3	평균
Pearlite	208	209	214	210
Cementite	681	654	665	667

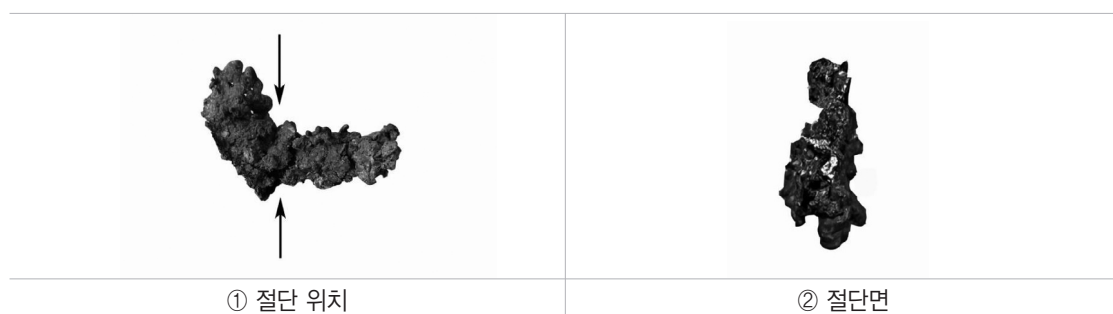
형성물1(23U-20)의 현미경 조직은 Ledeburite 조직으로 나타나고 입계에는 간헐적으로 Graphite가 형성되어 있었다. SEM-EDX분석에서는 Spectrum-①은 Cementite이고 Spectrum-②는 Pearlite조직이며 Spectrum-③은 Graphite조직으로 나타난다.

C/S분석에서는 2.01%C로서 아공정 선철의 조성을 나타내고 있다.

현미경경도 분석결과 Pearlite는 HMV210와 Cementite는 HMV667의 평균경도는 갖는 것으로 나타났다.

5.5 형성물2 (23U-21)

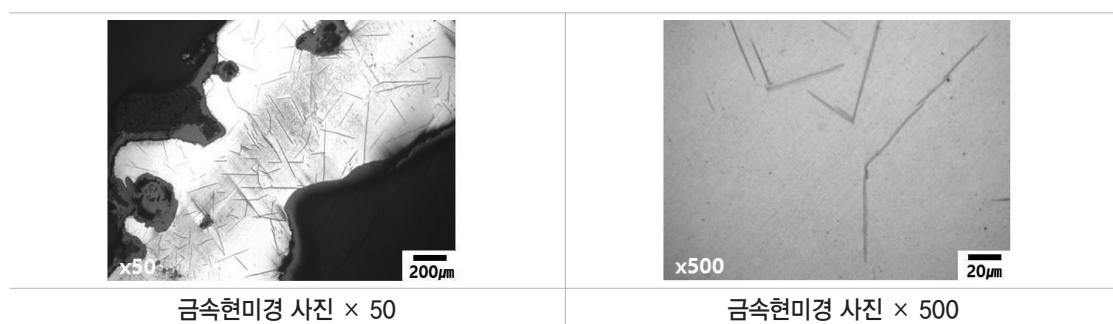
1) 시료의 채취

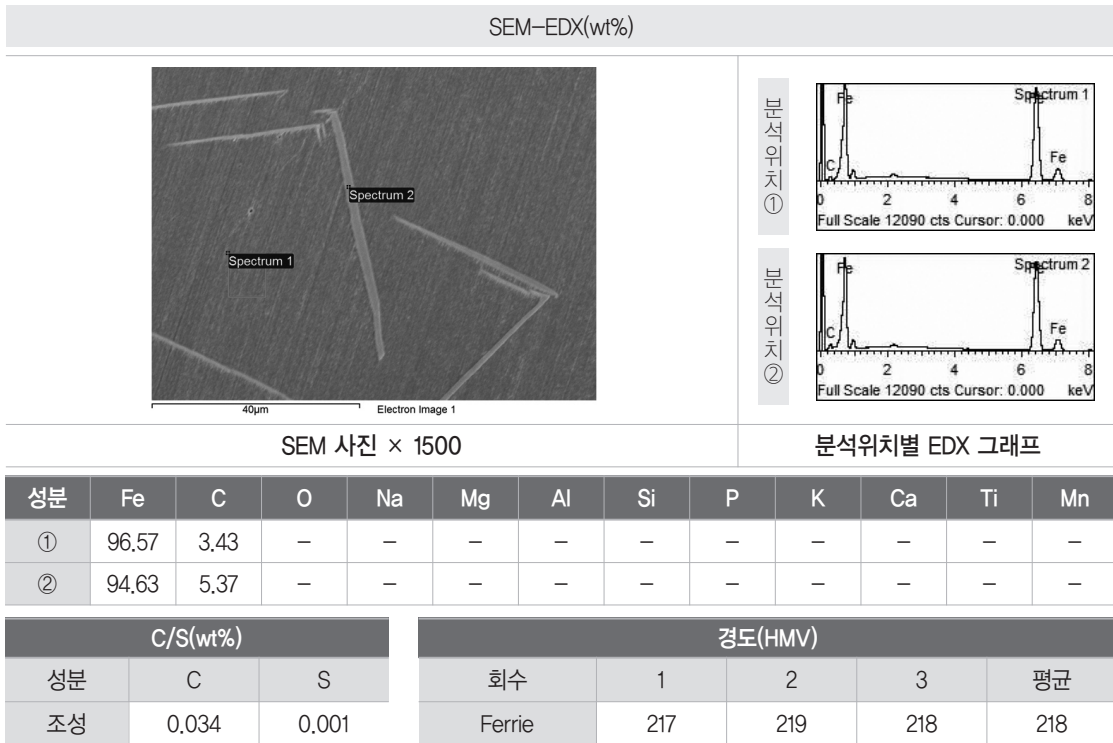


〈사진 24〉 형성물2 (23U-21)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 25〉 형성물2 (23U-21)의 분석결과





형성물2(23U-21)의 현미경조직은 완전한 Ferrite조직으로 형성되어 있으며 SEM-EDX에서 입계 내는 Cementite가 석출되어 있었다. C/S분석에서 0.034%C로서 순철에 가까운 조성을 갖고 있어서 전형적인 괴련철 조성으로 형성되어 있다.

현미경경도 분석결과 Ferrite조직의 경도는 HMV218 평균경도를 갖는 것으로 괴련철에 중에는 비교적 높게 나타났다.

6. 노 내 미환원 철광석, 노벽 용융

6.1 미환원 철광석(23U-16)

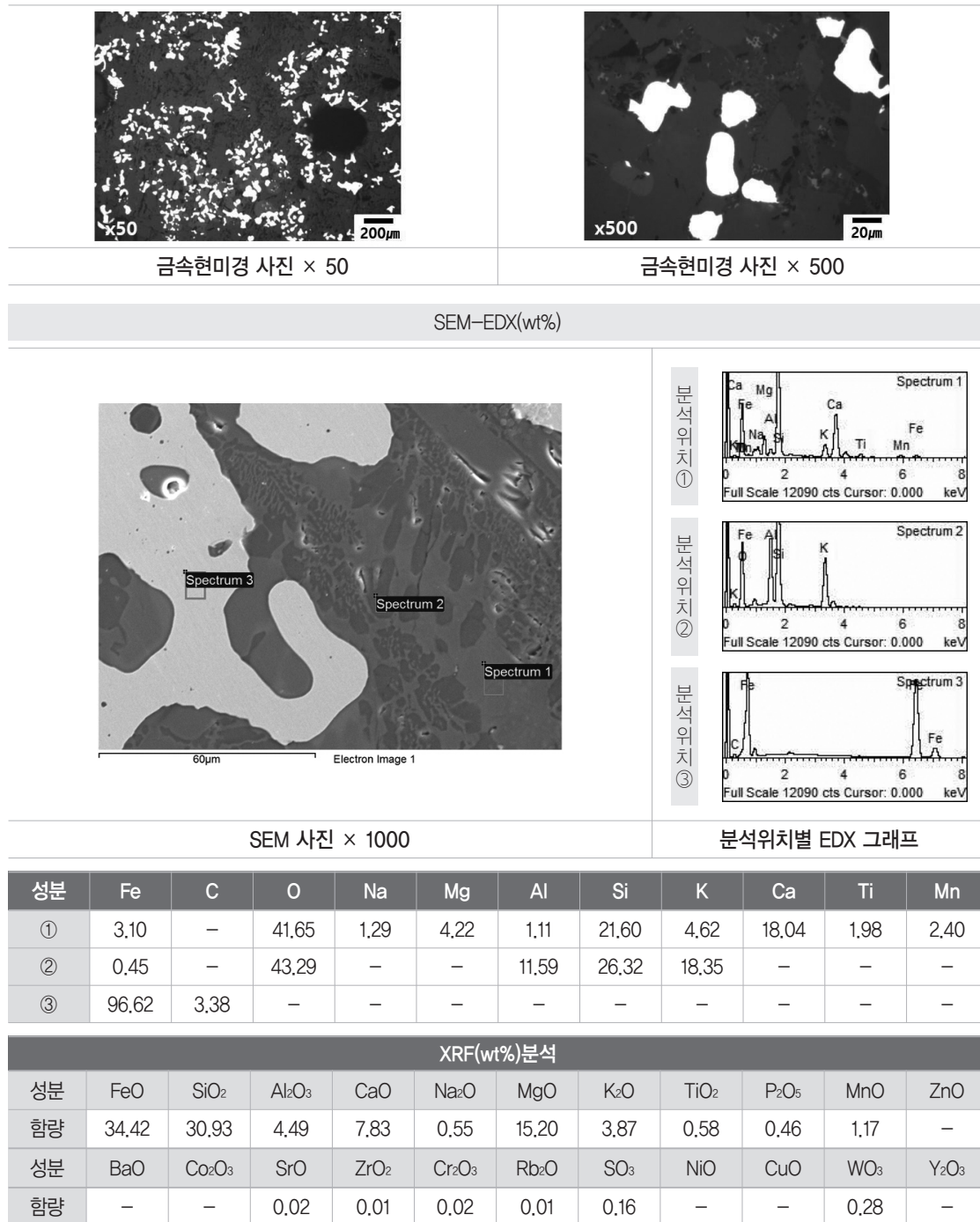
1) 시료의 채취



〈사진 25〉 미환원 철광석 (23U-16)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 26〉 미환원 철광석 (23U-16)의 분석결과



미환원 철광석(23U-16)의 현미경조직은 철광석의 배소조직과 유사하며 광석조직의 바탕에 입계에는 Wustite가 생성되기 시작한 상태이다. SEM-EDX분석에서 Spectrum-①,②는 (CaO·SiO₂)주성분으로 구성되어 있고 Spectrum-③은 입계에 탄화물이 석출되어 있는 상태이다. XRF분석에서 양산 철광석에서 나타나는 MgO와 CaO가 다량 잔류하고 있었다.

6.2 송풍관 용융철재 (23U-22)

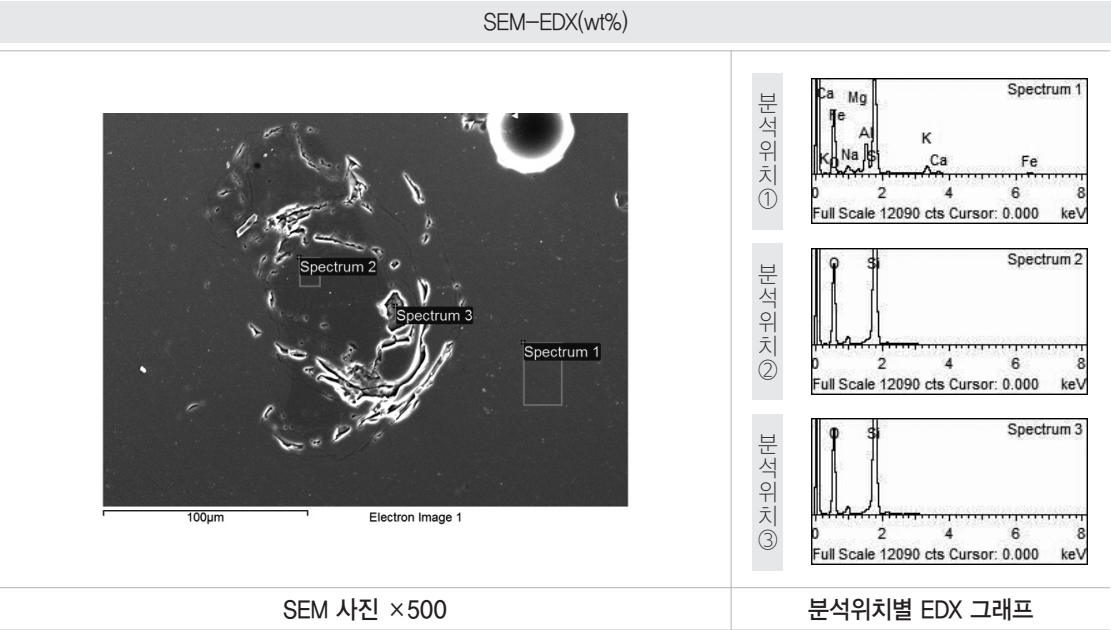
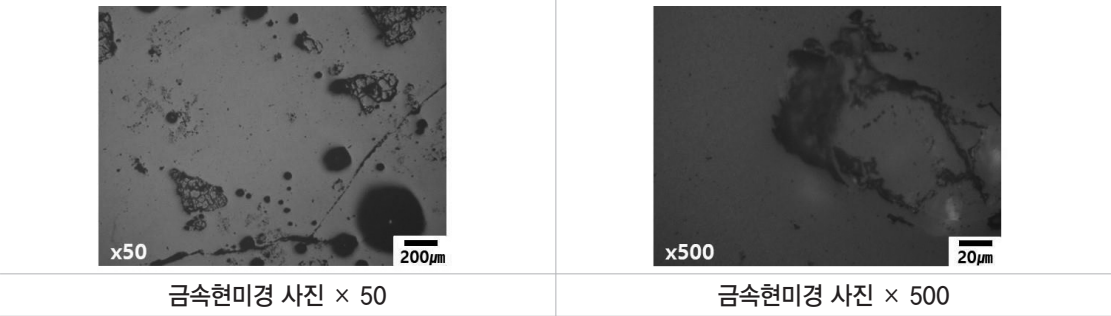
1) 시료의 채취



〈사진 26〉 송풍관 용융철재(23U-22)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 27〉 송풍관 용융철재(23U-22)의 분석결과



성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	4.76	—	48.24	0.03	0.98	7.34	33.01	4.34	1.30	—	—
②	—	—	52.49	—	—	—	47.51	—	—	—	—
③	—	—	53.42	—	—	—	46.58	—	—	—	—

XRF(wt%)분석											
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
함량	6.51	71.52	9.65	2.50	1.49	1.69	4.82	0.55	0.12	0.19	—
성분	BaO	Co ₂ O ₃	NbO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	PbO	Cl
함량	0.07	0.06	0.03	0.04	0.02	0.03	—	—	—	0.72	—

송풍관 용융철재(23U-22)의 XRF분석에서는 주성분은 점토질($\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$)이었고 특이성분으로 알카리 산화물이 잔존한다. 현미경 조직상의 기지조직은 유리질(SiO_2)이 주성분을 구성하고 알카리 산화물(K_2O)가 잔존한다.

6.3 노벽 용융부 (23U-23)

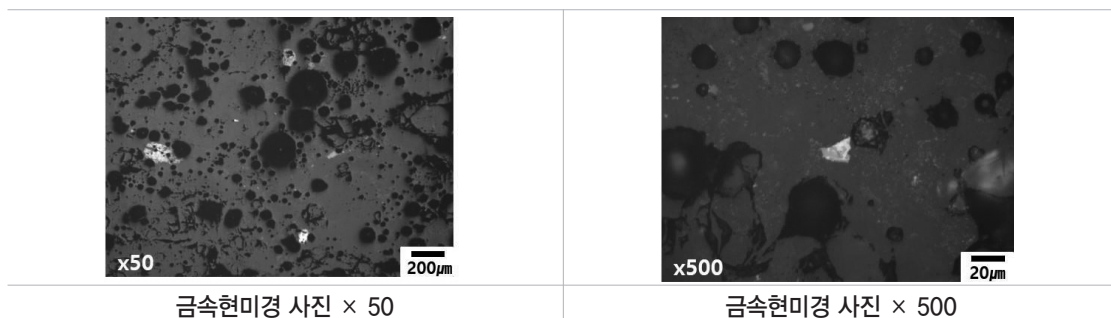
1) 시료의 채취



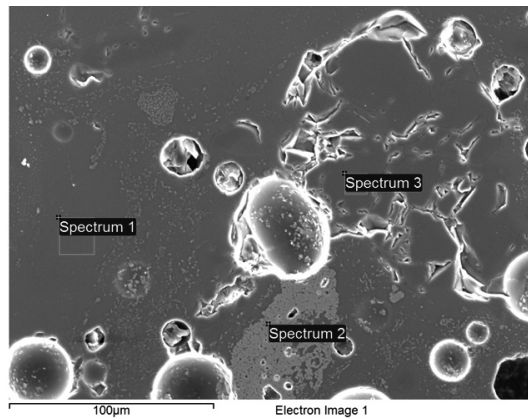
〈사진 27〉 노벽 용융부(23U-23)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

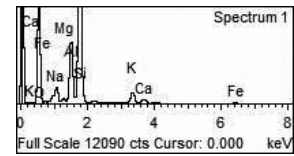
〈표 28〉 노벽 용융부(23U-23)의 분석결과



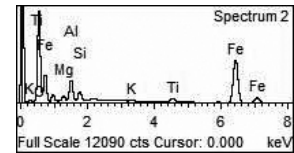
SEM-EDX(wt%)



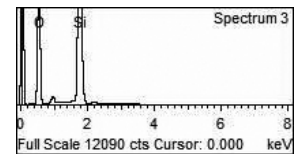
분석위치 ①



분석위치 ②



분석위치 ③



SEM 사진 × 500

분석위치별 EDX 그래프

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	1.83	—	47.57	2.41	0.58	9.97	32.05	3.94	1.65	—	—
②	58.64	—	30.88	—	1.37	4.72	1.88	0.29	—	2.22	—
③	—	—	51.67	—	—	—	48.33	—	—	—	—

XRF(wt%)분석

성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
함량	4.09	71.47	12.56	2.20	3.25	0.73	4.06	0.50	0.17	0.10	0.01
성분	BaO	Co ₂ O ₃	SrO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	WO ₃	Y ₂ O ₃
함량	0.05	0.05	0.03	0.03	0.04	0.02	—	—	—	0.65	0.00

노벽 용융부(23U-23)의 현미경조직은 일반슬래그상에서 구형의 산화물이 다량 산재한다. SEM-EDX의 분석에서 Spectrum-①, ②는 SiO₂ 및 Al₂O₃ 주성분이고 Spectrum-③은 SiO₂가 주성분이다. XRF분석에서 노벽채는 점토질(SiO₂+Al₂O₃)이고 특이성분으로 K₂O(알카리)가 잔존한다.

7. 판장쇠 주물사 및 청도 점토

안성주물 주물사-혼합사(23U-24)와 청도 점토(23U-25)의 XRF 분석에 의한 비교에서 둘다 점토질의 주요 조성을 갖고 있으며 차이점은 알칼리 산화물(K_2O)의 경우에 안성혼합사가 다량 함유하고 있음을 알 수 있었다.

XRF(wt%)분석											
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
주물사 (혼합사)	1.30	75.19	14.38	0.48	1.17	0.33	6.43	0.33	0.05	0.02	—
청도 점토	4.89	74.58	14.06	0.23	0.37	0.86	3.87	0.83	0.05	0.06	0.01
성분	BaO	Co ₂ O ₃	SrO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	PbO	WO ₃
주물사 (혼합사)	0.04	0.01	0.01	0.03	0.02	0.03	0.04	—	—	—	0.14
청도 점토	0.05	0.02	0.01	0.04	0.01	—	—	—	—	—	0.03

따라서 안성혼합사는 용범을 주입후에 탈사시에 붕괴성을 좋게 혼합된 합성사로 판단된다.

IV. 금속학적인 고찰

1. 송풍관의 용손원인

송풍관의 재질은 화강암을 가공한 판석을 4각으로 조립하여 사용하였으나 판석의 조립을 위한 덧살은 점토질 토양으로 미장되었다. 송풍관의 용손원인을 확인하고자 현미경분석을 실시하였으며 그 결과 1차적인 원인은 철광석의 환원중간물인 Wüstite(FeOx)가 판석에 부착되어 판석표면에서 Fayalite(Fe_2SiO_4)를 형성하고 있었다. 이 Fayalite는 송풍온도에 비해 용점이 낮아서 쉽게 녹아 용착이 되어 용손이 개시된 것을 확인할 수 있으며 이에 더불어 덧살에 포함되어 있는 알칼리 산화물(K_2O)가 Fayalite와 2차 용착반응을 일으켜 용손이 심화되는 것으로 밝혀지고 있다.

2. 유출재의 고찰

본 실험의 유출재는 철광석에 내포하고 있는 염기성 산화물(MgO , CaO)이 주변의 SiO_2 와 화합하여 ($\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$) 및 ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)의 복합 산화물을 형성하고 있었다.

이 현상은 현미경사진, SEM-EDX 및 XRF 분석에서도 같은 결과를 확인할 수 있었으며 일반적으로는 초기 유출재는 Fayalite($\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$)가 주성분인 것과는 다소 차이점이 있었다. 또한 XRF분석에서 Wüstite(FeOx)가 낮게 나타나는 것은 염기도가 높아진 슬래그 중에서 자체 탈산이 상당히 진행된 것으로 판단된다.

3. 유출선철

본 실험에서 유출재와 같이 흘러나온 유출선철은 현미경조직과 C/S 분석결과 대부분 아공정 및 공정선철이었으며 과공정 선철은 나타나지 않았다. 이는 탄소가 과포화되지 않았다고 볼 수 있겠다.

현미경조직은 Pearlite 기지조직에 Cementite(Fe_3C)가 석출하는 Ledeburite조직이 있으며 이 선철은 대부분 백주철의 조직이 된 것이며 일부 Cementite는 탄소가 집중하는 부분에서 흑연화($\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow \text{Graphite}$)가 진행된 것을 확인할 수 있었으나 흑연화 정도는 미미한 상태이다.

4. 출탕선철

출탕선철의 현미경조직은 모두 공정선철에 가까운 선철이었으며 Pearlite기조직에 Cementite(Fe_3C)석출하는 Ledeburite조직으로 판단되며 화학성분상으로 아공정 영역에 속하며 주조성형 후에는 모두 백주철의 조직을 갖는 것으로 판단되고 있다. 그리고 과포화 탄소의 산물인 Graphite의 생성은 되지 않고 있었다.

5. 출탕철재

출탕철재는 현미경조직상으로 유리질 조직으로 형성되었으며 석출되는 개재물도 구형의 산화물로 형성되어 있었다. SEM-EDX 및 XRF 분석에서도 주성분은 $(\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2)$ 및 $(\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2)$ 이며 Wüstite는 매우 낮게 분석되어 슬래그의 자체탄산이 철광석성분(양양산의 염기성 산화물)에서 분리된 염기성 산화물로 이루어진 것을 알 수 있었다. 이러한 현상은 본 실험의 유출재나 출탕철재에서도 같은 현상을 보여주고 있었다.

6. 형성물 철재

형성물 철재의 현미경조직은 SEM-EDX에서 확인된 바와 같이 Wüstite(FeO_x)는 모두 50% 이내로 낮아지고 염기성 슬래그인 $(\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2)$ 및 $(\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2)$ 과 20%이상을 점유하여 염기성 슬래그 반응이 형성물 철재를 주도 하고 있었다.

이러한 염기성 슬래그는 슬래그의 탈산을 촉진하여 철회수율을 높이는 효과를 얻을수 있겠다.

7. 형성물 선철(괴련철)

본 실험의 형성물 선철은 모두 공정선철의 조직을 갖고 있으며 선철괴의 냉각과정에서 Cementite(Fe_3C)가 Graphite로 변태하여 나타나는 경우도 있었다. 형성물 선철괴의 대부분은 아공정선철이었으며 일부의 시료에서는 선철을 형성하지 못하고 괴련철의 조직을 갖는 경우도 발생하고 있었다.

이는 선철이 생성되는 과정에서 탄소의 과포화가 형성되지 않아서 일부의 아공정선철은 탄소가 부족한 부위에서 괴련철(저탄소, 고탄소)을 형성하는 것으로 밝혀지고 있다. 이는 전반적인 선철형성 분위기가 아공정 조직의 영역에서 진행된 것을 알 수 있었다.

V. 결론

2023년도 울산쇠부리복원실험에서 선철을 생산할 수 있다는 가능성을 확인하였다. 노의 높이도 20 cm 낮추고 송풍관의 돌출을 하지 않고 다만 상판의 코부분을 돌출하는 방식으로 실험이 진행되어 전반적으로 만족하는 석축형제철로에서 선철을 생산할 수 있었다.

유출재를 형성하였으나 주성분이 염기성(MgO 및 CaO) 산화물로서 슬래그 형성을 통하여 환원과 탈산을 동시에 추구할 수 있었다는 데는 성과가 있었다.

그러나 달천지역의 토철 분석에서는 염기성 산화물이 양양산 철광석에 비하여 미량으로 확인되어 있어서 앞으로 낮은 염기도 하에서도 제련이 가능한지 여부를 확인하는 실험이 필요하다고 본다.

3 2022년 울산쇠부리기술 골구멍 예비실험보고서

I. 실험 개요

▣ 실험명 : 2022년 울산쇠부리기술 골구멍 예비실험

▣ 실험 배경

- *골구멍의 가마 내부 돌출 여부에 대한 의견 분분
 - 당초 가마 내부로 돌출되지 않았다는 의견, 유적에서의 현상
 - 돌출되어 있었으나 조업으로 인해 남아 있지 않다는 의견
- *2022년 8월 23일 연구단 회의결과 반영
- *골구멍의 침식, 목탄의 크기, 골구멍의 돌출 여부 등을 면밀히 검토한 다음 도면 작성 등 조업 매뉴얼 반영할 것

▣ 실험 목적

- 가. 골구멍 미 돌출 시 용융상태 확인
- 나. 앞창 개방 여부에 따른 온도차 확인
- 다. 가마 하부 90cm 노벽 보강점토가 없을 시 벽체의 용융상태 확인

▣ 실험 범위

- *골구멍을 가마 내부로 돌출시키지 않고 조업온도까지 상승시켜 골구멍 주변의 노벽 용융 상태 확인
- *이를 통해 쇠부리가마의 골구멍 구조 재검토

▣ 실험 일시 : 2022년 11월 13일

▣ 실험연구단 구성

- *실험총괄 : 이남규·이태우(공동단장)
- *연구원 : 신경환, 이은철, 김권일, 권용대, 강성귀, 이재용
- *울산쇠부리소리보존회 : 박실(부회장) 외
- *행정지원 : 정재화·김문주(울산쇠부리축제 추진위원회 사무국)

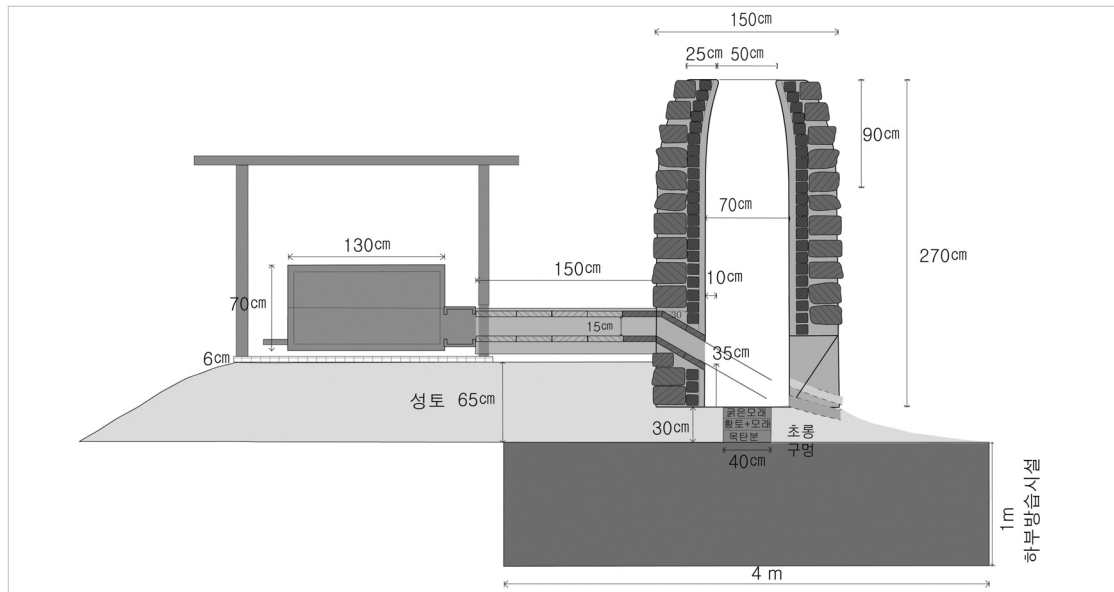
Ⅱ. 쇠부리가마 구조

▣ 2022년 제8차 실험 가마 보수 후 사용

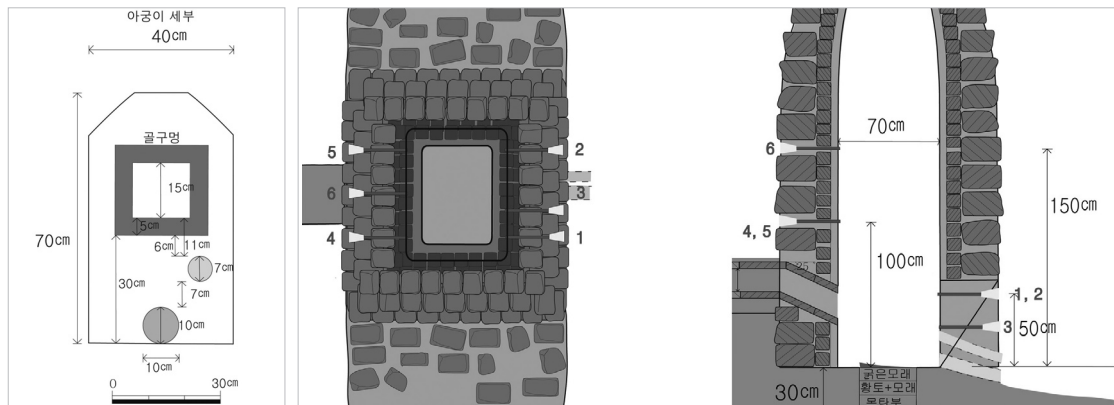
▣ 내벽 보수 및 앞창 설치

- * 제8차 실험 후 골구멍 단부가 노벽과 거의 동일한 면까지 용융
- * 골구멍의 단부 및 골조석재의 평행상태 등 보수
- * 골구멍 단부는 노벽 미장면까지 돌출되는 것으로 보수
- * 가마 하부구조 및 노상, 앞창(초롱구멍·잡쇠구멍 포함)은 8차 실험과 동일한 구조로 보수

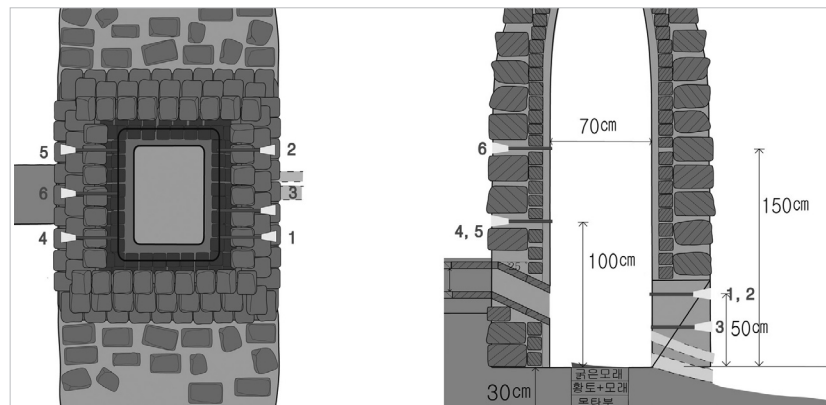
▣ 온도계 설치 : 제8차 실험과 동일하게 5개소 설치, 초롱구멍 좌측 1개소 설치



〈그림 41〉 가마 단면도(골구멍 및 하부구조 보수)



〈그림 42〉 앞창 구조



〈그림 43〉 온도계 설치(좌- 평면, 우 -단면)

Ⅲ. 실험 매뉴얼

1. 원료·연료·첨가제의 준비

1) 원료 및 첨가제

- 철광석 및 첨가제는 장입하지 않음

2) 연료

- 목탄 사용 : 울산광역시 울주군 하이참숯
- 분량 : 1,040kg 예상

〈표 1〉 목탄 장입 계획

구분	장입량(kg)	크기 구분(kg)				비 고
		잡탄	소탄	중탄	대탄	
가마 건조	30	30	—	—	—	화목 별도
조업 전 예열	190	—	110	50	30	
만장입	380	—	130	250	—	
추가 장입	440	—	—	440	—	
합계	1,040	30	240	740	30	

※ 2022년도 본 실험

- 만 장 입 : 540kg(대탄 140kg, 중탄 360kg, 소탄 40kg)
- 추가장입 : 420kg(대탄 170kg, 중탄 110kg, 소탄 140kg)

- 목탄 크기 구분 : 중탄-10cm 내외, 소탄-5cm 내외

가. 만장입 시 하부·중부는 중탄, 상부는 소탄 사용

나. 장입 간격 : 09:45부터 평균 15분 간격으로 장입(14:00까지 중탄 장입)

중탄 20kg씩 22회 총 440kg 장입(온도 상승 등 필요할 경우 대탄 사용)

- 목탄 보유량 : 1,280kg+잡탄 30kg(2022.09.22. 현재)

대탄 : 190kg(10kg×19박스)

중탄 : 800kg(10kg×80박스)

소탄 : 290kg(10kg × 29박스)

잡탄 : 30kg(30kg × 1마대)

- 예비 목탄 : 270kg(필요할 경우 사용)

대탄 : 160kg(10kg × 19박스)

중탄 : 60kg(10kg × 11박스)

소탄 : 50kg(10kg × 10박스)

2. 실험 순서

- 송풍기 점검 및 가마 예열 : 2022년 11월 12일(토) 13:00~(박실 등 보존회)

- 집결 : 2022년 11월 13일(일) 08:00

- 사전 미팅 : 08:00~08:30

- 실험 준비 및 온도계 설치 : 08:30~09:00

- 점화 및 만장입, 송풍 : 09:00~09:30

- 만장입 후 일정 간격으로 목탄 장입

- 목탄의 장입

2022.11.12.(토) 예열 190kg(소탄 110kg, 중탄 50kg, 대탄 30kg)

09:00~09:30 목탄 만장입 380kg(하부·중부 중탄 250kg, 상부 소탄 130kg)

09:45~14:00 목탄 추가장입 440kg(15분 간격으로 중탄 20kg씩 22회 총 440kg)

14:00~16:00 목탄 장입 종료, 기계송풍 계속

※ 15분 간격으로 20cm 하강 가정 시, 1시간에 80cm 하강, 3시간에 240cm 하강

※ 실험 중 온도 상승 등 필요할 경우 대탄으로 교체 장입

- 앞창의 개방 및 폐쇄

– 11:30~13:00 초롱구멍 및 잡쇠구멍 개방

– 13:00~14:30 초롱구멍 및 잡쇠구멍 폐쇄

– 14:30~16:00 초롱구멍 및 잡쇠구멍 개방

- 실험 종료

– 14:00 목탄 장입 종료

– 17:00 송풍 종료 및 앞창 개방, 실험단 평가회의

IV. 실험 준비

1. 가마 보수

제8차 실험에서는 노벽의 하부 90cm 지점부터 내경 하지만 예비실험에서는 직립하는 것으로 설계하였다. 골구멍 또한 노 내부로 돌출되지 않고 노벽과 평행을 이루는 것으로 설계하였다.

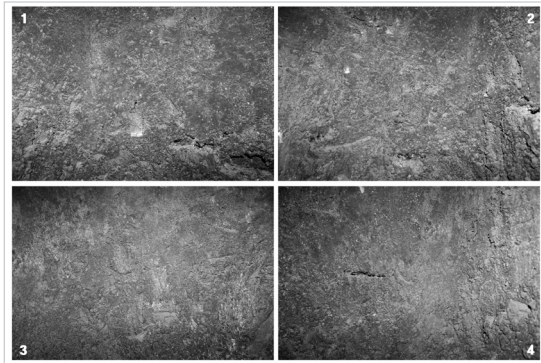
제8차 실험 후 노 벽 상태를 관찰해 보면, 상단부를 기준으로 상부 30cm 구간은 적갈색 산화부를 형성하였고, 그 하부 30~120cm 구간은 요철면이 형성되지 않는 경화된 환원부로 이루어져 있다. 하부의 120~150cm 구간의 경우, 유리질화는 다소 덜하지만 작은 알갱이가 부착된 요철면이 확인된다. 그 하부의 150~170cm에서부터(좌·우측 160cm, 뒷벽 170cm, 앞벽 150cm) 가마 하부까지는 유리질상의 요철면을 형성하고 있다. 뒷벽은 골구멍 상단에서부터 상부로 높이 45cm, 너비 60cm, 깊이 8cm로 움푹하게 침식되었다. 보강점토를 발랐던 골구멍 상부는 용융침식이 심하였다. 가장 깊이 침식된 부분은 골구멍 상단에서 17cm 높이로, 골구멍 중앙부에서 우측 횡방향으로 침식이 확인하다.

〈표 2〉 노벽 용융 현황

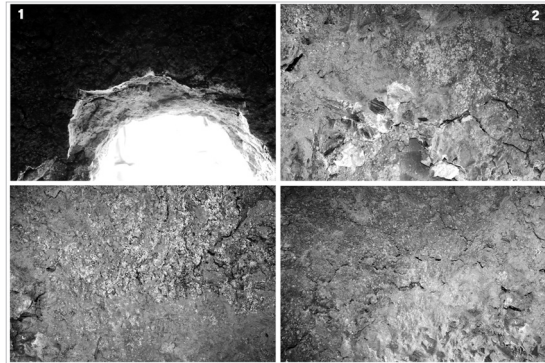
연번	구분	내용	비고
1	상단~30cm	적갈색 산화부 형성	
2	30~120cm	요철면이 형성되지 않는 경화된 환원부	
3	120~160cm	유리질화는 다소 덜하지만 작은 알갱이가 부착된 요철면 확인	
4	150~170~270cm	유리질상의 요철면 형성	
	150~170cm	* 골구멍 상단에서부터 상부로 높이 45cm, 너비 60cm, 깊이 8cm로 움푹하게 침식 * 보강점토를 발랐던 골구멍 상부는 용융침식이 가장 심함 * 가장 깊이 침식된 부분은 골구멍 상단에서 17cm 높이로, 골구멍 중앙부에서 우측 횡방향으로 침식 확인 * 가마 바닥(爐床)에서 90cm 높이 모서리 부분은 당초 아래로 내경하면서 좁아지게 설계·축조하였으나 용융으로 인해 말각화됨	
5	노상(爐床)	* 가마 바닥은 생성물 반출로 10cm 이상 하강한 상태 * 회색의 단면이 드러나고 바닥시설을 확인할 수 있는 단(황토블록의 흔적으로 추정) 노출 * 가마 바닥에서 35~50cm 높이, 내벽에서 8cm 정도 안쪽에서는 가마 축조 시 사용된 황토블록 확인	

가마 바닥(爐床)에서 90cm 높이의 모서리 부분은 당초 아래로 내경하면서 좁아지게 설계·축조하였으나 용융으로 인해 말각화된 양상이 확인된다. 하부 생성물 반출 후 가마 하단부(앞창)는 하부 생성물 반출자국으로 인해 탈락되어 상부는 회색, 하부는 백색의 벽체 내면부가 노출되었다. 가마 바닥은

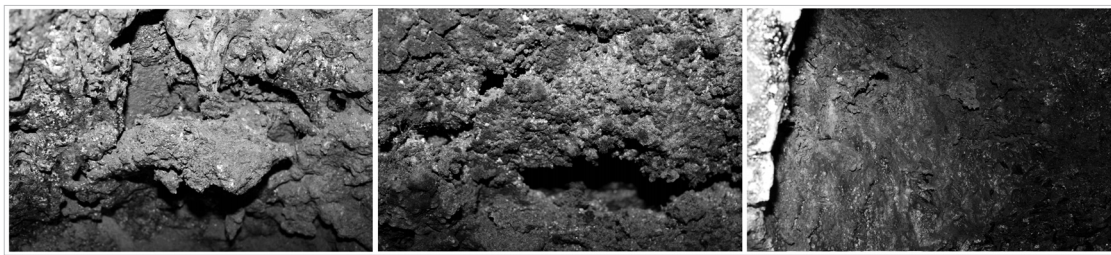
생성물 반출로 10cm 이상 하강한 상태로 회색의 단면이 드러났고, 바닥시설을 확인할 수 있는 단(황토블록의 흔적으로 추정)이 노출되었다. 가마 바닥에서 35~50cm 높이, 내벽에서 8cm 정도 안쪽에서는 가마 축조 시 사용된 황토블록이 확인되었다.



〈그림 44〉 8차 실험 후 가마 중부 벽체 모습



〈그림 45〉 8차 실험 후 가마 하부 벽체 모습



〈그림 46〉 8차 실험 후 가마 하단부 벽체 모습(좌-골구멍 우상벽, 중-우벽, 우-좌벽)

앞에서 살펴본 바와 같이 상단부 기준으로 150~170cm는 노벽의 변색은 관찰되지만 별다른 보수를 필요로 하지 않아 솔질로 내벽에 잔존하는 불순물을 제거하는 정도로 정리하였다. 노 하부의 150~170cm는 유리질상의 요철면과 생성물 반출 등으로 노벽이 탈락되었고, 하부는 황토블록 등이 노출되어 내화토로 내벽의 미장이 필요하였다.

다만 제8차 실험은 노하부 90cm를 기준으로 10° 각도로 내경하는 구조로 설계되어 노 바닥은 50×70cm로, 중부의 70×90cm보다 좁게 설계되었고, 하부로 갈수록 황토블록을 넓게 쌓아 노벽 축조에 사용되었다. 따라서 실험 후 노 하부에 노벽이 탈락된 후 황토블록이 노출되었지만 예비실험의 노 내경(70×90cm)보다 실험 후 노 내경이 좁게 남게 되었다. 노 하부는 잔존하는 노벽의 내경이 70×90cm 되도록 노벽을 손도끼 등으로 정리하였고, 중부의 슬래그 용착부와 용융부 등 유리질상의 요철면도 같이 제거하였다. 정리된 노벽에 황톳물을 도포하고 내화토/황토를 5/5의 비율로 섞어 미장을 실시하였다.

2. 골구멍 보수

골구멍은 높이 15~18cm, 너비 15cm로 잔존하고 있다. 가마 내부로 돌출시켰던 석조 골구멍과 보강 점토는 완전히 용융되어, 벽체에서 보이는 자갈색 용착면이 용융된 부분까지 덮고 있다. 골구멍 상단부는 좌측으로 약간 기울어졌는데, 골구멍 축조 시 점토로 평행을 맞추었으나 이 부분이 녹아 함몰된 양상으로 나타났다.

골구멍은 노벽과 평행하도록 노 내부로 돌출시켰던 석제가 용융되어 설계한 골구멍의 구조를 유지하고 있으며, 골구멍 우측하단이 생성물 반출시 박리된 부분이 있어 이 부분에 동일한 석재(구들장)를 잘라 보수하였다.

노 내벽과 골구멍을 보수한 후 잡목으로 건조를 실시하였는데 미장토는 기존 벽과 분리가 심하고, 균열과 박리가 심했다. 일부 탈락된 미장벽체를 수거하여 절구에 넣고 땀아 고운 가루로 만들고 이 점토에 마사 5의 비율로 다시 혼합하여 내벽을 5cm 정도 두께로 재 미장한 후 자연 건조하였다.



〈그림 47〉 8차 실험 후 골구멍 모습

V. 실험 과정

* 2022.11.13. 오전 08:30

온도계를 설치하고 09:00~09:30까지 잡탄 30kg, 소탄 120kg, 중탄 250kg 총 400kg의 목탄을 만장입한 후 송풍을 시작하였다.

목탄은 노 장입구에서 20cm 정도 하강할 때마다 중탄 20kg 씩 총 23회 장입하였고, 마지막 3회는 대탄 20kg씩을 장입하였다. 목탄은 09:08~15:15까지 6시간 7분 동안 모두 20kg씩 25회 장입(만장입 제외)하였으며 총 장입량은 920kg이다.

온도는 09:10~16:00까지 10분마다 측정하였다. 09:10~11:20까지 목탄을 장입하여 평균온도 1,200℃까지 상승시키고자 하였다. 11:20에 평균온도 1,171℃를 기록하였고, 11:30에 평균온도 1,202℃를 기록하여 계획한 대로 초롱구멍을 개방하여 1시간 30분 동안 온도를 측정하였다. 가-11:30~13:00 초롱구멍을 개방하여 온도를 측정하였고, 나-13:01~14:30은 초롱구멍 폐쇄하여 온도를 측정하였고, 다-14:31~16:00는 초롱구멍을 다시 개방하여 온도를 측정하였다.

골구멍은 30분마다 관찰하는 것으로 결정하였기 때문에 10:30부터 16:00까지 그 변화를 관찰하였다. 시간 단위별 관찰 현황은 다음과 같다.

- 10:30 골구멍 상부 닭발크기 노벽 용융
- 11:00 골구멍 상단부 양모서리 노벽 용융
- 11:15 골구멍 용융 심함으로 뚫음
- 11:30 11:00보다 양호함
- 12:00 11:30과 유사함 고드름 형성 뚫음
- 12:30 골구멍 좌측 1/2 정도, 우측 모서리 노벽 용융 뚫음
- 13:00 양호
- 13:30 골구멍 1/2 정도 용융 막음
- 14:00 골구멍 2/3 정도 막음
- 14:30 골구멍 용융 심함, 바람골 제거한 상태로 용융 제거
- 15:00 골구멍 중앙부 상단 고드름처럼 형성
- 15:30 골구멍 중앙부만 타원형으로 잔존, 가장자리 모두 용융, 제거
- 16:00 골구멍 하부와 중앙부 제외 노벽 용융 확인

Ⅵ. 실험 결과

1. 온도 변화

09:10~16:00까지 6시간 50분 동안 10분마다 온도를 측정하여 기록하였다. 평균온도는 1,238.1℃, 평균 최저온도는 1,198℃, 평균 최고온도는 1,258℃이다. 앞창 쪽의 평균온도는 1,191.3℃이고, 골구멍 쪽 평균온도는 1,284.9℃로 골구멍 쪽 온도가 93.6℃ 높았다.

개별 온도 변화를 살펴보면, 평균온도는 1번 1,222.6℃, 2번 1,128.2℃, 3번 1,223.2℃, 4번 1,350.6℃, 5번 1,321.9℃, 6번 1,182.3℃이었고, 앞창의 우측과 골구멍의 상부 온도가 낮았다.

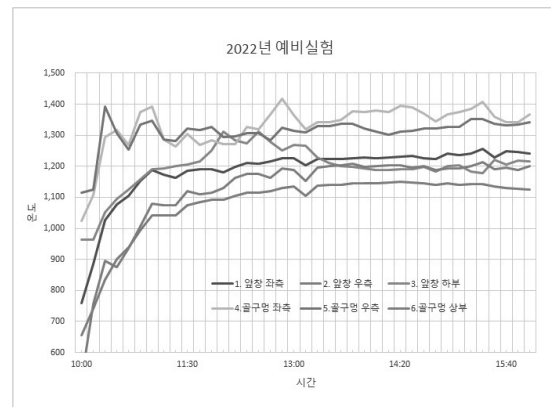
1번과 5번 온도계는 송풍 시작 이후 서서히 상승하였고, 초롱구멍 개폐에 영향이 없었다.

2번 온도계는 초롱구멍 1차 개방과 2차 폐쇄까지 온도는 서서히 상승하였고, 역시 초롱구멍 개폐에 영향이 없었으나 3차 개방이후 12℃ 정도 조금씩 하강하였다. 3번 온도계는 1차 초롱구멍 개방 시 온도가 서서히 상승하였다. 특히 골구멍 상태를 관찰하는 동안 송풍이 중지 되었을 때 조금 더 상승하였다가 송풍이 시작 되면 온도가 하강하는 것이 확인된다. 그러나

이때 바람이 심하게 불었고, 바람의 방향이 노 앞쪽에서 뒤쪽으로 불고 있어서 이것에 의한 영향인지도 모르겠다. 2차 초롱구멍을 폐쇄했을 때는 온도가 40℃ 정도 하강하였고, 3차 초롱구멍을 다시 개방했을 때는 온도가 12℃ 정도 상승하였다. 따라서 3번 온도계는 초롱구멍 개방과 폐쇄에 가장 큰 영향을 받았다.

4번 온도계는 1차 초롱구멍 개방 시 50℃ 정도의 온도 편차가 있었다. 3번 온도계와 반대로 골구멍 개방 시 온도가 하강하였다가 송풍 재개 시 다시 상승하는 반응을 보였다. 2차 초롱구멍 폐쇄 시 온도가 안정화되었고, 3차 초롱구멍 개방 시 일부구간 편차가 있으나 2차 보다 낮은 온도로 안정화되었다.

6번 온도계는 송풍 후 서서히 상승하다가 초롱구멍 개폐와 상관없이 12:50부터 온도가 안정화되었다.



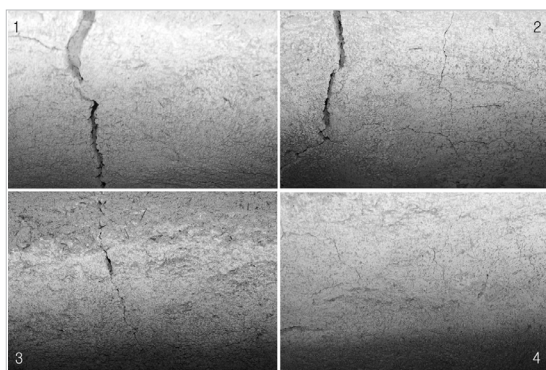
〈그림 48〉 8차 실험 후 골구멍 모습

2. 노벽의 변화

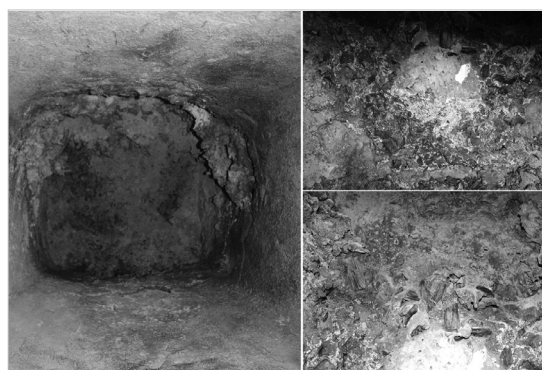
1) 노벽의 관찰

우측벽은 노상에서 100cm 높이까지는 대체로 요철면 없이 양호하였으며, 일부 크랙이 확인되었다. 100cm 높이의 좌측 상단부가 삼각형 형태로 용융되어 요철상을 이루고 있었다.

좌측벽은 110cm 높이의 우측 상단(뒷쪽면)에서 요철상이 관찰되지만 우측벽보다는 덜하다. 일부 크랙이 확인되고 좌벽과 뒷벽 사이 모서리부 하부에는 얇은 유리질이 형성되었다. 뒷벽은 110cm까지 중앙부는 높이 47cm, 너비 50cm, 최대깊이 7cm로 현저하게 침식이 확인된다. 이 부분이 용융 침식되어 노 바닥 쪽으로 흘러내렸는데, 바닥에서 높이 30cm, 너비 75cm 크기로 확인된다. 가장 앞쪽에는 유출상 슬래그가 얇게 막을 형성하는 것처럼 퍼져 있고, 일부 아래로 흘러내린 상태로 냉각되었다.



〈그림 49〉 예비실험 후 가마 상부 벽체 모습
(1 좌벽, 2 우벽, 3 뒷벽, 4 앞벽)



〈그림 50〉 예비실험 후 내부 목탄 제거 전
(좌: 상부에서 본 모습, 우상: 골구멍 모습, 우하: 골구멍 상부모습)



〈그림 51〉 예비실험 후 가마 하부 벽체(좌: 좌측벽, 중: 뒷벽, 우: 뒷벽과 우측벽 모서리)

2) 노벽에서 분리된 노벽

노 내부의 중첩되어 있던 목탄을 제거하는 과정에서 노벽의 일부가 분리되어 노 밖으로 유출되었

다. 골구멍 쪽과 그 하부 용융벽 및 목탄이 용융된 상태로 노출되었다. 제거된 용융 벽은 미장 시 얇게 형성된 부분만 분리된 것을 확인하였다. 이는 보강점토와 기존 벽체의 수축율이 달라서 결합되지 못해 갈라진 현상으로 추정된다. 함께 분리된 보수벽체 내면에 5cm 정도 두께의 미장면이 확인된다.

분리된 노벽의 단면을 살펴보면, 상부 25cm까지는 보강점토 및 최종 미장면의 구분이 뚜렷하고, 최종 미장면만 용융된 것이 관찰된다. 하부 17cm는 최종 미장면과 보강점토 모두 용융되어 보강점토면과의 구분이 쉽지 않다. 최종 미장면에 용융면 내측으로 상면에서 흘러내린 용융점토가 최대두께 10cm까지 용착되어 있다. 평면을 살펴보면, 상면 10cm에서는 최종 미장면의 용융이 확인되고, 하부 33cm는 상부에서 용융된 슬래그 용착이 확인된다. 그 면의 상부 쪽은 목탄이 다량 용착되어 있었고, 하부는 회백색 및 자갈색 슬래그가 주를 이룬다.



〈그림 52〉 노 밖으로 분리된 벽체(1 평면, 1 단면(미장면과 보강점토 구분 명확), 3 단면(미장면과 보강점토 모두 용융))

노 바닥이나 노벽에서 흘러내린 슬래그는 녹색 바탕에 자갈색이 얹은 막으로 분포하며, 대부분 유리질 광택을 보인다. 일부는 3cm 정도 판상을 이루기도 한다.

하부 슬래그 덩어리+목탄 다수는 자갈색 및 흑회색 유리질 광택 슬래그로 연소되지 않은 목탄으로 구성되어 있다.

3) 골구멍

골구멍에 사용된 벽체는 훼손되지 않았고, 골구멍 우측 하단에 보강하였던 석재 일부가 박리되었을 뿐이다. 골구멍 상면의 경우는 18~62cm까지 움푹하게 용융되었는데 이는 뒷벽의 관찰에서 설명하였다.



〈그림 53〉 예비 실험 후 골구멍 목탄제거 후 모습

VII. 맺음말

온도는 골구멍이 평균 1,337℃로 높았으며, 앞창은 초롱구멍을 기준으로 좌측이 평균 1,222℃, 우측은 1,129℃로 송풍이 균일하지 못했음을 알 수 있었다. 골구멍의 온도가 앞창의 온도보다 146℃ 높은 결과를 보였는데 이는 곡관형 송풍관을 사용해 실험한 결과와 유사하다. 초롱구멍과 잡쇠구멍 개방과 폐쇄에 영향을 받았던 곳은 출탕구 상부에 설치된 3번과 골구멍 우측의 5번이었다. 개방시 온도 상승효과가 있었으며, 폐쇄 시 하강현상이 있었다. 즉 가마 내의 바람길은 골구멍 우측에서 앞창의 좌측으로 형성된 것으로 추정할 수 있다.

노벽은 골구멍 상단이 현저하게 침식되는 현상을 관찰할 수 있었다. 이전의 실험에서도 동일한 현상이 반복적으로 확인되었으나 금번 예비실험에서 더 명확하게 나타났다. 실험 목적상 철광석을 장입하지 않았기 때문에 목탄에 의한 급격한 온도 상승의 영향을 고려할 필요가 있다. 이 부분에 대해서는 향후 추가적인 검토가 필요하다.

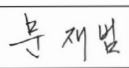
4 자문위원 의견서

자문위원 의견서		
사 업 명	2023년 제9차 울산쇠부리복원사업	
실험일시	2023년 5월 13일(토요일)	
자문내용	울산쇠부리기술 복원실험과 관련된 전반적 사항(기술·학술·보존·활용 등)	
자 문 의 건		
1. 제철기술 복원실험에 대한 의견		
<과정> • 1, 2차 출탕 시 판장쇠 바탕을 채우는 양이 부족했음. 3차 출탕 시 부족한 양을 채우려고 시간을 연장함. 시간을 놓쳐 내부 온도가 내려가면서 영켰을 가능성이 있음 • 여러 가지 원인이 있을 수 있으나 슬래그를 계속 빼내야 하는데 배출을 제대로 안 시켜 내부에 쌓여 있었던 것으로 보임. • 결국 1, 2차 선철이 출탕구(초롱구멍) 등에 응고되어 단단히 막힘. 3차는 출탕구를 뚫지 못해 쇳물 유출 실패.		
<과제> • 계속 온도를 높일 시 가마 내벽이 녹아내리는 문제를 어떻게 해결할 것인가? • 가마 내부 미장제를 무엇으로 할 것인가? • 발굴 원형대로 복원하는 것이 원칙이지만 아직까지 결과가 만족스럽지 못함 - 계속 이런 식으로 진행하기에는 시간적인 한계도 존재함. - <울산쇠부리기술> 무형문화재 신청에도 문제가 발생할 수 있음.		
2. 향후 추진 방향		
• 쇠부리기술복원은 지금까지 8차에 걸쳐 많은 성과를 내었음. • 앞으로 안정적 판장쇠 생산을 위한 매뉴얼 정립이 필요할 때인데 여러 가지 기술적 요인으로 문제가 많이 발생함. 물론 9차 실험은 가마 미장 공사라든지 실험 당일 날씨 등으로 변수가 많았음 • 발굴 원형대로 하는데 의의를 두지만 문제가 있으니 모든 가능성을 열어 놓고 다양한 실험을 시도해야 함. • 쇠부리 가마의 구조와 조업 매뉴얼을 확실하게 복원할 대안을 긴급히 마련해야 함. • 9차까지 진행한 결과를 가지고 향후 계획을 재정립하여 가시적 성과를 낼 수 있도록 총의를 모아야 함. • 이번 축제 기간에도 확인할 수 있었듯이 쇠부리기술복원도 시민들이 많은 관심을 가지고 있음. 쇠부리 기술과 문화에 대한 자부심을 느낄 수 있었음.		
자 문 위 원		
소 속	전 공	이 름
울산대학교	구비문학(민속학)	김 구 한 (인)
2023년 5월 19 일		
울산쇠부리복원사업단장 귀하		

자문위원 의견서

사 업 명	2023년 제9차 울산쇠부리복원사업		
실험일시	2023년 5월 13일(토요일)		
자문내용	울산쇠부리 기술복원실험과 관련된 전반적 사항(기술·학술·보존·활용 등)		
자 문 의 건			
복원 사업의 성공을 위해 불철주야 노력 하시는 복원사업단의 노고에 감사드립니다. 전년도의 우려 사항중 송풍구를 출탕구 방향으로 낮추어 주셨으면 하는 의견과 장입구의 입구크기를 작게줄여 주셨으면 하는 의견을 말씀 드렸으나 개선 되지 못한 점이 아쉬움으로 남습니다. · 목탄의 크기를 일정크기 이상으로 선별 장입하여 주신부분에 대해서는 앞으로도 계속 선별 장입하여 주시면 좋을 듯 합니다. · 로 전체에 습기가 많이 있는 부분도 개선 되어야 한다고 생각 합니다. · 또한 슬래그 제거가 원활하지 못한 점은 점토와 강모래로 배합하여 노벽의 두께도 3cm로 미장해 보면 좋을 것으로 사료 됩니다. 복원사업의 조그만 도움이라도 되었으면 하는 마음으로 자문서를 제출 합니다.			
자 문 위 원			
소 속	전 공	이 름	
안성주물	경기도 무형문화재 제45호 주물장 전 수 자	김 성 태 	
2023년 5월 일			
울산쇠부리복원사업단장 귀하			

자문위원 의견서

사 업 명	2023년 제9차 울산쇠부리복원사업	
실험일시	2023년 5월 13일(토요일)	
자문내용	울산쇠부리 기술복원실험과 관련된 전반적 사항(기술·학술·보존·활용 등)	
자 문 의 건		
1. 전년도의 실험조건과 비교하여 2-3가지의 변화를 주는 것은 각 조건들의 역할을 판단하는 것에 어려움이 있으므로 새로운 시도는 1가지 정도로 통제하는 것이 필요함.		
2. 이번의 결과에서 보면 출탕시간의 조절이 매우 중요한 것으로 판단되는 바, 향후 출탕시간의 결정은 기계적으로 시간을 정하지 말고 조업상황에 맞추어 조정할 필요가 있음. 이 경우에 어떠한 기준을 가지고 출탕시간을 정할 것인가에 대한 연구와 토론이 필요할 것으로 판단됨.		
3. 국내외의 여러 실험사례들을 보면 축제적인 요소가 들어가는 실험의 경우 연구자들이 원하는 조업시간 만큼 시간을 확보하지 못하기 때문에 처음에 기획한 결과가 나오지 않는 경우가 많은 것을 알 수 있음. 앞으로도 이러한 점을 염두에 두어 퍼포먼스와 실험이 양립할 수 있는 정도로 기획을 조정할 필요가 있어 보임.- 대중에게 공개하는 부분이 있기 때문에 눈높이에 맞는 정도의 기획도 필요함.		
자 문 위 원		
소 속	전 공	이 름
국립중앙문화재연구소	고고학	문재범 
2023년 5월 일		
울산쇠부리복원사업단장 귀하		

자문위원 의견서		
사 업 명	2023년 제9차 울산쇠부리복원사업	
실험일시	2023년 5월 13일(토요일)	
자문내용	울산쇠부리 기술복원실험과 관련된 전반적 사항(기술·학술·보존·활용 등)	
자 문 의 건		
* 이번 실험은 노 축조과정에서의 점토 문제와 실험 당일 비가 내리는 좋지 않은 조건에서 이루어졌음에도 불구하고, 1차와 2차 출탕이 이루어지는 등 비교적 성공적인 실험이었다고 생각된다. 다만 1·2차 출탕에서 남은 선철이 출탕구 등에 응고되어 가장 많은 양이 배출되어야할 3차 출탕이 이루어지지 못한 것은 조금 아쉬운 점이라 할 수 있으며, 향후 가마를 절개해 내부에서 수거된 것에 대한 분석을 토대로 금번 실험의 성공 여부를 평가해야할 것으로 생각한다. * 일단 미장제로 사용한 청도산 점토의 내화도가 높지 않았던 것으로 보이므로, 향후 내화도가 높은 점토를 찾는 것도 중요한 과제라 할 수 있다. * 기계 송풍에도 불구하고 가마 내부의 온도가 충분하지 못해 슬래그의 용융 및 유동이 원활하게 이루어지지 못한 것으로 보인다면, 송풍구의 위치 및 각도조정을 검토할 필요성은 없을까? 조선시대 제련로에서 측면에서 송풍이 이루어진 예도 참고가 될 수 있을 듯하다. 다만 무형문화재 등록 신청에 필요한 시간이 부족한 점을 감안하면 새로운 구조로 실험할 수 있는 시간은 내년 정도 밖에 없는 점이 문제일 것 같다.		
자 문 위 원		
소 속	전 공	이 름
충북대학교	역사고고학	성정용 
2023년 5월 일		
울산쇠부리복원사업단장 귀하		

자문위원 의견서

사 업 명	2023년 제9차 울산쇠부리복원사업
실험일시	2023년 5월 13일(토요일)
자문내용	울산쇠부리 기술복원실험과 관련된 전반적 사항(기술·학술·보존·활용 등)

자 문 의 건

사전작업 : 석축형제철로 축조과정에 대한 의견

- 석축형제철로 축조과정에서 벤토나이트 미장과 청도산 점토 미장으로 인한 문제는 향후 성분분석에 대한 검토가 필요하다. 이번 실험으로 청도산 점토에 대한 성분분석과 철재에 대한 분석을 통해 노내 미장점토가 미치는 영향에 대한 분석자료가 있어야 한다. 향후 실험에서도 노내 미장이 필요하므로 어떤 성질의 점토를 사용하는냐가 노내 제철조업 환경에 큰 영향을 줄 것으로 판단된다. 이 부분에 대한 고려가 필요하다.
- 석축형제철로의 구조로 보아 노 축조과정에서 자연건조와 예비 예열을 통한 건조과정이 충분하게 이루어져야 한다. 이번 실험을 위해 충분한 시간을 가지고 준비할 수 없는 환경이 있었다. 노 축조의 물리적 고충은 이해하나 석축형제철로의 경우 자연건조에 필요한 시간을 확보할 필요가 있다. 최소 10일 정도 자연건조가 필요하며, 예비 가열을 통한 수분 제거가 필수요소로 고려되어야 한다. 수분이 노내 조업환경의 결정적 영향을 미쳤다. 이와 더불어 우천으로 인한 자연환경적 요인까지 겹쳐 노내 온도를 평균 1,250~1,270도 유지가 되었다. 앞서 살펴본 자연건조와 우천관계 환경을 고려한다면 하부 1,300도 이상 균일하게 유지하기가 어려웠다고 추정된다.
- 아울러 노의 상부구조의 형태에 대한 문제 제기이다. 제련로의 열을 상부로 발산하는 것보다는 상부로 갈수록 폭을 좁게 해 종형 구조를 만들어 실험하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 노의 하부온도가 1,300도 이상 유지에 필요한 구조적 이점을 활용하지 못한 부분도 아쉬움으로 남는다.

조업과정 : 1차·2차 슬래그 유출과 쇳물 출탕

- 1차 출탕전 슬래그 유출을 유도하였다. 1차 슬래그 유출은 노내 조업환경을 파악하기 위한 작업이다. 이 점에서 잡쇠구멍을 통해 유출재가 흘러나왔는데, 색조와 기포 등 관찰을 통해 충분히 선철이 노 아래로 내려가지 않는 점이 확인되었다(1차 유출재 표면에 비중이 큰 선철 알갱이 맷집). 이는 유출재보다 비중이 큰 선철이 노 바닥으로 흘러내리지 않았고, 노 바닥 온도도 1,300도 이상이 아닌 평균 1,250도 전후를 유지하는 정도였다. 역시 노 바닥 온도가 1,300도 이상 유지할 때 출탕을 하는 것이 맞다고 생각했다. 이 과정에서 1차 쇳물을 출탕시켰는데, 이후 온도에 대한 정밀한 검토가 필요하다. 왜냐하면, 1차 출탕이후 노의 바닥에 형성되었던 쇳물 pool이 사라지면서 노내 온도가 불완전하게 되면서 급속도로 냉각이 이루어져 반응용 슬래그층 위에 선철층이 형성되었던 것으로 추정된다. 1차 출탕 쇳물도 8.55kg으로 6매 모두를 채우지 못했다. 그렇다면 1차 출탕시점에 대한 검토도 필요하다.
- 그 후 2시간 송풍을 하고 2차 출탕을 시도하였다. 이 과정에서도 출탕구 개방시 쇳물이 선철과 슬래그층에 꽂혀 빠지지 않았다. 이 과정에서 기존 출탕구 옆을 개방하여 쇳물을 출탕하였다. 그렇다면 1차 출탕(1,288도)과 2차 출탕(1,251도)과정에서 노 바닥의 변화가 이루어져 송풍과 슬래그층이 형성된 것으로 봐야 한다. 2차 출탕 이후가 아니라 1차 출탕이후 노내 환경변화가 있었다. 송풍구 코 부분 용선이 일어나게 된 점은 슬래그층 위에 선철pool이 형성되면서 바닥보다 송풍구 주변의 온도가 높아지면서 노벽과 송풍구 보완점토의 용선이 일어난 것으로 봐야 한다.
- 따라서 1차 출탕이후 노의 환경변화에 대응하기 위한 방안이 필요하다. 1차 출탕시점에 대한 검토를 통해 첨가제 슬래그 장입의 문제인지 아니면 충분한 건조가 이루어지지 않아 생긴 문제인지 점검이

필요하다. 노의 환경이 1,300도 이상을 유지되지 않았다면 슬래그 첨가제 사용이 조업환경을 방해한 요인으로 작용했을 수도 있다.

- 2차 출탕시(17시40분) 노의 평균온도가 1,251도이다. 그 후 1,250도 이상(18시 10분)으로 돌아오는데 30분이 소요되었다. 18시 40분부터 20시 30분 3차 출탕을 시도하는 동안 1차와 2차의 시간차를 3시간 간격으로 늘렸다. 2차 출탕이후 노내 온도 변화로 인해 여러 번 위기가 있었다. 2차 출탕이후 슬래그가 계속 생성되는데 유출이 되지 못하자 송풍구로 역류하는 현상이 발생해, 슬래그가 가마 뒤편으로 넘쳐흘러 강제로 제거하며 송풍하였다. 이 부분에 대한 분석은 3차 출탕 실패로 형성된 노내 형성물에 대한 절개조사를 통해 밝혀낼 수 있을 것으로 판단된다. 향후 노내 절개 부분에 대한 정밀한 분석이 가장 중요하다.

문화재 보존활용의 모범사례

- 쇠부리 제철복원실험에 처음으로 참석하였다. 울산 쇠부리 축제 속 시민들과 함께 하고자 하는 여러 연구자와 쇠부리 보존회 여러분께 큰 지지와 성원을 보낸다. 전국 어디에서도 볼 수 없는 전통제철복원 실험을 시민들과 공유하고자 하는 노력에 큰 감동을 받았다.
- 전통제철복원 실험과 전통문화유산을 보존활용하는 부분에 있어 모범사례로 향후 지속적인 보존과 활용에 대한 고민이 지속되기를 바란다. 제철복원 실험으로 획득한 생산품과 해설사에 대한 교육을 강화하여 울산 쇠부리 보존회가 자생할 수 있는 씨앗을 심어줄 수 있기를 기대한다.

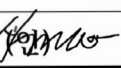
자 문 위 원

소 속	전 공	이 름
(재)삼강문화재연구원	고고학	소배경 

2023년 5월 14일

울산쇠부리복원사업단장 귀하

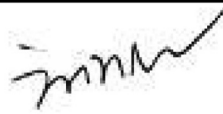
자문위원 의견서

사 업 명	2023년 제9차 울산쇠부리복원사업	
실험일시	2023년 5월 13일(토요일)	
자문내용	울산쇠부리 기술복원실험과 관련된 전반적 사항(기술·학술·보존·활용 등)	
자 문 의 건		
▶ 쇠부리 복원 실험은 그동안 여러 차례 실시된 결과를 바탕으로 보다 진전된 원형 복원을 시도하려는 노력의 일환이다. ▶ 3차 실험부터 시도된 선철 생산은 7, 8차에서는 양호한 결과를 보여주었으나 이번 실험은 다소 아쉬운 결과를 낳았다. 하지만, 실험일 우천으로 인한 습도 관계, 가마의 건조 미흡에 따른 상관 관계가 있을 것이라는 추정을 할 수 있게 되었다. ▶ 따라서 우천으로 인한 습도의 영향과 가마 건조 시간에 대한 문제는 깊이 검토될 필요가 있다. ▶ 이러한 원인 분석은 다양한 온·습도 환경에서 선철을 생산하였던 당시의 기술을 복원하는 기초 자료가 될 수 있다. ▶ 유동성이 떨어진 철재(鐵滓)의 형성 요인에 대한 철저한 검토가 필요하다고 판단된다. 즉, 이 요인이 첨가제로 사용한 철재의 문제인지 아니면 가마(爐) 온도의 문제인지 규명할 필요가 있다. ▶ 아울러 가마 내부 미장제인 청도산 점토(석립, 모래=Si)의 내화도 문제에 대한 검토가 필요함. ▶ 판장쇠바탕 제작에서 도형제의 원료에 대한 재검토가 필요하다. ▶ 9차례 진행된 실험은 울산 쇠부리기술의 복원을 위한 귀중한 기초 자료를 제공하고 있다. 따라서 이번 실험 결과와 8차례 진행된 실험 결과를 종합하면 앞으로 진행될 10차 실험 매뉴얼 작성에 중요한 자료를 제공할 것으로 판단된다.		
자 문 위 원		
소 속	전 공	이 름
한림대학교	고고학	심재연 
2023년 5월 일		
울산쇠부리복원사업단장 귀하		

자문위원 의견서		
사 업 명	2023년 제9차 울산쇠부리복원사업	
실험일시	2023년 5월 13일(토요일)	
자문내용	울산쇠부리 기술복원실험과 관련된 전반적 사항(기술·학술·보존·활용 등)	
자 문 의 건		
울산 쇠부리기술의 복원 과정에는 고고학, 역사학, 금속공학, 민속학 등 여러 분야 학문들의 지식을 필요로 하고, 현장에서 발생하는 돌발적인 상황이 있기 마련이어서 실험의 진행과정을 애초 기획한대로 통제하기란 대단히 어렵다. 그럼에도 불구하고 이번 실험은 큰 틀에서 보았을 때 무리없이 진행된 것으로 판단되며 참여자 분들의 노고에 진심으로 감사를 표한다. 다만 한두 가지의 촌평을 하면 다음과 같다. 먼저 실험용 제련로의 축조 재료, 그리고 연료와 원료의 구입에 따르는 변수들이 거의 매 실험마다 실험결과에 적지 않은 영향을 미쳐 왔다. 이번에도 노벽 축조의 과정에 반드시 필요한 점토의 선정에 우여곡절이 있었으며, 이로 인한 여파가 출탕에 직간접적으로 영향을 미쳤을 것으로 추정된다. 차후 실험에 대비하는 것뿐만 아니라 중장기적인 계획을 세워 축조 재료, 연료, 원료의 확보 방안을 마련해 나갈 것을 제안한다. 다음으로 첨가제인 슬래그의 투입은 실험 매뉴얼에 따라 준비된 것이므로 이러한 측면에서는 타당해 보인다. 다만 슬래그의 영향이 조업에 악영향을 미쳤는지에 대해서는 실험 결과물에 대한 면밀한 분석을 통해 규명해 나가야 할 것이다. 이번 경우 슬래그의 투입 자체는 문제가 없으나, 다만 투입 시 노 내 상황이 열악하여 문제가 생기지 않았나 여겨진다. 결과적으로 이번 실험에서 철 생산량이 목표치를 달성하지는 못했다. 그럼에도 불구하고 실험의 소기의 성과는 어느 정도 달성했다고 판단되며, 실험 결과에 영향을 미치는 영향들을 지속적으로 축적해 나가기를 당부한다.		
자 문 위 원		
소 속	전 공	이 름
전북대학교	고고학	조 대 연 (인)
2023년 5월 18일		
울산쇠부리복원사업단장 귀하		

자문위원 의견서

사 업 명	2023년 제9차 울산쇠부리복원사업	
실험일시	2023년 5월 13일(토요일)	
자문내용	울산쇠부리 기술복원실험과 관련된 전반적 사항(기술·학술·보존·활용 등)	
자 문 의 건		
지난 8차 실험의 성과를 기반으로 선철 생산량을 늘리기 위해 원료의 양을 추가하였다. 다만 조업 과정에서 3차 배출 시 알 수 없는 이유로 출탕구와 배재구가 막혀 철재의 제거 및 선철의 출탕이 원활하지 못해 조업 계획의 일부가 수정되었다. 이는 실험에서 흔히 볼 수 있는 일로, 제철로 안의 형성물을 현재 상태 그대로 관찰 및 분석하여 다음 실험을 원활하게 진행할 수 있는 자료를 확보한 것이라 볼 수 있다. 따라서 실험단에서는 노의 해체 및 형성물의 수거 방법, 기록 방법 등에 대해서 검토해 보아야 할 것이다.		
또한 현재 상황에서 출탕구와 배재구 막힘의 원인은 노벽에 붙은 철 및 철재가 배출구 중간에서 냉각된 것으로 보인다. 이에 출탕구 및 배재구를 막을 별도의 마개를 준비해 보아야 할 것으로 생각된다.		
자 문 위 원		
소 속	전 공	이 름
아주대학교 도구박물관	고고학	최 영 민 (인)
2023년 5월 16일		
울산쇠부리복원사업단장 귀하		

자문위원 의견서		
사 업 명	2023년 제9차 울산쇠부리복원사업	
실험일시	2023년 5월 13일(토요일)	
자문내용	울산쇠부리 기술복원실험과 관련된 전반적 사항(기술·학술·보존·활용 등)	
자 문 의 건		
이번 실험은 여건상 다른 실험들에 비해 좋지 못한 조건들로 시작됨 1. 우천으로 인한 습도 높아 낮은 온도 지속 2. 노내 내부 미장재료 교체 등으로 덜 마른 상태[김이 나옴] 이외에도 지난 실험과 달리 상부구조에서 꺾임 없이 일직선으로 조정하고, 조재제로 슬래그를 여전히 사용하였으나 노내 슬래그의 유동성을 오히려 저해하는 요소로 지목됨. 결과적으로 지난 22년 10월 7차 쇠부리 실험에서도 지적된 바와 같이 내부 점토가 송풍구 쪽으로 녹아내려 막힘 현상이 계속되었고, 슬래그가 찰떡해 철물의 유출이 제대로 안된 채 기포가 다량 발생한 판장쇠가 제작된 것과 비슷한 결과가 나옴 노내의 미장재료는 노벽을 축조한 재료[점토 또는 황토]와 크게 다르지 않았을 것으로 추정됨. 다만 송풍량이 너무 많아 노벽이 견디지 못하고 계속 녹아내리는 것이 문제임. 이번 실험에서는 사람이 직접 풀무를 밟아 기계송풍보다는 송풍량의 조절이 있었으나, 노내 공간 대비한 송풍량의 과다는 여전했을 가능성이 있어 이에 대한 계산이 필요함. 슬래그 조재제의 사용에 대한 의문이 계속되는 상황임. 그리고 이번에는 송풍관 높이에서 막을 형성하고 아래로 잘 내려오지 못해 걸림 현상도 있었던 것으로 보임. 따라서 슬래그의 유동성 확보 문제를 해결할 방법을 찾아내야하는데, 역시 패각의 사용을 재검토해 사용할 필요가 있다고 판단됨. 그간 패각을 사용하지 않았은 것은 염기도를 올리지 않기 위함이나 이미 사용중인 양양산 철광석의 염기도가 높아 고대 혹은 중근세 슬래그의 낮은 염기도 수준을 만들어 낼 수 없음. 따라서 염기도가 아닌 슬래그의 유동성 확보에 좀 더 집중하여 조재제를 사용할 필요가 있음, 상부구조도 일직선일 때 기체가 모두 빠져나감으로 좁아지는 설계가 재도입될 필요가 있음		
자 문 위 원		
소 속	전 공	이 름
국립문화재연구원	고고학	한 지 선 (인)
2023년 5월 13일 울산쇠부리복원사업단장 귀하 		

5 실험고고학으로 본 울산지역 석축형제철로 (울산쇠부리가마)의 선철(銑鐵) 생산기술 연구¹⁾

강성귀(한국문화재단 문화재조사연구단)
김권일(신라문화유산연구원)
권용대(울산문화재연구원)

【국문요약】

본 연구에서는 유적에서 파악되는 고고학적 특징과 4차례에 걸친 실험고고학 결과를 비교·검토해 조선후기 울산지역 석축형제철로의 선철 생산기술에 대해 살펴보았다. 그 결과 석축형제철로는 방형의 노와 석축시설, 대형 풀무, 석조식 바람골, 출선구·출재구가 설치된 아궁이, 판장쇠바탕 등 선철을 대량·선별 생산하기에 적합한 구조라는 점을 알 수 있었다. 또한 석축형로에서는 분말상의 달천광산 토철을 원료로 사용하였고, 용선을 일정한 모양의 틀에 흘려보내 규격화된 선철 소재를 생산하였으며, 생산품에는 4.3%C의 공정주철에 가까운 탄소가 함유되어 있어 용해주조의 소재로 적합하다는 점도 확인되었다.

선철 생산을 위해서는 노의 높이만이 절대적 조건이 아니며, 원료의 형태·연료와의 비율·송풍 방식·출탕 등의 조업방식 설정이 유기적으로 연계되어야 한다는 점이 실험고고학 연구를 통해 파악된 것이다. 다만 출선구의 막힘 현상, 유적과 동일 규모 노에서의 실험, 다른 시기 및 지역 선철 생산기술과의 비교검토 등은 앞으로의 과제이다.

【주제어】 석축형제철로(石築型製鐵爐), 울산쇠부리복원실험, 토철(土鐵), 선철(銑鐵), 판장쇠바탕

1) 이 글은 국립중앙문화재연구소의 2023년 '제2회 제철 관련 논문 공모'에 응모한 논문으로, 현재 심사가 진행 중이며 2024년 논문집이 발간될 예정이다. 2019~2022년 본 사업단의 선철 생산실험 결과를 정리·검토한 내용으로, 연구소의 사전 허가를 받아 본 보고서에 게재한다.

I. 머리말

석축형제철로는 조선후기 울산 달천광산 주변지역에서 360년 이상 이어온 철 제련로의 유형이다. 토독형·사도형(斜道形) 제철로, 쇠부리 노(セブリノ) 등으로 불리며, ‘울산 쇠부리가마’라는 명칭으로 제철복원 실험연구의 대상이 되고 있다. 석축형제철로의 가장 큰 특징은 노의 양측에 긴 석축이 설치되고 달천광산의 토철(土鐵)을 제련해 선철 판장쇠(철정-鐵錠)를 대량생산하였다는 점이다. 울산 태생의 구충당 이의립이 토철제련법(土鐵製鍊法)을 개발한 이래 그 후손들에 의해 달천광산과 제철장·주물점·대장간의 유기적 생산·유통체계가 이어져 왔으며, 권병탁의 경제사 연구 일환으로 방대한 전언·민속·실물자료가 채집되었다(권병탁 2004). 이후 석축형제철로에 대한 연구사와 유적 현황, 기원 및 계보, 조업방식 등에 대한 검토(김권일 2009; 김경호 2012; 신경환 외 2015; 최영민 2019; 김권일 2020a)가 지속적으로 이루어지고 있다. 「승정원일기」·「구충당문집」 등의 문헌기록을 통해서도 이의립이 달천철장을 경영하게 된 경위, 철장의 운영 체계, 토철의 채취, 달천철장에서 제련된 물종(선철의 생산) 등에 대한 검토가 이루어진 바 있다(서성호 2015).

울산쇠부리복원사업단(이하 사업단)에서는 2019~2022년 4차에 걸쳐 조선후기 울산 달천광산 주변지역 석축형제철로의 제철기술을 복원하기 위한 실험을 진행했으며, 대체로 1회 실험에서 3~4차례 쇳물을 출탕시켜 선철 판장쇠를 생산하는 등 조업방식에 대한 기술복원이 진척을 보이고 있다. 실험에서는 울산 대안동 쇠부리터 등을 모델로 노의 구조를 복원하고(1/2 축소), 유구·유물의 정보, 금속공학적인 이론, 제철복원실험, 장인의 기술적 노하우 등을 취합해 실험매뉴얼을 작성하였으며, 이러한 일련의 과정들을 보고서로 발간하고(이남규 외 2019·2020·2022a·2022b) 개략적인 현황을 학계에 보고한 바 있다(강성귀·김권일 2022).

본고에서는 4차에 걸친 사업단의 조선후기 선철 생산 복원실험 현황을 정리하고, 이를 토대로 석축형제철로의 선철 생산기술에 대해 검토하고자 한다. 구체적으로는 석축을 가진 제련로의 구조, 토철(土鐵)이라는 분상(粉狀) 원료, 목탄의 종류와 장입 비율, 산화칼슘(CaO) 성분의 첨가제, 송풍 및 온도 등이 선철의 생산에 미치는 영향 등을 분석하고, 최종 생산품인 선철 판장쇠의 효용성에 대해 검토하고자 한다.

Ⅱ. 울산지역 석축형제철로 조사 현황

석축형제철로(이하 석축형로)²⁾는 울산 달천광산을 중심으로 인접한 경주·청도지역에 집중적으로 분포한다. 현재까지 발굴·지표 등의 조사를 통해 보고된 유적은 40여 개소 이상이다. 하지만 권병탁에 의해 알려진 82개소 유적(중복유적 포함)을 감안한다면 적어도 100개소 이상의 유적이 남아 있는 것으로 추정된다³⁾. 석축형로는 달천광산 반경 40km 이내지역의 울산·경주·청도지역에 분포하며, 발굴 조사에서 토철이 출토된 점, 관련유물의 금속분석에서 비소가 검출되는 점, 달천광산의 토철을 가져다 조업했다는 주민들의 전언 등으로 보아 달천광산의 토철과 깊은 관련이 있음을 알 수 있다. 현재까지 정밀발굴조사가 이루어지거나 이전복원 과정에서 개략적인 구조가 밝혀진 석축형로 유적은 9개소이다(표 1 및 도면 1 참조).

〈표 1〉 석축형로 조사 현황

연번	유적명			석축 규모(m)	노 형태		규모(m, 내경 기준)				비 고
					평면	단면	장축	단축	높이	평면적(㎡)	
1	울산 삼정리 야철지			—	장방형	완만한 U자형	2.00	1.50	(1.00)	3.00	후면 송풍시설, 배재부
2	울산 삼정리 유적			—	말각 장방형	완만한 U자형	1.30	2.00	(0.6)	2.60	배재부 반원상, 후면 송풍시설, 원형 부서시설
3	울산 방리 야철지	1호	1차	15.1×3.6	방형	U자형	2.23	(1.92)	2.17	(4.28)	석축, 배재구, 이중의 배수구, 작업장, 철재
		2차	장방형		U자형	1.31		1.51	2.92		
		2호		—	방형	완만한 U자형	2.30	2.0	(1.21)	4.60	바닥 회청색 경화면, 배재부
4	울산 천전리 유적			—	말각 방형	U자형	1.90	1.80	(1.40)	3.42	후면 수혈시설, 배재구
5	울산 대안동 쇠부리터			15.0×4.3	장방형	역제형	2.1	1.6	2.50	3.36	배수구, 배재부, 유출재
6	경주 신대리 제철로			—	타원형	U자형	(0.92)	(0.74)	(0.37)	(0.68)	노벽 청회색, 바닥 회청색, 배재부
7	경주 모화리 모화지유적			20.2×3.2	말각 장방형	U자형	(2.02)	(1.85)	3.22	(3.74)	송풍구(60×56cm) 40~50°, 하부 50cm 바닥시설
8	경주 녹동리 야철지			20.6×3.2	방형	U자형	1.80	1.80	3.10	3.24	송풍구(60×45cm), 배재구, 이전복원
9	경주 용명리 제철유적			19.5×3.8	말각 장방형	완만한 U자형	2.90	2.30	2.50	6.67	송풍구(30×30cm) 20°, 방습시설 50~60cm,, 배재구

2) 석축형제철로가 형식설정(김권일 2009)된 이후, 광주 열미라·상주 호음리·광양 황죽리·하동 탐리·보은 상판 및 대원리 등의 유적에서도 유사한 구조의 제철로가 조사되어, 동일 범주의 유형에 포함되고 있다(최영민 2021; 박상현 2022). 이 유적들은 달천광산 및 토철과는 전혀 관련이 없으며, 사철 제련·반환원과 생산·주조철기 제작 등 성격에 차이가 있는 것으로 판단된다. 본고의 검토대상은 울산 달천광산 주변지역에 분포하며 토철을 주 원료로 하는 석축형제철로에 한정한다.

3) 모두 석축형로인지는 알 수 없지만 지표조사에서 확인된 유적의 현황 및 석재가 산재한다는 등의 보고내용으로 보아 대부분 석축을 가진 제철로로 추정된다.

먼저 유적의 입지를 살펴보면, 삼정리·방리·천전리는 모두 대곡천 유역에 위치한다. 삼정리에서 합류하는 주원천 상류와 대곡천 하류 사연호 주변 대곡리·반연리 일대, 그리고 청도 신원리 야철지와 가까운 울산 서부권역에 아직 보고되지 않은 석축형로가 골짜기를 따라 상당수 분포하는 것으로 알려져 있다.

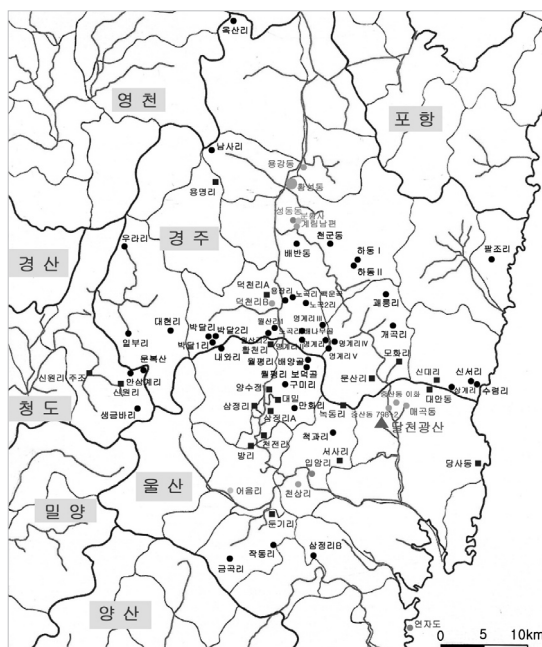
삼정리유적에서는 석축형로와 함께 측구식·무측구식 탄요가 발굴조사되었는데, 울산지역에는 쇠·숯 관련 지명이 함께 있는 경우가 많은 것으로 보아 제철에 필요한 목탄이 현지에서 수급되었음을 알 수 있다. 대안동·신대리·모화리 야철지는 동대산(해발 446.7m) 삼태지맥에서 동쪽으로 뻗어 내린 구릉 사면부, 녹동리 야철지는 치술령(해발 767m)에서 동쪽으로 뻗어 내린 구릉 사면부, 용명리 제철 유적은 구미산(해발 594.3m)에서 서쪽으로 뻗어 내린 구릉 사면부에 위치한다. 모두 계곡과 가까운 완만한 사면부에 석축형로를 조성하였다. 제철로 축조 및 그 운영에 필요한 석재·항토(점토), 물 등을 구하기 쉽고, 원료·연료의 운송에 용이한 지형이 선택된 것으로 볼 수 있다.

석축형로는 중앙에 노, 양쪽에 석축, 앞쪽에 아궁이와 배재부, 뒤쪽에 송풍시설 등을 갖추고 있다. 노의 평면형태는 대부분 장방형이며, 석재로 방을 쌓고 내면은 점토를 미장한다. 석축의 기능 및 내벽에 3회 내외의 덧바른 보수 흔적이 관찰되는 것으로 보아 장기간 사용되었음을 알 수 있다.

노의 단면형태는 크게 ‘U’자형, 완만한 ‘U’자형, 역제형으로 나눌 수 있다. ‘U’자형은 노벽이 수직으로 내려오다가 노 하부에서 완만하게 경사지며, 방리 1호·천전리·신대리·모화리·녹동리가 해당된다. 완만한 ‘U’자형은 노벽 상단에서 하단까지 전체적으로 완만하게 경사를 이루며, 삼정리 야철지·삼정리유적·방리 2호·용명리에서 관찰된다. 역제형은 노 상부가 넓고 하부가 좁은 형태로, 상단에서부터 직선적으로 경사져 내려오며 대안동 쇠부리터가 해당된다.

노의 크기는 장축 1.3~2.8m, 단축 1.31~2.3m, 잔존높이 1.55~3.22m로, 내면 평면적을 기준으로 3.0㎡ 미만의 소형, 3.0~5.0㎡의 중형, 5.0㎡ 이상의 대형으로 구분할 수 있다. 소형은 삼정리유적·방리 1호(2차), 중형은 삼정리 야철지·방리 1호(1차) 및 2호·천전리·대안동·모화리·녹동리 등 대부분의 제철로가 해당되며, 대형은 용명리 제철유적에서 관찰된다.

노 양쪽에 설치된 석축은 좌우 대칭이며, 노벽을 보강함과 동시에 원료·연료의 장입 동선이 된다. 노와 가까운 곳이 높고 넓으며 아래쪽으로 갈수록 완만하게 낮고 좁아진다. 주축방향 양쪽 가장자리에 석축을 쌓고 그 사이는 굴착했던 기반토와 석재 등을 채워 넣었다. 아궁이는 노 내부 환경을 관리



〈도면 1〉 석축형로 관련유적의 분포

(김권일 2022; ● 삼한~삼국시대 ● 통일신라~고려시대
■ 조선시대 ● 지표조사)

하는 기능 및 형성된 쇳물 및 슬래그를 배출시키는 출탕구가 설치되는 곳으로, 노 바닥 가까운 위치에 출선구, 그 위쪽에 출재구가 설치된다. 배재부는 노의 앞쪽에 구나 수혈의 형태로 조성되며, 작은 구와 ‘八’자상 수혈 등을 아궁이와 이어지도록 설치한다. 내부에서는 대체로 목탄과 철재가 검출되며, 이들은 최종적으로 경사가 낮은 곡부로 폐기된다.

송풍시설은 노 안쪽의 골구멍(송풍구), 바깥쪽의 바람골 및 풀무자리 등으로 나타난다. 골구멍은 석재를 이용한 석조식(石組式) 구조이며, 바람골과 연결되어 20~50° 각도로 노 벽체를 관통한다. 풀무자리는 삼정리·대안동에서 각각 길이 676·730cm, 너비 135·150~175cm, 깊이 40·60cm 세장방향 수혈로 확인되었다. 풀무의 크기는 제련로의 크기와 직결되는데, 석축형로의 크기가 다양한 것으로 보아 풀무의 크기도 달랐을 것으로 판단된다. 삼정리 제련로는 잔존 내경 기준 길이 200cm, 너비 150cm, 대안동 제련로는 길이 204cm, 너비 168cm의 크기이다. 노 내부 잔존길이 85cm, 너비 66cm의 고려시대 충주 완오리 제철유적 2호 제련로에 설치된 풀무가 길이 200cm, 너비 40cm 정도로 추정되고 있어(김권일 2021, 12~13), 노와 풀무의 크기는 일정한 비례관계를 가진다는 것을 알 수 있다. 이 외 석축형로에서는 노 바닥 방습시설, 배수로, 건물지, 토철·목탄 저장소, 각종 작업시설 등이 확인된다.

〈표 2〉 석축형로 풀무 크기

연번	자료명	풀무 크기(cm)			내용
		길이	너비	높이	
1	울산 삼정리 아철지	676	135	(40)	노의 뒷벽 중앙부와 연결되기 때문에 풀무가 있었던 자리로 판단됨
2	울산 대안동 쇠부리터	730	150~175	(60)	바람골은 터널형, 바람골 내부에서 송풍관으로 추정되는 판재 확인, 판재 두께 3cm
3	권병탁 자료①	400	50	-	가마의 뒤쪽에 흙벽돌과 판자로 장치
4	권병탁 자료②	270	60~75	-	달천지방 구름다리를 ‘발풀메’라고 함, 큰발풀무는 쇠부리와 무질부리에 사용, 풀무의 크기는 쇠점의 크기와 직결됨(李浩官·李宗碩 1984 인용)

석축형로에서는 철재·토철·목탄 등이 출토되는데, 이에 대한 자연과학분석은 방리·대안동·모화리·용명리 등의 유적에서 이루어진 바 있다. 방리에서는 총 24점의 시료가 분석되었으며, 슬래그는 대부분 유리질이 주성분으로 구성되어 있고, 철 함량이 낮은 것으로 보아 제련과정에서의 철 회수율이 높았던 것으로 파악되었다. 시료 중 4점에서는 순철 조직이 발견되었으며, 2점에서는 강 조직과 회주철 조직이 각각 확인되었다. 이 철 조직들에서는 상당히 높은 함량의 비소가 검출되었다.

대안동 출토 반환원괴 2점을 분석한 결과, 주성분이 비스타이트(FeO_x)이고 탄소 과포화 상태의 환원 분위기가 형성되었으며, 반환원괴에는 비소 성분이 다량 함유되어 있었다. 모화리 출토 철판과 슬래그에서는 바나듐 성분이 거의 포함되어 있지 않고, 비소 성분이 높게 나타나 달천광산의 광석이 사용된 것으로 파악되었다. 용명리 출토 철판과 슬래그에는 비소가 함유되어 있으며, 바나듐 성분은 거의 포함되어 있지 않았다. 노 바닥 및 전면 측대 밑에서 수습된 철판은 흑연 및 펄라이트 기지조직으로 구성된 회주철 조직으로, 주철 용탕이 천천히 응고될 때 형성된 것으로 파악되었다. 대부분의 시

료에서 비교적 높은 함량의 비소가 검출되었으며, 대체로 모화리 슬래그 및 철판과 비슷한 특징을 보여 주로 주철을 생산한 것으로 판단되었다. 주변지역 석축형로에서도 모두 비슷한 결과를 확인할 수 있어 비소가 포함된 달천광산의 광석을 사용했을 가능성을 시사한다.

〈표 3〉 석축형로 출토 유물

연번	유 적 명	출토 유물	비 고
1	울산 삼정리 야철지	철재, 유리질철재, 목탄, 노 벽체	-
2	울산 삼정리유적	철재, 유리질철재, 목탄, 노 벽체	-
3	울산 방리 야철지	철재, 유출재, 노 벽체, 목탄, 제련재, 순철·강·회주철 조직, 철광석 분말, 철괴 부석시설 : 백자대접 2, 수키와 3, 암키와 9	비소
4	울산 천전리유적	철재, 유리질철재, 목탄, 백주철·회주철 혼합조직, 순철·강 조직	비소
5	울산 대안동 쇠부리터	토철, 반환원괴, 철괴, 슬래그, 노 벽체, 철재	비소
6	경주 신대리 제철로	벽체편, 철재, 목탄	-
7	경주 모화리 모화지유적	건물지 : 토철, 잡쇠덩이, 목탄, 소용 구연부편 1 철재, 유리질철재, 철판, 철광석, 토철 회주철·순철 조직	비소
8	경주 녹동리 야철지	노 벽체, 철재, 목탄	-
9	경주 용명리 제철유적	철재, 유리질철재, 철괴, 철판, 목탄 분청사기발 1, 백자 2, 옹기편 2, 상평통보 2, 철봉 1 회주철 조직	비소

이처럼 석축형로는 달천광산 주변에 분포한다는 점, 석축 구조를 가진다는 점, 토철이 출토되거나 금속분석에서 비소가 검출되는 점 등의 공통점을 가진다. 즉 동일 유형의 구조에서 토철을 제련해 비슷한 성격의 철을 생산했던 것으로 판단된다.

Ⅲ. 울산쇠부리복원실험의 선철 생산

지금까지 우리나라에서는 모두 35차례의 철 제련복원실험이 실시되었으며, 정기적인 실험은 국립 중원문화재연구소(이하 연구소)와 사업단에 의해 이루어지고 있다. 연구소를 포함한 지금까지의 실험은 주로 고대 괴련철 생산기술 연구가 목적이었으나, 사업단에서는 2019년부터 조선후기 울산쇠부리 기술복원을 위한 선철 생산실험을 연 1회 진행해 오고 있으며, 2022년까지 4차례에 걸쳐 실험이 진행되었고 이에 대한 보고서가 발간되었다(이남규 외 2019·2021·2022a·2022b). 본장에서는 사업단에서 실시한 제5~8차 4차례 선철 생산실험의 구체적인 내용에 대해 정리하고자 한다.

1. 제5차 실험(2019년)

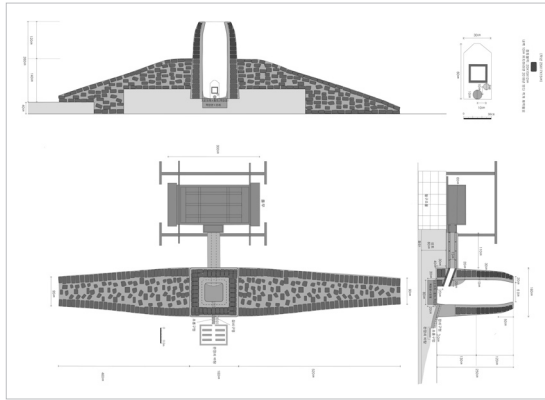
조선후기 석축형로를 모델로 2019년 5월 10~12일 울산 북구청에서 진행되었다. 실험로의 평면형태는 방형이며, 규모는 한 변 80cm(내경 기준, 이하 동일), 높이 250cm이다. 노벽의 형태는 바닥에서 200cm 높이까지는 직선적이며 상부 50cm는 내경하도록 하였다. 벽체의 조성은 노 바닥에서 125cm 높이까지는 길이 30cm 정도의 석재가 사용되었으며, 상부 125cm는 비소성 점토블록을 사용해 방 모양으로 쌓아올리고 그 내면은 점토로 미장하였다. 노의 양측으로는 가장자리에 석재를 쌓고 내부에 잡석과 황토 등을 다져넣어 석축을 축조하였다. 석축은 양측으로 갈수록 낮아지도록 하였으며, 원료·연료·첨가제의 장입 동선 기능을 하도록 하였다. 조성된 석축의 길이는 우측 520cm, 좌측 460cm이다⁴⁾.

송풍에는 길이 300cm, 너비 130cm, 높이 70cm의 발풀무가 주로 사용되었고, 실험 마무리 단계에서 기계송풍을 병행하였다. 풀무와 노는 한 변 15cm의 사각형 바람구멍으로 연결하였으며, 노 내부로는 석재를 사용하여 한 변 15cm의 사각 골구멍을 설치하였다. 송풍은 출선구 위쪽을 향하도록 하였다.

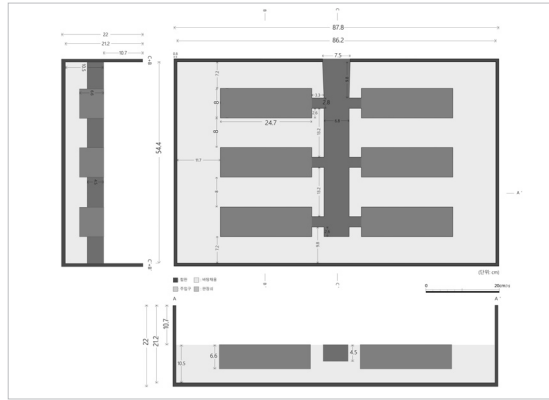
노 앞벽에는 높이 50cm, 너비 30cm 크기의 아궁이를 설치하였으며, 아궁이 중앙부 바닥면에 직경 10cm의 출선구를, 출선구 2cm 우측 및 2.5cm 상부에 직경 7cm의 출재구를 설치해 용선과 철재를 유출시키는 통로 기능을 하도록 하였다.

아궁이 앞에는 판장쇠바탕을 설치해 출탕되는 선철을 받아 냉각시켰다. 판장쇠바탕은 10kg짜리 (24.7cm×8cm×6.6cm×7.87【비중】) 6매, 즉 1회 출탕 시 60kg의 판장쇠가 생산될 수 있도록 하였다. 외형틀은 철판으로 제작하였으며, 바닥에 가스 배출을 위한 구멍을 뚫었다. 내부에 주물사를 채워 판장쇠틀을 찍는 방법으로 1본을 제작하였다.

4) 실험장의 여건상 좌측이 조금 짧게 축조되었다.



〈도면 2〉 5차 실험 노 설계도



〈도면 3〉 5차 실험 판장쇠바탕 설계도

실험의 원료는 강원도 정선군 신예미광산 산출의 4mm 이하 분광을 선별 사용하였고, 조재제는 폐각을 소성하여 사용하였다. 연료는 참나무 목탄을 15cm 이상(대)·10~15cm(중)·10cm 이하(소)로 구분 사용하였다.

실험(송풍 기준, 이하 동일)은 총 14시간 16분 동안 진행되었다. 송풍 개시 1시간 50분이 지난 후부터 8시간 57분 동안 분광 380kg, 목탄 750kg(만장입 630kg/총 장입 1,380kg), 폐각 60kg을 장입하였으며, 장입 비율은 1:1.97(1.66/3.63):0.16이다. 온도⁵⁾는 광석 장입 이후 안정온도를 기준으로 평균 1,219℃, 평균 최저 1,165℃, 평균 최고 1,267℃가 기록되었다.



〈도면 4〉 5차 실험 광경 및 생산품

선철은 광석 장입 후 5시간 56분이 지난 시점부터 6시간 26분 동안 모두 9회 노 밖으로 출탕되었다. 2차 출탕에서 판장쇠바탕 2매를 채울 정도의 선철이 출탕되었고, 나머지 차수에서는 슬래그와 혼합된 상태로 출탕되었다. 생산된 선철은 모두 83.85kg이며 광석 장입량 대비 철 회수율은 22.09%이다. 생산된 철의 탄소 함량은 3.85~4.5%의 공정선철에 가까우며, 슬래그는 모두 100.4kg이 배출되었다.

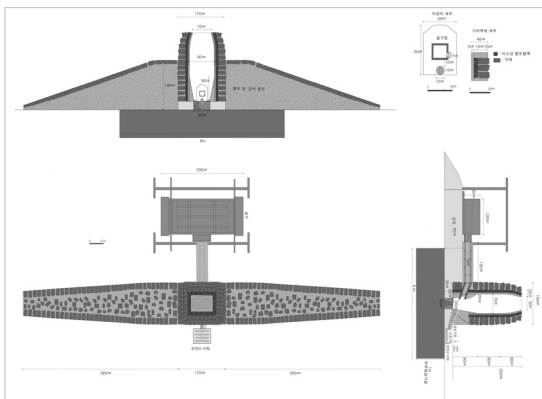
5) 온도센서는 굴구멍 좌우측 상·하단에 각 1개, 아궁이 우측 상·하단에 각 1개 등 모두 6개를 설치하였으나, 아궁이 하단은 두꺼운 노벽으로 인해 노 내부 온도를 정확히 측정할 수 없었고, 상부 온도는 센서의 고장으로 인해 측정이 불가하였다.

2. 제6차 실험(2020년)

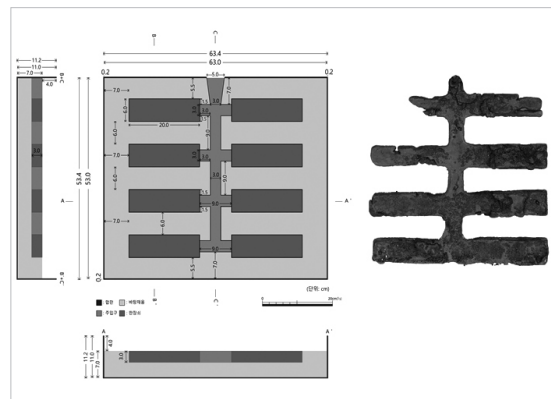
2020년 10월 9일부터 11일까지 울산 달천철장 실험장에서 진행되었으며, 대안동 쇠부리터 노 크기의 1/2로 축소 제작되었다. 노의 평면형태는 장방형이며, 크기는 길이 60~90cm, 너비 40~70cm, 높이 250cm이다. 상부 80cm는 안으로 좁아지도록 설계하였고 하부 90cm는 'U'자형을 이루도록 하였다. 노 벽체는 가장 외면에 30cm 정도 크기의 석재, 내면에 10×10×15cm 크기의 비소성 황토블록을 방모양으로 쌓고 그 내면을 점토로 미장하였다. 석축은 노 바닥에서 150cm 높이에서 양측으로 갈수록 낮아지며, 길이는 좌우 각 565cm로 조성하였다.

송풍은 기계송풍기⁶⁾를 사용하였고, 송풍구는 5차 실험과 마찬가지로 석조식 바람골을 20° 각도로 설치하였다. 아궁이는 높이 60cm, 너비 40cm 크기이며, 상부는 이맷돌을 올린 아치형으로 구축하였다. 중앙부 바닥에 직경 10cm의 출선구를 15° 경사로 뚫었으며, 출선구 2cm 우측 및 10cm 상부에 직경 7cm의 출재구를 뚫어 용선과 철재를 노 밖으로 유출시켰다.

원료는 강원도 정선군 신예미광산 산출의 4mm 이하 분광을 선별 사용하였고 5차와 달리 배소를 실시하였다. 첨가제로는 폐각과 함께 5차 실험에서 배출된 슬래그를 1cm 정도 크기로 파쇄해 사용하였다. 연료는 참나무 목탄을 5차와 마찬가지로 대·중·소의 크기로 구분하였으며, 초기 예열에는 대탄, 광석 장입 이후에는 중탄과 소탄이 사용되었다.



〈도면 5〉 67차 실험 노 설계도

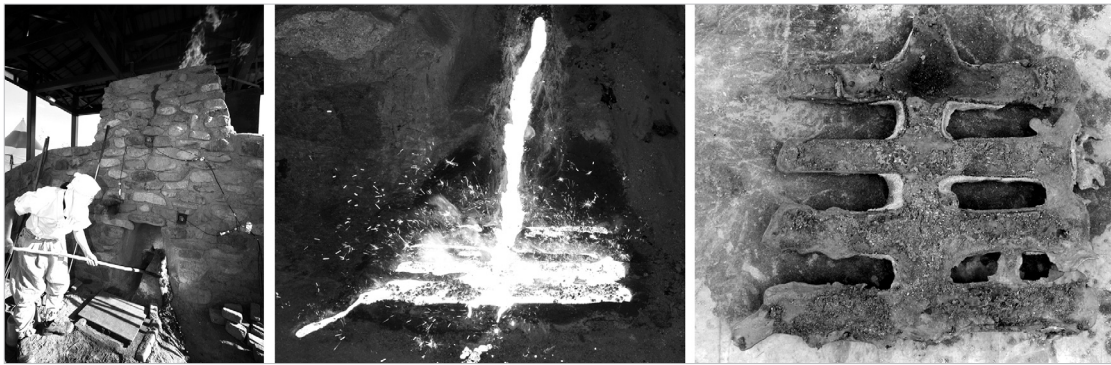


〈도면 6〉 6차 실험 판장쇠바탕 설계도

판장쇠바탕은 판장쇠의 무게를 조절하여 1회 출탕 시 22.64kg이 생산될 수 있도록, 2.83kg짜리(20cm×6cm×3cm×7.87【비중】) 8매의 판장쇠가 대칭되도록 설계하였다. 외형들은 5차 실험 때 철제로 제작된 것이 너무 무거워 이동이 자유롭지 못했기 때문에 목재를 사용하였고, 가스 배출을 위해 바닥은

6) 당시 코로나19 방역체계에 따라 실험에 참석할 수 있는 인원이 제한되어 기계식 송풍기를 사용하였으며, 발품무의 들숨·날숨 방식을 최대한 재현하기 위해 여단이를 설치해 인력으로 송풍구를 개폐하였다.

만들지 않았다. 외형틀 내부에 주물사를 채워 판장쇠틀을 찍는 방법으로 3본이 제작되었다. 실험은 11시간 17분 동안 진행되었다. 송풍 개시 2시간 후부터 7시간 50분 동안 분광 310kg, 목탄 660kg(만장입 390kg/분광장입 종료 후 100kg/총 장입 1,150kg), 슬래그 22kg, 폐각 30kg을 장입하였으며, 장입비율은 1:2.13(1.26/0.32/3.7):0.071:0.097이다.



〈도면 7〉 6차 실험 광경

온도⁷⁾는 광석 장입 이후 안정온도를 기준으로 평균 1,190℃, 평균 최저 1,121℃, 평균 최고 1,256℃이다. 하부와 중부 온도는 평균 1,220℃ 이상으로 안정적이었으며, 상부는 평균 991℃로 낮은 온도가 기록되었다.



〈도면 8〉 6차 실험 생산품

7) 온도는 높이에 따라 상·중·하로 구분하여 6개의 온도센서를 설치하였다. 상부는 바닥에서 150cm, 중부는 100cm, 하부는 50cm 높이이며, 상부는 아궁이와 골구멍 상부, 중부는 골구멍 좌측과 우측, 하부는 아궁이 좌측과 우측이다.

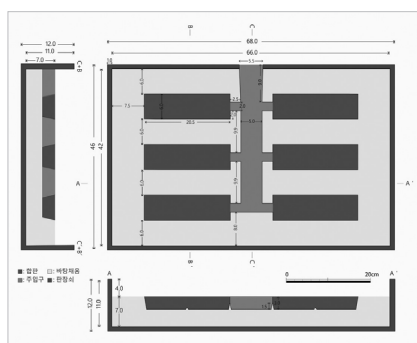
선철은 모두 4회 출탕되었으며, 1~3차는 판장쇠바탕에 받아 냉각시켰고 4차는 별다른 시설 없이 오목한 구덩이(湯場)에 받아 냉각시켰다. 광석 장입 후 3시간 29분이 지난 시점에 1차 출탕이 이루어졌고, 2차 출탕은 4시간 44분, 3차 출탕은 8시간 7분, 4차 출탕은 9시간 42분에 출탕되었다. 1차는 판장쇠 7매를 채웠으며, 2차는 판장쇠 2매, 3차는 판장쇠 8매를 모두 채울 정도로 선철이 출탕되었고, 생산된 선철의 탄소함량은 3.53~4.18%로 공정선철에 가까웠다. 출탕된 선철은 모두 72.25kg이며, 배출된 슬래그는 131.15kg이다.

3. 제7차 실험(2021년)

2021년 10월 22일부터 24일까지 울산 달천철장 실험장에서 진행되었다. 노는 6차 실험에서 사용한 것을 보습해 재사용하였다. 원료는 강원도 양양산 산출 4mm 이하 크기의 분광을 선별하여 배소를 진행하였다. 사용된 목탄의 크기와 송풍로의 축조는 6차 실험과 동일하다. 첨가제는 6차 실험에서 배출된 슬래그를 1~2cm 크기로 파쇄해 사용하였다. 판장쇠바탕은 1회 출탕 시 16.98kg의 판장쇠가 생산될 수 있도록 2.83kg짜리(20cm×6cm×3cm×7.87【비중】) 6매의 판장쇠가 대칭되도록 설계하였으며, 목형틀 내부에 주물사를 채워 판장쇠틀을 찍는 방법으로 4본이 제작되었다. 6차 실험 때보다 1회 출탕량은 줄이고 횟수를 늘려 4회 받아 냉각시키고자 하였다.

실험은 12시간 42분 동안 진행되었으며, 송풍 개시 2시간 39분 후부터 8시간 34분 동안 분광 300kg, 목탄 600kg(만장입 430kg/분광장입 종료 후 20kg/총 장입 1,050kg), 슬래그 28kg을 장입하였다. 장입비율은 1:2.0(1.43/0.067/3.5):0.093이다.

온도⁸⁾는 광석장입 이후 평균온도는 1,190℃이고, 평균 최저는 광석이 첫 장입되는 시점에 1,156℃가 기록되었고, 평균 최고는 1,252℃이다. 하부와 중부 온도는 1,250℃ 이상으로 안정적이었으며, 상부는 1,000℃ 정도의 낮은 온도가 기록되었다.



〈도면 9〉 7차 실험 판장쇠바탕 설계도



〈도면 10〉 7차 실험 광경

8) 제6차 실험로를 재활용하였기 때문에 온도센서 위치는 동일하다.

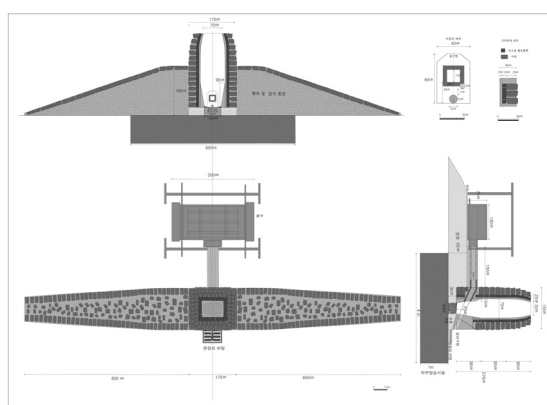
선철은 4회 출탕되었으며 모두 판장쇠바탕에 받아 냉각시켰다. 1차는 광석 장입 3시간 24분이 경과한 후, 2차는 5시간 16분, 3차는 6시간 49분, 4차는 10시간 18분이 경과한 후 출탕되었다. 1~3차는 판장쇠 6매를 모두 채웠고 4차는 4매를 채웠다. 노 내부에는 노 중앙부와 골구멍 하부에서 출탕되지 않고 잔존한 선철괴가 확인되었다. 생산량은 유출 선철 47.85kg과 노 내부 선철괴 36.4kg 등 모두 84.25kg이다. 선철의 탄소 함량은 3.9~4.4%의 공정선철에 가까웠고, 배출된 슬래그는 69.25kg이다.



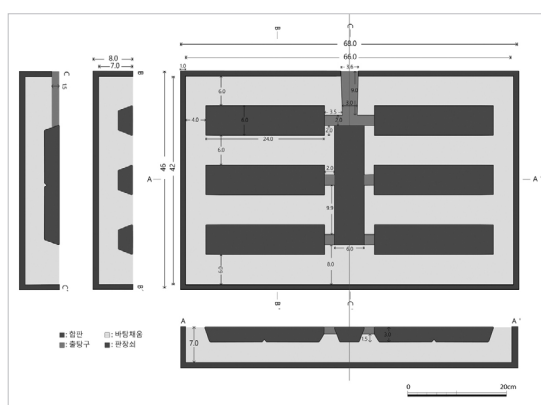
〈도면 11〉 7차 실험 생산품 일괄

4. 제8차 실험(2022년)

2022년 5월 13일부터 15일까지 울산 달천철장 실험장에서 진행되었다. 노는 6·7차 실험로를 보수하고 20cm 높여 재사용하였다. 송풍은 기계송풍기가 사용되었고, 골구멍은 5~7차와 마찬가지로 석조식으로 설치되었다. 노 내부로 25° 기울어지며 바람이 출선구를 향하도록 하였다. 아궁이는 높이 60cm, 너비 40cm의 아치형으로 새로 구축하였고, 중앙부 바닥면에 직경 10cm의 출선구를 15° 경사지게 뚫었으며, 출선구 2cm 우측 및 7cm 위에 직경 7cm의 출재구를 뚫었다.



〈도면 12〉 8차 실험 실험로 설계도



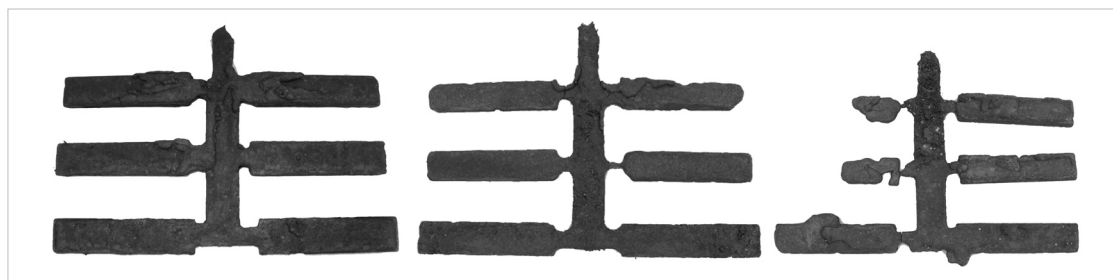
〈도면 13〉 8차 실험 판장쇠바탕 설계도

원료는 강원도 양양산 4mm 이하 크기를 선별하여 사용하였고, 7차와 달리 배소는 진행되지 않았다. 첨가제는 6차 실험에서 배출된 슬래그를 1~2cm 크기로 파쇄한 것과 생산품의 염기도를 낮추기 위해

산성조제제인 마사토가 사용되었다. 판장쇠바탕은 1회 출탕 시 19.06kg의 판장쇠가 생산될 수 있도록 2.723kg짜리 (길이 22~24cm×4~6cm×3cm×7.87【비중】) 판장쇠 6매는 좌우 대칭되도록 하고, 1매는 기존 탕도의 기능을 하던 부분에 설계하여 모두 7매의 판장쇠가 생산되도록 하였다. 목형틀 내부에 주물사를 채워 판장쇠틀을 찍는 방법으로 3본이 제작되었다.



〈도면 14〉 8차 실험 광경



〈도면 15〉 8차 실험 생산품

실험은 12시간 동안 진행되었으며, 송풍 개시 3시간 후부터 5시간 16분 동안 분광 200kg, 목탄 420kg(만장입 540kg/분광장입 종료 후 100kg/총 장입 1,060kg), 슬래그 20kg, 마사토 16kg을 장입하였다. 장입비율은 1:2.1(2.7/0.5/5.3):0.1:0.08이다. 선철은 3회 출탕되었으며 판장쇠바탕에 받아 냉각시켰다. 1차는 광석 장입 3시간 59분, 2차는 5시간 19분, 3차는 7시간 34분이 경과한 후 출탕되었다. 1차와 2차는 판장쇠 7매를 모두 채웠고, 3차는 5매+1/2매를 채웠다. 노의 중앙부와 골구멍 하부에 출탕되지 않은 선철괴가 잔존하였다. 생산품은 유출선철 32.95kg, 노 내부 16.68kg을 포함해 모두 49.63kg이다. 생산된 선철의 탄소 함량은 4.07~4.4%의 공정선철에 가깝다.

이상의 실험 내용을 정리해 보면, 원료는 모두 토철과 유사한 4mm 이하 크기의 분광을 선별해 사용하였다. 배소는 5차와 8차 실험에서는 실시되지 않았고, 6차와 7차 실험에서는 배소 후 장입되었으나 〈표 4〉와 같이 배소 여부는 광석 중의 철 산화물(FeO) 성분엔 큰 영향을 미치지 않는 것으로 추정된다. 광석 장입은 5차 실험에서 가장 많은 380kg이 장입되었고, 8차 실험에서 가장 적은 200kg이 장입되었다.

〈표 4〉 광석의 시료분석 현황

구분	시료 성격	시료명	FeO	배소 여부	구분	시료 성격	시료명	FeO	배소 여부
5차 실험	철광석	19U-2	43.94	×	7차 실험	철광석	21U-1	39.51	×
							21U-2	45.20	○
6차 실험	철광석	20U-4	43.54	○	8차 실험	철광석	22U-1	51.61	×
		20U-8	42.91				22U-2	48.90	×

조재제는 제5~7차 실험에서는 염기성 조재제인 패각·패각+슬래그·슬래그가 사용되었으며, 제8차 실험에서는 앞선 실험들의 염기도를 낮추기 위해 슬래그와 산성 조재제인 마사토가 사용되었다.

용선은 제5차 실험에서 1회, 제6차 실험에서 3회, 제7차 실험에서 4회, 제8차 실험에서 3회에 걸쳐 판장쇠바탕에 받아 냉각시켰다. 판장쇠바탕을 채울 만큼 양이 충분하지 않을 때도 있고, 바탕을 모두 채우고 넘칠 때도 있었다. 용선의 양 조절과 출탕 시점을 예측하는 것이 쉽지 않았다. 3~4회 용선을 출탕시킨 제6~8차 실험을 통해 적당한 출탕 시점을 살펴보면 다음과 같다.

1차 출탕은 광석 장입 후 평균 3시간 40분이 경과한 시점에 진행되었다. 2차 출탕은 5시간 6분 경과, 3차 출탕은 7시간 30분, 4차 출탕은 10시간 경과 후 출탕되었다. 앞 차수와는 2차 출탕이 1시간 30분, 3차는 2시간 30분, 4차는 2시간 30분의 간격을 보였다. 출탕 시 판장쇠바탕에 채워진 선철의 양을 고려했을 때, 1차 출탕은 광석 장입 후 3시간 30분 정도가 적당한 것으로 판단된다. 3차례 실험에서 모두 판장쇠바탕을 채울 수 있었으며 장입된 광석은 평균 140kg이었다. 2차 출탕은 1차 출탕 후 1시간 52분이 경과한 제7차 실험에서 가장 양호한 상태였으며, 광석은 80kg이 장입되었다⁹⁾. 3차 출탕은 제6차 실험에서 양호한 상태로 출탕되었으나 2차 출탕 후 3시간 25분이 경과한 시점으로 앞 차수와의 출탕 간격이 너무 길어졌고 이때 광석은 100kg이 장입되었다. 따라서 출탕시점은 1차 광석 장입 후 3시간 30분, 2차부터는 앞 차수 출탕 2시간 정도 경과 후 출탕하는 것이 적당할 것으로 생각된다. 광석 장입량은 1차 출탕 시 150kg이 적당하며, 2차부터는 최소 50kg 이상이 장입¹⁰⁾되어야 양호하게 판장쇠바탕을 채울 수 있을 것으로 판단된다.

〈표 5〉 선철 출탕표

구 분		1차 출탕	2차 출탕	3차 출탕	4차 출탕
6차 실험 (2020)	장입량(kg)	160	210	310	310
	광석장입 후	3시간 29분	4시간 44분	8시간 7분	9시간 42분
	앞 차수 이후		1시간 15분	3시간 23분	1시간 35분
7차 실험 (2021)	장입량(kg)	120	200	250/409	300
	광석 장입 후	3시간 24분	5시간 16분	6시간 49분	10시간 18분
	앞차 이후		1시간 52분	1시간 33분	3시간 29분
8차 실험 (2022)	장입량(kg)	130	200	200	
	광석 장입 후	3시간 59분	5시간 19분	7시간 34분	
	앞차 이후		1시간 20분	2시간 15분	
평균	평균 출탕시간	광석 장입 후 3시간 40분	1시간 30분	2시간 30분	2시간 30분
	광석 장입량	140	203	253	305

※ 1차 출탕은 광석 장입 후 평균 3시간 30~40분 정도가 적당함

－ 광석은 130kg 이상 장입해야 함.

※ 2차 출탕부터 광석 장입량은 50kg 이상 장입해야 적당한 선철이 형성될 가능성 높음

※ 장입 간격과 장입량은 상관성이 있음

9) 장입된 광석은 앞 차수 출탕 이후의 장입량을 산정한 것이다.

10) 제6차 실험의 경우 3차 선철 출탕은 2차 출탕 이후 3시간 25분 동안 광석 100kg 장입한 후 실시되었고 판장쇠 8매를 모두 채울 수 있는 양의 선철이 생산되었다. 생산량은 많았으나 장입 간격이 길어져 다음 차수의 출탕에 영향을 줄 수 있으므로 출탕 간격을 줄이고 장입량도 조절할 필요가 있다.

생산품은 모두 탄소 함량 3.53~4.4%C로 공정선철에 가까웠다. 대체로 판장쇠바탕에 받아 냉각시켰으나 일부 유동성이 좋지 않은 채 노 밖으로 유출되거나 노 내부에 잔류하기도 했다. 장입된 광석 대비 철 회수율은 22.07~28.08%로 평균 24.6%이다. 이는 원통형로의 회수율이 7.5~36.3%로 격차가 큰 것에 비해 석축형로는 회수율이 일정하게 나타나는 것이 큰 차이점이라 할 수 있다.

〈표 6〉 5~8차 실험 비교표

구 분		5차 실험	8차 실험	8차 실험	8차 실험
		2019.05.10~12	2020.10.9~11	2021.10.22~24	2022.05.13~15
노 구조	평면형태	방형	장방형		
	내경(cm)	80	70~90		
	외경(cm)	160	150~170		
	높이(cm)	250	250		270
광석(kg)		380	310	300	200
목탄(kg)		1,380 (630-750)	1,150 (390-660-100)	1,050 (430-600-20)	1,060 (540-420-100)
장입 비율 광석/목탄/조재제(패각·슬래그·마사토)		1/1.97/0.16(패)	1/2.13/0.168 (패-0.97, 슬-0.071)	1/2.0/0.93(슬)	1/2.1/0.18 (슬-0.1, 마-0.08)
평균 온도(℃)		1,219	1,191	1,190	1211.4
철 생산량(kg)		83.85	72.25	84.25	49.63
철 회수율(%)		22.07	23.3	28.08	24.82
생산품 탄소 함량(%C)		3.85~4.50	3.53~4.18	3.9~4.4	4.07~4.4

※ 장입비율 항목의 목탄 : 광석 장입 개시~장입 종료까지의 비율을 의미함

IV. 실험으로 본 석축형제철로의 선철 생산기술

1. 노의 구조

앞에서 살펴본 바와 같이 실험에서는 울산 대안동 쇠부리터 제련로를 1/2 크기로 축소하였다. 석축형로의 규모가 워낙 커 실험 여건상 동일한 크기로 실험하기는 어려웠으며, 이후 2023년 현재까지 개·보수해 사용되고 있다. 2019년 보고된 대안동 쇠부리터의 약식보고서에 의하면 노의 규모는 동-서 길이 210cm, 남-북 너비 160cm, 잔존높이 220cm이다. 따라서 1/2 규모는 길이 105cm, 너비 80cm가 된다. 하지만 내벽 점토의 침식 20~30cm를 감안하면 길이 180cm, 너비 140cm로 상정할 수 있다. 1/2 축소 규모는 길이 90cm, 너비 70cm로 복원된다. 8차(2022년)까지는 노 상부 50~80cm 부분을 위로 올라갈수록 약간 좁아지도록 설계하였으나, 9차(2023년)에서는 직립하도록 변경하였다.

석축 역시 실험장의 여건상 유적과 동일한 크기로 할 수 없어 좌·우 각각 600cm, 석축 전체길이 13.7m, 너비 150cm로 약간 줄여 조성하였다. 아궁이는 높이 60cm, 너비 40cm의 오각형이고, 출선구(초롱구멍)를 하단에, 바로 위 오른쪽에 출재구(잡쇠구멍)를 설치하였다. 현재까지 사용된 실험로의 구조 및 제원은 <표 7>과 같다.

노의 내경은 6~8차 실험에서 상부 50×70cm, 중부 70×90cm, 하부 40×60cm로 하고 높이는 250(6·7차)~270cm(8차)로 설계하였다. 노 하부가 가장 좁고 중부가 가장 넓으며, 상부 길이와 너비를 20cm 좁혀 노 내 열기가 방출되는 것을 방지하도록 하였다. 대안동 노는 단면형태가 역제형이지만 현재 실험로에서는 완만한 'U'자형을 이루도록 하였는데, 이는 발굴조사 자료에 'U'자형이 가장 많기 때문이다. 벽면이 결락된 부분을 감안한다면 'U'자형으로 설계해도 무방할 것으로 판단된다.

현재까지 발굴조사된 석축형로에서 상부 구조와 높이는 정확히 알 수 없다. 잔존상태가 양호한 경우 250~322cm에 이르며, 높이가 높을수록 선철 생산에 유리하다. 8차 실험에서 높이를 270cm로 높인 것은 철광석 배소를 실시하지 않았기 때문으로, 노의 높이가 높으면 철광석과 목탄이 천천히 하강함으로써 환원에 필요한 화학반응이 일어날 수 있는 시간을 벌어 주는 것이다. 노의 높이가 비교적 낮은 220·250·270cm에서 4.3% 내외의 공정선철 생산이 가능한 것은 장입한 철광석이 괴광이 아닌 토철과 유사한 형태의 분광이었기 때문으로 평가할 수 있다.

아궁이는 노 내 출입과 출선 및 슬래그 유출을 위한 시설이다. 노 축조와 실험 종료 후 부산물 배출을 위한 출입에는 큰 문제가 없었다. 선철 출탕과 슬래그 배출 과정에서 반복적으로 구멍을 개폐하면서 아궁이 벽 안쪽이 단단하게 굳어졌다. 1차 출탕 이후부터 출선구·출재구가 막히는 문제가 매년 반복되었는데, 실험로 크기가 실제보다 1/2 축소되면서 출선구와 출재구의 높이도 함께 낮아져 발생하는 문제로 여겨진다. 향후 원래 크기의 실험로 복원실험이 이루어진다면 이와 같은 많은 문제가 해소될 수 있을 것으로 사료된다. 출선구는 선철 출탕, 출재구는 슬래그를 배출함에 있어서 위치상 큰 문

제가 없는 것으로 보이지만, 철광석 장입량이 증가해 용선의 양이 많아질 경우 출재구를 좀 더 높은 위치에 설치해야 할 것이다.

〈표 7〉 실험로 구조 및 제원

구분	형태		규모(㎝, 내경 기준)				노 높이 (㎝)	골구멍(㎝)		골구멍 각도
	평면	단면	상부/중부		하부			바람골 연결부	노 관입부	
			길이	너비	길이	너비				
5차 실험 (2019년)	방형	장방형	80	80	80	80	250	15×15	15×15	20°
6차 실험 (2020년)	장방형	통형	50/70	70/90	40	60	250	15×15	15×15	20°
7차 실험 (2021년)	장방형	통형	50/70	70/90	40	60	250	15×15	15×15	25°
8차 실험 (2022년)	장방형	통형	50/70	70/90	40	60	250	15×15	15×15	25°
9차 실험 (2023년)	장방형	U자형	90	70	60	40	250	15×15	15×20	30°

골구멍은 출선구와 출재구 사이를 향하도록 하였으며, 각도는 출선구·출재구의 위치와 연동되도록 설계하였다. 아직 보고서가 발간되지 않아 본고의 검토대상에서는 제외했지만 2023년 제9차 실험에서는 골구멍을 나팔상으로 벌어지도록 하고 관입단부 위판과 아래판을 직각으로 해 바람이 위로 올라가는 것을 방지하도록 하였다.



〈도면 16〉 석조식 바람골의 조업 후 용융상태(1: 6차, 2: 7차, 3: 8차)

그동안의 실험에서 골구멍 관입부가 녹아내리거나 막히는 현상이 지속적으로 발생되고 있는데, 발 굴조사된 유적에서는 골구멍 끝부분이 노 내로 노출되어 있지 않다. 이에 대해 당초부터 돌출되지 않았다는 견해와 돌출된 부분이 조업으로 인해 용융되어 남아 있지 않다는 견해가 맞서고 있다. 현재까지의 실험에서는 노 내부로 약간 돌출되도록 하고 그 위를 볼록하게 미장한 다음 점토로 피복하고 있다. 이처럼 실험에서 석재 골구멍 관입부가 녹아내리는 현상이 반복되는 것은 고대 괴련철 실험에서도 송풍관이 용융되는 현상과 동일하다. 애초 관입부가 돌출되지 않도록 하거나 고온에서도 깨지거나 용융되지 않는 내화도가 높은 석재 및 점토를 골구멍 및 상단부 미장재로 사용할 필요가 있다.

판장쇠바탕은 목재 틀을 여러 본(本) 제작해 사용하였는데, 실험 시작 최소 일주일 전에 제작하여 충분히 건조가 되도록 하여야 한다. 판장쇠바탕이 충분히 건조되지 않으면 주물사에 수분이 남아 있어 용선 내 가스가 제대로 방출되지 못한다. 판장쇠바탕은 출탕 직전 출선구 앞쪽에 노상과 15° 정도의 각도를 이루도록 설치해 쇳물이 자연스럽게 탕도를 따라 유입되도록 하였다. 쇳물의 온도가 너무 낮거나 유동성이 좋지 않을 경우 일률적이고 신속한 속도로 주입되지 못한다.

최초 광석 장입으로부터 3시간 30분 정도 후에 1차 출탕이 이루어진다면 판장쇠바탕 1본을 무난하게 채울 수 있을 것으로 판단된다. 이후에도 2시간 이상의 시간적인 여유를 갖고 출탕이 진행된다면 1본을 충분히 채울 수 있을 것이다. 판장쇠는 선철을 일정 크기로 규격화할 수 있으므로, 다음 공정인 무질부리(용해주조) 공정에 유통시킬 수 있는 최적의 선철 소재라 할 수 있다.

2. 토철; 분상(粉狀) 원료

석축형로의 원료가 달천광산 토철(土鐵)이라는 사실은 경제사 연구와 지표조사의 전언자료 등(權丙卓 1969·1971·1972·1991, 鄭澄元 외 1987, 蔚山廣域市 외 2003, 울산문화원 1996)에서 수차 확인되었다. 이후 울산 방리·천전리, 경주 모화리·용명리 등 유적 시료의 금속분석에서도 확인되었으며, 대안동·모화리 등의 유적에서 토철 실물이 출토됨으로써 원료 문제는 일단락 된 듯하다.

다만 달천광산은 현재 울산광역시 기념물로 지정되어 있어 채광이 불가능하다. 이에 유일하게 구매가 가능한 강원도 양양군 철산마을의 대한광물과 정선군 신예미광산의 한덕철광 두 곳의 철광석을 사용하였으며, 달천광산 토철과 유사한 크기의 4mm 이하 분광을 선별하였다. 실험에 사용된 철광석과 달천광산 산출 철광석 및 토철의 금속분석 결과는 <표 8>과 같다. 실험 철광석은 어느 정도 선광이 된 상태에서 구매했고, 구매 후 세척 및 선별 과정을 거친 결과 금속철 함량이 39.51~51.61%Fe로 일정하게 나타났다. 규소·알루미나·산화칼슘·산화마그네슘 역시 일정한 비율을 보인다. 달천광산 철광석의 경우, 금속철 함량이 59.58~98.06%Fe(평균 84.31%Fe)로 전체적으로 상당히 높게 나타난다. 반면 달천유적 및 대안동 쇄부리터에서 채취된 토철의 경우, 12.86~63.19%Fe(평균 30.62%Fe)로 함량 폭이 매우 큰 점이 특징인데, 제대로 선광이 되지 않은 점 및 오랜 세월 풍화작용의 영향을 철광석보다 많이 받았기 때문으로 추정된다.

산화규소의 경우, 실험 철광석·달천 철광석·달천 토철이 각각 25.87·44.77·9.85%로 서로간의 격차가 커 유용한 비교가 어렵다. 알루미나는 각각 2.50·15.90·2.83%, 산화칼슘은 4.13·1.54·0.58%로 나타났다. 산화마그네슘은 실험 철광석이 20.06%인데 비해 토철은 0.93%에 불과해 극명한 차이를 보이며, 이산화티탄 역시 실험 철광석이 0.15%인데 비해 토철은 1.48%로 다소 높게 나타났다. 비소의 경우, 실험 철광석에서는 전혀 검출되지 않은 반면, 달천광산의 철광석과 토철에서는 대부분 검출되었다. 산화칼슘과 산화마크네슘이 달천광산에서는 낮게 나타나는 반면, 실험 철광석에서는 매우 높게 나타난다는 점을 가장 큰 특징으로 들 수 있는데, 이러한 결과가 선철 생산이라는 조업목적에 영향을 주었는지는 정확히 알 수 없다. 분명한 점은 광석에 포함된 조제 성분은 첨가제의 사용 여부와

밀접한 관련이 있기 때문에 이에 대해서는 첨가제 부분에서 다루고자 한다.

〈표 8〉 실험 철광석 및 달천산 철광석·토철의 금속분석 결과(XRF)

연번	구분	시료 성격	시료명	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	K ₂ O	TiO ₂	As ₂ O ₃	비고(출전)
1	사업단 5차	철광석	19U-2	43.94	25.42	2.51	3.09	23.11	1.01	0.55	0.10	-	신경환·이재용 2019, 신예미
2	사업단 6차	철광석	20U-4	43.54	25.03	3.04	6.91	18.02	1.21	1.13	-	-	신경환·이재용 2021a, 신예미광산, 배소
3		철광석	20U-8	42.91	25.71	2.29	3.40	23.46	1.07	0.67	0.10	-	
4	사업단 7차	철광석	21U-1	39.51	28.73	2.62	4.94	21.77	1.20	0.67	0.11	-	신경환·이재용 2022a, 철산마을, 배소 전(1)·후(2)
5			21U-2	45.20	25.31	2.35	3.18	21.29	1.24	0.67	0.11	-	
6	사업단 8차	철광석	22U-1	51.61	25.56	2.26	3.76	15.02	0.67	0.45	0.28	-	신경환·이재용 2022b, 철산마을
7			22U-2	48.90	25.31	2.41	3.61	17.78	0.75	0.52	0.37	-	
평균				45.09	25.87	2.50	4.13	20.06	1.02	0.67	0.15		
8	달천 유적	철광석	시료 1	98.06	0.59	0.48	0.08	0.39	0.27	0.003	0.02	0.003	高塚秀治 외 2010
9			시료 6-1	90.41	3.16	1.93	1.35	2.12	0.84	0.087	0.04	0.002	
10			시료 18	76.16	11.33	4.89	2.80	0.17	1.30	0.22	0.08	0.26	
11			1	78.22	12.17	6.79	0.08	-	1.29	-	-	0.46	최영민 2013, 울산문화재연구원 제공
12			2	80.50	7.96	7.78	0.08	-	1.37	-	-	1.03	
13			3	88.78	5.19	1.85	0.61	2.73	0.60	-	-	-	
14	중산동 798-2	철광석	UJ-1	91.07	3.91	2.84	0.24	-	0.15	-	-	1.05	신경환 외 2010
15			UJ-2	93.24	2.31	1.32	0.47	-	1.16	-	-	0.75	
16			UJ-3	93.97	2.57	0.83	0.32	-	1.14	-	-	0.62	
17	경주 덕천리	철광석	GD-1	77.46	19.07	2.21	0.36	0.33	0.30	-	-	-	신경환 외 2009, 반환원고 (GD-3) As-3.24 검출
18			GD-2	59.58	40.11	0.23	-	-	-	-	-	-	
평균				84.31	9.85	2.83	0.58	0.52	0.77				
19	사업단 5차	토철	19U-3	63.19	25.50	6.03	1.46	0.71	0.99	0.66	0.18	-	신경환·이재용 2019, 대안동
20	사업단 6차	토철	20U-TO	32.44	45.95	11.04	4.88	1.07	1.23	1.60	0.46	0.32	신경환·이재용 2021a, 대안동
21			20U-D1	16.37	60.05	16.12	0.89	1.56	0.40	2.43	0.91	0.14	
22			20U-D2	26.74	52.34	13.72	0.94	1.40	0.39	1.96	0.63	0.48	
23	달천	토철	UD-4	35.82	39.16	19.30	0.47	0.73	0.55	1.06	0.92	0.92	최영민 2013 (김권일 제공)
24			UD-5	32.58	22.83	23.46	2.34	-	-	-	6.68	-	
25			UD-6	24.98	48.53	20.13	0.80	1.24	0.58	1.25	1.05	0.56	
26	대안동	토철	USD-2	12.86	63.79	17.36	0.57	0.75	0.23	2.93	0.99	-	신경환·이재용 2021b
평균				30.62	44.77	15.90	1.54	0.93	0.55	1.49	1.48		

3. 목탄의 종류와 장입 비율

석축형로에서 목탄이 출토된 유적은 울산 방리·대안동, 경주 모화리·용명리 등이다. 방리와 모화리에서는 소나무, 용명리에서는 참나무와 소나무 수종이 확인되었으며, 대안동의 경우 분석된 20점 중

18점이 소나무과 소나무속 경송류이고 상수리나무류와 서어나무속이 각 1점이다(남태광 2021).

우리나라에서는 주로 참나무류와 소나무류가 목탄의 원료로 이용되었다. 고대의 경우 참나무류가 많이 이용되었으나 별채 등으로 인한 고갈이 심해 중세로 갈수록 주종(主種)이 소나무류로 이동하는 경향이 나타난다(강애경 2001: 8). 현재의 제철복원실험에서는 구매가 용이한 참나무 백탄만을 사용하고 있는데, 석축형로에서 주종을 이루는 소나무 목탄의 사용도 고려해 볼 필요가 있다. 중·근세 무측구식탄요는 고대의 측구식탄요와 구조가 다른데, 백탄 생산이 어렵기 때문에 주로 흑탄을 생산한 것으로 파악되고 있다(金鎬詳 2003: 22·148). 대안동 출토품 중에는 옹이 및 나무를 자른 부분이 남아 있거나 불완전 탄화된 목탄이 상당량 포함(이민아·권용대 2022: 197)되어 있는 점으로 보아 흑탄일 가능성이 높다.

목탄은 탄화과정과 소화방식에 따라 크게 흑탄(黑炭)과 백탄(白炭)으로 구분할 수 있다. 흑탄은 600~800℃ 정도에서 제조되며 착화되기 쉬운 반면, 백탄은 약 1,000℃에서 제탄되며 착화되기는 어려우나 착화되면 화력이 높고 오랫동안 유지되는 특성이 있다(황원중 외 2002, 50). 실제 흑탄을 연료로 사용했던 2011년 중원문화재연구원의 제철복원실험에서는 강하게 송풍해 온도를 1,340℃까지 높였던 반면, 백탄을 연료로 사용했던 2015년 연구소 실험에서는 약한 송풍에 1,530℃, 송풍을 중지하였을 때도 1,300℃를 유지하였다. 즉 제련과정에서는 가성비가 좋은 흑탄을 사용하다가 온도를 유지하거나 노 내 급격한 온도변화 등이 생길 경우 백탄의 사용도 필요했을 것으로 추정되고 있다(박상현 2020, 128)

지금까지 복원실험에서는 모두 참나무 백탄을 구매해 사용하였다. 목탄의 크기와 온도 등의 상관관계를 검토하고자 대탄 15cm 이상, 중탄 10cm 이상~15cm 미만, 소탄 10cm 미만의 3가지 크기로 분류하였다. 조업 개시 후 온도를 높이기 위한 초기 장입(만장입)에는 주로 대탄을 사용하였고, 광석 장입 중에는 노 내 분위기에 따라 대탄·중탄·소탄의 비율을 조절하였다. 광석이 장입되는 동안 광석:목탄의 비율은 1:1.97~2.12로 평균 1:2 정도의 비율을 유지하였다.

사업단의 실험매뉴얼에 의하면 대탄 2/3, 소탄 1/3 정도로 만장입한 상태로 평균온도 1,250~1,300℃까지 상승시킨 후, 계획한 평균온도에 도달하면 광석과 목탄을 각각 10·20kg을 장입하고, 이후 15분 간격으로 연료와 원료를 장입한다. 광석 장입이 개시된 후에는 5차 실험 중탄 20kg→소탄 20kg, 6차 실험 중·소탄 40kg→중·소탄 40kg-대탄 20kg, 7차 실험 중·소탄 20kg→대탄 20kg, 8차 실험 대탄 20kg→중·소탄 20kg, 9차 실험 대탄 20kg→중탄 20kg씩 장입하는 것이다.

7차 실험에서는 총 1,050kg을 장입하였다. 예열을 위해 430kg, 광석 장입 개시 후 600kg, 광석 장입 종료 후 20kg을 장입하였고 대탄 740kg, 중탄 130kg, 소탄 180kg이 소요되었다. 목탄의 크기별 비율은 대탄:중탄:소탄이 5.7:1:1.4(70.5%, 12.4%, 17.1%)로, 광석을 장입하는 동안은 대탄 340kg, 중탄 130kg, 소탄 130kg이 소요되어 비율은 2.6:1:1(56.6%, 21.7%, 21.7%)이다.

8차 실험에서는 총 1,060kg을 장입하였다. 예열을 위해 540kg, 광석을 장입하는 동안 420kg, 광석 장입 종료 후 100kg을 장입하였고, 대탄 300kg, 중탄 600kg, 소탄 160kg이 사용되었다. 목탄의 크기별 비율은 대탄:중탄:소탄이 1:2:0.53로, 광석을 장입하는 동안은 대탄 160kg, 중탄 140kg, 소탄 120kg이 소요되어 비율은 1:0.88:0.75(38%, 33%, 29%)이다. 본 실험에서는 노 내 온도와 조업환경

등으로 인하여 대탄 사용량이 증가하였다.

〈표 9〉 사업단 실험의 철광석 및 목탄 장입량

구분		1차 (2016)	2차 (2017)	3차 (2017)	4차 (2018)	5차 (2019)	6차 (2020)	7차 (2021)	8차 (2022)	9차 (2023)
광석 장입량(kg)		460	425	170	300	380	310	300	250	250
목탄 장입량 (kg)	만장입	277	250	250	610	630	390	430	500	480
	광석 장입 시	483	382.5	340	620	750	660	600	500	520
	장입 후	—	—	—	—	—	100	20	100	80
	총 장입	760	632.5	590	1,230	1,380	1,150	1,050	1,100	1,080
장입 비율 (광석 /목탄)	광석 장입 시	1/1.05	1/0.90	1/2.0	1/2.1	1/1.97	1/2.12	1/2.0	1/2.0	1/2.08
	총장입	1/1.65	1/1.48	1/3.47	1/4.1	1/3.63	1/3.7	1/3.5	1/4.4	1/4.32

2016년과 2017년 제1·2차 실험에서는 고대 원통형 제련로의 구조를 복원해 단조철기 소재용 괴런 철을 생산하는 것을 목표로 하였다. 울산과 비교적 가까운 밀양 사촌 제철유적 1호 제련로를 모델로 하였다. 원료는 철광석 괴광, 연료는 참나무 백탄을 사용하였다. 광석:목탄의 비율은 광석 장입 개시 후 1차에서 1:1.05, 2차에서 1:0.9였다. 장입된 광석 대비 회수율은 1차 15.2%, 2차 26.6%이다. 1차 생산품 시료의 탄소 함량은 13점 중 11점이 0.011~0.316%C, 2점은 0.64~1.64%C였다. 2차 생산품 시료의 탄소 함량은 0.014~0.192%C였다. 따라서 괴런철 생산에서는 광석과 목탄의 비율을 1:1 내외, 선철 생산에서는 1:2 이상일 때 적절한 탄소 함량의 철이 생산되는 것을 알 수 있다.

석죽형로에서는 참나무·소나무 목탄이 모두 사용되었을 가능성 및 흑탄 또는 흑탄과 백탄이 혼용되었을 가능성이 높다. 노 내의 조업환경이 좋지 않아 골구멍이 막히거나 슬래그 등이 잘 배출되지 않을 때 급속한 온도 하강으로 이어진다. 노 내 온도를 안정적으로 유지하고 출탕 등 필요 시 온도를 상승시켜야 하므로, 다양한 상황 변화에 대응할 수 있도록 목탄이 구비되어 있어야 한다. 온도 하강 시에는 흑탄 사용이 효과적일 수 있고, 안정될 시에는 백탄을 사용할 수 있다. 소나무와 참나무는 특성이 서로 다르므로 향후 실험에서는 이러한 점을 반영할 필요가 있다.

4. 첨가제

사업단 실험에서는 모두 조재(造滓) 목적의 첨가제를 투입하였다. 5차 실험에서는 폐각, 6차 실험에서는 폐각+슬래그, 7차 실험에서는 슬래그, 8차 실험에서는 슬래그+마사토를 사용하였다. 광석:첨가제의 비율은 7차 실험의 1:0.093을 제외하면 1:0.16~0.18이다. 슬래그의 유출량을 보면, 폐각+슬래그를 첨가한 6차 실험에서 131.15kg이 유출되어 장입광석 대비 42.3%의 슬래그가 유출되었고, 나머지 실험에서는 23~29.3%의 슬래그가 유출되었다.

슬래그의 산화칼슘(CaO) 함량은 분석된 30건의 시료 중 7·8차 실험의 송풍관 용손철재에서 각각 5.82(21U-4)·3.29%(22U-6) 함량이 확인되었을 뿐, 나머지 28건에서는 11.64~22.31%의 함량(30건 평균 14.83wt%)을 보여 울산 대안동 쇠부리터 슬래그 분석치인 0.35~3.03%보다 월등히 높다. 다만 경주 덕천리아철지에서 채취한 반환원괴의 철재부에서는 26.04%로 나타나, 중세 제련유적(0.18~8.43%)은 물론 용해주조유적(1.35~4.06%)에 비해서도(신경환 외 2015: 94~95) 상당히 돌출된 결과를 보이고 있다.

이처럼 실험 슬래그의 산화칼슘 함량이 유적 슬래그에 비해 매우 높게 나타나는 현상은 실험에 사용된 첨가제의 산화칼슘 함량에서 기인하는 것이다. 유적에서 나타나는 기술적 특징을 재현하고자 한다면 실험 시 조제 목적의 황토·슬래그·폐각·마사토 등을 투입하는 것은 재검토의 여지가 있어 보인다. 2022년도 연구소에서는 동일한 조건에서 첨가제만 서로 다르게 해 점토·황토·폐각·석회 첨가 시와 아무것도 첨가하지 않았을 경우를 비교한 바 있다. 이 예비실험에서는 황토 및 첨가하지 않은 경우에 가장 많은 철이 생성되고 슬래그가 유출되는 결과가 도출되었다. 이에 대해 실험에 사용된 철광석에 이미 다량의 산화칼슘이 포함되어 있기 때문에 폐각 등의 염기성 조제제보다는 산성 조제제가 더 효용이 있을 것이라는 추정도 있다(한지선 2022: 371). 사업단 실험에 사용된 철광석 역시 연구소와 동일품이어서 철광석에 다량의 산화칼슘이 포함되어 있는 현상과 무관하지 않은 것으로 추정된다.

산화마그네슘은 사업단 실험 철광석 7건 평균 20.06%, 슬래그 30건 평균 20.24%로 양자 모두 높게 나타난 반면, 달천광산 철광석과 토철에서는 검출되지 않거나 0.17~2.73%의 낮은 함량을 보이며, 석축형로 출토 철재 역시 0.70~1.48%로 매우 미미하다. 산화마그네슘은 제철공정의 노 내에서 산소를 흡수해 가열된 노의 내부를 안정화시키는 기능이 있는 등 제련조업과 밀접한 관련이 있다.

이처럼 석축형로에 사용된 달천광산 토철을 구할 수 없는 현 시점에서 실험용 철광석과 슬래그, 유적 출토 철광석과 슬래그의 조제 성분에 대한 면밀한 검토 후 실험매뉴얼을 수립할 필요가 있다.

〈표 10〉 석축형로 출토 철재의 금속분석(XRF)

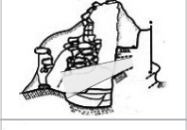
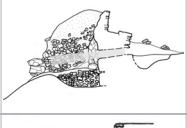
연번	구분	시료 성격	시료명	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MnO	K ₂ O	MgO	TiO ₂	As ₂ O ₃	비고(출전)
1	경주 덕천리	반환원괴 철재부	S-2	12.78	49.55	6.94	26.04	2.34	0.92	0.70	0.17	0.10	申環煥 외 2013
2	울산 대안동	슬래그 (중상)	USD-B	52.09	29.14	11.78	3.03	1.77	1.45	-	0.27	0.05	신경환·이재용 2021b
		슬래그(상)	USD-C	83.63	8.16	3.16	0.35	0.50	0.38	1.48	0.09		
3		노바닥 철재	USD-5	5.80	72.37	16.09	0.84	0.09	3.30	-	0.77		
4	울산 방리	유출재 등 24점	-	시료 # 6·8·9·24-순철 조직, 시료 # 14-공석조직(0.77%C) 시료 # 4-회주철조직(4.3%C), 12점-유리질 슬래그 시료 # 4·6·9·14·24-As 검출(철 조직에서 모두 검출)									박장식 2002 SEM-EDX
5	울산 천전리	철재 5점	-	시편 #1 등 거의 모든 슬래그에 칼슘 함량이 높아 의도적 첨가 가능성, 대부분 주철 제련과정에서 생성된 유리질슬래그, 시편 #10-As 검출									박장식 2004 SEM-EDX
6	경주 모화리	슬래그 등 14점	-	유적-순철+주철 생산, 소재-달천광산 철광석+토철, 순철·회주철·아공석강 조직 발견, As 검출									정광용 외 2002 중성자방사화-EDX
7	경주 용명리	슬래그 등 9점	-	유적-주철 생산, 소재-달천광산 철광석+토철, 회주철 조직 발견, As 검출									정광용·박광렬 2006 중성자방사화SEM-EDX

한편 사업단 5~7차 실험에서는 실험용 광석을 배소처리 하였으나 8차 실험부터는 이 과정을 생략하였다. 실험 결과 배소처리를 하지 않아도 입자가 작은 분상 원료는 괴상 원료에 비해 환원속도가 빨라 선철을 생산할 수 있음이 확인되었다. 타타라제철에서 사철을 배소하지 않는 것과 동일한 원리로 해석할 수 있다.

5. 송풍 및 온도

송풍시설은 경제사¹¹⁾ 및 민속학¹²⁾ 조사에서 발풀무에 대한 자료를 확인할 수 있으며, 고고유적에서는 울산 삼정리야철지와 대안동 쇠부리터의 노 뒷편에 길이 676~730cm, 너비 135~175cm, 깊이 40~60cm의 세장방형 풀무터 및 풀무와 노 내부를 연결하는 바람골이 확인된 바 있다. 풀무의 크기는 노의 크기와 직결되는 것으로 노의 용적이 클 경우 3조 내지 4조의 6·8인용 발풀무가 필요하며, 용적이 작을 경우 2조의 4인용이 사용된 것으로 유추된다. 석축형로는 시기를 막론하고 한반도에서 가장 규모가 크기 때문에 6·8인용 발풀무가 사용되었을 것으로 생각된다. 사업단 실험에서는 길이 300cm, 너비 130cm, 높이 70cm, 체적 2.73m³의 판재식 6인용 발풀무와 기계 송풍기를 병용하였다.

〈표 11〉 석축형로의 송풍구(바람골) 현황

연번	유적명	크기(cm)	각도(°)	특징	사진(도면)	비고
1	방리 1호	-	-	1차 바닥에서 약 75cm 2차 바닥에서 약 35cm 하단 석재 받침		석조식, 방형
2	대안동	직경 20	5	노 바닥에서 85cm 하단 30~40cm 받침석 송풍 - 아궁이 위쪽		목제 사용?, 원형
3	모화리	60×56	20	노 바닥에서 70~80cm 송풍 - 아궁이와 노 바닥 사이		석조식, 방형
4	용명리	30×30	20	노 바닥에서 50cm 하단 50~60cm 석재 받침 송풍 - 아궁이 아랫쪽		석조식, 방형
5	녹동리	50×43	20	노 바닥에서 30cm 송풍 - 아궁이와 노 바닥 사이		석조식, 방형

※ 방리야철지는 도면에 송풍구가 표현되지 않았으나, 조사원료 사진의 추정 송풍구를 참고하여 높이 계측

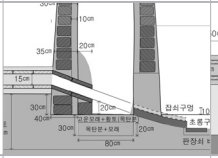
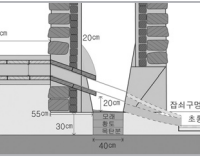
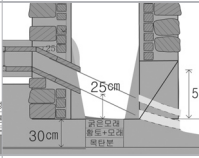
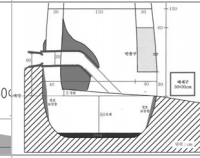
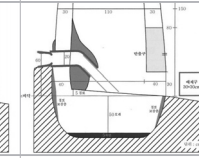
11) 길이 400cm, 너비 50cm의 흙벽돌과 판자로 장치한 풀무와 길이 270cm, 너비 60~75cm의 발풀무 기록이 있다(권병탁 2004).

12) 용해로에 사용된 풀무로 길이 606cm, 너비 60.6cm의 6인조 발풀무와 길이 273cm, 너비 60.6~75.8cm의 6인조 발풀무 기록이 있다(李浩官·李宗碩 1984).

석축형로에서는 도제 송풍관 출토사례가 아직 없으며, 노 뒷벽에 1개의 석조식 송풍구가 설치된다. 송풍구의 크기는 최소 20cm, 최대 60×56cm로 그 범위가 넓지만 울산 대안동과 경주 용명리의 구조를 참조한다면 20×20cm 또는 30×30cm가 적당할 것으로 생각된다(표 11 참조)¹³⁾. 송풍구의 경사각도는 대안동을 제외¹⁴⁾하고는 대체로 아궁이 아래쪽 또는 아궁이와 노 바닥 사이를 향한다. 실험에서는 유적의 사례를 참고하여 석조식 송풍구를 설치하여 아궁이의 출재구 또는 출선구와 출재구 사이로 송풍되도록 하였고 원활하게 출선이 이루어졌다¹⁵⁾. 또한 연구소의 괴련철 생산 실험에서는 대체로 노 중앙으로 송풍이 이루어졌는데 아궁이쪽보다는 송풍관쪽의 온도가 20~368℃ 높게 측정되었고 송풍관을 중심으로 괴련철괴가 생성되었다. 석조식 송풍구는 도제 송풍관에 비해 용융이 덜하기 때문에, 노 내부에 철재 또는 기타 생성물로 송풍에 방해가 되지 않는다면 지속적인 송풍이 가능한 반면, 도제 송풍관은 관전부가 용융되면서 실험에서 의도했던 송풍방향이 이루어지지 못했을 것이다.

주요 실험 결과, 출선구와 출재구쪽으로 바람이 향하게 하여 높은 온도를 유지하는 것이 용선의 출선과 슬래그 유출에 유리하며, 괴련철 생산에서는 노 중앙을 향해도 별 무리가 없었다.

〈표 12〉 주요 실험의 송풍구 현황

구분	사업단 5차 실험	사업단 6·7차 실험	사업단 8차 실험	연구소 5차 실험	연구소 6차 실험
크기 (cm)	15×15	15×15	15×15	20×20	20×20
각도 (°)	20	20	25	45	45
송풍 방향	출재구와 출선구 사이	출재구	출재구와 출선구 사이	중앙부와 배재구 사이	바닥 중앙부
도면					
풀무	4인용 발풀무	기계송풍	기계송풍	4인용 발풀무	4인용 발풀무

한편 연구소에서는 5·6차 실험의 송풍관 삽입 정도에 대한 노체구조의 전산학적 해석을 위한 시뮬레이션 연구를 진행한 바 있다(한지선 2022). 송풍관을 배재구쪽으로 10cm 더 이동하여 장착한 연구소 5차 실험에서 노 내부로 취입된 바람이 노 바닥을 친 후 아궁이와 충돌되면서 아궁이쪽 온도가 높게 형성되는 결과를 가져왔고 〈표 13〉에서 보는 바와 같이 노 중하부의 온도는 평균 1,290℃로 안정적이었으며, 송풍구(송풍관)와 아궁이의 온도차가 20℃ 정도로 크지 않았다.

13) 울산 방리야철지 1호 제련로의 추정 송풍구를 계측해 보면 한 번 20~25cm로 나타난다.

14) 대안동 쇠부리터는 송풍 방향이 아궁이 위쪽을 향한다. 이는 굴구멍이 노 바닥 85cm 위에 위치하며, 경사각도 5°의 거의 직선적으로 송풍되는 구조이기 때문이다.

15) 출선 과정에서 노 밖으로 미처 빠져나오지 못한 용선의 일부가 외부의 냉기와 접촉하여 냉각되면서 출선구를 막아 실험이 중단되기는 하였지만 전반적으로 출선구의 유동성은 양호했다.

반면 노 중앙부로 송풍되었던 연구소 6차 실험의 중하부 온도는 1,264℃로 5차 실험과 큰 차이가 없었으나 송풍구쪽 온도가 1,342℃, 아궁이가 1,166℃로 176℃의 온도차를 보였다. 즉 노 하부의 안정적인 온도를 유지하기 위해서는 아궁이(배재구)쪽으로 바람이 향하는 것이 유리하다는 결론이 도출된 것이다.

사업단 5차 실험에서는 4인용 발풀무가 사용되었고 아궁이 온도가 줄곧 1,050~1,130℃ 사이로 낮게 유지되었으며 선철이 판장쇠바탕을 채울 정도의 양이 되지 못했다. 6차 실험 이후부터는 기계송풍기가 사용되었고 송풍량을 일정하게 지속할 수 있었다. 6차 실험에서는 아궁이 온도가 1,300℃로 출선이 양호했고¹⁶⁾, 7차 실험은 2차 출탕 후 온도가 하강하면서 판장쇠바탕을 다 채우지 못했지만 1~3차 출탕까지 1,290℃로 양호했으며, 8차 실험에서도 1차 출탕은 1,280℃로 양호했다. 따라서 노의 크기에 맞는 송풍량을 노 내부로 송풍하는 것 또한 온도유지에 필요한 요건으로 판단된다. 노의 크기에 맞는 적당한 송풍량과 풀무의 크기를 측정하는 실험이 추가로 필요해 보인다.

〈표 10〉 석축형로 출토 철재의 금속분석(XRF)

실험명		사업단							전통제철 연구단	연구소					평균
		1차	2차	4차	5차	6차	7차	8차		2차	3차	4차	5차	6차	
평균 온도 (℃)	전체	1,197	1,215	1,269	1,219	1,191	1,190	1,211	1,202	1,113	1,115	930	1,144	1,094	1,160.77
	중하부	1,279	1,274	1,321	1,159	1,278	1,272	1,285	1,317	1,142	1149.7	1,171	1,290	1,264	16,201.7
	송풍구	1,360	1,379	1,346	1,231	1,256	1,296	1,281	1,378	1,240	1,334	1,257	1,295	1,342	1,307.31
	아궁이	1,198	1,169	1,295	1,087	1,300	1,248	1,289	1,255	1,043	922	889	1,275	1,166	1,164.31
광석 장입 시점	전체	1,224	1,083	1,253	1,217	1,247	1,157	1,203	1,224	1,134	1,139	978	1,157	1,161	1,167.46
	중하부	1,331	1,198	1,261	1,173	1,271	1,246	1,277	1,331	1,227	1,160	1,171	1,288	1,352	1,252.77
	송풍구	1,449	1,301	1,285	1,241	1,241	1,187	1,255	1,422	1,354	1,372	1,284	1,315	1,501	1,323.62
	아궁이	1,212	1,095	1,236	1,104	1,300	1,305	1,298	1,280	1,101	948	1,059	1,262	1,202	1,184.77
출탕 시점	전체			1,310	1,216	1,203	1,219	1,210							
	아궁이			1,342	1,129	1,305	1,279	1,259							
송풍구-아궁이 온도차		162	210	51	144	-44	-48	-8	123	197	412	368	20	176	135.62

※사업단 6차 배재구 온도 가장 양호, 1차~2차 출탕 후 온도하강- 다시 상승- 3차 출탕 시 온도 1,306℃ 양호

※사업단 5차 배재구 온도 계속 낮았음

※사업단 4차 아궁이 하부는 아궁이의 좌우측벽을 측정하였음

현재까지의 주요 실험을 통해 볼 때, 선철 생산에는 석조식 송풍구를 설치하여 지속적으로 송풍이 되도록 하며, 송풍 방향은 아궁이 하부, 즉 출재구 또는 출선구를 향하는 것이 유리하다. 노 내부의 평균온도 1,200℃ 이상을 유지하면서 중하부는 1,280℃ 이상, 아궁이는 1,300℃ 이상을 유지해야 양호한 출선이 이루어지는 것으로 판단된다.

16) 제6차 실험의 2차 선철 출탕은 1차 선철 출탕 후 1시간 15분이 경과한 시점에 진행되었으나 판장쇠를 충분히 채우지 못했다. 이를 통해 광석 장입량과 광석 장입 이후의 환원되는 최소의 시간이 필요함을 알게 되었다.

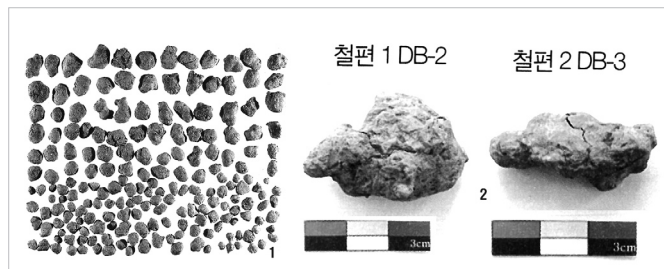
6. 생산품

본 실험의 생산품은 규격화된 선철 판장쇠로, 울산 달천광산 주변지역의 전언자료와 현장 실물자료를 수집·연구한 권병탁에 의하면 판장쇠는 다음과 같이 정의되고 있다(권병탁 2004: 551)¹⁷⁾.

【판장쇠란 순수 우리말이다. 전통사회에 있어서는 쇠점(冶鐵場)이나 유기점에서 철의 원자재로 써 왔다. 어떤 의도한 그릇을 방째(달구어 두드려 만들)할 때 가마(爐)에서 끓는 쇳물을 물판(熔型)에 부어 굳히거나, 강엿쇠를 여러 번 다루고 망치질하여 만든 두리납작한 작은 철판을 판장쇠 또는 무대가리하고 한다. 학계에서는 일반적으로 철정(鐵錠), 방주형철봉(方柱形鐵棒) 또는 장방형철판(長方形鐵板)이라고 한다】

즉 선철을 생산해 일정한 틀에 부어 굳히거나, 괴련철을 큰대장간에서 정련·단련해 만든 판상(板狀)의 철 소재를 말하는 것이다. 전자의 경우 노 내에 생성된 선철 쇳물을 판장쇠바탕 등에 흘려 부어 일정 크기의 판상(板狀) 철 소재이고, 후자의 경우 가마 바닥에 생성된 혼합철괴를 후속 공정인 정련단야·단련단야를 통해 만들어진 판상(板狀)·봉상(棒狀)의 철 소재이다. 전자는 주물점의 주조철기 소재인 선철 판장쇠, 후자는 대장간(단야)의 단조철기 소재인 괴련철 판장쇠가 되는 것이다. 본고에서는 현재 학계에서 통용되고 있는 용어인 철정(鐵錠)을 괴련철 및 선철 소재를 통칭하는 의미로 이해하고자 하며, 조선 후기~일제강점기 석축형로에서 대량 생산되었던 철은 곧 선철 판장쇠가 된다.

우리나라에서는 아직 주조철기의 소재, 즉 선철 판장쇠의 실체가 분명하지 않다. 일부 주조쟁이를 철 소재로 파악하는 견해가 있기는 하지만(孫明助 1998, 野島永 1997, 류위남 2009), 파철의 재사용에 관한 오해에서 비롯된 것으로 이해되며 이에 대해서는 충분한 반론(村上恭通 2007, 金度憲 2010,



〈도면 17〉 경주 황성동 I-다-11호 주거지 구슬형철괴(1) 및 대구 봉무동 선철괴(2)

김권일 2020b)이 제시되어 있어 따로 검토할 필요는 없다. 반면 금속분석을 통해 원삼국시대 대구 봉무동유적 선철괴(도면 17)가 용해주조의 소재로 상정된 바 있고, 경주 황성동유적 I-다-11호 주거지 출토 구슬형철괴(선철)가 주조철기의 부소재로 상정된 바 있다.

석축형로에서 생산된 판장쇠는 권병탁의 연구 및 본 실험 생산품을 통해 그 실체를 유추할 수 있다. 전언자료에 의하면 조업을 위해 가마를 축조할 때 아궁이 바깥 초롱구멍(출선구) 아래에 좌우 4매씩 8매짜리로 제작한 판장쇠바탕을 설치해 두고, 점화한 지 8~9시간 후 골편수가 초롱구멍(출선구)을

17) 권병탁이 수집한 쇠부리 관련 자료는 다수의 무쇠술과 도가니를 비롯해 철광석·토철·노 벽체·슬래그·도가니·철괴·목탄·철 소재·거푸집·단야구 등 매우 다양하고 수량도 많다. 현재 대구 화원의 전통산업박물관(송광매기념관)에 소장 중이며, 정확한 목록은 아직 파악되지 않고 있다.

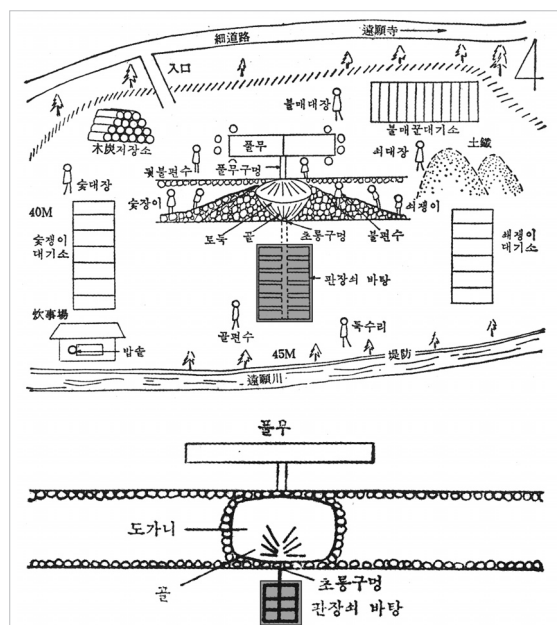
끓으면 쇳물은 탕도를 따라 판장쇠바탕으로 차례로 흘러들어간다. 쇳물이 굳기 전 독수리가 쇳물 위에 뜨는 철재를 감나무 고무래로 끌어낸 후 쇳물이 굳으면 선철 판장쇠가 되는 것이다. 1회 출탕에서 80근(약 48kg)짜리 선철을 제작하며, 이를 평균 3회 실시해 하루에 240근(약 144kg)의 판장쇠를 생산하면 성공적이라는 것이다(권병탁 2004: 578~579).

【점화한 지 7~8시간이 지나 강한 풀무바람을 받은 도가니 안의 화염은 하늘을 찌른다. 이때 골편수는 토독의 외벽을 쇳망치로 가볍게 쳐 보면서 쇳물이 고인 정도를 확인한다. 한편 독수리는 초롱구멍 아래 땅바닥에 판장쇠 바탕자리를 좌우로 4날씩 8개를 깨끗하게 준비해 둔다. 가장 호조건일 때 점화한 지 8~9시간이 지나면 골편수는 쇳창으로 초롱구멍을 뚫는다. 금빛 쇳물은 골을 따라 흘러 내려 첫째 바탕에 고이고 이어서 둘째, 셋째, 차례로 고여서 강처럼 굳어진다. 굳어지기 전에 독수리는 감나무 고무래로 쇳물 위에 뜨는 찌꺼기를 조심성 있게 끌어낸다. 쇳물이 멎으면 골편수는 초롱구멍을 점흙으로 다시 막는다.】

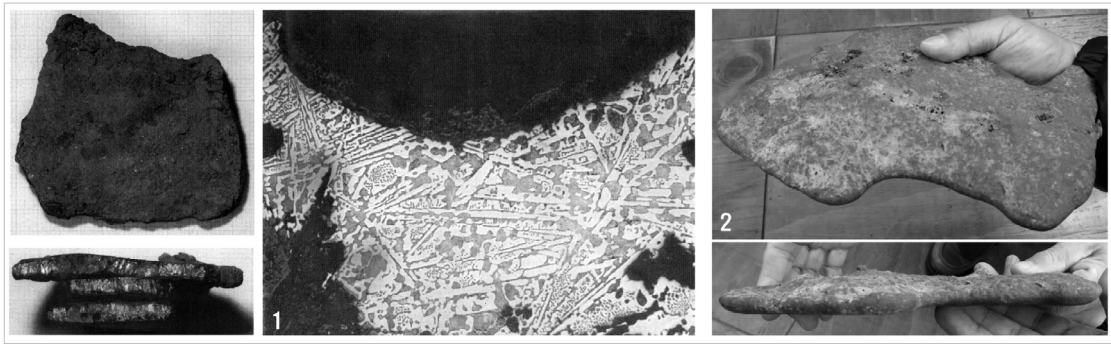
【작업조건에 따라 동일하지 않지만 보통 일주야에 80근짜리 판장쇠(중방철)를 1회에 평균 3개씩만 얻으면 그 작업은 성공적이라고 한다. 이러한 작업은 여타조건만 허락되면 불을 끄지 않고 며칠이고 계속하는 것이지만 단위작업에서 사흘간을 계속 할 수 있으면 전주는 큰 이익을 얻는다고 한다.】

권병탁이 제시한 쇳부리점터 가상도와 쇳부리 가마 구조도에도 판장쇠바탕이 표현되어 있다. 〈도면 18〉의 위에는 좌우 6매씩 모두 12매로 이루어진 판장쇠바탕으로 표현되어 있고, 아래에는 좌우 3매씩 6매로 된 판장쇠바탕이 묘사되어 있다. 반면 위에서 본 바와 같이 일부 기술에서는 좌우 4매씩 8매로 이루어져 있다고도 하였다. 좌우 3매씩 6매, 좌우 4매씩 8매, 좌우 6매씩 12매 등 전언자료와 도면에 조금씩 다르게 나타나기는 하지만, 결론적으로 한번 출탕으로 좌우 3~6매, 모두 6~12매의 판장쇠가 생산되었던 것으로 추정할 수 있다. 판장쇠의 정확한 크기나 판장쇠바탕 제작방법에 대해서는 알려진 바가 없지만, 용해로 장입 전 분할하기에 적당한 두께 및 유통시기에 적합한 무게가 중요하다는 점을 감안한다면, 길이 25~50cm, 너비 5~10cm, 두께 3cm 정도의 판상으로 유추할 수 있다.

한편 권병탁이 울산 달천광산 주변에서 채집해 전통산업박물관에서 소장하고 있는 철판(鐵板)과 조선시대 충주 완오리 야철유적의 선철 쇳조각은 제련공정의 생상품일 가능성이 높는데, 일정한 평면 형태를 가지지 않고 얇은 판상이라는 점에서 판장쇠바탕과 같은 일정한 모양의 틀을 사용하지 않고, 노 앞의 얇은 구덩이로 흘러서 굳힌 것일 가능성이 높다(도면 19 참조).



〈도면 18〉 권병탁 자료의 판장쇠바탕



〈도면 19〉 총주 완오리유적 출토 쇠조각(1)과 권병탁 수집 철판(2)

선철 생산을 목적으로 하는 일본 근세 타타라제철의 즈쿠오시(ずくおし-銑押)의 경우, 용선을 탕장(湯場)이라고 불리는 직경 1m, 깊이 30~60cm의 웅덩이(窪) 혹은 정형화된 틀에 흘려보내 굳힌다(角田德幸 2014)¹⁸⁾. 생산품은 대단야장에서의 탈탄과정을 거쳐 호쵸우테츠(庖丁鐵)라는 단조 가능한 괴련철로 변모하며, 일부는 용해주조의 소재가 된다. 쇳물이 모이는 구덩이의 크기는 다를 수 있겠지만 파쇄가 용이한 두께를 형성한다면 용해주조의 소재로 큰 문제가 되지 않는다.

판장쇠바탕으로 유출되어 냉각된 판장쇠에 대해서는 달천철장 실험장에서 분리실험을 실시해 그 결과를 실험보고서에 수록한 바 있다(이남규 외 2021·2022). 생산품은 탕도 부분 냉각선철이 그대로 잔존하거나 후속 유출되어 냉각된 슬래그가 상면에 부착되어 있기도 하였다. 분리실험 현황은 〈표 14〉와 같다.

〈표 12〉 판장쇠 분리실험 현황

회차	실험 일시	실험 대상	실험 결과	비고
1차 실험	2021.06.27	2020년 제6차 실험 1차 출탕 판장쇠 1본	판장쇠 8매 및 탕도부 선철	
2차 실험	2022.05.13	2020년 제6차 실험 2차 출탕 판장쇠 1본 2021년 제7차 실험 1·3·4차 출탕 판장쇠 3본	판장쇠 20매 탕도부 선철	
3차 실험	2022.08.13	2022년 제8차 실험 2·3차 출탕 판장쇠 2본	판장쇠 14매 탕도부 선철	

실험 결과를 요약하면, 판장쇠 6매 혹은 8매와 탕도로 이루어진 냉각 판장쇠를 모루 위에 대고 정과 망치를 이용해 분리할 부분을 내려치자 쉽게 분리가 되었다. 오랜 경험을 가진 장인(이은철 연구원)과 실제 쇠를 다루어 본 경험이 별로 없는 비장인의 작업에도 결과는 마찬가지였다.

18) 다만 즈쿠오시의 생산품은 대단야장에서의 탈탄과정을 거쳐 강재(鋼材)로 제작되어 도검으로 만들어진다는 점에서 상기한 우리나라의 경우와는 차이가 있다.

2021년도 제7차 실험부터는 판장쇠 바탕에서 냉각된 판장쇠의 분리를 원활하게 하기 위해 탕도와 개별 판장쇠들 사이 및 개별 판장쇠들 중앙 아래에 삼각형 홈을 냈다. 그 결과 타격 시 훨씬 분리가 용이했으며, 개별 판장쇠도 홈이 있던 절반 지점에서 쉽게 분리되었다.



〈도면 20〉 생산된 선철 판장쇠의 외형 및 단면

대부분의 판장쇠는 탕도 부분과 분리가 원활하게 이루어졌으나 간혹 내려칠 때의 충격으로 인해 판장쇠 자체

에 균열이 생겨 서로 분리되는 경우가 있었다. 단면 형태를 보면 기포가 거의 생기지 않아 아주 치밀한 조직도 있고, 크고 작은 기포가 형성된 경우도 있다(도면 20 참조). 기포가 생기는 이유는 출탕 및 냉각 시 가스가 외부로 충분히 방출되지 못했기 때문인데, 이러한 기공이 생긴 부분이 타격 시 그 충격을 이기지 못하고 깨어지는 것이다.

판장쇠 내부에 기공이 형성되는 원인은 두 가지 정도로 유추해 볼 수 있다. 첫째, 모래와 주물사를 사용해 판장쇠바탕을 제작하였는데, 계획과 달리 미리 제작되지 못해 실험 당일해야 제작된 경우가 있다. 그 과정에서 모래와 주물사에 물을 섞었으며 이를 건조할 충분한 시간이 부족했다. 즉 판장쇠바탕이 충분히 건조되지 않고 수분이 많이 남아 있어 용선 내 가스가 제대로 방출되지 못했던 것이다. 둘째, 형성된 선철 쇳물 자체에 다량의 가스가 발생되었고, 탕도를 통해 판장쇠바탕으로 주입되는 과정에서 쇳물의 온도가 너무 낮고 유동성이 좋지 않아 일률적이고 신속한 속도로 주입되지 못했기 때문이 아닌가 생각된다. 앞서 충주 완오리유적 쇳조각 및 권병탁 수집 철판에 대해서도 언급한 바와 같이 깨어진 부분도 엄연한 선철이므로 다음 공정, 즉 용해주조 공정의 소재로 사용될 수 있다. 하지만 유통을 고려한 안정적 판장쇠 생산을 위해서는 최대한 규격 판장쇠를 생산하는 것이 효율적일 것이다.

이처럼 실험에서 생산된 판장쇠는 3.53~4.4%C의 공정선철에 가까운 탄소를 함유하고 있었다. 용해주조 공정에서 다시 한 번 용융시키면 4.3%C의 공정선철을 생산할 수 있을 것으로 판단되며, 결론적으로 석축형로에서 생산된 선철 판장쇠는 분할 및 재용해를 통해 주조철기를 생산하기에 적합한 철소재라는 점이 검증된 사례로 평가된다.

V. 맺음말

조선후기 울산 달천광산 주변지역 석축형제철로의 고고학적 특징으로는 ㉦ 토철(土鐵)이라는 울산 달천광산의 독특한 분상원료를 사용하며, ㉡ 석축형이라는 노 구조를 채택함으로써 반영구적 사용이 가능하고, ㉢ 노 내부 평면적이 2.9~6.7㎡에 이르는 대형으로 이전 시기에 비해 생산량을 현저히 증가시킬 수 있는 구조(최영민 2021: 102)이고, ㉣ 도제 송풍관이 아닌 용융의 우려가 적은 바람골이라는 석조(石組) 송풍로를 통해 지속적인 송풍을 한다는 점 등을 들 수 있다.

본 실험을 통해 밝혀진 내용을 정리하면, ① 석축형로는 선철을 대량 생산하기에 적합하도록 발전한 장대화(長大化)된 구조이고, ② 달천광산 특산의 토철과 같은 분말상 원료를 제련하기에 적합하다는 점, ③ 판장쇠바탕이라는 거푸집을 사용함으로써 규격화된 선철 판장쇠를 효율적으로 생산해 유통시킬 수 있다는 점, ④ 생산된 선철 판장쇠는 4.3%C의 공정선철에 가까운 탄소를 함유하고 있어 용해주조의 소재로 적합하기 때문에 용해정련 등 추가적인 공정이 필요하지 않다는 점, ⑤ 실험에서 설정한 바와 같이 선철 생산에 필요한 원료/연료 비율은 1/2 이상이 적절하다는 점, ⑥ 출선구(초롱구멍)와 출재구(잡쇠구멍)를 통해 각각 용선과 철재를 분리해 유출시킬 수 있다는 점, ⑦ 노의 높이만이 선철 생산에 절대적인 조건이 아니라 원료의 형태·연료와의 비율·온도(송풍 방식)·출탕 등의 조업방식 설정을 통해 선철 생산이 가능하다는 점 등을 들 수 있다. 사업단의 실험을 통해 이러한 내용이 증명되었으며, 노의 구조와 조업매뉴얼을 토대로 실제 규격화된 선철 판장쇠를 반복 생산할 수 있었다. 다만 출선구의 막힘 현상 등 조업방식의 세부적인 측면에서 개선되어야 할 부분이 있고, 유적에서 나타나는 크기의 대형로(大形爐) 실험이 이루어지지 않는 등 아직까지 기술복원이 완전한 것은 아니어서 추가적인 검증이 필요한 부분도 있다.

이상과 같이 석축형로에 대한 연구는 경제사 연구를 위한 민속조사로부터 시작되어 고고자료를 통한 노 구조 및 조업방식의 복원, 생산품에 대한 검토 등으로 진전되고 있으며, 최근의 실험고고학을 통해 전반적 기술검증이 이루어지고 있는 단계라 할 수 있다. 조선후기 울산 달천광산 주변 석축형로의 선철 생산기술에 대한 연구가 집적된다면, 다른 지역의 선철 생산기술은 물론, 고려시대 및 그 이전 시기의 양상에 대해서도 본격적으로 검토될 수 있다는 점에서 이러한 실험연구의 의미는 클 것으로 판단된다.

● ● ● 참고문헌

- 강성귀·김권일, 2022, 「한국 철 제련복원실험의 비교분석 연구」, 「동북아시아 제철기술 연구 논문집Ⅱ」, 국립중앙문화재연구소.
- 강애경, 2001, 「충주 2차 큰골, 뒷골 유적 출토 목탄의 수종」, 「中部內陸高速道路 忠州區間 文化遺蹟 發掘調査 報告書」.
- 國立慶州博物館, 2000, 「慶州 隍城洞 遺蹟Ⅰ·Ⅱ」.
- 權丙卓, 1969, 「李朝末期 淸道郡 솔계 鎔鉄手工業 研究, 上·下」, 「産業經濟」5, 嶺南大學校.
- 權丙卓, 1971, 「蔚山郡 達川 鐵産業에 대한 史的 研究 1~3」, 「新羅加耶文化」2, 嶺南大學校.
- 權丙卓, 1972, 「쇠부리터 발견경위」, 「東洋文化」1, 嶺南大學校.
- 權丙卓, 1991, 「傳統 鎔鑪 復元과 製鍊術 研究-쇠부리터 시설장비를 되살려 보존하기 위하여-」, 「民族文化論叢」12, 嶺南大學校.
- 권병탁, 2004, 「한국산업사 연구」, 영남대학교출판부.
- 김권일, 2009, 「영남지역 조선시대 製鐵文化의 기초적 연구-石築型 製鐵爐의 설정-」, 「嶺南考古學」50, 嶺南考古學會.
- 김권일, 2020a, 「석축형제철로(石築型製鐵爐)의 조업방식 재고」, 「신라문화유산연구」4, 신라문화유산연구원.
- 김권일, 2020b, 「한국 고대 제철기술의 고고학적 연구 -영남지역을 중심으로-」, 학연문화사.
- 김권일, 2021, 「충주 완오리 고려시대 철 제련로의 구조와 조업방식 연구」, 「한국중세고고학」10, 한국중세고고학회.
- 김권일, 2022, 「울산 쇠부리 기술의 시설장비와 도구」, 「구충당 이익립과 울산 쇠부리」, 울산대국박물관.
- 김경호, 2012, 「중원지역 제철로 연구」, 「先史와 古代」36, 한국고대학회.
- 金度憲, 2010, 「古代 鑄造鐵斧 鐵器 素材說 檢討」, 「釜山大學校 考古學科 創設20周年 記念 論文集」, 釜山大學校 考古學科.
- 金鎬詳, 2003, 「韓國의 木炭窯 研究」, 大邱가톨릭大學校 大學院 博士學位論文.
- 남태광, 2021, 「울산 대안동 쇠부리터 출토 목탄의 수종분석」, 「울산 대안동 쇠부리터」, 울산연구원 문화재센터.
- 류위남, 2009, 「삼한시대 영남지역 판상철부와 주조철부 연구」, 「영남고고학」51, 영남고고학회.
- 文化財管理局, 1987, 「冶鐵遺蹟址調査報告書」.
- 박상현 2020, 「남한지역 목탄요의 변천 양상과 요인」, 「百濟學報」31, 百濟學會.

- 박상현, 2022, 「보은 대원리 유적으로 보는 조선시대 제철수공업」, 『중앙고고연구』37, 중앙문화재연구원.
- 박장식, 2002, 「芳里 冶鐵址 출토 유물에 대한 금속학적 분석」, 『蔚山圈 廣域上水道(大谷댐)事業 編入敷地内 1次 發掘調査 報告書』, 韓國文化財保護財團.
- 박장식, 2004, 「울산 천전리유적 제련로 성격에 관한 연구(출토 슬래그(Slag)의 미세조직 분석을 통하여)」, 「울산권 광역상수도(대곡댐) 사업 편입부지내 2차 발굴조사-蔚山 高旨坪遺蹟(Ⅲ)」, 韓國文化財保護財團.
- 서성호, 2015, 「기록으로 본 울산 달천 광산」, 『울산사학』19, 울산사학회.
- 聖林文化財研究院, 2006, 「慶州 乾川 龍明里 製鐵遺蹟」.
- 孫明助, 1998, 「韓半島 中·南部地方 鐵器生産遺蹟의 現狀」, 『嶺南考古學』22, 嶺南考古學會.
- 신경환·이남규·장경숙·배민규, 2009, 「경주 덕천리유적 출토 제철관련 유물의 분석고찰」, 『경부고속철도 건설공사구간내 慶州 德泉里遺蹟Ⅴ-三國時代 以後-』, 嶺南文化財研究院.
- 신경환·이남규·장경숙, 2010, 「울산 중산문화센터 건립예정부지내 유적 출토 철광석의 금속학적 분석고찰」, 『蔚山中山洞798-2遺蹟』, 蔚山文化財研究院.
- 신경환·이남규·최영민, 2013, 「한국고대 製鐵기술Ⅰ」, 금속기술연구소.
- 신경환·이재용, 2019, 「2019 울산쇠부리 제철기술 복원실험의 금속학적 분석 및 고찰」, 「2019 울산쇠부리 제철기술 복원실험 연구보고서」, 울산광역시 북구문화원·울산쇠부리복원사업단.
- 신경환·이재용, 2021a, 「2020 울산쇠부리축제 제철복원실험의 금속학적 분석」, 「2020 울산쇠부리복원사업 연구보고서」, 울산광역시 북구문화원·울산쇠부리복원사업단.
- 신경환·이재용, 2021b, 「울산 대안동 쇠부리터 발굴시료의 금속학적 분석 및 고찰」, 「울산 대안동 쇠부리터」, 울산연구원 문화재센터.
- 신경환·이재용, 2022a, 「실험에 대한 금속학적 분석결과」, 「2021년도 울산쇠부리복원사업 연구보고서」, 울산광역시 북구문화원·울산쇠부리복원사업단.
- 신경환·이재용, 2022b, 「실험에 대한 금속학적 분석결과」, 「2022 울산쇠부리복원사업 연구보고서」, 울산광역시 북구문화원·울산쇠부리복원사업단.
- 신경환·김권일·최영민, 2015, 「석축형제철로(石築型製鐵爐)의 조업방식 연구」, 『야외고고학』22, 한국매장문화재협회.
- 嶺南文化財研究院, 2011, 「대구 이시아폴리스 조성사업부지내 大邱 鳳舞洞遺蹟Ⅳ」.
- 蔚山文化財研究院 蔚山發展研究院 文化財센터·蔚山大學校博物館, 2003, 「文化遺蹟分布地圖-蔚州郡-」.
- 울산문화원, 1996, 「울산의 전설과 민요」.
- 울산연구원 문화재센터, 2021, 「울산 대안동 쇠부리터」.
- 이남규·이태우·신경환·김권일·이은철·강성규·권용대·이민아, 2019, 「2019 울산쇠부리 제철기술 복원실험 연구보고서」, 울산광역시 북구문화원·울산쇠부리복원사업단.

- 이남규·이태우·신경환·이은철·김권일·권용대·강성귀·이재용·이민아, 2021, 「2020 울산쇠부리복원사업 연구보고서」, 울산광역시 북구문화원·울산쇠부리복원사업단.
- 이남규·이태우·신경환·이은철·김권일·권용대·강성귀·이재용, 2022a, 「2021년도 울산쇠부리복원사업 연구보고서」, 울산광역시 북구문화원·울산쇠부리복원사업단.
- 이남규·이태우·신경환·이은철·김권일·권용대·강성귀·이재용·이지은, 2022b, 「2022 울산쇠부리복원사업 연구보고서」, 울산광역시 북구문화원·울산쇠부리복원사업단.
- 이민아·권용대, 2022, 「영남지방 전통 제철용 목탄의 생산과 소비」, 「동아시아제철기술 비교 연구논문집Ⅱ」, 국립중앙문화재연구소.
- 李浩官·李宗碩, 1984, 「金屬工藝-韓國의 在來 採鐵·製鍊·鑄鼎 技術調査」, 無形文化財(工藝技術) 調査報告書(5), 文化財管理局 文化財研究所.
- 정광용·박광열, 2006, 「경주 건천 용명리 제철유적 제철로의 과학적 연구」, 「경주 건천 용명리 제철유적」, 성림문화재연구원.
- 정광용·조상기·오재진·최경용, 2002, 「모화지유적 제철로의 과학적 분석연구」, 「慶州 外東地區 農村用水開發 事業地區 內 遺蹟 發掘調査報告書」, 中央文化財研究院.
- 鄭澄元·李建茂·朴方龍, 1987, 「Ⅲ. 釜山·慶北·慶南地域」, 「冶鐵遺蹟址調査報告書」, 文化財管理局.
- 최영민, 2013, 「울산 달천유적 출토 철광석과 토철의 금속학적 분석 및 고찰」, 「울산쇠부리문화 철을 말하다」 2013년 울산쇠부리축제 학술심포지엄, 울산쇠부리축제 추진위원회·한국철문화연구회.
- 최영민, 2019, 「조선시대 석축형제철로의 기원과 성격 재검토」, 「한국중세고고학」6, 한국중세고고학회.
- 최영민, 2021, 「중세 철 생산기술의 발전 양상」, 「한국중세고고학」9, 한국중세고고학회.
- 한지선, 2022, 「괴련철 생산 기술」, 「기술의 고고학」, 제46회 한국고고학전국대회, 한국고고학회.
- 황원중·권구중·이성재·박형수·김남훈, 2002, 「전통식 탄화로에서 제탄된 목탄의 해부학적 특성」, 「林産에너지」21(1), 한국산림바이오에너지학회.
- 角田徳幸, 2014, 「たたら次製鐵の成立と展開」, 清文堂.
- 高塚秀治·永嶋正春·齋藤努·安在皓·盧泰天, 2010, 「蔚山達川遺跡出土遺物の自然科学的分析結果」, 「蔚山達川遺蹟 3次 發掘調査」, 蔚山文化財研究院.
- 野島永, 1997, 「弥生·古墳時代の鉄器生産の一樣相」, 「たたら研究」38, たたら研究会.
- 村上恭通, 1997, 「原三国·三国時代における鉄技術の研究 -日韓技術比較の前提として」, 「青丘學術論集」11, 韓國文化研究振興財團.



2023년도
**울산쇠부리
복원사업
연구보고서**



발행일 : 2023. 12. 16.

발행인 : 박원희

집필자 : 이남규, 이태우, 신경환,
이은철, 김권일, 권용대,
강성귀, 이재용

발행처 : 울산광역시 북구문화원

주 소 : 울산광역시 북구 산업로 1104

전 화 : 052)294-2222

팩 스 : 052)286-0031

홈페이지 : <http://www.ubcc.or.kr/>

이 메 일 : soeburi@hanmail.net

디자인·편집 : 디자인문

울산광역시 남구 삼산중로 131번길 42-10

전 화 : 052)260-1870

팩 스 : 052)269-5110

※ 이 보고서는 2023 울산광역시 북구 보조금으로
발행되었습니다.