

2020

울산쇠부리
복원사업
연구보고서
SOEBURI



울산광역시 북구문화원장 귀하

본 보고서를
‘2020년도 울산쇠부리 복원실험 연구’의
최종보고서로 제출합니다.

2021. 06. 30.

울 산 쇠 부 리 복 원 사 업 단





CONTENTS

I. 머리말	13
II. 연구 목적 및 방법	17
1. 연구 목적	19
2. 연구 방법	20
3. 연구단 구성	21
III. 실험 준비	23
1. 가마의 구조	25
2. 실험매뉴얼	29
3. 실험 준비과정	30
IV. 실험 내용	43
1. 실험 과정	45
2. 실험 결과	54
V. 고찰	61
1. 실험 결과의 고찰	63
2. 금속학적 분석결과에의 고찰	72
VI. 맺음말	77
부록	81
1. 실험 기록	83
2. 2020 울산쇠부리축제 제철복원실험의 금속학적 분석	92
3. 자문의견서	142
참고문헌	147

국내 최초로 판장쇠 생산을 축하하며...



박 원 희
북구문화원 원장

이천년 철의 역사가 시작된 달천철장 그곳에 조선의 철강왕 구충당 이의립 선생께서 15년간 전국 팔도를 편답하시어 채득한 제철기술이 고스란히 녹아든 울산쇠부리 가마가 축조되고 1,300도를 넘나드는 불의 열기 속에 붉은 쇳물을 거침없이 토해 내는 광경은 세상 그 어떤 비경보다도 아름다웠습니다.

2020 울산쇠부리복원사업의 본 실험이 지난 10월 10일 달천철장 제철실험장에서 코로나19라는 미증유의 상황 속에서도 성공적으로 개최되었습니다. 360여 년 전 구충당 이의립 선생께서 발명하신 무쇠 제조법을 다시 되살리겠다는 일념으로 국내 최고 권위의 학자와 장인 그리고 울산을 삶의 터전으로 살아온 지역 주민들과 울산 복구의 지원으로 구성된 민·관·학 거버넌스인 울산쇠부리복원 사업단이 발족되어 2016년 시작된 울산쇠부리복원사업은 올해로 여섯 번째 실험을 맞이하였고 그 어느 해보다 놀라운 성과와 함께 많은 의미를 담은 사업이었다고 자평합니다.

우선, 이 땅에서 가장 오래된 철산지인 달천철장에서 실험이 진행되었다는 것이 큰 의미를 담고 있다 할 것입니다. 삼한시대부터 2002년 폐광하기까지 품고 있던 철을 기꺼이 인류의 문화발전을 위해 내어 주었고, 더 이상 철장이라는 이름에 걸맞은 터의 기능을 다하진 못하지만 지역 주민의 삶에 심포가 되어 준 달천철장에서 활화산 같은 불기둥과 붉은 쇳물로 철의 땅 달천철장의 역사를 유감없이 증명하였다 할 것입니다. 또 다른 의미는 2019년 발굴 조사된 대안동 쇳부리터를 모델로 울산쇠부리 가마가 축조되



었다는 점입니다. 동대산 기슭에서 100여 년간 품고 있던 울산쇠부리 기술의 비밀을 이번 실험을 통해 실증할 수 있었습니다. 마지막으로 국내 최초로 판장쇠를 생산하였다는 것입니다.

2020 울산쇠부리복원사업의 성공은 참여자들의 땀과 열정이 없었다면 불가능했을 것입니다. 이남규, 이태우 공동단장님과 신경환, 이은철, 김권일, 권용대, 강성귀, 이민아 연구원님, 울산쇠부리소리 보존회 회원님들 그리고 정상태, 윤석원, 심재연, 성정용, 신상용, 한지선, 조대연 자문위원님께 감사드리며 국립중원문화재연구소와 울산문화재연구원, 금속기술연구소 관계자분들께도 감사의 마음을 전하고자 합니다.

마지막으로 지역의 소중한 문화자산을 바로 세우는데 행정적, 재정적 지원을 아끼지 않으시는 이동권 구청장님과 임채오 북구의회 의장님을 비롯한 북구의회 의원님들께도 감사드리며 울산광역시 북구 관계 공무원들께도 감사의 마음을 전하고자 합니다.

울산쇠부리 문화가 우리 울산의 대표적인 문화자산임은 주지의 사실입니다. 2019년 12월 26일 울산광역시 무형문화재 제7호로 지정된 ‘울산쇠부리소리’, 울산광역시 지정 기념물 제40호 ‘달천철장’, 울산광역시 지정 기념물 제44호 ‘대안동쇠부리터’와 더불어 전통제철기술인 ‘울산쇠부리’가 지역의 소중한 무형문화로 인정될 수 있기를 기대해 봅니다

2021년 6월

울산광역시 북구문화원장 박 원 희

●●●축사

과거와 현재, 미래를 연결하는 ‘울산쇠부리문화’



이 동 권
울산광역시 북구청장

어느덧 ‘울산쇠부리복원사업’이 6차로 접어들었습니다.

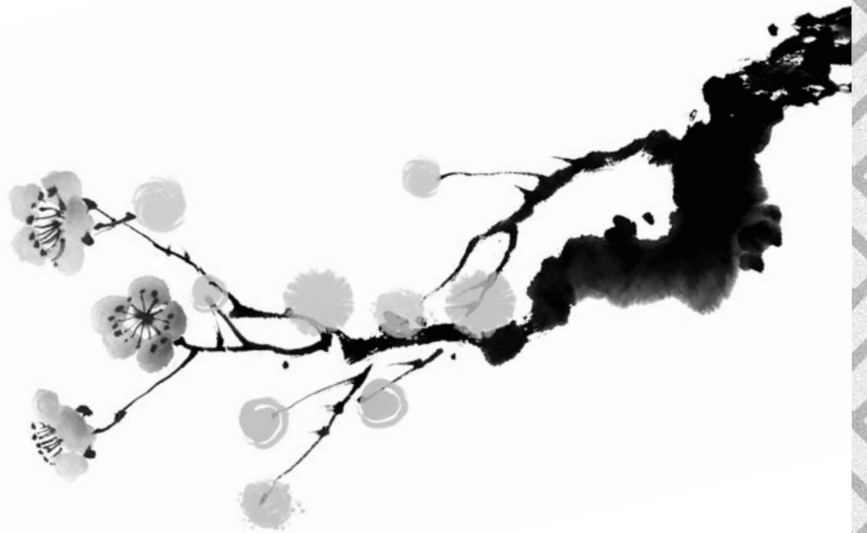
고대 괴련철 기술 복원을 시작으로 조선후기 선철 제조기술 복원실험을 진행한 지금에 이르기까지 꾸준한 복원실험이 가능했던 것은 울산만의 독창적인 문화유산인 ‘울산쇠부리문화’에 관심을 가져주신 많은 분들의 노력 덕분이라고 생각합니다.

올해는 어느 해보다 ‘울산쇠부리문화’에 대한 정체성을 강화한 해였다고 생각합니다.

우선, 제철기술 복원실험에 사용된 쇠부리가마를 삼한시대부터 유래된 철기문화의 중심지인 달천철장에 축조하였고, 달천광산만의 특징적인 철광석인 토철 제련의 성공으로 ‘토철제련법’이라는 독창적인 기술을 개발하고 보급하여 양란으로 피폐해진 조선을 부국강병의 길로 이끄는 데 대단한 공을 세운 구충당 이의립 선생의 동상을 북구청에서 달천철장으로 이전 설치하였습니다.

또한, 달천철장으로 축제 장소를 이전한 후 처음 개최된 ‘울산쇠부리축제’에서 진행된 ‘울산쇠부리복원사업’에서 달천철장에서 나오는 토철과 유사한 철광석을 원료로 사용하여 판장쇠 규격품 생산에 성공하였습니다.

그동안 이루어진 복원사업에서는 괴광과 분광을 이용하여 원통형, 정방형 제련로에서 쇳물을 출탕해 내었지만, 일정한 모양인 판장쇠 규격품을 생산해낸 것은 올해 실험이 최초이며 대안동 쇠부리터의 형태를 본뜬 석축형 제련로에서 판장쇠 생산까지 성공하면서 조선후기 토철제련법 복원에



한 걸음 더 다가서게 되었습니다.

오랜 시간 단절되어 있던 기술을 되살리는 것이 단기간에 이루어지는 작업은 아닙니다. 그럼에도 여섯 번의 복원실험 동안 유의미한 성과를 창출해낼 수 있었던 것은 선조들의 지혜와 노력을 계승하여 울산 복구의 대표적인 문화자산인 ‘울산쇠부리문화’를 보존하고 복원하고자 하는 민·관·학 거버넌스 ‘울산쇠부리복원사업단’ 참여자분들의 끊임없는 노력 덕분이라고 생각합니다.

앞으로도 과거의 전통인 ‘울산쇠부리문화’를 계승하고 더 나아가 이 문화를 현대화하고 발전시켜 ‘울산쇠부리문화’가 과거와 현재, 미래를 연결하는 매개체로서의 역할을 할 수 있도록 ‘울산쇠부리복원사업단’ 참여자분들의 많은 역할을 당부 드립니다.

아울러, 오랜 시간 동안 ‘울산쇠부리’의 복원을 위하여 힘써주신 박원희 문화원장님, 이남규 교수님, 이태우 울산쇠부리소리보존회 회장님, 여러 연구원님과 자문위원님들을 비롯한 관계자 여러분의 노고에 깊은 감사를 드립니다.

2021년 6월

울산광역시 복구청장 이 동 권

●●●축사

울산 북구의 자랑스런 문화유산 ‘울산쇠부리문화’



임 채 오
울산광역시 북구의회
의장

여러분, 반갑습니다. 북구의회 의장 임채오입니다.

‘울산쇠부리복원사업 연구보고서’ 발간을 진심으로 축하드립니다. ‘울산쇠부리’는 고대 동북아 철기 문화를 이끈 북구의 자랑스러운 역사적 유산입니다. 이번에 진행된 제6차 실험을 통해 우리들은 ‘울산쇠부리’를 복원하고자 하는 목표에 한층 더 가까워졌습니다.

어려운 여건 속에서도 지속적으로 큰 성과를 내고 계신 박원희 쇠부리축제 추진위원장님, 공동단장이신 울산쇠부리소리 보존회 이태우 회장님과 한신대학교 이남규 교수님, 그리고 이은철 장인을 비롯한 연구원님 및 자문위원님을 포함해 보고서 발간에 애써 주신 모든 관계자 분들께 격려와 감사의 인사를 전합니다.

철의 발견으로 인해 인류 문명은 혁명적으로 발전할 수 있었습니다. 위대하고 찬란했던 울산쇠부리 제철문화의 보존과 계승을 위해 민·관·학 거버넌스인 ‘울산쇠부리복원사업단’이 구성되었고, 지난 2016년부터 6차례에 걸친 실험을 진행한 결과 70% 복원률을 달성할 수 있었습니다.

특히 이번 제6차 복원사업은 우리나라 최초의 철산지인 달천철장에서 진행되었다는 데에서 매우 큰 의미가 있습니다. 삼한시대부터 철을 대량 생산해 온 곳이 바로 달천철장이며, 이곳은 철 생산의 모든 과정인 쇠부리의 현장이었고 산업수도 울산의 근간이라 할 수 있기 때문입니다.



이와 더불어 이번에는 대안동 쇠부리터를 본떠 독창적 구조의 제련로인 ‘울산쇠부리가마’를 축조하였고, 제16회 울산쇠부리축제 기간 열린 울산쇠부리복원사업에서 조선 후기 구충당 이의립 선생의 토철제련기술을 복원하며 국내 최초로 판장쇠 규격품 생산에 성공하는 등 조선 후기 가장 특징적이고 선진적인 철 생산 기술을 밝히는 데 한 걸음 더 다가서게 되었습니다.

울산쇠부리 복원 연구에 대한 보고서를 지속적으로 발간하여 과학적이고 객관적인 자료를 확보해 나가는 것은 우리 지역 쇠부리문화의 유구한 역사와 정신을 잇는 후손들의 과업이라고 생각합니다.

더욱이 복구는 올해 2년 연속으로 지역 관광 활성화를 위한 공모사업에 선정되어 '울산쇠부리'를 활용한 '문화광부가 부르는 북구 12경' 관광콘텐츠 사업을 추진할 예정입니다. 주민 스스로 창작 합창곡 공연을 하면서 울산쇠부리 문화에 대해 더 깊이 알게 될 뿐만 아니라 울산쇠부리 문화를 전국 곳곳에 널리 알릴 수 있는 계기가 되길 희망합니다.

북구의회에서도 쇠부리 문화의 전통 계승과 발전을 위해 지속적인 관심과 지원을 아끼지 않겠다는 약속을 드리면서, 울산쇠부리 복원을 위해 애쓰시는 모든 분들께 다시 한 번 격려의 말씀을 전합니다. 감사합니다.

2021년 6월

울산광역시 북구의회 의장 임 채 오

2020

울산쇠부리
복원사업
연구보고서
SOEBURI

I

머리말



I. 머리말

그동안 울산광역시 북구청이 지원하고 울산쇠부리축제 추진위원회 및 북구문화원에서 주관하여 실시해 온 제철복원실험은 벌써 6회째에 달한다. 2016년 쇠부리축제의 일환으로 시작하였고 2017년에는 자체 실험 외에 「2017 대한민국 문화의 달 행사」 일환으로 추가실험이 이루어져 횡수로는 5년이지만 6회에 달하게 된 것이다. 그 중 3차까지는 고대의 반지하식 원통형 고대 체철로를 모델로 단조철기 소재용 괴련철 중심의 철괴를 생산하는데 주력하였는데 비해, 4차부터는 이 지역 특유의 달천광산 토철로 선철(무쇠)을 생산했던 것으로 말해지는 조선시대 울산쇠부리기술을 복원하는데 목적을 두고 실시되었다. 그리고 그 가운데 2019년도에 이어 올해도 본격적인 울산쇠부리가마에서 조업하는 방식을 취하였다.

지난 4년간은 울산 북구청 앞마당에서 대장간 시설들과 자리를 나란히 하여 상호간에 시너지효과도 있었으나 올해에는 코로나의 영향으로 인해 축제의 다른 행사들은 대부분 취소되고 제철복원실험만 실시되었고 이를 온라인으로 중계하는 방식을 취하게 되었다.

또한 실험장소의 이동도 큰 변화의 요소였다. 2020년부터는 삼한시대, 조선시대 및 현대의 철광석 채광지가 발굴을 통해 확인된 달천철장으로 자리를 옮기게 되었고, 향후 지속적으로 이곳에서 축제가 개최되고 그 한 부분에서 제철복원실험이 진행되는 것으로 확정이 되었다.

이미 공원이 조성되고 소규모의 전시장도 마련되어 있던 달천철장의 동남부에 실험장을 마련할 계획을 세우고 북구청에서 사용하던 것보다는 큰 철제 구조물 실험장을 설치하고 울산쇠부리가마를 조성한 후, 세부적인 제철조업의 준비작업은 봄부터 시작되었으나 본격적으로는 9월 이후에 진행되었다.

울산쇠부리가마는 석축길이 1,300cm에, 평면형태가 장방형을 이루는 가마부분은 높이 250cm, 내부 크기 70~90cm의 규모로서 전체적으로 토석 혼축의 구조물로 되어 있다. 이는 울산시 북구 대안동의 쇠부리가마를 모델로 하고 그 크기는 1/2로 축소하여 만든 것이다. 이로서 그동안 본 실험에서 추구 하던 울산쇠부리가마의 기본 조건이 어느 정도 마련되었고, 이후 이를 기반으로 지속적인 제철실험 을 실시하여 사라져 간 전통 제철기술의 진상을 구명(究明)하고 복원하는 작업이 가능해진 셈이다.

원료는 기록과 유적 발굴에서 확인된 토철과 유사한 성격의 것을 쓰기로 결정되었으나, 현실적으로 그러한 실물 획득이 불가능하여 광석을 분쇄하여 마련하였고, 연료는 대·중·소 크기의 목탄을 준비하 였으며, 조제제로는 이전 실험에서 생성된 철재(유출재)와 패각을 사용하는 것으로 정하였다. 또한 송풍은 코로나로 인해 인력에 의한 송풍이 곤란하여 송풍기를 이용한 기계송풍을 할 수 밖에 없었다.

10월 9일부터 실시된 본 실험은 예상한 만큼의 온도를 충분히 올리기는 어려웠으나 출탕시점과 같 은 필요시에 실험방식을 변경해가면서 가마 하부의 온도를 1,300℃ 이상으로 높여 실험을 큰 무리 없 이 진행할 수 있었다. 출탕은 4차례 실시하였으며 이 중 3차의 경우 판장쇠바탕을 가득 채울 정도의 선철을 성공적으로 받아내는 성과를 올리기도 하였다. 이처럼 울산쇠부리가마 제철복원실험의 특징 은 상당히 짧은 기간 동안 진행되어 온데 비해 괄목할만한 성과를 올린 셈이며, 아직 해결해야 할 부 분들이 일부 있지만 핵심기술의 많은 부분이 이미 복원되었다고 할 수 있을 것 같다.

이 보고서는 그러한 실험의 결과를 냉정히 분석·평가하고 향후 지적된 문제점들을 개선해 나가면서 울산쇠부리기술을 완전히 복원하는데 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

이렇듯 제철실험이 많은 성과를 올리면서 지속적으로 발전할 수 있었던 것은 울산 북구청 이동권 구청장님을 비롯한 울산 북구청 관계자 여러분들의 적극적인 관심과 지원 덕분이라 할 수 있다. 또한 울산 북구문화원·울산쇠부리축제추진위원회·울산쇠부리소리보존회와 자문단 및 여러 참여자가 우리 사업단과 혼연일체의 거버넌스를 형성하여 성심성의껏 노력해 주셨고, 그 외에 많은 시민들의 격려 와 참여가 있었기에 가능한 것이었다. 이 모든 분들께 머리 숙여 깊이 감사를 드린다.

울산쇠부리기술이 완전히 복원되고, 당시의 지극히 어려운 여건을 묵묵히 감내하면서 국가의 기간 산업인 제철업을 지속적으로 유지·발전시켜 온 수많은 제철 장인들과 노동자들의 정신과 열이 온전 히 되살아나 우리나라 현대산업사회 노동정신의 진정한 귀감으로 자리잡게 될 그날까지 우리 사업단 단원들 모두는 향후의 제철복원실험에 최선의 노력을 경주할 것을 다짐해 본다.

2020

울산쇠부리
복원사업
연구보고서
SOEBURI

II

연구 목적 및 방법

1. 연구 목적
2. 연구 방법
3. 연구단 구성



제 II 장 연구 목적 및 방법

1. 연구 목적

울산광역시 북구에서는 울산지역의 특징적 전통문화인 ‘울산쇠부리문화 복원사업’을 계속해서 추진해 오고 있으며, 그 일환으로 2016년도부터 ‘울산쇠부리 기술복원실험’을 연차적으로 진행해 오고 있다. 지금까지 모두 5차에 걸쳐 실험이 진행되었는데, 1~2차는 고대 원통형로 복원을 통한 괴련철 제련실험을, 3차는 선철 제련실험, 4~5차는 조선후기 울산 쇠부리가마 선철 제련 예비실험의 성격으로 진행되었다.¹⁾ 이 실험들의 결과는 모두 보고서로 작성되어(이남규 외 2016·2018a·2018b·2019) 울산 쇠부리 기술사를 연구하는데 없어서는 안 될 중요한 자료로 평가되고 있다.

울산지역의 제철기술에 대해서는 1960년대부터 경제사 연구를 위한 민속·지표조사의 형태로 이루어져 오다가, 1990년대 이후 울산 달천광산·방리·천상리·둔기리·입암리·중산동, 경주 모화리·용명리·녹동리 등의 제철유적 발굴조사를 통해 본격적인 고고학 및 금속공학적인 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.

하지만 조선시대 후기가 되면 달천광산을 중심으로 한 울산 및 주변에서는 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 울

1) 2017년 10월의 제3차 실험은 원통형로에서 선철을 생산하는 것이었는데, 실험의 목적은 분광을 사용해 선철을 생산할 수 있는지 타진하는 것이었다.

산 쇠부리가마 혹은 석축형제철로(石築型製鐵爐)이다(김권일 2009·2014·2020, 신경환 외 2015).

이러한 울산쇠부리기술은 20세기 초반까지 성행했으나 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)이 나타나고 중요성이 점점 커지게 되었다. 이후 여러 연구자들의 노력으로 울산쇠부리기술의 실체가 점점 명확해지게 되었다. 본 실험은 이처럼 명맥이 끊어진 울산쇠부리기술을 복원·전승하고, 소중한 우리 전통문화를 보존하고자 하는 목적으로 실시되었다.

2. 연구 방법

앞에서 언급한 바와 같이 울산쇠부리복원사업단에서는 2016~2019년도 1~5차 실험연구를 진행해 왔으며, 1·2차는 고대 원통형 제련로의 구조를 복원하여 괴련철을 생산하는 실험을 실시하였다. 전통 제철기술연구단(공동단장 이남규·이태우)의 연구와 연계한 이 실험을 통해 고대 원통형 제철로 복원은 어느 정도의 성과가 있는 것으로 평가되자, 지역사회를 중심으로 조선후기 울산지역 특유의 제철 기술이라 할 수 있는 구충당 이의립 선생의 ‘토철제련법’을 복원하자는 의견이 대두되게 되었다.²⁾ 이에 2017년도 제3차 실험에서는 토철과 비슷한 형태인 분광의 제련 가능성을 타진했고, 2018년도 제4차 실험에서는 방형 제련로에서 토철제련법의 예비실험 성격으로 진행해 소량의 선철 출탕에 성공한 바 있으며, 2019년도 제5차 실험에서는 비록 1본(本)을 다 채우지는 못하였으나 판장쇠바탕에 선철을 주입시키는데 성공하였다.

한편 울산 대안동 쇠부리터가 발굴조사됨에 따라 가마 구조, 풀무 흔적, 토철과 목탄의 출토 등 새로운 자료들이 확보됨에 따라 좀 더 진전된 실험계획을 수립할 수 있게 되었다. 또한 2020년도부터는 울산쇠부리축제를 기존의 울산 북구청 광장이 아니라 달천철장에서 개최하기로 결정됨에 따라 실험 역시 달천철장에서 이루어지게 되었다. 이에 달천철장에 새로운 실험장을 조성하게 되었으며, 울산 대안동 쇠부리터의 가마를 모델로 해 새로운 가마를 축조하게 되었다. 즉 이번 실험부터 거의 온전한 형태의 울산쇠부리기술 복원실험으로 진행하게 되었다.

실험의 준비와 진행에 대해서는 다음 장에서 자세하게 기술하겠지만 개략적인 준비과정을 언급하자면, 우선 실험의 목적은 울산 대안동 쇠부리가마를 모델로 한 실험로에서 토철 형태의 분광을 제련해 용융상태를 거친 선철을 1본이 6매 혹은 8매로 이루어진 판장쇠바탕에 흘러 들어가게 해 선철 판장쇠를 생산하는 것이다. 다만 대안동 쇠부리가마는 크기가 너무 커 실험장의 규모 등 제반조건이 맞지 않기 때문에 이를 절반 크기로 축소한 실험로를 제작하였다. 석축의 규모 및 풀무의 크기는 가마 크기에 연동하기 때문에 전반적인 조정이 필요하였으나 최대한 유적에서의 현상을 복원하는 방향으

2) 국립중앙문화재연구소에서는 고대 한반도 제철기술 연구를 주요 프로젝트로 선정해 2014년도부터 원통형 제련로 복원실험을 연차적으로 실시해 오고 있다. 이에 울산에서는 전국적으로 유사한 기술계통을 보이는 고대 원통형 제련로 복원실험보다는 울산 제철문화의 특징을 잘 보여주는 조선후기 선철 제련로 복원실험이 필요하다는 의견이 다수 개진되었다.

로 진행하였다.

실험의 원료는 달천철장의 토철을 사용해야 하지만 현재 달천광산은 울산광역시 기념물 제40호로 지정되어 있어 토철을 채취할 수 없다. 이에 기존의 강원도 정선산 철광석의 쇄분을 선별해 사용하였다. 풀무는 지금까지 인력송풍으로 운용해 왔으나 이번 실험은 코로나19의 여파로 인해 비대면으로 진행하게 되어 기계송풍과 겸용할 수 있도록 하였다. 실험 결과물과 관련해서는 1본 6매 및 8매 규격의 판장쇠바탕을 조성해 일정 규격의 판장쇠를 제작하는 것에 주안점을 두었다.

실험 기획 및 준비, 진행, 결과물 수습 등의 전 과정을 기록하였으며, 그 과정에서의 원료, 생산품, 부산물 등에 대해서는 시료를 채취해 금속분석을 진행하였다. 이러한 내용들을 정리·분석하여 본 보고서를 작성해 울산쇠부리기술을 규명하는 연구기록도서로 남기고자 한다.

한편 당초 실험의 준비 및 진행과정, 그리고 결과물에 대해서는 많은 시민들과 연구자들이 참관할 수 있도록 계획하였으나 코로나19로 인해 이루어지지 못하였다. 대신 준비과정과 실험과정을 담은 영상물을 제작해 실험 실시간 중계 및 온라인 콘텐츠로 활용하였다. 향후 코로나19가 진정되면 울산 시민들과 연구자 등 많은 사람들과 함께 하는 흥미롭고 재미있는 문화콘텐츠로서의 역할을 할 수 있을 것이다.

3. 연구단 구성

이번 울산쇠부리기술 복원실험 및 보고서 작성에는 많은 인원의 참여가 있기에 가능하였다. 실험에 필요한 예산은 울산광역시 북구(북구청장 이동권)에서 지원하였고 실험의 총괄은 울산광역시 북구문화원(원장 박원희)에서 담당하였으며, 공동단장 이남규·이태우를 비롯한 10명의 연구진과 5명의 학술자문위원단으로 구성되었다. 실험의 준비와 진행은 울산쇠부리축제 추진위원회 사무국과 울산쇠부리소리보존회 회원들이 맡아 주었으며, 야철문화연구소의 홍석영님은 이은철 장인(匠人)과 함께 고난도의 실험과정을 수행해 주었다. 또한 한신대학교 박물관의 양정민과 김태은이 실험에 참여해 많은 도움을 주었다. 이 외 국립중앙문화재연구소의 김서진 학예연구사와 아주대학교 도구박물관의 최영민 학예연구사가 실험을 참관하고 여러 가지 학술적 조언을 해 주었다. 앞에서 언급한 바와 같이 이번 실험은 코로나19로 인해 시민들이 관람하지 못하고 비대면 온라인 중계를 통해 진행되었으며, 자문위원들의 학술자문 역시 온라인 화상회의를 통해 진행되었다.

- 사 업 총괄 : 박원희(울산광역시 북구문화원 원장)
- 단 장 : 이남규(책임연구원, 한신대학교 한국사학과 교수)
이태우(울산쇠부리소리보존회 회장)
- 연 구 원 : 신경환(공동연구원, 금속기술연구소 소장)
이은철(공동연구원, 한국야철문화연구소 소장)

- 김권일(공동연구원, 신라문화유산연구원 선임연구원)
 권용대(공동연구원, 울산대국박물관 관장)
 강성귀(공동연구원, 한국문화재단 연구원)
- 연구보조원 : 이민아(공동연구원, 울산광역시 북구청 문화체육과 주무관)
 이재용(금속기술연구소 부장)
 이지은(국립중원문화재연구소 연구원)
- 연구위원 : 권오걸(울산광역시 북구청 문화체육과장)
 (가나다순) 김기항(울산광역시 북구청 행정지원국장)
 윤석원(울산쇠부리축제 추진위원회 위원)
 이정민(울산광역시 북구의회 의원)
 정상태(울산쇠부리축제 추진위원회 위원)
 정외경(울산광역시 북구의회 의원)
- 학술자문위원 : 성정용(충북대학교 고고미술사학과 교수)
 신상용(울산대학교 첨단소재공학부 교수)
 심재연(한림대학교 연구교수)
 조대연(전북대학교 고고문화인류학과 교수)
 한지선(국립중원문화재연구소 학예연구사)
- 실험참여 : 울산쇠부리소리보존회
- 행정지원 : 정재화·이소경(울산쇠부리축제 추진위원회)
 김경곤·류희영(울산광역시 북구문화원)
 손삼승·김희진(울산광역시 북구청 문화체육과)
- 사진촬영 : 오세윤(문화재전문 사진작가)
- 실험참여 : 홍석영(한국야철문화연구소), 최영민(아주대학교 도구박물관)
 김서진(국립중원문화재연구소), 양경민·김태은(한신대학교 박물관)
 박실·김원수·김정호·박금열·박삼성·양진하·윤귀철·이정걸·조기오·조선행·지상
 길·황문규(울산쇠부리소리보존회)

실험보고서 발간의 기획과 집필·편집은 공동단장 이남규의 책임 하에 진행되었다. 실험 준비는 정해진 일정 및 계획에 따라 울산쇠부리소리보존회(회장 이태우) 회원들이 맡아 주었으며, 연구원들이 이를 감리하고 기록하였다. 실험 진행에 있어 온도기록은 이민아가, 장입량 기록은 이지은이 담당하였으며, 이를 비롯한 전반적인 진행사항을 권용대와 강성귀가 기록 및 취합하였다. 보고서의 작성은 이남규·김권일·권용대·강성귀·이민아가 각 파트를 분담하여 집필·편집하였고, 최종적으로 이남규가 교정·감수하였다.

실험 과정 및 결과물에서 채취된 시료 37점에 대해서는 신경환·이재용(금속기술연구소)이 금속학적 분석과 검토를 맡아 주었다.

2020

울산쇠부리
복원사업
연구보고서
SOEBURI

III

실험 준비

1. 가마의 구조
2. 실험매뉴얼
3. 실험 준비과정



제III장 실험 준비

1. 가마의 구조

울산쇠부리가마의 구조 및 조업방식에 대해서는 기왕의 연구(권병탁 2004, 김권일 2009·2014·2020, 신경환 외 2015)를 통해 개략적인 면모가 밝혀져 있으며, 2018년과 2019년의 제4·5차 실험에서는 내경 80cm의 가마를 축조해 실험을 진행하였다. 이 실험은 울산쇠부리가마 복원실험의 예비실험에 해당되는 것으로, 개략적인 크기를 축소·설정하고 토철을 대신해 분광을 원료로 실험을 실시하였다. 실험을 통해 울산쇠부리가마에서 분광을 제련해 선철을 생산하는 것이 가능하다는 결과를 얻을 수 있었다.

구분	규모(cm)			플루터 (cm)	배재구 (cm)
	석축		가마		
현황	길이	1,500	210	730	—
	너비	430	160	150~175	—
	높이(깊이)	160	220	45	—
	벽체 두께		10	골구멍 한번 17	—
복원	길이	1,300	90	300	—
	너비	150	70	130	40
	높이(깊이)	150	250	70	60
	벽체 두께		40	골구멍 한번 15	—

〈표 1〉 울산 대안동 쇠부리터 가마의 제원

한편 2019년도 제5차 실험보고서에는 기존 두 번의 조업을 통해 선철을 생산하는 방식과 달리, 한 번의 조업에서 곧바로 선철을 생산할 수 있다는 가능성이 연구사 정리를 통해 제시한 바 있다(이남규

외 2019). 여기에서는 그 근거로 3가지 자료가 제시되었는데, 첫째는 폴란드 광산학교 출신 아너트(E. Ahnert)의 만주 여행 기록(1904년)에 의하면 당시 북한 회령 인근의 전거리에서는 석축이 설치되고 중앙부의 노가 석축보다 사람 키만큼 돌출된 구조에서 사철을 이용해 선철을 생산하였다. 둘째, 2019년도 울산 대안동 쇠부리터가 발굴되었는데, 동벽의 가마 벽체가 석축 상면보다 약 50cm 돌출되어 있다는 점이 확인되어 전거리 제철로와 같이 울산쇠부리가마도 석축보다 가마가 더 높게 돌출되었을 가능성이 있다. 셋째, 2018년도에 실시된 제4차 실험에서 높이 220cm의 가마에서 분광을 제련해 쇳물 24kg을 유출시키는 등 모두 61.9kg의 선철을 생산한 점이다. 이어 2020년도에는 이를 심화한 논고(김권일 2020)에서 2019년도의 울산쇠부리복원실험 결과 및 일본 타타라제철(たたら製鐵)과 가고시마(鹿兒島縣)지역 석조제철로(石造製鐵爐)와의 노 구조 및 조업방식의 차이점과 유사점이 비교 검토됨으로서 분광의 경우 고로 형태가 아니어도 선철의 생산이 가능하다는 점이 더욱 뚜렷하게 나타났다.

즉 울산쇠부리가마는 대안동 쇠부리터의 가마 및 북한 전거리 제철로와 같이 석축보다 가마가 더 높게 돌출된 높이 3~4m의 고로(高爐) 구조일 가능성이 확인되었으며, 설령 높이가 그렇게 높지 않은 220cm 내외 구조에서도 분광을 사용하면 선철의 생산이 가능하다는 점이 파악된 것이다.

이번 실험에서는 이러한 가능성을 근거로 석축보다 가마의 높이를 더 높게 설계한 점이 구조상의 특징이라 할 수 있다. 이에 다음과 같이 가마의 구조를 설계하였다. 가마는 석축과 벽체, 아궁이, 초롱구멍·잡쇠구멍, 송풍시설, 판장쇠바탕 등으로 구성하였으며, 규모는 최근 발굴조사된 울산 대안동 쇠부리터 가마를 1/2로 축소한 것으로 설정하였다. <표 1>에서 보는 바와 같이 대안동 가마는 내면 기준 길이 210cm, 너비 160cm, 잔존높이 220cm이지만, 이 크기를 그대로 적용할 경우 실험에 소요되는 비용과 시간, 인원이 과도하기 때문에 현재로서는 불가능하다. 따라서 절반 크기로 줄이는 것으로 결정하였으며, 이 외 구조와 관련된 다양한 부분은 기 발굴된 유적 및 연구성과를 반영하였다.

먼저 석축은 대안동 쇠부리터의 경우 15m에 달하지만 이번 실험에서는 규모를 축소하였고, 실험장 지붕구조물 역시 이를 다 포용할 수 있는 크기가 아니었다. 따라서 가마 좌·우 길이를 각각 565cm로 하였는데, 이는 가마 외경이 170cm이므로 석축 전체 길이는 13m가 되는 것이다. 대안동 가마 석축의 최대 너비는 중앙부가 430cm인데, 중앙부 앞부분이 함몰된 상황도 있고 실험장에서는 이를 그대로 구현해 내기 어려워 가마 바깥너비와 동일한 150cm로 하였다. 가장자리를 석재로 쌓고 내부에 잡석과 흙을 채워 넣는 것으로 설정하였으며, 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 가마가 들어설 자리에 굵은 모래-고운 모래+황토-목탄을 각각 10cm씩 깔아 30cm 두께로 조성하였다. 이러한 방습시설 상면에는 굵은 모래층을 5cm 두께로 깔아 가마 바닥을 조성하였으며, 골구멍(송풍구)에서 초롱구멍(출탕구)으로 갈수록 비스듬히 낮아지도록 설계하였다.

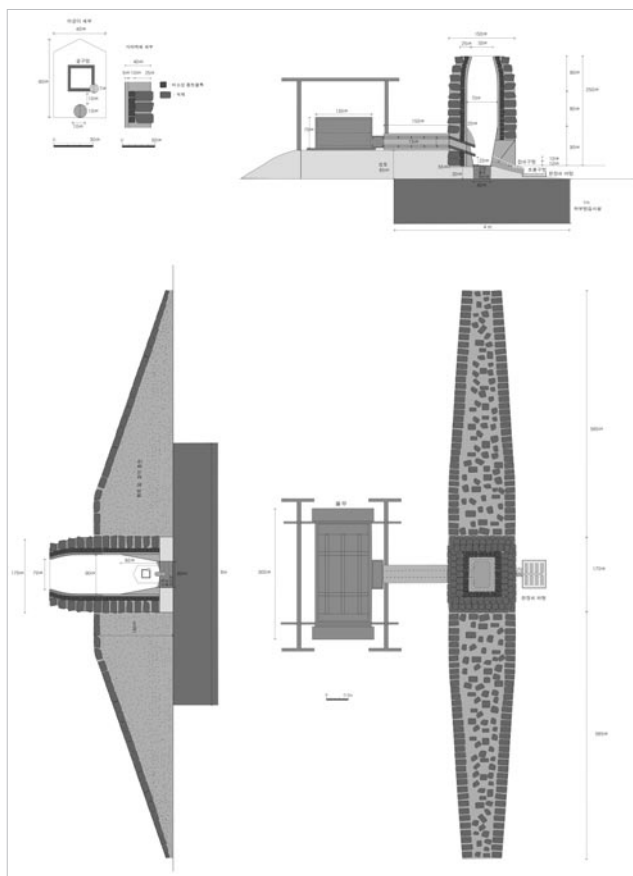
가마는 앞에서 밝힌 바와 같이 울산 대안동 쇠부리가마를 1/2 크기로 축소하는 것으로 설계하였는데, 1/2 크기는 길이와 너비가 각각 105cm, 80cm가 되지만 내벽 점토의 침식 20~30cm를 감안해 180×140cm로 상정하고 이를 1/2로 축소해 내벽의 길이 90cm, 너비 70cm로 복원·설계하였다. 좀 더

세부적으로 기술하면, 가마의 외면은 길이 170cm, 너비 150cm가 되고, 내면은 상부 길이 70cm, 너비 50cm, 중부 길이 90cm, 너비 70cm, 하부 길이 60cm, 너비 40cm가 되도록 하였다. 높이는 노 바닥에서부터 250cm가 되도록 하였는데, 더 높게 하자는 의견도 있었으나 2019년도 실험 결과 및 실험 리스크를 줄이기 위해 너무 높게 하지는 않았다.

가마의 형태는 평면 장방형이고, 단면은 내경을 기준으로 중부 80cm는 직립하며 상부는 80cm 지점에서 위로 올라갈수록 약간 좁아지도록, 하부는 90cm 지점에서 80° 각도로 밑으로 내려갈수록 좁아지도록 하였다. 가마 벽체의 두께는 위로 갈수록 좁아지는데, 하부 50cm, 중부 40cm, 상부 20cm 정도이다. 온도센서가 설치될 위치의 벽체는 얇게 조성하였는데, 벽체 조성 시 직경 10cm의 나무막대를 꽂았다가 제거 후 그곳에 센서를 설치하는 방법으로 하였다. 벽체의 구축은 석축 중앙에 30cm 크기의 석재와 점토를 층층이 쌓아 방(房) 모양으로 조성하고, 안쪽에 10×10×15cm 크기의 비소성 황토(+내화토) 블록을 쌓고, 내면에 내화점토를 5cm 두께로 미장하기로 하였다. 초롱구멍과 잡쇠구멍은 가마의 아궁이에 설치되는데, 아궁이는 가마 앞쪽에 높이 60cm, 너비 40cm의 오각형으로 조성하고 좌·우에 소성벽돌을 세운 뒤 상면에 불목돌³⁾을 설치하는 것으로 설계하였다.

아궁이의 두께는 벽체 상단에서 하단으로 갈수록 얇게 해 초롱구멍 부분은 10cm 이하가 되도록 하였으며, 반건조 점토를 이용해 아궁이를 설치하고 초롱구멍(출탕구)과 잡쇠구멍(배재구)을 설치하도록 하였다. 초롱구멍은 노상과 연결해 약 15°로 경사지게 설치하며 직경은 10cm가 되도록 해 판장 쇠바탕으로 연결해 쇠물을 출탕할 수 있도록 하였다. 잡쇠구멍은 초롱구멍 10cm 위, 2cm 우측에 직경 7cm 크기로 제작하는 것으로 설계하였으며, 노상에서는 20cm 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 이전·설치해 그대로 사용하는 것으로 계획하였다. 바람골은 나무판재나 판석으로 한 변 15cm 크기의 도랑모양 틀을 만들고 외면을 점토로 밀봉해 설치한 2019년도의 구조를 그대로 재현하



〈그림 1〉 가마 설계도

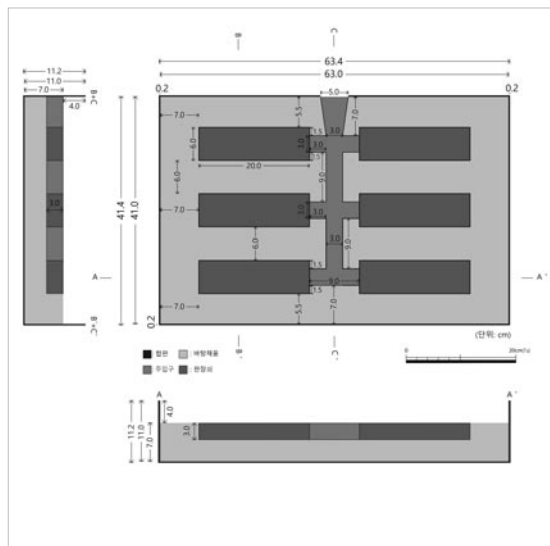
3) '불목돌'이란 울산쇠부리가마 배재구에 사용하던 가마의 아궁이돌로, 경주시 산내면 상목리에서만 생산되는 열에 잘 견디는 납작돌을 말한다(권병탁 2004, 65). 현대의 주택건축에서는 '이맛돌'이라고 하여 베트남산 현무암 등이 사용된다.

기로 하였다. 가마 벽체 관통부의 골구멍은 판석으로 한 변 15cm 크기 사각형 틀을 제작해 20° 각도로 설치하고 외면을 점토로 밀봉해 고온을 견딜 수 있도록 하였다. 풀무와 골구멍까지의 바람길 길이는 150cm로 해 송풍구의 개방이 용이하도록 하였다.

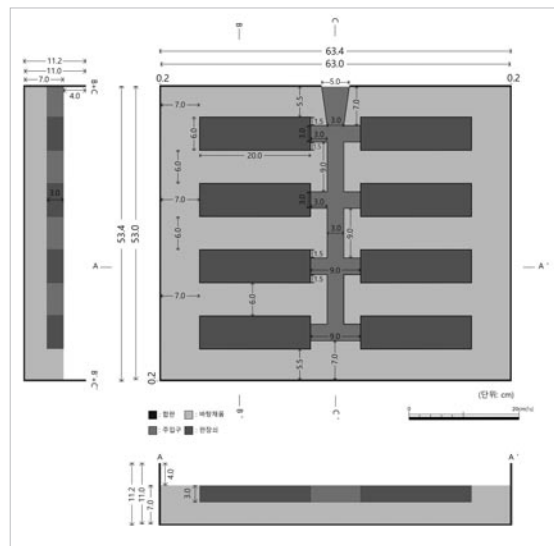
가마				석 축			
구 분		내용(cm)	비고	구 분	내용(cm)	비고	
평면형태		장방형	안쪽 모서리는 약간 둥글게	길이	전체	1130	가마 제외
단면형태		통형	상단 80cm부터 좁아짐		동쪽	565	
크기	내경	90×70			서쪽	565	
	외경	170		너비	150	방습시설 설치면 에서부터	
높이 (깊이)	전체	250	가마 바닥→상단, 내경/높이=1/3.57, 1/2.77	높이	방습시설	180	
	하부구조	30	가마 바닥 아래, 목탄-모래+황토-굵은 모래		가마바닥	150	가마바닥에서부터
	석축	150	가마 바닥에서 석축까지				
	상부	80	좁아지는 부분에서 상단까지				

〈표 2〉 실험로의 속성

판장쇠바탕은 2.83kg짜리 6매로 이루어진 판장쇠바탕 2본과 2.83kg짜리 8매로 이루어진 판장쇠바탕 1본을 제작하는 것으로 설계하였으며, 이에 따라 판장쇠의 크기는 길이 20cm, 너비 6cm, 높이 3cm가 된다[$20\text{cm} \times 6\text{cm} \times 3\text{cm} \times 7.87(\text{비중}) = 2.83\text{kg}$]. 판장쇠바탕은 2mm 두께의 철판으로 사방과 바닥을 짜고 주물사를 이용해 제작하며, 바닥에 공기구멍을 조성해 쇳물 주입 시의 가스가 빠져나갈 수 있게 한다. 이렇게 제작된 판장쇠바탕에 쇳물을 모두 주입한다면 생산할 수 있는 선철의 양은 56.60kg이 된다($16.98\text{kg} + 16.98\text{kg} + 22.64\text{kg} = 56.60\text{kg}$).



〈그림 2〉 판장쇠바탕-6매



〈그림 3〉 판장쇠바탕-8매

2. 실험매뉴얼

여러 차례의 회의를 거쳐 5차 실험과 동일하게 울산쇠부리가마에서 선철을 생산할 계획을 수립하였다. 원료는 4mm 이하 크기의 분광을 사용하며, 5차와 달리 분광은 배소를 해 분광 중에 함유되어 있는 아황산가스, 비소⁴⁾ 및 수분을 제거하여 온도 상승에 효과를 높이도록 하였다. 실험은 아래 <표 3>과 같이 실험매뉴얼을 작성하고 이에 따라 진행하도록 한다.

가마는 축조 시 이진 점토로 인해 수분을 다량 함유하고 있어 예열이 필요하므로 실험 전날 10월 9일 15:00 고유제를 지내고, 18:00에 점화를 해 실험 당일까지 예열하기로 한다. 10일 08:30 송풍을 시작으로 본격적으로 실험을 시작하며, 목탄은 대탄을 만장입한 상태로 평균온도 1,000℃ 이상을 1시간 이상 유지한 후 1,200℃ 이상 상승시킨다. 계획한 평균온도에 도달하면 광석 10kg, 조재제(소성 폐각+유출재) 2kg, 목탄 20kg을 장입하고, 이후 15분마다 같은 양으로 원료·조재제·연료를 장입한다. 목탄은 중탄 20kg-소탄 20kg-중탄 20kg-소탄 20kg-대탄 20kg의 순서를 한 세트로 장입하며, 다만 가마 내부 분위기 등 실험환경에 따라 크기를 조절한다. 조재제는 소성폐각과 유출재⁵⁾를 각 1kg씩 섞어 2kg을 매회 장입해 광석 내 불순물의 분리를 용이하도록 한다. 총 9시간 45분 동안 광석 400kg, 목탄 800kg, 조재제(폐각+유출재) 80kg을 투입하여, 원료/연료/조재제의 비율은 1.0/2.0/0.2로 한다.

송풍은 코로나19로 인한 인력 부족으로 발폴무의 풍량을 측정해 그와 유사한 풍량의 기계송풍을 한다. 설계된 가마의 구조와 실험매뉴얼에 따라 가마를 축조하고 실험을 진행한다. 실험 중 매뉴얼 변경이 불가피한 경우 연구원의 요청 및 책임연구원(이남규)의 승인에 의해 변경할 수 있도록 한다.

잡식구멍은 초롱구멍보다 10cm 정도 높게 설치하며, 잡식구멍을 통해 철재 및 선철의 형성이 확인되면 가마 바닥부의 초롱구멍을 통해 선철을 출탕한다. 가마 바닥에 용융선철이 형성되면 비중이 낮은 철재는 상부에 부유하게 되는데, 선철이 10cm 정도 형성되었을 시 송풍관으로 역류할 우려가 있기 때문에 이 때를 선철의 유출 시점으로 한다. 선철은 초롱구멍 앞에 만들어진 판장쇠바탕에 모아 굳힌 다음 수습하며, 16.98kg⁶⁾짜리 2회, 22.64kg짜리 1회 출탕한다.

모든 원료와 연료, 조재제의 투입이 종료된 이후 3시간 30분⁷⁾ 정도 송풍을 더하여 가마의 내용물을 모두 연소시키고, 가마 하부에 잔류하는 선철과 슬래그를 수습하는 것으로 한다.

실험기록은 원료·연료·조재제·온도 기록 담당자가 미리 표를 작성하여 실험 현장에서 기재하며, 실험 후 정리해 제출한다. 온도센서는 노 앞면 하부에 2개, 뒷면 중간부에 2개, 앞면과 뒷면 상부에 각 1개 등 모두 6개를 장착하고, 이동식온도계(1,600℃까지 측정 가능)는 1대를 사용한다. 그리고 실험기록의 정확성을 기하기 위해 기록자들이 공동으로 볼 수 있는 시계를 준비한다.

4) 비소는 달천광산의 광석에 함유되어 있는 미량원소로, 650℃에서 균열이 발생해 광석 중에서 제거된다. 달천광산은 현재 채굴이 진행되지 않는 관계로 본 실험에서는 정선 신예미광산 산을 사용하였다. 따라서 비소는 함유되어 있지 않다.

5) 유출재는 5차 복원 실험(2019년도 쇠부리 복원실험) 시 유출된 것을 파쇄해 사용하기로 하였다.

6) 판장쇠바탕은 2.83kg짜리 6매를 1분으로 제작하면 판장쇠의 중량은 16.98kg, 8매를 1분으로 제작하면 22.64kg이다.

7) 5차 실험 시 분광의 첫 장입 시간은 11:06분이었고, 1차 선철 출탕시간은 17:02분으로 분광 장입 후 약 6시간 정도 지난 시점에 출탕되었다. 마지막 분광 장입은 20:03이며, 마지막 출탕 시간은 23:31로 약 3시간 30분 정도 예열한 후였다. 따라서 마지막 분광은 장입 후 3시간 30분 정도 지나야 출탕이 가능한 것으로 추정된다.

날짜	시간	실험 내용	비고
2020년 10월 9일(금)	09:00~18:00	• 실험 준비	• 이남규 주관 준비사항 체크
	17:00~18:00	• 실험 최종 점검회의	
	15:00~15:30	• 고유제	
	18:00~18:30	• 점화, 노 예열	
2020년 10월 10일(토)	08:30~09:00	• 실험 준비사항 점검 및 목탄 만장입	
	10:00~24:00	• 원료 장입(분광 400kg) - 분광 총 400kg, 최초 목탄 만장입 및 평균온도 1,000℃ 1시간 이상 유지, 평균온도 1,250℃ 이상 상승시, 10:00에 10kg 장입(잔량 390kg), 이후 평균 15분 간격으로 매 10kg씩 39회에 걸쳐 19:45까지 390kg 장입, 9시간 45분동안 장입 예상. 원료는 나무삽으로 투입. • 목탄 장입 - 목탄 총 1,460kg, 분광 장입 전 하단~중단까지 대탄 장입, 상단은 소탄 장입, 약 660kg 만장(잔량 800kg), 분광 장입 후 10:10부터 평균 15분 간격으로 매 20kg씩 40회에 걸쳐 19:55까지 800kg 장입, 9시간 45분 동안 장입 예상. • 조재제 장입(소성패각+유출재편) - 광석 장입 후 10:05 최초 2kg 장입(잔량 78kg), 이후 15분 간격으로 매 2kg씩 39회에 걸쳐 19:50분까지 장입, 9시간 45분 동안 장입 예상 • 광석 장입 개시 후 9시간 55분 경과 후 목탄·광석·조재제(패각+유출제) 장입 종료	• 평균 1,250℃ 책임연구원 판단 하에 철광석 장입 개시. • 광석 장입 개시 후 철광석 / 목탄/ 조재제 비율을 1.0/2.0/0.2유지. • 노 상단에서 20cm 하강 후 장입, 장입 간격·무게 등은 변동되었지만 비율은 최대한 유지하도록 함.
2020년 10월 11일(일)	09:00~12:00	• 실험 결과물 확인 및 평가회의 - 분석시료 선정, 파생품 및 생산품 일부 - 사진촬영, 노트, 기록 정리 • 가마 - 적정기간 동안 전시 • 실험 성공 시 노 해체 및 배재구 개방은 필요하지 않음 - 노 내 변화 관찰 위해 필요 시 배재구 개방	• 10월 24일 - 생성물 수거 및 정리
	13:00~15:00	• 실험장 정리 및 해산(13:00~15:00)	

〈표 3〉 2020년 울산쇠부리 제철기술 복원실험(6차) 실험매뉴얼

3. 실험 준비과정

2020년 5월 31일(일요일) 실험 준비에 앞서 광석에 대한 예비 배소를 실시하였다. 길이 130cm, 너비 110cm, 깊이 22cm 수혈을 굴착한 후 바닥에 철판을 깔고 길이·너비 각 70cm의 정방형으로 넷돌을 둘러 다음 황토로 내벽을 미장하였다. 배소로 건조에는 중탄 25kg을 사용하였다.

분광 10kg씩 4회에 걸쳐서 1차 10:56, 2차 11:08, 3차 11:21, 4차 11:38까지 총 40kg을 장입하였다. 목탄은 중탄 총 45kg을 1차 5kg, 2~5차 10kg씩 4회 장입하였다. 13:15~14:30까지 분광 수습 및 채질을 하였다.



〈사진 1〉 예비 배소



〈사진 2〉 예비배소 분광 수습

1) 원료, 연료, 조재제 준비

(1) 원료

원료인 철광석은 정선 신예미광산에서 생산된 분광 1,100kg을 준비하였다. 철광석은 불순물이 많은 상태이기 때문에 먼저 선광을 통한 선별작업을 하였다. 선광은 2020년 9월 5일(토요일) 울산 북구청 임시주차장 동편에서 실시하였다. 선광시설은 길이 300cm, 너비 45cm, 높이 30cm의 부력선광기를 이용하였다.⁸⁾ 적정량의 철광석을 부력선광기에 담은 후 물을 강하게 분사하면서 삽과 호미 등으로 이동 및 뒤집으면서 골고루 세척하였다. 세척한 철광석은 수습 후 햇볕에 건조해 물기를 제거하였다. 세척한 철광석의 무게는 930kg이고 이렇게 세척된 철광석은 예비처리를 위한 배소공정을 진행하였다.



〈사진 3〉 철광석 세척



〈사진 4〉 세척된 철광석



〈사진 5〉 철광석 건조



〈사진 6〉 철광석 1차 선광



〈사진 7〉 철광석 2차 선광

8) 2016년도 1차 실험 준비과정에서 철광석 세척을 위해 부력선광기를 제작하였고, 이후 현재까지 실험에 계속 사용하고 있다.

철광석의 배소는 2020년 9월 12일(토요일) 실험장 앞에서 이루어졌는데, 길이 410cm, 너비 290cm, 깊이 40cm 크기의 구덩이를 파 배소로를 조성하였다. 수혈 굴착면을 정면한 후 굴광면 가장자리에 황토를 놓고, 그 위에 황토블록(길이 25cm, 너비 17cm, 높이 15cm)을 가로 방향으로 배치하였다. 황토를 반죽하여 벽면과 바닥에 차례로 발랐으며, 두께는 2cm 정도로 미장하였다.

황토로 정면된 수혈은 화목에 불을 붙여 건조시키고, 건조된 수혈 내부에 목탄(대탄)을 장입한 후 전력송풍기를 이용해 예열하였다. 이후 예열된 목탄 상부에 철광석을 골고루 장입해 배소를 진행하였다. 철광석은 930kg을 3등분해 투입하였고 화목 50kg, 목탄 255kg(대탄 17박스), 잡탄 620kg(28박스)이 장입되었다. 송풍기 바람이 닿는 곳의 온도는 850~930℃, 바람이 닿지 않는 곳은 700℃ 정도였다.

일주일 뒤인 9월 19일(토요일) 배소된 철광석을 수습하였다. 실험에 사용할 4mm 이하 크기로 분류하기 위해 4mm 채로 먼저 쳐서 걸러내었다. 그리고 풍구를 이용하여 철 함량이 낮고 너무 미세한 입자를 분리하였다. 이어 자력선광을 2회 실시한 후 마대자루에 10kg 단위로 담아 보관하였다. 선광을 거친 철광석은 470kg으로, 약 43%의 불순물을 제거하였다.



〈사진 8〉 배소로 축조



〈사진 9〉 배소로 건조



〈사진 10〉 철광석 배소



〈사진 11〉 배소 철광석 수습

구분	1차(2016. 05.13~15)	2차(2017. 05.12~14)	3차(2017. 10.20~22)	4차(2018. 05.11~13)	5차(2019. 05.10~12)	6차(2020. 09.26~27)
준비량(kg)	500	660	440(240/200)	400	382	470
장입량(kg)	460	425	170	300	380	310
광석 산지	양양산 자철광석	양양산 자철광석	정선 신예미광산	정선 신예미광산	정선 신예미광산	정선 신예미광산
크기	2~5cm 괴광	3cm 내외 괴광	3cm 내외 괴광, 1cm 이하 분광	4mm 이하 분광	4mm 이하 분광	4mm 이하 분광
배소 여부	○	○	○	×	×	○

〈표 4〉 울산 쇠부리 1~6차 복원실험 철광석

(2) 연료

연료인 목탄은 울주군 언양읍 하이 숲에서 참나무 백탄 2,100kg, 인도네시아산 망그로브(man-grove) 잡탄 1,600kg(160자루)을 구입하였다. 주문은 15cm 길이의 대탄 1,000kg(100박스), 10cm 길이의 중탄 500kg(50박스), 5cm 길이의 소탄 600kg(60박스)를 박스당 10kg 단위로 하였다. 2020년 10월 7일 배송된 목탄은 대탄의 크기가 너무 커서 손도끼와 칼 등을 이용해 절반 정도로 절단하였다. 절단된 목탄은 10kg 단위로 재포장한 후 크기별 대·중·소로 구분해 두었다.



〈사진 12〉 목탄 분류

(3) 첨가제

첨가제로는 조재제 및 유동제로 굴 껍질과 슬래그를 사용하였다. 굴 껍질은 거제도 중앙수산물로부터 총 130kg을 구입하였다. 굴 껍질에는 이물질이 많이 부착되어 있어서 칫솔과 물을 이용해 깨끗하게 세척한 다음 충분히 건조시켰다. 건조 후에는 소성작업을 진행하였다.

소성은 2020년 10월 8일(목요일) 실험장 앞에 설치된 배소로에서 실시하였다. 먼저 배소로에 목탄을 점화하였다. 배소로 위에 철망을 걸친 다음 일정량의 굴 껍질을 올려 소성하였다. 소성된 굴 껍질은 나무망치로 분쇄하였다. 분쇄된 굴 껍질은 2kg 단위로 지퍼팩 39개(78kg)에 담아 습기가 스며들지 않도록 보관하였다.

슬래그(철재)는 2019년 5차 실험에서 생성된 것을 2~5cm 크기로 파쇄해 2kg 단위로 지퍼팩 38개(76kg)에 담아두었다.



〈사진 13〉 패각 소성



〈사진 14〉 패각 파쇄

2) 가마 축조

가마의 축조는 구조복원 설계도에 따라 진행하였으며, 큰 변경 없이 설계도에 따른 축조가 이루어졌다. 가마는 높이 250cm, 외경 150×170cm, 내경 70×90cm, 평면형태는 장방형을 이루도록 하였다. 석축은 가마 외벽에서 좌우 각각 565cm 길이로 설계하였고, 가마를 포함한 석축의 전체길이는 1,300cm이다. 가마의 외벽은 바닥에서부터 상부 170cm까지 직선적으로 축조하였으며, 상부 80cm 지점부터는 안으로 좁아지게 하였다. 벽체의 두께는 하부 55cm, 중부 40cm, 상부 25cm이며, 외벽에서부터 석재 25cm→비소성 황토벽돌 10cm→황토 미장 5cm의 순으로 구성하였다. 가마의 내벽은 바닥에서 90cm 높이까지는 서서히 넓어지도록 하였으며, 바닥의 최종적인 내경은 40×60cm를 이루도록 하였다. 가마 축조는 4월 11일 석재 채취부터 9월 27일 보수에 이르기까지 5개월 15일간 진행하였다.

(1) 방습시설 및 바닥

새롭게 정비된 달천철장 실험장은 관람객의 이동로를 향해 약간 경사지게 성토되어 있다. 성토된 지면은 다져지지 않은 상태로 수혈을 굴착할 수 없을 정도로 무른 상태였다. 바닥이 다져진 높이까지 전면 제토한 후 가마를 축조하려고 했으나 이미 풀무 설치대의 높이가 정해진 상태였다. 따라서 가마와 석축이 축조될 너비를 따라 ‘┐’자 형태⁹⁾로 굴착하였고, 굴착된 바닥은 다시 다진 후 정지하였다. 가마가 들어설 자리의 중심을 잡고, 철제구조물 천장에 추를 설치해 가마가 축조되는 동안 가마의 중심을 맞추도록 하였다.



〈사진 15〉 가마터 굴착



〈사진 16〉 방습시설 최하단 축조



〈사진 17〉 골구멍과 방습시설 높이 측정



〈사진 18〉 최하단 축조 후 건조상태



〈사진 19〉 점토 깔기



〈사진 20〉 황토블록 올리기

9) 가마를 중심으로 풀무대가 설치될 경사면 뒤쪽은 깊게, 아궁이가 설치될 앞쪽은 얇게 해 단면상 비대칭 '┐'자 형태가 되도록 하였다.



〈사진 21〉 방습시설 축조 완료



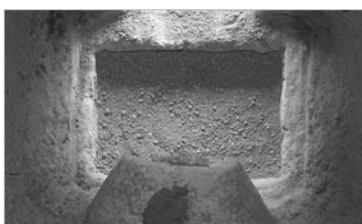
〈사진 22〉 방습시설 건조

방습시설의 축조는 정지된 지면에 황토물을 코팅해 점토의 접착이 용이하도록 한 다음 점토반죽¹⁰⁾을 한 겹 깔았다. 가마 벽체가 축조될 크기인 150×170cm 너비의 중앙부에 40×60cm 크기의 장방형 공간을 비우고, 점토반죽 위에 황토블록을 1단 쌓았으며¹¹⁾, 외곽에는 석축이 축조될 수 있도록 석재를 돌린 후 건조하였다. 이렇게 황토블록을 3단 정도 쌓아 가마 바닥이 조성될 높이까지 축조한 후, 점토반죽으로 피복해 수평을 맞추어 가마의 바닥을 정면하였다. 이렇게 방습시설을 축조하여 암반이 아닌 실험장의 단점을 극복하고자 하였다.

방습시설은 가마 벽체가 완성된 후 내벽을 미장하기 전 조성하였다. 하부에서부터 굽은 모래→고운 모래+황토→목탄을 각각 10cm 두께로 깔았다. 노의 바닥(爐床)은 굽은 모래를 초롱구멍 방향으로 낮아지는 경사를 주어 5cm 정도 두께로 깔았다.



〈사진 23〉 방습시설(굽은 모래)



〈사진 24〉 방습시설(모래+황토)



〈사진 25〉 방습시설(목탄)

(2) 가마 벽체

① 석재 채취

이번 복원 실험에서는 가마 벽체와 석축의 외벽을 석재로 축조하기 때문에 많은 양의 석재가 필요했고, 4월 11일과 5월 10일 2차에 걸쳐 울산 대안천에서 석재를 채취하였다. 석재는 30cm 정도 길이를 선별해 채취하였으며, 복원실험장에 적치하여 석재에 묻어 있는 수분을 건조시켰다. 가마 벽체와 석축 축조과정 중 석재가 부족하여 6월 28일, 7월 24일, 7월 26일 석재를 추가로 채취하였다.¹²⁾



〈사진 26〉 채취된 석재

10) 점토반죽은 황토/마사/모래를 5/5/1의 비율로 혼합하였다. 혼합된 점토는 물을 뿌린 후 3~4명이 발로 밟아 무르기를 조정된 후 하루정도 숙성시켜 사용하였다. 점토반죽은 가마 축조 전 과정 동안 4명의 인원이 지속적으로 작업하였다.

11) 황토블록의 축조방법은 점토반죽을 한 겹 깔 후 그 위에 블록을 올렸으며, 블록과 블록 사이의 빈 공간도 점토반죽으로 메워 충전하는 방식으로 쌓았다.

12) 석재의 채취는 관련법규 및 울산광역시 복구청의 행정절차를 따랐다.

② 황토블록 제작

가마 벽체의 내벽에는 비소성 황토블록을 쌓아 올리기로 하였다. 가마 벽체에 사용될 블록은 $15 \times 10 \times 10\text{cm}$ 의 크기로 600여개가 필요하였고, 가마 바닥 및 아궁이 주변 등에 사용될 블록은 $25 \times 17 \times 15\text{cm}$ 크기 80개 정도로 예측하였다. 6월 7일 황토 7톤, 마사 2톤, 모래 1톤을 구입해 울산쇠부리소리 보존회 연습장에 적치하였다. 몇 차례의 실험 과정을 통해 1주일 정도 숙성시킨 점토는 혼합된 성분의 결합력을 높이고 점성이 좋아 황토블록을 제작하기에 용이하다는 평가를 얻었다. 6월 8일 황토블록에 사용될 황토를 숙성시키는 작업을 시작하였다.

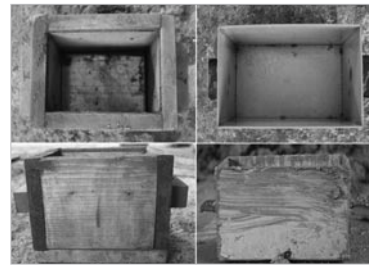
황토덩이는 황토:마사:모래를 5:4:1의 비율로 섞어 진행하였다. 1차 혼합된 황토덩이는 입자가 곱고 점성이 강해 블록의 형태를 유지하기에 적합하지 않았다. 따라서 마사의 비율을 높이기로 하였고, 2차부터는 황토:마사:모래의 비율을 5:5:1의 비율로 섞어 진행하였다. 황토덩이를 제작하는 동시에 황토블록을 찍어내기 위한 판재틀을 여러 개 제작하였다. 1주일 후 6월 13일과 14일 2일간 황토블록을 틀에 넣어 제작하였고, 소형 624개와 대형 80개를 제작해 그늘에 건조하였다.



〈사진 27〉 황토 구매



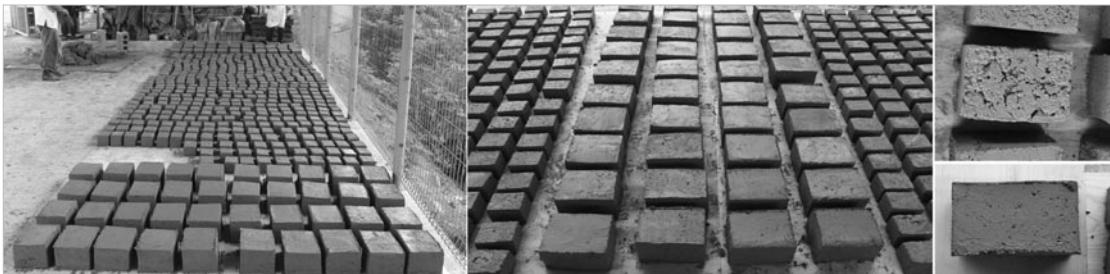
〈사진 28〉 황토덩이 제작 및 숙성



〈사진 29〉 황토블록 틀



〈사진 30〉 황토블록 제작과정



〈사진 31〉 황토블록 건조

③ 벽체 조성

벽체는 황토블록을 쌓아 형태를 만든 후 그 외면에 석재를 쌓아 외벽을 축조하였고, 내벽은 점토로 미장¹³⁾을 한 후 건조를 실시하였다. 가마의 내경은 하부 40×60cm, 중부 70×90cm, 상부 50×70cm이고, 벽체의 두께는 하부가 40~55cm, 중부 40cm, 상부 25cm이다. 가마 하부 90cm는 내벽이 바닥에서부터 110° 각도로 서서히 넓어지도록 설계하였다. 가마 바닥에서부터 대형 황토블록을 내어쌓기(계단상)로 3단 정도 쌓아 위로 갈수록 너비를 점점 넓혔고, 그 바깥으로 석재를 쌓았다. 석재는 사이사이에 점토를 넣어 접착제 및 충전제의 역할¹⁴⁾을 하였다.



〈사진 32〉 점토 깔기



〈사진 33〉 외면 석재 축조



〈사진 34〉 내면 황토블록 쌓기



〈사진 35〉 벽체 하부 내어쌓기 모습

가마의 중부는 80cm로 직립적이며, 벽체 두께는 40cm이다. 건조된 가마 하부 벽체에 점토를 한 겹 깔고 소형 황토블록을 올렸다. 그 외면에는 하부 축조방법과 동일하게 석재를 놓고 사이사이에 점토를 채우는 방법으로 축조하였으며, 하부와 중부는 170cm 높이까지 축조한 후 건조시켰다. 가마 상부(80cm)는 내경이 줄어드는 구조이며, 줄어드는 각도를 염두에 두고 축조하였다. 건조된 가마 벽에 소형 황토블록을 들어쌓기로 5단 쌓았다. 1단씩 쌓을 때마다 미리 설치한 추로 중심을 잡았고, 이를 이용하여 네 벽의 거리를 재어 대칭을 이루도록 하였다. 가마 벽의 두께가 상부로 갈수록 점점 얇아지

13) 가마벽의 두께는 중부를 기준으로 40cm이다. 외벽에서부터 석재(25cm)→황토블록(10cm)→미장(5cm)의 순서로 설계하였다. 하부 90cm는 그 내면에 점토로 미장하여 경사지게 하였고, 상부 80cm 지점부터는 가마벽의 두께가 점점 얇아지면서 가마 내경이 줄어든다. 가마벽의 축조방법은 동일하나 석재의 길이를 조절하는 방법으로 축조하였다.

14) 석재의 축조 방법은 점토반죽을 1겹 깔고 석재를 놓아 점토반죽에 눌러 고정시켰으며, 석재와 석재 사이는 점토를 채워 빈 공간을 충전하였다. 석재와 석재 사이의 공간이 클 경우에는 작은 돌을 끼워 넣기도 하였다.

는 것을 고려하여 석재는 길이가 짧은 것을 골라 쌓아올렸다. 완성된 가마 상단은 점토로 마감하였고, 숯 15kg을 사용해 건조시켰다.



〈사진 36〉 중부 황토블록 쌓기



〈사진 37〉 중부 석재 쌓기



〈사진 38〉 중부 벽체 완성 후 건조



〈사진 39〉 상부 좁아지는 내경 측정



〈사진 40〉 상부 내면 황토블록 쌓기



〈사진 41〉 외면 석재 쌓기

가마 내벽의 미장은 3차례 실시하였다. 7월 24일 가마 상부까지 벽체 축조를 완료한 후 내벽 전면을 얇게 미장하여 숯 30kg을 사용해 건조하였다. 7월 25~26일은 건조된 가마 내벽의 굴곡면과 탈락된 부분 등을 보수하면서 다시 한 번 전면 미장하였으며, 굴구멍 주변에는 보강점토를 바른 후 건조하였다. 8월 2일 건조된 가마벽의 일부가 탈락되어 보수를 실시하였다. 이 후 틈틈이 가마 건조를 실시하였고, 9월 27일 가마 건조를 진행하는 과정에서 굴구멍을 피복한 하단 점토와 가마벽의 점토 일부가 열에 의해 녹아내리거나 탈락하는 현상이 확인되었다. 이에 아궁이를 뜯어내고 굴구멍을 다시 피복하였고, 뜯어진 가마벽 역시 다시 미장해 보수를 완료하였다. 실험 전일까지 가마벽의 갈라진 곳은 틈틈이 보수를 진행하였고, 가마의 건조도 실시하였다.



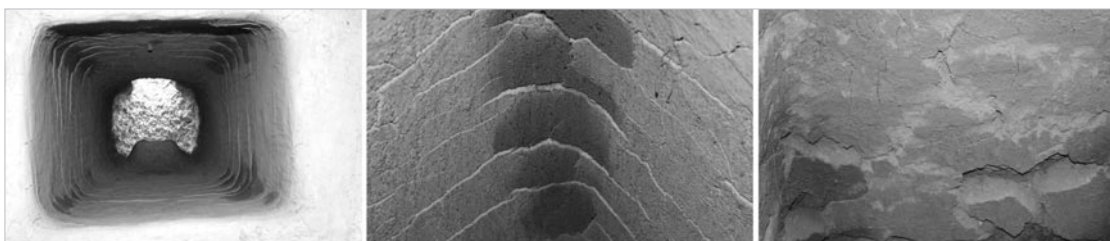
〈사진 42〉 장입구 점토 미장



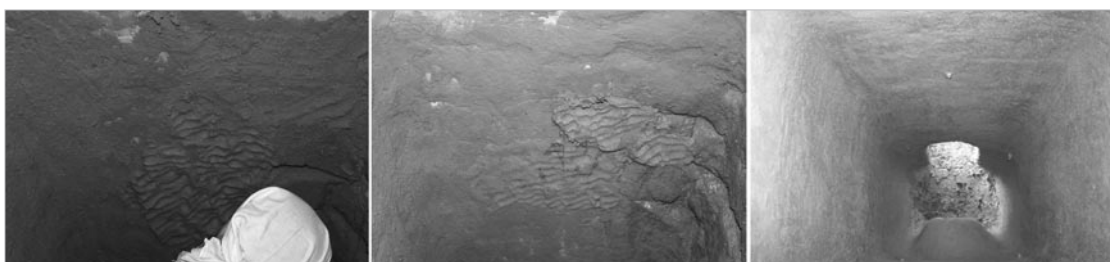
〈사진 43〉 완성된 벽체



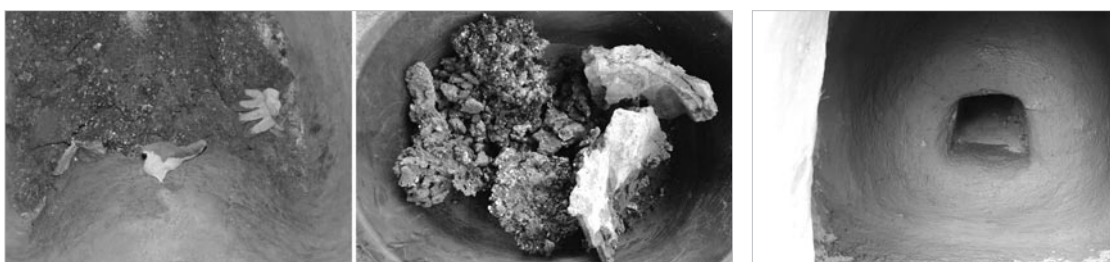
〈사진 44〉 가마 내벽 1차 미장 모습



〈사진 45〉 가마 내벽 1차 미장 후 건조 상태



〈사진 46〉 가마 내벽 2차 미장



〈사진 47〉 골구멍 주변 벽체 탈락 현상



〈사진 48〉 골구멍 보수

(3) 석축

방습시설을 조성함과 동시에 가마벽과 연접한 일정 범위까지 석축의 축조를 진행하였다. 석축의 높이는 지면에서 150cm 정도로 설계하였으나, 가마가 축조될 부분이 30cm 정도 더 굴착되어 방습시설이 설치됨에 따라 석축 역시 30cm 더 깊게 축조되었고, 최종적으로 석축의 최대높이는 180cm가 되었다. 석축의 너비는 가마벽과 접한 부분이 150cm이고, 가마 벽과 멀어질수록 좁아져 최종 88cm이다.

먼저 석축이 축조될 부분을 실과 각목으로 구획하였으며, 가마벽과 덧붙여 외벽 최하단석이 축조될 부분에 얇은 수혈을 굴착하였다. 가마벽 축조와 동일한 방법으로 정지된 바닥에 황톳물을 칠한 후 외면으로 면맞춤해 석재를 놓고, 그 상부에 점토반죽을 충진하였으며 다시 석재를 올리는 방식으로 외벽 1열을 쌓았다. 이후 내부에 소형 잡석이 혼입된 점토를 채워 넣은 후 물을 뿌리고 나무망치 등으로 쳐서 다지는 작업을 반복하였다. 석축의 최상단은 점토를 덮어 피복을 하였다. 완성된 석축의 규격은 가마를 기준으로 좌·우 길이 565cm, 경사도는 약 23°이다.



〈사진 49〉 내면 점토 다지기



〈사진 50〉 외면 석렬 쌓기



〈사진 51〉 내면 물 뿌리기



〈사진 52〉 외면 석재 놓은 모습



〈사진 53〉 축조 과정



〈사진 54〉 완성된 석축 외면



〈사진 55〉 석축 내면 축조 과정



〈사진 56〉 완성된 가마 모습

(4) 골구멍

가마 하부 벽체를 축조하면서 골구멍을 동시에 설치하였다. 가마 뒤쪽 골구멍이 설치된 공간은 판재로 만들어진 방형의 골구멍 틀을 놓은 후 그 외곽으로 납작한 판석을 쌓아 골구멍을 설치하였다. 골구멍은 가마 바닥에서 20cm 높이, 벽에서 20° 각도로 가마 내벽에서부터 20cm 안쪽까지 돌출되도록 설치한 후, 돌출부 주변은 점토를 두껍게 발라 배가 부른 형상이 되도록 하였다. 가마를 건조시키는 동안 골구멍 외형 틀은 연소되어 사라지고 석재로 쌓은 골구멍만 남았다.



〈사진 57〉 골구멍 설치



〈사진 58〉 골구멍 목재를 설치



〈사진 59〉 목재를 주변 판석 설치(1)



〈사진 60〉 목재를 주변 판석 설치(2)



〈사진 61〉 앞에서 본 골구멍



〈사진 62〉 상부에서 본 골구멍

(5) 아궁이 및 초롱구멍과 잡쇠구멍

가마의 앞쪽 아궁이는 가마 바닥에서부터 높이 60cm, 너비 40cm로 하였으며, 소형 황토블록과 석재를 상부로 갈수록 좁게 들여쌓기해 아치형이 되도록 축조하였다. 가마가 축조되는 동안은 작업 동선을 유지하기 위해 계속 비워두었고, 가마벽 축조와 내부 미장이 완료된 8월 2일 점토로 막음하였다. 아궁이의 두께는 상부에서 하부로 갈수록 얇아지게 미장하였으며, 상부는 40cm, 하부는 10cm가 되도록 하였다.

초롱구멍과 잡쇠구멍은 아궁이를 미장한 후 아궁이의 하단에 설치하였다. 초롱구멍은 쇳물이 출탕되는 구멍으로, 가마 바닥 중앙에 직경 10cm의 원형 구멍을 뚫었다. 쇳물의 출탕이 용이하도록 가마 바닥에서 15° 경사지도록 하여 판장쇠바탕과 연결하였다. 잡쇠구멍은 초롱구멍의 우측 10cm, 상부 10cm 정도 떨어진 위치에 설치하였으며, 크기는 직경 7cm로 역시 경사가 지도록 설치하였다. 잡쇠구멍과 연결되는 아궁이 바깥쪽은 선철과 철재가 섞이지 않도록 판장쇠바탕이 설치되는 구덩이의 오른쪽으로 돌려서 구(溝)를 형성하였다.



〈사진 63〉 아궁이 설치



〈사진 64〉 아궁이 앞면 점토 막음



〈사진 65〉 초롱구멍



〈사진 66〉 초롱구멍과 잡쇠구멍

3) 판장쇠바탕

판장쇠바탕은 생산된 선철의 규격을 일정하게 하고 운반을 용이하도록 한다. 당초 계획안은 2.83kg 짜리 6매로 이루어진 판장쇠바탕 2본과 2.83kg짜리 8매로 이루어진 판장쇠바탕 1본을 제작하고자 하였다. 바탕 틀은 2mm 두께의 철판으로 사방과 바닥을 짜고 주물사를 이용해 바탕을 만든 후 흙으로 그 안을 채우는 형태로 계획하였으며, 이를 바탕으로 작성된 판장쇠바탕 모식도는 〈그림 2, 3〉과 같다.

당시 현장 상황이 주물을 이용해 바탕 틀을 제작하기 어려워 외곽틀이 되는 2mm 철판은 나무 재질로 변경하였으며 바닥은 따로 제작하지 않았다. 나무 틀 내부에 채워 넣은 판장쇠바탕 재료는 가는 모래 4, 황토 1.5, 숯가루 1의 비율로 혼합해 제작하였다. 내면에 바탕 재료를 1/2 정도 채워 넣은 후 목형 판장쇠틀을 찍고 바탕재료를 채워 높이를 맞췄다. 이어 목형 판장쇠틀을 분리한 후 변형되지 않도록 굳히고 쪼을 태운 재로 건조하였다. 마지막으로 판장쇠바탕과 선철의 분리를 용이하게 하기 위해 표면을 황토가루→목탄가루→황토가루 순으로 도포하였다. 위와 같은 방법으로 2.38kg짜리 8매로 이루어진 판장쇠바탕을 3회에 걸쳐 제작하였다 〈사진 67〉.



〈사진 67〉 판장쇠바탕 제작 과정

2020

울산쇠부리
복원사업
연구보고서
SOEBURI

IV

실험 내용

1. 실험 과정
2. 실험 결과



IV. 실험 내용

1. 실험과정

1) 준비 점검

10월 9일 업무분장 계획에 따라 업무를 나누어 맡았으며, 원활한 실험 진행을 위해 준비상황들을 점검하였다. 실험 진행에 필요한 물품 및 재료들은 실험장 배치도에 맞게 위치시켰다. 가마의 석축 좌측에는 광석과 조재제, 우측에는 목탄을 준비해 놓았다. 가마의 우측 앞쪽에는 실험기록과 온도 측정을 위한 기록대를 배치하였고, 가마 앞쪽 이동선 맞은 편에는 전시공간을 마련하였다. 원료는 4mm 크기 분광 470kg을 10kg 단위로 47자루, 그 외 분광가루 200kg은 10kg 단위로 20자루를 준비하였고, 조재제는 패각과 슬래그 각 1kg씩 40자루를 준비하였고, 목탄은 대탄 1,000kg, 중탄 500kg, 소탄 600kg을 10kg 박스로 나누어 준비하였다. 풀무와 바람구멍, 바람구멍과 골구멍을 연결하여 송풍상황을 점검하였고 온도센서를 설치하였다. 아궁이에는 초롱구멍과 잡쇠구멍 외에 가마 내부의 상황을 관찰하기 위해



〈사진 68〉 준비상황 점검회의



〈사진 69〉 목탄 준비

초롱구멍 상부에 관찰공을 새롭게 뚫었다.

15:00 구충당 이의립 동상 및 실험장 앞에서 실험의 성공과 무사기원을 위한 고유제를 지냈다. 17:00 실험 목적에 대한 이남규 공동단장의 설명을 듣고, 각자 맡은 업무의 대장들과 업무에 대한 진행회의를 하였다. 18:00 점화식을 하였으며, 10일 본 실험까지 가마 온도를 일정하게 유지시키기 위한 예열이 계속 이루어졌다.



〈사진 70〉 조재제 준비

2) 점화 및 예열

10일 08:00 실험을 시작하였다. 가마는 전날부터 계속 예열하였으며, 06:30 대탄 100kg을 더 장입하여 예열 상태를 유지하였다. 그 영향으로 초롱구멍과 잡쇠구멍은 마사토 등 황토에 혼입되어 있던 성분이 녹아 유리질화되어 입구를 막고 있어 이를 제거하고 복구 작업을 하였다. 08:00 본격적인 실험을 시작하였다. 08:00~08:30까지 대탄을 10kg씩 대나무 바구니에 담아서 170kg을 만장입하였다. 10:50까지 대탄 100kg을 더 장입하였으며, 이후 11:00까지 소탄 20kg을 더 장입하였다. 가마의 예열을 위하여 목탄은 대탄 370kg, 소탄 20kg을 사용하였다. 송풍은 09:10부터 기계송풍을 시작하였으며, 빠른 온도상승을 위하여 여단이를 사용하지 않고 계속 송풍하였다. 10:00부터는 평균온도 1,000℃까지 상승하였으며, 10:40부터 하부온도 평균 1,200℃ 이상을 계속 유지해 분광을 장입하기로 결정하였다.



〈사진 71〉 관찰공



〈사진 72〉 바람구멍 연결



〈사진 73〉 온도계 연결



〈사진 74〉 고유제 상황(1)



〈사진 75〉 고유제 상황(2)



〈사진 76〉 목탄 만장입



〈사진 77〉 장입구 불꽃 상황

3) 원료·연료·첨가제의 장입

분광은 11:10에 10kg을 첫 장입하였다. 이후 14:39 1차 선철이 출탕될 때까지 평균 13.6분 간격으로 16회 160kg을 장입하였다. 2차 선철의 출탕은 분광 100kg을 더 장입한 후 출탕하기로 결정하였다. 그러나 배출된 슬래그에서 선철이 확인되어 분광 50kg을 장입한 상태로 2차 선철(15:30)을 출탕하였다. 이후 평균 18분 간격으로 분광을 장입하였다. 16:20부터는 온도가 조금씩 하강하기 시작하였고, 온도가 상승한 후 분광을 장입할 예정으로 온도를 계속 주시하였다. 1시간 20분이 경과한 17:58부터 분광을 다시 장입하였고, 3차 선철이 출탕되기 전 19:00까지 약 15분 간격으로 10회 100kg을 장입하여 분광 장입을 완료하였다. 분광은 나무삽에 10kg씩 담아 31회 총 310kg을 장입하였다. 장입시간은 총 7시간 50분이며, 평균 장입 간격은 15.16분이다.



〈사진 78〉 광석 장입



〈사진 79〉 조재제 장입

목탄은 예열을 위해 대탄 370kg과 소탄 20kg을 만장입하였다. 목탄 크기의 장입 비율은 중탄 4, 소탄 4, 대탄 2로 계획하여, 중탄 20kg→소탄 20kg→중탄 20kg→소탄 20kg→대탄 20kg 장입을 한 세트였으나, 조재제인 패각의 파쇄상태가 너무 미세하여 장입 시 비산(飛散)될 우려가 있었고, 또한 장입된 분광 상부에 접촉되는 외부의 찬 공기를 차단하기 위해 소탄 10kg+중탄 10kg을 혼합하여 4회 장입 후 대탄 20kg을 1회 장입하는 것으로 목탄의 장입 순서를 변경하였다. 첫 분광 장입 5분 후인 11:15부터 위와 같은 순서대로 목탄을 장입하였다. 14:36 원활한 선철 출탕(1차)을 위한 온도 상승이 필요하여 중탄+소탄 대신 대탄만 20kg을 2회 장입하였다. 이후 16:40까지 장입 순서대로 계속 장입하였으며, 16:20부터 하강하기 시작한 온도를 상승시키기 위해 16:56부터는 대탄 위주로 20kg씩 나

누어 연속 장입하기로 결정하였다. 대탄을 원래 계획보다 40kg 더 장입하였고, 소탄과 중탄은 장입량을 조절하기로 하였으나 온도 상승을 위하여 대탄만 연속 장입하였다. 마지막 분광 장입 후 2시간 정도 더 연소시켜 일정기간 온도를 계속 유지한 후 분광을 완전히 용융시켜 출탕하는 계획을 설정하였다. 따라서 분광장입을 완료한 19:00부터 대탄 100kg을 더 장입하여 20:20 마지막 목탄을 장입하였다. 목탄의 장입시간은 06:30부터 20:20까지 총 13시간 50분이다. 장입된 목탄의 양은 총 1,150kg, 이 중 만장입에 390kg, 분광 장입 후 660kg, 분광 장입 종료 후 100kg을 장입하였다. 최종적인 목탄 장입량은 대탄 770kg, 중탄 180kg, 소탄 200kg이 되었으며, 그 비율은 3.85/0.9/1(67%/16%/17%)이다.

조재제는 소성패각 1kg과 5차 실험 시 유출된 슬래그 1kg을 파쇄하여 패각과 슬래그를 혼합해 분광 장입 5분 후 2kg을 장입하는 것으로 계획하였다. 하지만 소성패각은 계획했던 것보다 파쇄가 잘게 이루어져 가루상태가 되었고, 슬래그는 계획보다 입자가 굵게 파쇄되었다. 입자 차이가 커서 2가지 조재제를 혼합해 장입하기에는 무리가 있었다. 따라서 슬래그 2kg과 패각 2kg을 번갈아가며 장입하는 것으로 변경하였다. 슬래그의 첫 장입은 첫 분광 장입 2분 후인 11:12에 2kg을 먼저 장입하였고, 패각은 11:25 두 번째 분광 장입 후 2kg을 첫 장입하였다. 16:00까지 위의 순서대로 슬래그 2kg 11회 22kg, 패각 2kg 11회 22kg을 장입하였다. 이 후 점검회의(16:07) 시 장입한 분광의 양에 비해 슬래그가 과도하게 형성되어 있어 골구멍으로 역류하는 현상이 확인되었다. 또한 선철이 슬래그층을 뚫고 하강해야 초롱구멍으로 출탕될 수 있는데, 슬래그층이 너무 두터워 선철이 하강하지 못하는 것으로 판단하였다. 따라서 조재제의 양을 조절하기로 결정하였고, 슬래그의 장입을 중단하고 패각만 장입하였다. 패각은 18:44 마지막 장입을 완료하였다. 조재제는 11:12 첫 장입부터 18:44까지 7시간 32분 동안 2kg씩 26회 52kg을 장입하였다. 조재제 중 슬래그는 11회 22kg, 패각은 15회 30kg을 장입하였다.



〈사진 80〉 초롱구멍 뚫기



〈사진 81〉 잡쇠구멍 뚫기

4) 송풍 및 온도 변화

실험의 송풍은 09:10 시작하였다. 목탄이 가마의 2/3 지점까지 장입된 시점부터 송풍을 시작하였으며, 여닫이를 사용하지 않고 계속 송풍하여 온도를 상승시켰다. 10:00 이후 온도가 1,000℃ 이상 상승하자 풀무의 여닫이를 사용하여 발풀무와 같은 용량과 속도로 송풍을 시작하였다.¹⁵⁾ 마지막 슬래그 배출 전인 20:27까지 송풍을 지속하였으며, 송풍시간은 총 11시간 17분이다.

15) 여닫이는 풀무의 송풍을 재현하기 위해 기계풀무에 장치한 것으로, 1인이 발풀무의 날숨과 비슷한 속도로 손으로 밀어 여닫이를 조절하였다.

골구멍은 12:48, 15:11, 16:24, 17:08, 18:44의 5차례에 걸쳐 이상 여부를 확인하였는데, 주로 송풍이 원활하지 못할 때이다. 12:48과 15:11 입구를 막고 있던 목탄을 쇠파스로 뚫었으며, 16:24 슬래그를 제거하였다. 17:08 온도가 계속 하강하게 됨으로 잡쇠구멍을 먼저 뚫고 이어 골구멍의 막힌 부분을 뚫어 송풍을 원활하게 하였다. 18:44 가마 내부에 슬래그 양이 많아져 슬래그가 골구멍으로 역류하는 현상이 발생하고, 장입구의 불꽃이 약하게 되었다. 골구멍을 확인하여 슬래그를 제거하였고, 이후 실험이 완료되는 시점까지 골구멍의 상태는 양호하였다.



〈사진 82〉 골구멍 상태 확인



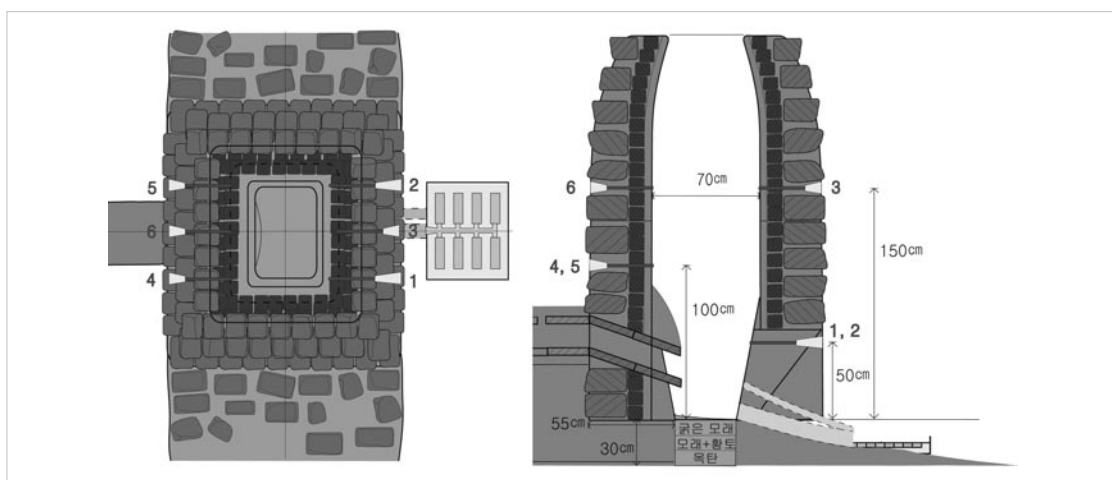
〈사진 83〉 골구멍 상태(16:24)



〈사진 84〉 골구멍 상태(18:50)

온도계는 본체 및 6개의 센서로 구성하였으며, 노상을 기준으로 상·중·하로 구분하였다. 상부는 노상으로부터 150cm, 중부는 100cm, 하부는 50cm 높이로 하였으며, 상부는 아궁이가 위치하는 앞벽 중앙과 송풍구가 위치하는 뒷벽 중앙에 각 1개씩 설치하였다. 중부는 송풍구를 중심으로 좌·우 벽에 각 1개씩, 하부는 아궁이를 중심으로 좌·우 각 1개씩 위치하며, 설치된 온도센서의 위치는 〈그림 4〉, 〈사진 85, 86〉과 같다.

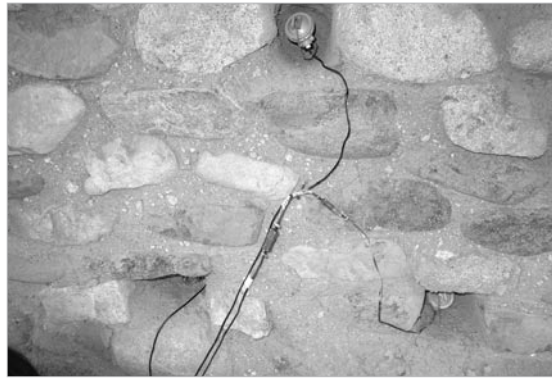
온도센서가 설치될 지점의 벽체 조성 시 직경 10cm의 막대기를 꽂았다가 벽체 조성 완료 후 제거하고 그 위치에 가마 내부로 10cm 정도 삽입하였다. 가마 내부는 원활한 실험을 위해 실험 하루 전날부터 계속 예열을 하였다. 온도센서 설치가 완료된 09:20부터 실험 종료 시간인 20:57까지 5분 간격으로 온도를 기록하여 총 11시간 동안 가마 내부의 온도 변화를 확인하였다. 온도 변화는 〈표 5〉의 그래프와 같다.



〈그림 4〉 온도센서 설치 위치(좌-평면도, 우-단면도)



〈사진 85〉 온도센서 설치 사진(가마 앞쪽)



〈사진 86〉 온도센서 설치 사진(가마 뒤쪽)

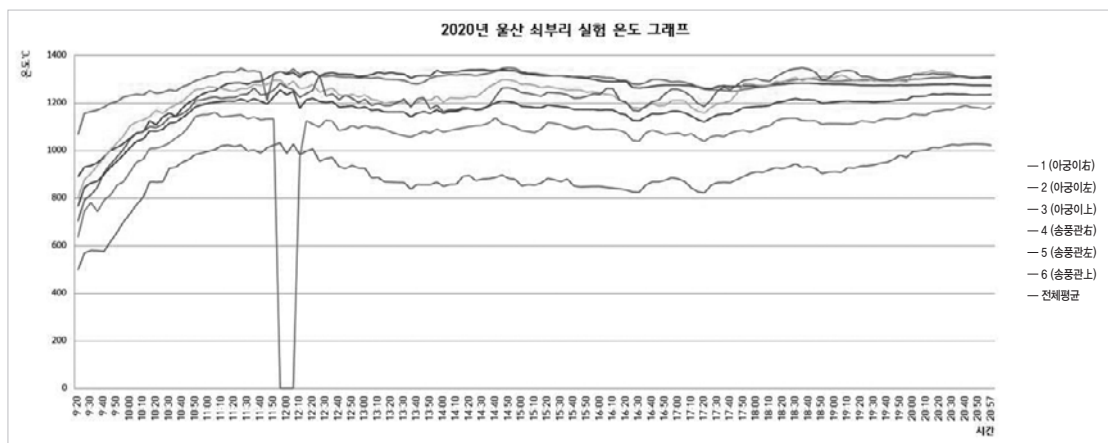
송풍을 시작한 지 약 50분 뒤인 10:00에 평균 온도 1,014℃로 1,000℃에 도달하였고, 이 시점으로부터 약 1시간 후인 11:10에 분광을 장입하였다. 장입 당시 평균 온도는 1,200℃였다. 11:10 분광 장입 후 온도가 지속적으로 상승하였으며, 30분이 지난 11:50 아궁이 좌·우의 1번과 2번 온도계는 각각 1,323℃, 1,324℃를 기록하였다. 11:55 출탕구 중앙 상부에 설치한 3번 온도센서가 작동하지 않아 12:05까지 교체 작업을 진행하였다.

분광 장입 시점부터 12:40까지 1시간 30분 정도 온도가 지속적으로 상승하여 평균온도가 1,200℃ 이상을 기록하였지만, 이후 계속해서 1,200℃ 아래로 떨어지는 현상이 확인되었다. 온도를 높이기 위해 14:36, 14:47 연속으로 대탄 20kg씩을 장입하였다. 평균온도가 일시적으로 1,200℃ 이상으로 상승했으나, 가마 상부 온도가 1,000℃ 아래로 계속 떨어져 큰 상승 폭은 보이지 않았다. 대탄의 연속 장입에도 불구하고 온도가 지속적으로 떨어지는 현상이 발생하였으며, 1,300℃ 이상을 기록하던 하부의 1번, 2번 센서도 1,200℃대를 기록하였다. 16:56부터 온도를 높이기 위해 대탄만 장입하였다. 이후 18:15를 기준으로 온도센서 분리 시점인 20:57까지 약 2시간 40분 정도 전체 평균 온도 1,200℃ 이상을 계속 유지하였으며, 가마 중·하부 평균온도 1,300℃, 가마 상부 평균 온도가 1,000℃ 이상으로 올라가는 현상을 보였다.

이번 실험에서의 온도 계측이 이루어진 시간은 총 11시간 50분으로, 전체 평균 온도는 1,165℃이며, 가마 하부와 중부의 평균 온도는 1,253℃, 상부는 991℃로 계측되었다. 하부와 상부의 평균 온도 차이는 약 300℃의 차이를 보였다. 실험 중 계측된 최고 온도는 1,348℃로 가마 하부의 송풍관 좌측에 설치한 5번 온도계이며, 최저 온도는 가마 상부 중앙에 위치한 6번 온도계로 570℃도를 기록하였다.

상부(3번·6번) 전체 평균 온도는 991℃, 중부(4번·5번) 전체 평균 온도는 1,228℃, 하부(1번·2번) 전체 평균 온도는 1,278℃로, 하부의 평균 온도가 가장 높았고 중부와는 크게 차이 나지 않지만 상부와는 300℃ 이상의 차이가 확인되어 가마 내 열기의 흐름이 원활하지 않았던 것으로 판단되었다.

선철 생산이라는 동일한 목표를 가진 실험이었던 2019년 5차 실험과 온도 변화를 비교하였을 때 평균온도는 100℃ 낮아졌을 뿐 큰 변화가 확인되지 않았다.



〈표 5〉 온도센서별 온도 변화

5) 출탕

(1) 1차 출탕

12:44 관찰구멍으로 쇳물이 형성되고 있는 것을 확인하고 13:34 잡쇠구멍을 뚫었다. 쇳물과 함께 섞여서 1차 슬래그가 배출되었다. 슬래그가 많아서 관찰구멍과 골구멍 등으로 역류할 수 있으므로 계속해서 배출시켰다. 슬래그는 점성이 높은 녹색계열로, 산성 슬래그에 가까우므로 철의 분리가 아직 많이 진행되지 않은 것으로 판단되었다. 14:25 잡쇠구멍으로 슬래그를 배출하였다. 선철이 많이 포함되어 있는 것을 확인하고 출탕 준비를 하였다. 14:39 초롱구멍을 뚫자 판장쇠바탕 위로 쇳물이 가마 내부의 압력에 의해 순식간에 빠져나왔다.



〈사진 87〉 1차 슬래그 배출



〈사진 88〉 1차 선철 출탕

(2) 2차 출탕

1차 출탕은 분광 160kg 장입 무렵에 이루어졌다. 2차 출탕은 240~250kg 장입 시점에 진행하는 것으로 계획하였다. 15:30 2차 슬래그 배출을 위하여 잡쇠구멍을 뚫기 시작하자 골구멍 쪽으로 슬래그가 역류하였다. 15:43 잡쇠구멍으로 염기성 슬래그가 배출되며 선철이 함께 나왔다.

15:45 2차 출탕을 준비하였다. 초롱구멍이 잘 뚫리지 않았으며, 15:54 가마 내부의 압력이 너무 강하였다. 15:54 슬래그와 함께 선철이 배출되었는데, 슬래그의 양이 너무 많았다. 첨가제로 슬래그를

장입하였기 때문에 그 양이 증가한 것으로 판단되었다. 슬래그와 함께 선철을 초롱구멍 쪽으로 모두 배출하였다. 이때까지 분광은 210kg를 장입하였다.



〈사진 89〉 2차 슬래그 배출



〈사진 90〉 2차 선철 출탕

(3) 3차 출탕

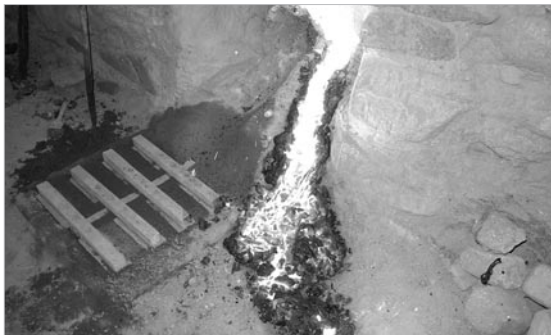
16:07 점검회의를 실시하였다. 슬래그는 염기성이 좋으나 그 양이 너무 많다는 지적이 있었다. 이에 가마 내부 슬래그를 모두 배출시킨 다음 파쇄 슬래그(철재) 장입은 하지 않기로 결정하였다. 16:19 슬래그가 골구멍과 아궁이를 모두 막고 있었다. 16:53 점도가 낮은 슬래그 배출이 이루어졌다. 잡쇠구멍이 잘 뚫리지 않아 대탄을 장입하여 온도를 높이려고 하였다.

17:17 잡쇠구멍 쪽으로 선철이 길게 빠져 나왔고, 17:45 슬래그가 배출(3차)되었다. 19:02 유동성이 좋아진 슬래그가 배출되기 시작(4차)하였다. 판장쇠바탕을 건조해 두었다. 19:12 3차 출탕을 준비하였으며, 19:17 판장쇠바탕 위로 넘치면서 선철이 출탕되었다. 분광은 이때까지 총 310kg을 장입하였다.

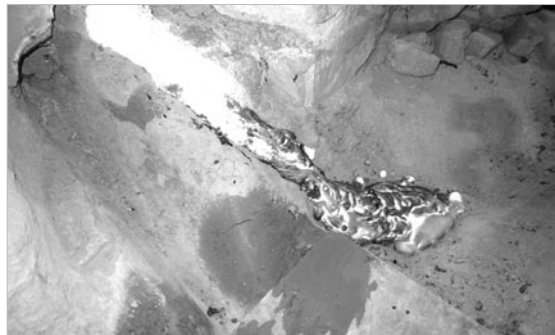
(4) 4차 출탕

19:37 점검회의를 실시하였다. 목탄(대탄)만 100kg 정도를 추가 장입하기로 결정하였다. 19:41 3차 출탕된 선철을 이동시켰다. 20:21 잡쇠구멍을 뚫었다. 20:27 슬래그 배출이 시작되었다, 슬래그의 염기성이 좋은 것으로 보아 가마 내부 환경도 좋을 것으로 판단되었다. 20:32 슬래그가 완전하게 배출되지 않아 잡쇠구멍을 계속 뚫었다. 20:34 다시 슬래그 배출이 시작되었다.

20:35 마지막 출탕을 준비하였다. 20:37 골구멍을 완전 개방하였다. 초롱구멍이 뚫리지 않아 계속해서 쇠창에 망치질을 가하였다. 20:52 마지막 출탕이 이루어졌다.



〈사진 91〉 3차 슬래그 배출



〈사진 92〉 4차 슬래그 배출



〈사진 93〉 3차 선철 출탕



〈사진 94〉 5차 슬래그 배출



〈사진 95〉 4차 선철 출탕

차수	시간	중량(kg)	비고
1차	13:34	11.2	
2차	15:30	43.55	
3차	17:45	28.45	
4차	19:02	13.8	
5차	20:27	8.05	
기타	—	26.1	출탕구, 골구멍 등
총량		131.15	

〈표 6〉 슬래그 배출

차수	시간	중량(kg)	비고
1차	14:39	11.25 (10.6/0.75)	시료 0.25, 판장쇠바탕
2차	15:54	9.45 (8.5/0.95)	판장쇠바탕
3차	19:17	27.1 (26.75/0.3)	판장쇠바탕
4차	20:52	8.65	
기타	—	15.81	아궁이, 출탕구 주변
총량		72.25	

※ 기타사항 : 선철은 10월 11일 59.75kg으로 계속되었으나, 11월 15일 2차 정리 중 슬래그 등에 포함되어 있던 선철 12.5kg 이 추가되어 최종 72.25kg으로 정리됨

〈표 7〉 선철 출탕

6) 실험 종료

10일 진행된 실험은 20:52 4차 선철 출탕 후 주변을 정리하고 온도센서를 회수하는 것으로 실험을 종료하였다. 가마 내부에는 20:20 마지막 장입한 목탄이 하부로 하강하여 계속 연소되고 있었다. 초롱구멍과 잡쇠구멍, 골구멍을 열어 둔 상태로 목탄을 자연 연소시키기로 하였다. 다음 날인 11일 09:00 가마 내부에는 목탄이 계속 연소 중이었고 열기가 높은 상태였다. 아궁이는 형태를 온전히 유지하고 있었고, 초롱구멍과 잡쇠구멍은 출



〈사진 96〉 실험 종료 후 초롱구멍과 잡쇠구멍

탕을 위해 조금씩 확장된 상태였으며, 확장 시 열기 차단을 위해 덮어두었던 흙도 남아 있었다. 아궁이 전면을 개방하여 가마 내부의 결과물을 밖으로 배출하기로 하였다. 쇠창과 망치 등을 이용하여 아궁이를 개방하였다. 그러나 아궁이 내부에는 가마 하부의 벽체 일부가 용융되어 흘러 내려 목탄과 엉킨 상태로 아궁이를 막고 있었고, 쇠창이 들어가지 않을 정도로 경도가 높았다. 완전 연소되지 않은 목탄과 입구를 막고 있는 벽체 등으로 인해 가마 내부의 생성물을 배출하기에는 무리가 있었다. 또한 가마 내부에 형성된 선철은 이미 출탕을 완료하였으며, 내부에는 목탄과 슬래그만 잔존할 것으로 판단하였다. 따라서 목탄이 완전히 연소되고 열기가 식은 후 내부의 생성물을 배출시키기로 하였다.

11월 13일 가마 내부 생성물을 배출하였다. 생성물은 골구멍 가까이, 가마의 중앙부에 집중되어 있었다. 생성물의 두께가 얇은 벽체 쪽을 뚫어 생성물을 가마 하부로 떨어뜨린 후 밖으로 배출시켰다. 가마 밖으로 배출된 생성물은 목탄과 슬래그 등으로 분류하였다.



〈사진 97〉 아궁이 절개 후 모습



〈사진 98〉 내부 생성물 배출 후 모습

2. 실험 결과

1) 생산품

2020년 10월 10일 진행된 실험에 대한 결과물은 다음날인 11일과 약 한달 후인 11월 15일 2회에 걸쳐 정리 및 관찰하였다.

선철의 출탕시간은 10월 10일 분광 첫 장입 후 3시간 29분이 지난 14:39 1차 출탕을 시작으로 6시간 13분 동안 총 4차례 출탕하였으며, 슬래그는 분광 첫 장입 후 2시간 24분이 지난 13:34 1차 배출을 시작으로 6시간 53분 동안 5차례 배출하였다.

생산품을 정리한 결과, 선철은 72.25kg이고 슬래그는 131.15kg이다. 이 모두에 대해 사진촬영 및 무게를 기록하였으며, 출탕된 차수별로 구분해 보관하였다.

1~3차에 출탕된 선철은 판장쇠바탕에 받아 냉각시켰으며, 4차 선철은 아궁이 앞에 설치된 용덩이에 받아 굳혔다. 1~4차 출탕된 선철은 차수별로 사진과 무게를 기록하여 〈표 8~12〉와 같이 정리하였고, 그 외 슬래그와 함께 출탕되었다가 분리되거나 판장쇠바탕에서 이탈하여 출탕된 선철들을 모아 〈표 13〉과 같이 정리하였다.

차수		시간	중량(kg; 판장쇠/기타)	비고
1차		14:39	11.25(10.6/0.75)	시료 0.25
2차		15:54	9.45(8.5/0.95)	
3차		19:17	27.1(26.75/0.3)	
4차		20:52	8.65	
기타	A	15:30	4.2	잡쇠구멍 출탕
	B	16:50	0.6	초롱구멍 출탕
	C	17:17	3.55	잡쇠구멍 출탕
	D		5.0	슬래그 정리과정 시 수습
	E		2.45	노상 생성물 해체 시 수습
총 중량			72.25(45.85/26.4)	

〈표 8〉 선철 출탕 현황

출탕시간	중량(kg)	특징	사진
14:39	11.25 (판장쇠:10.5 기타:0.75)	• 시료 0.25kg 채취 • 판장쇠 전체 : 길이 49.0cm, 너비 35.0cm, 두께 11~31mm(평균 16.5mm) • 출탕로 : 길이 32.5cm, 너비 5.0cm • 판장쇠바탕에 받은 생산품, 초롱구멍에서 빠르게 출탕되어 판장쇠 7개를 채우고, 출탕로까지 연결되어 굳은 상태, 앞면에는 중복 출탕되어 굳은 흔적 확인, 뒷면 모래가 부분 부착됨	 〈앞면〉  〈뒷면〉

〈표 9〉 1차 출탕

출탕시간	중량(kg)	특징	사진
15:54	9.45 (판장쇠:8.5 기타:0.95)	• 판장쇠 : 길이 32.5cm, 너비 45cm • 선철과 슬래그 혼합 출탕, 선철 상부에 슬래그가 얹혀 진 상태로 출탕 후 분리함, 느린 속도로 출탕, 출탕구와 가까운 판장쇠 2개를 채우고, 다음 판장쇠의 1/2 정도 채움	 〈앞면〉  〈뒷면〉

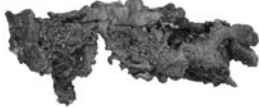
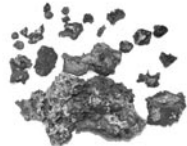
〈표 10〉 2차 출탕

출탕시간	중량(kg)	특징	사진
19:17	27.1 (판장쇠:26.75, 기타:0.35)	• 판장쇠 : 길이 52.8cm, 너비 51.0cm, 두께 26~47mm(평균 34.9mm) • 2차 출탕 이후 분광 100kg 더 장입 후 출탕 • 빠른 속도로 흘러 판장쇠바탕을 채우고 흘러넘침	 〈앞면〉  〈뒷면〉

〈표 11〉 3차 출탕

출탕시간	중량(kg)	특징	사진
20:56	8.65	• 평면형태 'U' 자형 선철괴 : 길이 39.0cm, 너비 27.0cm • 판장쇠바탕이 아닌 아궁이 앞 구덩이에 받아 굳힘, 선철 상부로 슬래그 유출, 유출 선철 소량	

〈표 12〉 4차 출탕

명칭	출탕시간	중량(kg)	특징	사진	
A	15:30	4.2	2차 슬래그와 함께 출탕 후 분리, 가는 실 형태		
B	16:50	0.6	초롱구멍 확인하는 과정에서 출탕 길이 18.2cm, 너비 4.5cm		
C	17:17	3.55	3차 슬래그 유출 시도 시, 잡쇠구멍을 통해 슬래그 대신 출탕됨		
D	13:34	5.0	1차 슬래그와 함께 출탕 후 분리, 가는 실 형태 및 구상 선철 확인	실 형태	
				구상	
	20:27		6차 슬래그와 함께 출탕되어 분리, 짧은 봉상으로 확인		
E	노상 생성물 해체 시 수습		스펀지상 괴련철과 방울 형태의 선철이 혼재된 상태, 괴련철에서 선철로 이행하는 단계		

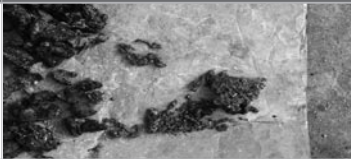
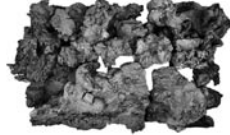
〈표 13〉 기타

2) 슬래그

슬래그는 모두 유리질로, 대체로 유동성이 높게 유출되었으나 일부 그렇지 않아 서로 엉켜있는 것도 확인되었다. 색조는 대체로 암청색(썩색)을 띠는 염기성 슬래그이며, 기포가 많이 확인되지 않아 슬래그 속에 철성분이 적게 함유된 것으로 추정된다. 1차 유출 슬래그에는 상부에 구슬모양의 선철이 없었으나 2차 유출 슬래그에는 작은 방울형태로 확인되었다. 3~5차 슬래그 역시 작은 구슬형태의 선철이 슬래그 속에 침투되어 있다. 6차는 가벼운 슬래그로, 밀도가 높은 데는 떠 있고 낮은 데는 가라앉은 형태로 확인된다. 그 현황을 정리하면 〈표 14〉 및 〈표 15〉과 같다.

차수	시간	중량(kg)	비고
1차	13:34	11.2	
2차	15:30	43.55	
3차	17:45	28.45	
4차	19:02	13.8	
5차	20:27	8.05	
기타		26.1	출탕구, 골구멍 등
총량		131.15	

〈표 14〉 슬래그 현황표

차수	유출시간	중량(kg)	사진	
			유출 시	정리 후
1차	13:34	11.2		
2차	15:30	43.55		
				
				
3차	17:45	28.45		
				
4차	19:02	13.8		
				

차수	유출시간	중량(kg)	사진	
			유출 시	정리 후
5차	20:27	8.05		
기타		26.1	1차 출탕 슬래그 	4차 출탕 슬래그 

〈표 15〉 슬래그

3) 가마의 변화

가마는 동·서 양쪽 석축과 벽체에서 큰 구조적 변화나 열의 방출 등이 관찰되지는 않았다. 그러나 가마 상단부에서 금이 가는 현상이 확인되었다. 실험 당일인 10월 10일 09:24 가마 북벽 중앙부와 동벽, 서벽 및 상단부 표면에 균열이 발생하였다. 12:13 가마 상단부 보수작업을 실시하였다. 12:26 가마 북·동·서벽의 균열부 보수작업을 진행하였다.



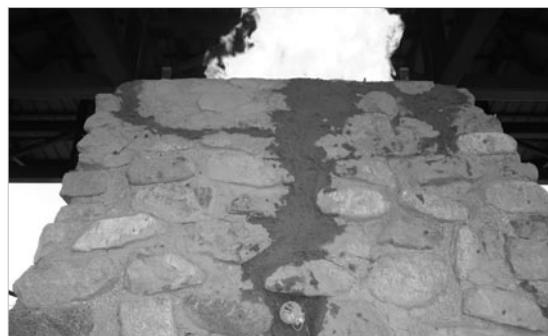
〈사진 99〉 가마 상단부 보수

실험 종료 후 가마 외면 남벽 상단부가 동쪽 좌측 벽을 따라 길이 70cm, 너비 2cm로 갈라져 있었다. 동벽은 상단 중앙에서 북쪽 바닥 모서리 쪽으로 비스듬하게 갈라졌으며, 서벽과 남벽은 모서리 부분에서 균열이 확인되었다. 가마 내부는 상단 벽면에서 60cm 정도 깊이까지 검은색으로 변색되었으나 벽면이 크게 훼손되지는 않았다.

실험이 종료된 후 11월 15일(일요일) 실험장에서 생산품 및 부산물에 대한 정리작업이 이루어졌다. 가마 아궁이는 실험 종료 직후와 같이 개방된 상태였으며, 이를 더 넓게 개방하여 내부에 남아 있는 생성물을 모두 꺼냈다. 여기에서는 선철 등 철괴는 거의 포함되어 있지 않았으며, 불완전 연소된 목탄과 슬래그, 그리고 배출과정에서 탈락된 가마 벽체가 대부분을 차지한다.



〈사진 100〉 북벽 균열(10:25)



〈사진 101〉 북벽 보수 후(12:47)



〈사진 102〉 실험 종료 후 가마 외벽



〈사진 103〉 실험 종료 후 가마 내벽

가마 내 생성물은 중앙부 송풍관 쪽으로 치우쳐 확인되었는데, 골구멍 주변의 보강점토는 고온에 녹아 골구멍 조성에 사용된 석재에 일부 부착되었다. 생성물은 가마 하부의 노상으로 사용된 모래 상면에 형성되었으며, 이를 가마 밖으로 배출시켜 그 현상을 관찰하였다. 당초 위치 및 형태에 따라 크게 세 가지로 구분할 수 있다.

첫째, 골구멍 쪽 바닥 생성물은 길이 43cm, 너비 29cm, 두께 25cm의 크기이며, 노상으로 사용된 모래바닥에 형성되어 바닥이 둥근 형태를 띤다. 바닥 부분에는 선철이 일부 형성되어 있으며, 골구멍 조성에 사용된 석재편이 부착되어 있고 골구멍으로 역류한 슬래그층이 확인되었다. 먼저 형성된 선철이 아궁이 쪽으로 이동하여 형성된 것으로 보이며, 송풍구 쪽의 온도가 높아 일어난 반응으로 추정된다.



〈사진 104〉 내부 생성물

둘째, 아궁이 쪽 생성물은 길이 33cm, 너비 26cm, 두께 19cm의 크기로, 역시 노상으로 사용된 모래층에 형성되어 둥근 바닥을 이룬다. 노상의 모래가 고온 및 철성분과의 반응에 의해 응결되어 실리콘 카바이드상¹⁶⁾을 형성하고 있다. 단면상에서 층위가 나누어짐을 관찰할 수 있는데, 가장 상층에는 두께 2.0cm의 흑회색 선철층이 형성되었으며 일부 목탄덩어리가 확인되고 자력이 강하다. 그 아래 두께 1.6cm는 흑색 슬래그층이며, 다음 두께 2cm는 고온에 의해 목탄과 슬래그가 혼합되어 있는 층이다. 마지막 두께 11cm는 선철 방울이 형성되어 있다.¹⁷⁾

셋째, 길이 18cm, 너비 11cm, 두께 4.5cm의 생성물은 아래쪽 일부에 모래가 부착되었는데, 선철 풀(pool)은 형성되지 않았던 것으로 보인다. 부분적으로 선철 방울이 확인되며, 상부에는 목탄이 잔존한다. 슬래그는 형성되지 않았으며, 골구멍 쪽의 측면에서 생성된 것으로 추정된다.

유출된 가마 벽체편을 관찰한 결과, 벽체 중위의 경우 외벽에서부터 4cm 미장 후 다시 3cm를 추가 미장한 흔적이 확인되었으며, 내벽에는 용융된 슬래그가 부착되었다. 바닥과 연결되는 하부 벽체의 경우 외측에서부터 2.2cm→2.2cm→2.5cm→2.5cm의 네 개 층위가 확인되었다.

16) 실리콘카바이드는 노상(爐床)에 사용된 모래가 상부에서부터의 고온 및 선철의 영향에 의해 팽창된 것으로, 장입된 목탄과 반응하여 SiC를 형성한 것이다. 강도가 매우 높다.

17) 고온 반응대에서는 탄소의 팽창과 수축이 심해 저탄소 선철에 고탄소 목탄이 침투하여 용점의 하강이 일어나는 과정에서 선철이 물방울 형태를 이루게 된다.



〈사진 105〉 골구멍쪽 벽체 단면



〈사진 106〉 중앙부 바닥 단면

가마 내 생성물을 모두 배출시킨 후 가마 내부를 관찰하였다. 먼저 골구멍의 상태는 양호하였으며, 가마벽 중·하부 상위의 내벽은 미장한 부분이 5~10cm 박리되었다. 하부는 잔존한 벽체 두께 40cm 정도로, 미장한 부분은 대부분 탈락 혹은 박리되었다.



〈사진 107〉 앞쪽 벽체



〈사진 108〉 우측 벽체 하부



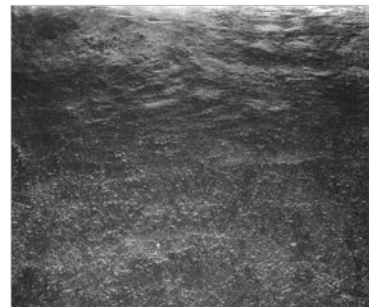
〈사진 109〉 우측 벽체 상부



〈사진 110〉 뒷쪽 벽체 하부



〈사진 111〉 좌측 벽체 하부



〈사진 112〉 좌측 벽체 상부

아궁이를 중심으로 앞·뒤·좌·우의 네 개 영역으로 구분해 가마 벽체 내부를 관찰한 결과, 앞벽은 노상에서부터 132cm 높이까지(잔존 118cm), 뒷벽은 132cm 높이까지(잔존 118cm), 좌벽은 140cm 높이까지(잔존 110cm), 우벽은 125cm 높이까지(잔존 125cm) 내벽 미장부가 용융·탈락되었다. 네 곳 모두 미장 점토가 탈락되어 그 내부의 비소성 황토블록이 노출되었으며, 네 모서리 부분의 미장은 일부 잔존하였다. 용융·탈락된 부분의 상위는 회청색으로 경화되었으며, 상단에서부터 56cm 아래까지는 요철면 없이 매끈한 잔존상태를 보여준다. 그 아래 57cm 이하는 콩알 크기 정도의 철광석 가루가 부착되어 있다.

한편 골구멍의 아래쪽은 가로 23cm, 세로 25cm가 잔존하였으며, 내부 생성물 배출 후 노상 부분의 탈락된 부분은 좌·우 98cm, 전·후 63cm 크기이다.

2020

울산쇠부리
복원사업
연구보고서
SOEBURI

V

고찰

1. 실험 결과의 고찰
2. 금속학적 분석결과의 고찰



V. 고찰

1. 실험 결과의 고찰

1) 준비과정의 고찰

(1) 석축 및 쇠부리가마

이번 실험에 사용된 쇠부리가마의 석축 규모는 가마 좌·우 길이 각 565cm, 최대높이 180cm이며, 가마 길이(외경)를 포함하면 전체 13m가 된다. 울산 대안동 쇠부리터 가마의 석축은 길이 15m, 최대폭 430cm, 최대높이 150cm인데, 실험로가 축소된 크기임을 감안하면 비교적 적절한 규모로 생각된다. 다만 대부분의 울산 쇠부리가마는 노가 위치한 중앙부의 폭이 가장 넓은데, 실험로에서는 이를 적절히 구현해 내지 못했다는 한계가 있다. 이는 아궁이 및 바람골의 구조와 연관된 문제이기 때문에 향후 추가적인 검토가 필요하다.



〈사진 113〉 울산 대안동 쇠부리터의 석축(좌)과 실험로의 석축(우)

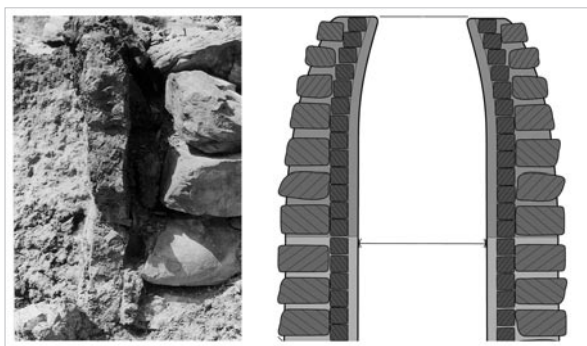
가마의 앞·뒤 가장자리에 쌓은 석축의 경우, 유적에서의 가마 석축은 흙이 거의 없이 석재만을 쌓은 구조이지만 <사진 115의 좌>, 실험로 석축은 석재 사이에 점토가 상당히 많이 사용되었다 <사진 115의 우>. 향후 추가적인 축조 계획이 생긴다면 이러한 세부적인 면도 적절히 반영되어야 할 것이다. 또한 석축 내부를 조성함에 있어서도 황토를 물에 이겨 채움으로서 <사진 114>, 실험 과정 중 가마 벽체를 통해 내부의 열을 빼앗아 갈 수 있다는 걱정거리가 되었다. 유적에서는 가장자리를 석재로 쌓고 내부는 흙과 잡석을 채운다는 점이 확인되었을 뿐 내부에 물을 뿌려 이겼다는 증거가 없다. 내부의 밀도를 높여 붕괴 방지에 도움이 될 수도 있겠으나, 굳이 그럴 필요가 있는지는 다시 한 번 검토해 볼 문제이다.

가마는 울산 대안동 쇠부리가마를 1/2 크기로 축소한 구조로 설계해, 안쪽 너비의 최대치가 각각 90cm, 70cm의 평면 장방형이고 높이는 250cm이다. 중부는 직립하고 상부는 80cm 지점에서부터, 하부는 90cm 지점에서부터 안으로 좁아지도록 하였다.

가마의 축조는 대체로 설계한 대로 이루어졌다. 다만 너비 10cm의 비소성 황토블록을 제작해 쌓아 올리면서 그 바깥에 석재를 쌓아 올린 다음 내면을 5cm 두께로 미장하듯 발라 벽체를 축조했는데, 이는 대부분의 울산 쇠부리가마가 먼저 석재를 쌓아 방 모양을 만든 다음 그 내면에 점토를 10cm 정도 두께로 미장해 조성한 것과는 다른 구조이다. 이는 석재가 노 내부의 열을 흡수해 온도를 낮출 수 있다는 우려 때문이었는데, 이에 대한 판단은 차치하고서라도 유적에서의 현상을 제대로 구현하지 못한 것만은 분명하다. 이에 대해서는 지금까지 실시된 다양한 제철복원실험 결과를 검토해 최종적인 판단을 해야 할 필요가 있다.



<사진 114> 석축 내부 조성과정



<사진 115> 울산 방리 1호 제련로 벽체(좌)와 실험로(우)

(2) 판장쇠바탕

판장쇠바탕은 2019년도 제5차 실험에서 처음 사용되었으며, 규격화된 선철 소재를 생산하는 울산 쇠부리가마의 성격과 관련해 상당히 중요한 부분이라고 할 수 있다. 판장쇠바탕은 앞에서 기술한 바와 같이 당초 2.83kg짜리 6매로 이루어진 판장쇠바탕 2본(16.98kg)과 2.83kg짜리 8매로 이루어진 판장쇠바탕 1본(22.64kg)을 제작을 제작하기로 하였으며, 판장쇠 1매의 크기는 길이 20cm, 너비 6cm, 두께 3cm이다. 또한 2mm 두께의 철판으로 사방과 바닥을 짜고 바닥에 공기구멍을 조성하여 내부는 주물사를 이용해 제작하는 것으로 설계하였다.

하지만 제작 담당이 명확하지 못했고 정보 공유에 약간의 문제가 있는 등 현장 여건상 철판으로 제작하는 것이 어려워지게 되었다. 이에 틀의 소재를 목재로 변경하였으며, 바닥판은 조성하지 않는 것

으로 변경하였다. 바탕의 내부는 가는 모래 4, 황토 1.5, 숯가루 1의 비율로 혼합해 제작하였으며, 조성이 완료된 후 목재 판장쇠를 분리해 실험 준비를 마무리하였다.

당초 설계한 바와 같이 이동식 판장쇠바탕을 제작할 경우 실험 중 쇳물을 유출시킬 때에만 바탕을 이동·설치하면 되는데, 이번과 같이 판장쇠바탕의 이동이 불가능한 경우, 아궁이를 통한 온도 관리 및 유출재의 배출 등에 심각한 문제가 발생할 수 있다. 이처럼 설계와 다른 판장쇠바탕의 구조는 실험결과를 떠나 매뉴얼을 그대로 따르지 않았다는 점에 대해서는 우리 연구단이 반성해야 할 중요한 문제로 생각된다.

(3) 원료·연료 첨가제

원료는 당초 계획과 같이 정선 신예미광산에서 생산된 분광 1,100kg을 준비하였다. 계획에 따라 흐르는 물을 이용한 부력선광→자연 건조→배소로에서의 건조(700~930℃)→채질을 통한 4mm 이하 선광→풍구를 이용한 미광 제거의 과정을 거쳤으며, 이러한 작업 결과 당초 1,100kg의 광석은 470kg가 되어 약 43%의 회수율을 나타냈다. 울산 쇄부리가마가 운용되던 조선후기에 이러한 과정을 거쳤는지는 정확히 알 수 없지만, 세철지(洗鐵池)가 있었다는 구충당문집의 내용이나 울산광업소(1965~1966년) 당시에 물을 이용한 선광작업이 있었으므로 물을 이용한 세광(洗鑛) 및 선광은 필수조건으로 판단된다.

토철을 배소했는지에 대해서는 파악하기 어려운데, 현대의 금속공학 이론 및 제련공학으로는 전처리과정에 해당되는 배소작업이 반드시 필요하다는 의견이 있는 반면, 토철을 배소했다는 근거가 어디에도 없고 형태가 비슷한 사철의 경우도 배소하지 않는다는 사실에 비추어 배소가 필요하지 않다는 의견도 있다. 한편 4mm 이하의 광석을 얻기 위한 채질은 토철에서는 필요하지 않은 작업이고, 미광의 제거가 있었는지는 알 수 없지만 필요하다면 키클을 이용한 작업은 가능했을 것이다. 이상과 같이 원료 토철을 구할 수 없는 현재의 사정상 이러한 준비작업은 반드시 필요한 부분이고, 세부적인 의문이나 문제점에 대해서는 향후 추가적인 실험을 통한 검증이 필요하다.

연료인 목탄은 울산지역 생산품을 이용하자는 의견에 따라 울주 언양 하이참숲에서 참나무 백탄 2,100kg, 인도네시아산 망그로브(mangrove) 잡탄 1,600kg(160자루)을 구매하였다. 당초 대·중·소로 구분해 각각 길이 15cm·10cm·5cm로 주문하였으나 대탄의 경우 크기가 너무 커 절반 정도로 절단해 사용하였다. 목탄은 연구단에서 인위적으로 대·중·소로 구분해 사용하고 있는데, 유적에서의 보고 사례가 적어 실제 사용된 크기를 정확히 알 수 없었다.

다행히 최근 발굴된 울산 대안동 쇄부리터에서는 총 4.76kg의 목탄 78점이 수습되었는데, 길이는 3.1~23.2cm(평균 11.5cm), 너비 3~20cm(평균 7.9cm), 무게 10~550g이다(사진 116). 대부분 횡방향으로 절개되어 있고, 웅이가 남아 있는 것도 많다. 수종 동정된 20점 중 소나무속 경송류가 18점으로 대부분을 차지하고, 상수리나무와 서어나무가 각 1점이다(권용대 2021). 즉 길이와 너비가 다양하고 웅



〈사진 116〉 울산 대안동 출토 목탄

이가 있는 점 등으로 보아 다양한 크기의 소나무를 사용해 목탄을 제조했음을 알 수 있다.

권병탁이 수집한 자료에 의하면 울산 쇠부리가마 조업에 사용되는 목탄은 일부러 불완전하게 연소시켰다고 하며, 단위가마에서의 생산량은 송탄 10관들이 100짐, 참탄 10관들이 70짐이었다고 한다(권병탁 2004, 581~583). 이로 보아 소나무 목탄과 참나무 목탄이 10:7 비율로 쇠부리조업에 사용되었을 가능성이 높으며, 불완전 연소된 백탄이 사용된 것으로 추정된다. 목탄의 크기는 온도와 관련해 조업에 미치는 영향이 크기 때문에 적어도 대·소 정도의 구분은 반드시 필요할 것으로 생각되며, 추가적인 자료가 없는 한 현재의 구분방식을 그대로 사용해도 무방할 것으로 판단된다. 다만 현재 참나무 목탄만을 사용하고 있으나 그 효율이 서로 다른 만큼 소나무 목탄의 사용도 고려해볼 필요가 있다.

첨가제로는 굴 껍데기 및 2019년도에 생성된 유출재를 조재제의 용도로 준비하였다. 굴 껍데기는 세척을 통해 이물질을 제거하고 건조시킨 다음, 배소로에 석쇠를 걸치고 소성한 후 나무망치로 파쇄하였다. 유출재 역시 망치로 파쇄하여 장입 준비를 하였다. 당초 2~5cm 크기로 준비할 계획이었으나 패각은 다소 잘게 파쇄되어 가루상태가 된 것이 있었고, 유출재는 반대로 크게 파쇄되어 이들을 혼합해 장입하기는 불가능하였다. 당초 별도로 장입할 계획이었기 때문에 큰 문제는 없었으나 패각의 가루상태는 장입 시 가마 상부의 열압에 의해 비산될 위험이 있으며, 유출재는 원료인 분광보다 너무 크면 용융 시간차 때문에 적절한 장입 시기를 파악하기 어려울 수 있다는 문제가 있다. 이는 실험준비가 평일에 이루어지는 경우가 많아 사업단의 연구원이 모든 준비작업을 점검하고 기록할 수 없다는 데서 발생한 문제이다. 향후 일정 조정 및 작업자와의 충분한 정보 공유가 강화되어야 할 필요가 있다.

조재제의 사용과 관련해서는 제철유적 출토 철재의 산화칼슘(CaO) 함량이 울산쇠부리복원사업단 실험 생성 철재의 함량보다 훨씬 낮다는 데서 사용 여부에 대한 의견이 엇갈려 왔다. 이에 대해서는 다음 항에서 상세히 논하겠지만, 본 실험의 목적이 조선후기 울산쇠부리 기술복원이라는 점에서 유적의 사례와 유사하게 할 필요가 있다는 점은 분명하다. 이를 위해서는 조재제로 사용하는 패각 및 유출재의 산화칼슘뿐만 아니라 철광석에 포함된 산화칼슘, 노 벽체에 사용되는 점토의 산화칼슘의 함량에 대한 검토가 필요하며, 장입방법에 대한 다각적인 연구와 고증이 필요하다.

2) 실험 진행 및 결과의 고찰

실험에 대한 제반 준비를 마치고 10월 9일 오후에 고유제와 점화식을 거행하여 예열작업을 시작하였고 익일 8시부터 본격적인 작업이 개시되었다. 대탄을 중심으로 노내 목탄을 만장입한 후 조절작업 없이 기계송풍을 하여 1시간 반 정도 경과한 시점에 노 하부의 평균온도가 1,200℃ 정도에 도달하였고 그로부터 30분 경과 후에 원료를 장입하기 시작하였다. 이후의 진행과정에 대해 송풍 및 온도 관리, 원료·연료·첨가제의 장입, 출탕, 생산품 등으로 구분하여 고찰해 보자면 다음과 같다.

(1) 송풍 및 온도 관리

송풍은 코로나19 문제로 발포무를 쓰지 못하고 기계송풍기를 사용하였는데, 초기에 직접송풍을 하다가 온도가 1,000℃ 이상 상승한 10:00경부터 사람 손에 의한 여닫이를 사용하기 시작하였다. 풍량

과 풍압의 측정은 못하였지만 육안으로 볼 때 발포무의 경우와 비슷하거나 그보다 약간 강하다는 느낌을 받았다. 향후 이 둘을 비교하여 송풍기 사용 시 적용해야 할 것으로 보인다. 그리고 차후 이 여단이 방식은 인력으로 하는 것을 지양하고 조절기능이 달린 기계장치로 대체하는 것이 좋을 것 같다.

송풍 도중 바람골의 상태 확인을 5차례 실시하였다. 이은철 야장의 주도하에 이루어진 이러한 확인 작업 시점은 이전 실험의 경험을 바탕으로 가마 위로 솟아오르는 불길의 세기와 색깔을 기준으로 하였는데,¹⁸⁾ 이전의 실험에 비해 철재가 송풍구를 막는 정도가 심하지 않아 쉽게 제거할 수 있었다. 다만 18:44 마지막 점검 시에는 바람골로의 철재 역류가 심하게 일어나 있는 상태였다. 이러한 점들로 보아 괴련철 생산의 경우와 마찬가지로 토철을 이용한 선철 생산의 경우에도 가마 위로 상승하는 불길의 강도와 색깔을 관찰하면서 바람골의 상태를 확인하고 송풍을 가로막는 철재의 제거작업을 간헐적으로 실시해야 하는 사실을 확실히 인지하게 되었다. 하지만 울산쇠부리가마의 송풍시설인 지하 바람골 구조는 개폐가 가능한 구조가 아닐 가능성이 높아 이에 대해서는 추가적인 검토가 필요하다.

2019년의 5차 실험에서 가마 외부에 석재를 이용한 결과 이전의 토축에 비해 방열이 과다하여 가마 온도의 상승이 염려되었었는데 이번 실험에서도 가마 외벽의 온도가 이전의 토축에 비해 다소 높게 느껴지기는 하였으나 그러한 문제가 크게 부각되지는 않는 상태로 실험이 지속되었다. 이는 2019년에 비해 노의 외벽에 일정 부분 점토블록을 쌓아올린 효과로 보인다.¹⁹⁾ 차후 유적의 발굴이 추가로 이루어지면 이 부분의 재질을 보다 면밀히 분석하여 의도적으로 내화성이 높은 토양을 사용하였는지를 밝힐 필요가 있다.²⁰⁾

노 하부의 평균온도가 1,300℃ 이상 정도가 되어야 조업에 어려움이 없을 것으로 판단되는데 그에 미치지 못한 점에 대해서는 검토와 개선이 필요해 보인다. 즉 방열의 문제도 일부 있지만 연료의 장입에 있어 중탄과 소탄이 상대적으로 많이 투입되면서 나타난 현상이어서 향후에는 실험에서의 고온 유지를 위해 대탄의 사용량을 늘려야 할 것으로 보인다.

이러한 온도에서 선철의 생성은 가능하나²¹⁾ 출탕을 하게 되면 빨리 굳어버리는 문제가 발생한다. 그러한 인식과 판단 하에 1차 출탕 직전에 목탄 장입방법을 변경하여 대탄만을 투입하였다. 그 결과 노 내 하부온도가 1,300℃ 이상으로 상승하면서 선철의 출탕이 원활히 이루어질 수 있었다. 그리고 분석 결과에서 밝혀진 바와 같이 이 때 선철이 공정조직에 가까운 탄소량을 함유하고 있었던 점도 출탕과 판장쇠 제작에 유효하게 작용한 셈이다.

온도 문제와 관련하여 항시 노 상부의 불길 세기와 색조를 관찰하면서 실험을 진행하였고 불길과

18) 괴련철의 경우도 마찬가지로인데 노 위로 타오르는 불길의 세기가 이전보다 크게 약화되고 불길 하부 색조에 푸르고 하얀 기운이 사라지고 황색이나 황적색의 기운이 보이면 이는 필시 바람골의 송풍구 앞이 슬래그에 의해 막혀 있는 상태이므로 신속히 노에 삽입되는 송풍 연결부를 빼고 쇠막대기로 유동성을 잃고 굳어 있는 슬래그를 제거하여야 한다. 이후 이러한 작업은 송풍 종료 시까지 단속적으로 반복된다. 이는 과거에도 조업을 총괄 지휘하는 골편수에게 가장 중요한 작업이었을 것이다.

19) 향후 석축형제철로가 추가로 발굴된다면 노벽의 바깥쪽 부분을 어떻게 처리하였는지에 대한 정보를 확실하게 파악할 필요가 있다.

20) 이러한 제철복원실험에서 내화토의 사용 여부를 발굴자료 분석에 근거하여 결정하여야 할 것이며 특히 용식(溶蝕)이 가장 심한 송풍구 부분의 상태 파악이 가장 중요한 관건이 된다.

21) 탄소량 4.3%의 공정주철은 1,146℃에서 선철로 얻어지고 출탕은 가능하나 대기에서 급히 냉각되어 굳어 버릴 가능성이 높다. 이러한 인식하에 1차 출탕 시 사전에 목탄의 크기를 변경하여 투입하였던 것이다.

온도에 변화가 발생하면 먼저 골구멍을 열어 5번에 걸친 조치를 신속하게 취하여 철재가 송풍시설 쪽으로 역류하지 못하게 하였다. 9시간 반 정도 경과 후 가마 내 온도가 급속히 하강하였을 때에는 연료를 대탄 위주로 장입하여 문제점을 해결하였다. 이러한 실험을 통해 터득한 것은 골편수가 어떠한 시점의 어떤 상황에서 문제점을 신속히 파악하고 그에 대한 다양한 조치를 어떻게 취해야 하는가 하는 노하우(know how)를 부분적으로나마 터득하게 되었다.

상·중·하 각 2개씩 6개의 온도계로 가마 내 위치별 온도의 변화를 11시간 동안 측정하였는데, 송풍 개시 55분 후에 가마 내 평균온도가 1,000℃를 넘기 시작하였고 지점별 설치가 완료된 09:20부터 실험 종료 시간인 20:57까지 5분 간격으로 온도를 기록하여 총 11시간 동안 가마 내부의 온도 변화를 확인하였다. 평균온도가 1,000℃를 넘기 시작한 후 70분 경과된 시점에 가마 내 평균온도가 1,200℃에 도달하였을 때부터 원료인 분광을 장입하기 시작하였다. 하지만 토철을 이용한 선철 생산에서 이 정도에서도 쇳물 생산은 가능하나 출탕 시 가마 내의 평균온도가 그보다는 조금 더 높아야 하지 않는가 생각이 되었다. 온도 상승방법에 대해서는 별도의 검토와 논의가 필요해 보인다.

이번에 사용한 가마는 대안동의 석축형제철로를 1/2로 축소하여 축조한 것이므로 원래의 크기라면 산술적으로 8배의 목탄이 최초 만장입 시 들어가야 하고 소모량과 추가 투입량도 1/2로 축소한 것보다는 훨씬 많이 들어갈 것이다. 이러한 추론 하에 송풍과 가마 내 연소가 원활히 이루어진다면 온도도 전체적으로 보다 높게 형성된 가운데 실험이 진행되어 선철을 생산과 배출이 큰 무리 없이 이루어질 수 있었을 것으로 생각된다.

(2) 원료·연료·첨가제의 장입

원료와 연료의 장입은 원래의 매뉴얼 계획을 상황에 맞추어 일부 변경하면서 실시하였다. 예를 들어 패각과 유출재의 투입방식 변화 및 후자의 투입 중지, 출탕 전의 투입 목탄 크기의 조정 등을 통해 실험이 큰 무리 없이 진행된 것은 하나의 적절한 조치였으며 중요한 경험이기도 하였다.

원료·연료·첨가제(패각+슬래그)는 충분히 준비가 된 상태에서²²⁾ 실험을 시작하여 원료는 마련한 분광 470kg의 약 66%에 해당하는 310kg을 투입하였는데 크기 4mm 이하의 토철상태 분광을 나무삽에 담아 그대로 장입하는 방법은 재검토의 여지가 있어 보인다. 이 부분에 대해 그동안 신경환 연구원이 가마 내 통기성의 문제를 거론하면서 소결(sintering) 내지는 점토와 혼합한 펠렛(pellet)화의 필요성을 지적하여 왔는데 차제에 심도 있는 검토가 있어야 한다고 생각하게 되었다. 가마 내 온도가 기대치(1,300℃) 만큼 상승하지 못한 것은 분광으로 인한 통기성의 저하도 한 요인으로 볼 수 있을 것 같으며 그만큼 환원시간도 더 소요되어 선철 출탕의 시점도 늦어졌을 가능성이 있다. 이와 관련하여 권병탁이 1960년대에 울산 달천지역을 조사하였을 때 답사 안내역을 맡았던 김덕이(金德伊, 당시 54세)씨의 다음과 같은 전언(傳言)에 주목할 필요가 있다,

“蔚山郡 達川에서 沙鐵을 소나 말에 싣고 이곳에 와서 쇠를 녹여 판장쇠를 만들었다고 한다. 김씨에

22) 원료는 4mm 크기 분광을 10kg 단위로 47자루, 분광가루 10kg 단위로 20자루로 총 670kg을 마련해 놓았고 첨가제는 패각 1kg씩 40자루, 슬래그 1kg씩 40자루로 각각 40kg을 준비하였다. 목탄은 대탄 1,000kg, 중탄 500kg, 소탄 600kg을 10kg의 박스로 나누어 놓았다.

의하면 황토흙으로 이겨 만든 ‘鐵鑛沙棒’을 그 위에 얹어서 거대한 풀무질을 하여 그것을 용해시켰던 것이라고 전하여 들었다고 한다”(權丙卓 1972, 99)

그동안 연구단이 이러한 기록 내용을 간과하고 있었다는 점은 큰 불찰이었다고 여겨지며, 현재의 여러 정황으로 볼 때 차후 이와 같은 방법을 이용하여 제철실험을 해야 할 당위성이 높아져 있는 상태라 할 수 있다.

연료는 준비량 2,100kg 중 1,150kg(대탄 770kg, 중탄 180kg, 소탄 200kg 장입. 만장입 390kg, 분광 장입 후 660kg, 분광 장입 종료 후 100kg)을 장입하여 약 55%를 소진한 셈이다. 당초의 계획에서는 장입 중 중탄과 소탄의 비중을 많이 들 예정이었으나 최초 만장입에 대부분 대탄이 소요되고 실험 도중 투입방식의 변경 등으로 인해 그 비율이 달라지게 되었다.²³⁾

이처럼 제철작업에서 적정온도를 유지하면서 원료의 환원이 원활히 이루어지려면 노 내의 온도 상승을 위한 연료 선택과 투입의 적정성 내지 효율성과 통기성의 확보가 가장 중요한 요소임을 이번 실험을 통해 깊이 인지하게 된 점은 가장 큰 수확이 아닌가 생각되며, 이러한 개선점을 어떻게 실행으로 옮길 것인가가 향후의 중요한 과제가 되었다.

또한 조재제는 11:12~18:44(7시간 32분)의 시간 동안 52kg(유출재 22kg, 폐각 30kg 2kg씩)을 장입하였다. 차제에 이러한 조재제 사용의 문제도 전면적인 재검토를 요하는 단계에 도달한 것으로 보인다.

먼저 유출재 투입은 앞서 지적한 황토 혼합방식의 펠렛인 소위 ‘철광사봉’으로 바꾼다면 그 투입의 필요성이 사라지게 된다. 이는 또한 슬래그에 포함된 과다 칼슘분의 문제도 해결하게 되는 것이다. 하지만 차후 원료를 황토 혼합 펠렛상태로 투입한다 하더라도 철 환원의 촉진과 철재의 유동성 확보를 위해 슬래그를 첨가제로 투입하는 방식을 완전히 배제할 필요는 없어 보인다.

그동안 철재의 염기성화를 통한 유동성의 향상을 위해 Ca분이 풍부한 폐각을 투입하여 왔으나 철재 성분분석에서의 CaO 양이 제철유적 철재보다 월등히 높게 나오는 결과에 대해 그동안 깊이 고찰하지 않았던 점은 개선이 필요하다. 조재제 투입 시 철재의 CaO 양이 10%를 훨씬 상회하는 수치를 보이는데 비해 제철유적 철재의 그것은 일반적으로 2~4% 정도의 범위에 속하는 것이 다수를 차지하고 있어 이 양자 간의 괴리는 그동안 너무 컸다. 물론 양산 물금유적의 경우는 제철유적에서 폐각이 출토되고 철재의 CaO 양이 10%를 크게 상회하기도 하나 이는 드문 사례에 속하고(이남규 2019), 철재의 CaO 양을 기준으로 한다면 고대부터 대부분의 제철유적에서는 칼슘분을 조재제로 직접 쓰지는 않았던 것으로 보아야 할 것이다. 따라서 차후의 제철복원실험에서는 폐각사용을 중지하거나 혹은 최소화하는 방향으로 나아가야 할 것이다.

(3) 출탕

토철 제련에서 생산된 선철을 받아내는 작업에 대해서는 권병탁이 이미 판장쇠바탕(좌우 4개씩 8개)²⁴⁾을 이용한 것으로 설명하고 있어 이에 맞추어 작업을 하였다. 2019년에는 철판틀 안에 토사를 넣

23) 당초 소탄 10kg+중탄 10kg 4회 장입 후 대탄 20kg 장입 계획이었으나 오후 4시 20분경 노 온도가 하강하여 소탄 10kg+중탄 10kg을 혼합하여 2회 장입 후 대탄 20kg을 연속 장입하는 것으로 목탄장입 순서를 변경하였다.

24) 하지만 「쇠부리점터 가상도」(權丙卓 1972)에는 좌우 5개씩 10개로 되어 있다.

고 목형을 찍어 바탕을 만들기는 하였으나 중량이 너무 무거워 작업이 원활히 이루어지기 어려웠다. 이에 비해 이번 실험에서는 초롱구멍 앞에 점토 섞인 사질토로 평면을 만들로 목형을 찍어 판장쇠바탕을 만들어 사용하였다. 후자가 간편하기는 하나 실험 중에 준비하는 것이 번거로워 2021년에는 목제 틀로 미리 만들어서 쓰기로 결정되었다.

출탕은 1차와 3차의 경우만 판장쇠바탕에 선철을 받는 작업이 이루어졌으며, 1차는 일부에 그쳤으나 3차에서는 전체를 가득 채우는데 성공할 수 있었다. 권병탁이 조사한 바에 따르면 과거 조업 시 3회 출탕을 하는데 1회에 80근의 판장쇠 3개 정도씩만 받아내도 성공이라 하고 있어 본 실험과는 상당한 괴리가 있다.²⁵⁾

그 외에도 조사내용이 개략적이어서 여러 기술적 요소들의 상세한 부분에 대해서는 제대로 알기가 어려운 실정인데 이러한 문제는 실험과 면밀한 검토를 통해 합리적이고 적절한 방법을 파악해내는 방법 밖에 없을 것 같다.

출탕과 관련하여 고려하여야 할 점 중 우선 그 시점의 판단이 중요하다고 생각된다. 1차 출탕은 분광이 160kg, 2차 출탕은 240~250kg 장입되었을 때 실시하였는데, 이 때 잡쇠구멍에서 슬래그가 배출되는 양상을 보고 작업을 진행하였다, 아마 과거에는 골편수가 장기간의 경험을 바탕으로 원료 장입량과 슬래그의 배출상태 등을 파악한 후 출탕시기를 결정하였을 것으로 생각된다. 그렇다 하더라도 때에 따라서는 선철이 판장쇠바탕을 가득 채우고 넘칠 정도로 배출되어 초롱구멍을 막아야 하는 상황이 벌어지기도 하였을 텐데²⁶⁾ 그리할 때의 조치방법도 필요한 것으로 파악되었다. 이에 대해 이은철 야장과 함께 논의한 결과 차후 긴 집게로 목제 썰기를 집어 출탕구를 폐쇄하는 방식을 써보기로 하였다.

이번 실험에서 출탕이 이루어진 탕도의 경우 약 15°의 경사도를 갖고 있었는데 다소 과출탕이 되었던 3차 출탕 시에 선철의 유출속도가 빨라 위험을 느낄 정도였으며 바탕을 가득 채운 후의 조치를 사전에 준비하지 않았기 때문에 판장쇠바탕의 선철이 넘치는 현상에 대해 적절히 대처하지 못하였다. 이는 차후 탕도의 각도를 이번보다 약간 완만하게 하고 출탕구에서의 선철흐름 방지장치 마련 등의 개선안을 조속히 마련하여야 할 것이다.

이러한 출탕작업에서 얻게 된 부수적인 지식 중 하나가 용해유적에서 출토되는 소형 구상선철(球狀鉄鐵)의 생성요인에 대한 것이다.²⁷⁾ 즉 이번 출탕작업 시와 사전 철재 배출 시 슬래그 상부에 그러한 소형의 구상선철이 떠서 흘러내려오는 현상을 몇 차례 목격할 수 있었다. 이러한 구상선철은 노 내 환원과정에서 액상화된 작은 구슬형태의 선철이 노 하부로 내려오다가 슬래그층을 만났을 때 슬래그의 표면장력에 의해 그 위에 잠시 떠있던 중에 배재(排滓)와 출탕의 작업이 진행되면서 함께 흘러나온 것이 밝혀진 것이다.

25) 판장쇠의 무게를 80근으로 기록한 것은 8매 한판을 말하는 것 같다. 그렇다면 판장쇠 1개의 무게가 10근이 되어 너무 무겁지 않은가 생각된다.

26) 3차 출탕 시 선철이 판장쇠바탕을 약간 넘칠 정도로 배출되어 판장쇠 일부는 정형화된 형태를 갖추지 못하는 상태가 되었다.

27) 삼한시대 경주 황성동 제철유적에서도 구상선철(구슬형철괴)이 간간히 출토되어 그동안 이를 철소재로 보는 경우도 있었다.

(4) 생산품

실험 중 출탕된 선철은 정식으로 4차례 및 기타방식으로 총 72.25kg이 얻어졌다. 이를 원료 대비 단 순비교해 볼 때 철회수율이 23.3%에 해당하는 것이어서 적정수준의 제철작업이 이루어진 것으로 평가할 수 있겠다.

1차와 3차의 출탕은 판장쇠바탕에서 판장쇠를 얻기 위한 작업이었는데 전자(前者)는 출탕량이 부족하였고 후자(後者)는 과출탕 상태였다. 당초 판장쇠의 두께를 3cm로 설계해 준비하였으나 본서 제Ⅳ장의 실험결과에서 나타난 바와 같이 1차 출탕에서 생산된 판장쇠 9매는 두께가 11~31mm(평균 16.5mm)로, 계획한 두께의 절반밖에 이르지 못하였고, 3차에서 생산된 판장쇠는 8매가 모두 생산되기는 하였으나 두께가 26~47mm(평균 34.9mm)로 일정하지 않았다.

유통과 판매를 위한 판장쇠는 규격화·정형화가 생명인 만큼 이러한 실험결과는 어찌면 불량품에 해당할 수 있기 때문에 차후 이러한 결과물이 되지 않도록 대안을 마련하여야 한다. 이를 위해 관찰공의 적극 활용, 가마 내 상태 파악방식의 체득, 잡쇠구멍을 통한 철재의 배출과 상태 확인 등이 원활히 이루어져야 할 것이다. 이에 대한 대처능력은 한 두 번의 실험으로 얻어지기 어려울 것으로 보이기 때문에 차후도 수차례의 시행착오가 있을 것으로 예상된다. 이러한 출탕의 시간과 방법에 대해서는 별도의 시뮬레이션 작업과 논의가 필요해 보인다.

그리고 한 단계 더 나아가 판장쇠바탕에 만들어진 판장쇠의 분리와 형태 및 무게 조정 작업을 통한 상품화와 유통과 판매를 위한 추가작업까지도 실시하는 최종 마무리작업의 실행도 부수적 과제로 남아 있다.

또 하나 고려해야 할 사항이 실험 종료에 관한 것인데, 주어진 여건상 현재는 당일 야간의 8~9시 경에는 장입 종료 후 일정 시간이 지나면 인위적으로 중지하고 앞부분을 개방하여 자연 통풍에 의한 연소가 이루어지도록 하는데 이러한 방식을 지양하고 노 내 잔존물이 거의 모두 환원될 때까지 송풍하는 방식도 고려할 필요가 있다. 왜냐하면 그러한 방법을 택할 경우 사후 노 내 잔존물이 대폭 감소하여 추가 실험에 다각적으로 유리할 것으로 판단되기 때문이다.

한편 실험 중 슬래그는 5차례의 정식 배출과 기타²⁸⁾ 배출 등 모두 131.15kg이 가마 외부로 배출되었다. 선철 72.25kg과 슬래그 131.15kg을 합하면 203.4kg이 되는데, 장입된 분광이 310kg인 점을 감안한다면 약 107kg이 누락된 셈이다. 이는 장입 분광의 일부가 노 내에 슬래그와 함께 잔존하거나 가마 벽체에 용착되기도 하였으며, 또 일부는 비산(飛散)되거나 소량으로 유출되어 계측에서 누락되었기 때문으로 이해된다. 그렇다 하더라도 그 낙차가 상당히 큰 것으로 생각되며, 제련에서의 철 생산량은 회수율과 직결되는 문제이기 때문에 이에 대해서는 심도 있는 검토가 필요한 것으로 사료된다.

(5) 기타 사항

이번 실험은 울산쇠부리축제의 킬러콘텐츠 중 하나로, 울산쇠부리기술 복원 현장을 시민들에게 생생히 보여 준다는 점에서 많은 이점이 있었다. 하지만 코로나 19로 인해 축제 자체가 비대면 온라인

28) 출탕구나 골구멍에서 흘러나온 것을 말한다.

중계로 진행됨으로서 이러한 이점을 충분히 살리지 못한 측면이 있다. 사무국에서는 이러한 상황을 고려하여 실험 준비 및 진행 과정을 동영상으로 제작해 온라인으로 공개했으며, ‘달천문화광부’ 등 다양한 프로그램을 제작해 유튜브에 게재하였다. 즉 주로 오프라인으로 진행되어 왔던 울산쇠부리축제의 쇠부리기술 복원사업이 온라인을 통해 공개되면서 더 많은 사람이 접할 수 있는 기회가 되었다고 볼 수 있다. 팬데믹 시대 위기를 기회로 전환한 발 빠른 조치였다고 평가된다.

한편 이러한 상황에서 본 실험의 학술자문회의 역시 온라인으로 대체하였는데, 실험 당일 하루 종일의 과정을 위원들이 모두 지켜보기는 힘들다는 점과 실험의 다양한 과정을 속속들이 보여줄 수 없다는 점이 단점으로 나타났다. 무엇보다 시간을 정해 회의를 진행하였으나 야외에서의 온라인 회의가 상당히 혼잡스럽고 가변적인 상황과 병행하기 어렵다는 사실이 확인되었다. 향후 실험의 학술자문회의는 현장에서 직접 진행하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

2. 금속학적 분석결과와 고찰

1) 원료 철광석

제6차 울산쇠부리 복원실험에서 원료 철광석은 달천광산 지역의 토철을 원료로 사용하여 석축형제 철로에서 선철 판장쇠를 생산할 목적으로 복원실험을 실시하고자 하였다. 그러나 현재에는 달천광산이 폐광이 되어 조선시대의 토철을 획득할 수 없어서 이와 유사한 성분을 갖고 있는 신예미광산 괴광석을 직경 4mm 이하의 분광을 만들어 토철 대신 사용하였다.

4mm 이하 분광의 제조는 먼저 배소(양철광위에 분광을 넣고 하부의 정사각형의 수혈에 목탄을 넣어 800–900℃×30분 건조)한 후 4mm 채로 걸러 선별하고 2차 자력선광하여 원료를 준비하였다.

원료 철광석의 시료는 배소 후의 자력선광 전후에 각각 1점씩 준비하여 분석을 실시한 것이다. 조선시대 이의립 선생이 사용하던 토철은 산에서 흙으로 채취할 때 철광석의 품위는 약 25%(Fe₃O₄자철광) 정도였으나 이를 골짜기의 세철장에서 선광을 하여 세철된 토철(40%Fe₃O₄)을 원료로 하여 이를 다시 배소처리하여 사용하였다고 판단하였으며, 울산 대안동 쇠부리터 유적지에서 채취된 토철의 분석결과는 <표 16>과 같으며 저장소 절개지에서 채취된 토철의 경우 32.44%FeO(20U-TO), 저장소 토층에서 채취한 1차 자력선별한 토철의 경우 16.37%FeO(20U-D1)이고 수차례의 세척 후 자력선별한 것은 26.74%FeO(20U-D2) 정도로 분석되었다.

원료철광석의 분석에는 4mm 이하로 제조된 분광을 자력선별한 것과 대안동 유적지 토철을 상호 대비 분석하였다.

구분		FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	As ₂ O ₃
철광석	20U-4(배소광석)	42.91	25.71	2.29	3.40	0.11	23.46	0.67	0.10	0.06	1.07	—
	20U-8(2차자선광석)	43.54	25.03	3.04	6.91	0.38	18.02	1.13	—	0.11	1.21	—
	4차(2018년, 배소X)	41.95	25.69	2.51	2.76	—	25.09	0.58	0.09	0.06	1.04	—
	5차(2019년, 배소X)	43.94	25.42	2.51	3.09	—	23.11	0.55	0.10	0.05	1.01	—

구분		FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	As ₂ O ₃
토 철	20U-D1(자선)	16.37	60.05	16.12	0.89	0.59	1.56	2.43	0.91	0.22	0.40	0.14
	20U-D2(자선, 수세)	26.74	52.34	13.72	0.94	0.57	1.40	1.96	0.63	0.21	0.39	0.48
	20U-TO(절개지)	32.44	45.95	11.04	4.88	0.38	1.07	1.60	0.46	0.19	1.23	0.32
	절개지 자선 토철(2019대안동)	63.19	25.50	6.03	1.46	0.22	0.71	0.66	0.18	0.18	0.99	—

〈표 16〉 기존 실험 철광석(신예미광산 및 토철) 성분 분석결과 대비(XRF분석, 단위wt%)

2) 목탄(백탄)의 사용

목탄은 울산시 울주군 하이참숯(백탄)을 사용하였고 초기건조를 위한 목탄장입을 제외하고 원료장입(분광 400kg)과 더불어 목탄 800kg(1:2)의 비율로 준비하였다. 분광장입시에는 장입물의 통기성과 환원반응성을 고려하여 대탄(10kg), 중탄(10kg), 소탄(10kg)을 15분 간격으로 장입하였다.

본 실험에 사용된 목탄과 더불어 다른 지역의 백탄, 흑탄은 배소작업용으로 사용하였다. 목탄의 용도는 발열과 환원을 위한 고정탄소량이 중요하지만 품질에 영향을 주는 수분, 회분 및 유황의 함량도 확인하였다(신경환 외 2020).

구분	고정 탄소	수분	회분	휘발분	유황
목탄(백탄)	85~95%	4.3~6.2%	1.6~2.2%	10~25%	0.019~0.08%
실험재(백탄)	89.15%	9.82%	2.86%	7.99%	0.03%
코크스	80~90%	0.2~5.0%	7~14%	1~3%	0.5~0.7%

〈표 17〉 제련원료의 성분

3) 첨가제의 사용

첨가제로는 철광석중에 함유되어 있는 맥석산화물을 철광석으로부터 분리하기 위하여 염기성 조제제로 소성폐각 30kg과 재사용 유출재(5차 실험분) 파쇄분 22kg을 합하여 52kg을 사용하여 원료대비(1:0.2)의 비율로 준비하였고 이들은 모두 노천수혈에서 배소 후에 가루로 만들고 2kg 단위로 방습포장하여 사용하였다.

전통제련에서 유출재는 100% 환원이 되지 않고 미환원 산화철(FeO)이 (SiO₂)와 융합하여 저융점의 Fayalite(Fe₂SiO₄)를 형성하여 유출되기 때문에 Fayalite 중의 (FeO)를 회수하는 목적과 신속히 슬래그 용해를 유도할 목적으로 재사용 슬래그를 폐각과 함께 사용하였다.

성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Cl
조성	0.17	0.95	0.27	92.29	2.16	0.99	0.13	—	0.25	1.62

〈표 18〉 폐각(19U-1)의 XRF 분석결과(조성의 단위는 wt%)—2019년 울산쇠부리복원실험

성분 시료번호	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
19U-19	8.79	64.62	10.05	3.43	1.91	2.28	7.88	0.39	0.14	0.30
19U-20	3.71	74.76	11.77	0.97	2.24	0.60	5.28	0.42	0.05	0.10
19U-21	3.25	75.55	11.88	0.76	2.06	0.48	5.29	0.46	0.06	0.09
19U-22	4.47	73.40	11.36	1.37	2.30	0.72	5.59	0.44	0.06	0.15
19U-23	5.11	71.42	10.82	2.53	1.98	1.27	5.96	0.40	0.10	0.19
19U-24	3.45	74.69	12.14	0.99	2.33	0.49	5.08	0.51	0.06	0.11
19U-25	3.15	75.49	11.84	0.81	2.50	0.45	5.09	0.42	0.05	0.09
19U-26	4.50	72.32	11.69	1.39	1.69	1.15	6.38	0.46	0.07	0.19
평균	4.55	72.78	11.44	1.53	2.13	0.93	5.82	0.44	0.07	0.15

〈표 19〉 패각(19U-1) 재사용 슬래그의 XRF 분석결과(조성의 단위는 wt%)-2019년 울산쇠부리 5차 복원실험

조제제로 사용되는 패각의 XRF분석결과는 〈표 18〉과 같으며 주성분은 CaO가 92.29%로서 대부분을 구성하고 다음으로 Na₂O(2.16%), MgO(0.99%) 및 SiO₂(0.95%)이며 이는 완전한 염기성 슬래그의 산화물로 밝혀지고 있다.

이들 중 CaO는 철광석 중의 SiO₂와 화합하여 슬래그 (CaO·SiO₂)를 형성하고 또 철광석 중의 환원 과정에서 형성된 FeOx(Wüstite)는 (Fe₂SiO₄)라는 Fayalite(저융점)의 슬래그를 형성하여 유출재가 되어 철광석으로부터 분리되어 나온다. 패각은 슬래그의 염기도를 높여서 철광석의 환원회수율을 높이는 효과를 기대하였고 염기도에 기여하는 산화물은 CaO, MgO, Na₂O, K₂O 등으로 구성되어 있다.

4) 유출 슬래그의 형성

철광석 중에서 철산화물(Fe₃O₄, Fe₂O₃)은 목탄에 의하여 환원이 일어나고 나머지 맥석 산화물은 서로 복합산화물을 형성하게 된다. 특히 이 중 반환원괴(FeOx) Wüstite는 SiO₂와 결합하여 Fayalite(Fe₂SiO₄)를 형성하여 융점이 떨어져서 다른 산화물에 우선하여 유출이 일어나고, 염기성 산화물인 CaO, MgO, K₂O 등은 이보다 높은 온도에서 슬래그(CaO·SiO₂), (MgO·SiO₂), (K₂O·SiO₂) 등을 형성하여 유출재가 되어 초기에 출재구를 통하여 유출되고 있었다.

울산쇠부리 복원실험에서는 지금까지 염기성 슬래그를 사용하였고 이들의 염기도는 0.41에서 1.17의 범위 내에서 환원 회수율이 개선된 실험을 수행할 수 있었다. 제6차 실험에서 형성된 유출 슬래그에 대한 분석은 (20U-17), (20U-19), (20U-21), (20U-22), (20U-23), (20U-26), (20U-27)을 통하여 그 결과를 확인할 수 있었다. 그리고 이들 유출 슬래그와 동반하여 유출된 선철은(20U-18), (20U-19), (20U-20) 등이 있으며, 이들의 기지조직은 Ledeburite 조직이고 입계에 탄화물을 형성하고 있는 백주철의 조직으로 분석되었다.

5) 용융선철 및 형성물 선철의 형성

본 6차 실험에서 유출재가 형성된 후의 용융선철이 확인된 시료인 (20U-12), (20U-14), (20U-15), (20U-16)의 시험 결과를 살펴보면 다음과 같다.

용융 선철은 대부분 용융슬래그가 형성된 후 환원철(Fe)이 침탄을 일으키고 이 침탄량이 4.3%C(공정조성)일 때 가장 낮은 용점을 형성하여 선철이 용융되고 있다. 선철의 범위는 탄소 함량으로 볼 때 2.0%C에서 5%C 정도로서 넓게 분포하지만 탄소 함량이 4.3%C를 미달하거나 초과할 경우에는 오히려 용점이 상승하여 용탕 형성이 어렵게 된다.

본 실험에서 형성된 용융선철의 탄소 함량은 4.18%, 3.53%, 3.92%, 4.16%로 확인되었다. 그리고 형성물 선철은 노체를 개방하여 냉각된 후에 출재구 측을 절개하여 채취한 선철 중 슬래그대 선철(20U-30)과 상부 형성 선철(20U-40)의 분석 결과를 살펴보면 냉각과정에서 선철 중의 Cementite(Fe_3C)가 흑연으로 변태하고 기지조직은 기존의 Ledeburite조직에서 Pearlite와 Ferrite조직으로 변태한 것을 알 수 있었다. 다시 말하여 용융상태에서 유출된 선철은 Ledeburite조직이고 노체를 냉각한 후에 취출한 선철은 흑연화된 회주철이 되는 것을 알 수 있었다.

본 실험의 1차적인 생산품인 선철 판장쇠의 제조는 2세트(46.4kg)를 출선구(초롱구멍)에서 연결하여 직접 제조를 하였고 나머지 잔탕은 냉각된 선철괴를 노 바닥으로부터 13.35kg 제조할 수 있었다. 이들을 분석해보면 모두 공정선철에 가까운 백주철의 조직이었으며 일반적으로 Pearlite기지의 Ledeburite 조직으로 나타났다. 이 판장쇠들은 재용해용 선철로 사용되거나 탈탄강 원료로 사용될 수 있다고 판단된다.

6) 형성물 슬래그

형성물 슬래그는 용융선철의 윗층에서 용융선철과 함께 냉각되어 취출(取出)된 것으로 유출 슬래그에 비하여 용점이 높고 여러 가지 복합 산화물을 형성하였다.

본 실험에서 채취된 형성물 슬래그는 (20U-28), (20U-34), (20U-34) 등이 있으며 용점이 유출슬래그보다 높게 나타났다. 특히 형성물 슬래그의 염기도는 0.69으로서 유출 슬래그(0.90)보다 낮아져 있었고 현미경 조직에서는 슬래그 내부에 수많은 기공이 형성되어 있었다.

7) 송풍구, 노벽 용손 및 노 바닥

지금까지 송풍구와 노벽 용손의 원인은 저용점의 Fayalite(Fe_2SiO_4)가 송풍구에서 먼저 형성되고 노체 산화물과 복합슬래그를 형성하여 용손이 일어나는 것으로 파악되고 있었다. 본 분석에 활용된 시료는 (20U-24), (20U-32), (20U-33), (20U-38), (20U-39) 등이 있으며 이들의 용손 원인을 파악하는데 중점을 두었다.

그러나 본 연구에서 포스코의 주물선 고로에 대한 자료를 참고하여 알칼리 산화물(K_2O)의 침식을 고찰하였다. 알칼리 산화물은 주로 노체의 점토 성분에서 유래된 것으로, 산화물을 형성하면 용점이 800-1,000℃까지 낮아져서 국부적인 용손이 일어날 가능성이 크다고 하였고 또 알칼리 농축과 순환

반응으로 연속적인 침식을 유발하여 특히 연속작업을 하려는 제련로에서는 그 피해가 크다고 하였다.

가마 바닥의 분석은 (20U-37-1), (20U-37-2) 및 (20U-29)가 적용되었으며 점토질과 모래로 된 가마 바닥에 목탄이 박혀있는 형상이 나타나며 일부에서는 선철 중의 Cementite(Fe_3C)가 반응하며 흑연을 형성하기도 하였다. 그리고 점토질 바닥에서 농축된 알칼리 산화물이 최대 (17.32% K_2O)로 나타나고 있다.

2020

울산쇠부리
복원사업
연구보고서
SOEBURI

VI

맺음말



VI. 맺음말

2020년은 코로나 팬데믹으로 거의 모든 부분에서 국가의 기능이 정상적으로 운용되지 못하는 가운데 울산쇠부리 제철복원실험 또한 준비와 실행 과정이 상당히 파행적으로 진행될 수밖에 없었다.

당초 5월 둘째 주 주말에 쇠부리축제의 일환으로 실시되어야 하나 이때는 모든 계획이 기약없이 순연되는 가운데 준비작업의 일부만이 겨우 완료된 상태였다. 그렇다 하더라도 어려운 여건을 감내해 가면서 5월말까지 원료를 준비하고 6월 하순까지 달천철장의 쇠부리가마 축조 등을 마치면서 기타의 준비작업도 계획대로 하나씩 진행되었다. 그리고 실험은 가을에 진행되어 10월 9일 오후에 고유제와 점화식을 거행하여 예열작업을 시작하였고 실제적인 실험은 다음날인 10일에 시작되었으며 그 개요는 다음과 같다.

실험을 위해 마련한 크기 4mm 이하의 분광은 470kg이었으나 그 66%에 해당하는 310kg만 가마 내에 투입되었고, 목탄은 준비된 2,100kg 중 총 1,150kg(대탄 770kg, 중탄 180kg, 소탄 200kg)이 사용되어 전제 준비량의 약 55%를 소진한 셈이다. 그리고 조재제는 장입 도중 원래의 계획이 변경되어 52kg(유출재 22kg, 폐각 30kg)이 사용되었다.

본격적 가마 작업인 기계송풍의 개시는 9시 10분부터 시작되어 20시 27분에 종료되었고, 11시간 17분간 송풍하면서 원료, 연료 및 첨가제의 장입이 이루어졌다. 선철은 4차례의 출탕과 기타 방식으로 72.25kg이 생산되어 원료 대비 단순계산방식의 철회수율은 23.3% 정도이고, 슬래그는 5차의 잡쇠구멍과 초롱구멍 등을 통해 131.15kg이 생성되었다. 출탕 중 3차에서는 최초로 판장쇠바탕에 선철이 모두 채워지는 결과를 얻어 그동안의 쇠부리가마 제철복원실험 중 가장 성공적인 성과를 거둔 셈이다.

그동안 선철 생산을 목표로 한 3차례의 제철복원실험을 통해 기본적으로 제반 생산요소들과 조업상의 노하우(know how)에 대해 많은 지식과 경험을 축적하게 되었고, 이제는 각 부문의 세부적 기술

요소들을 더 파악하고 개선해 나가야 하는 과제들이 남아 있다.

예를 들어 원료인 토철의 구체적 성격 구명(究明)과 실험 원료로서의 확보 및 가공 문제, 골구멍의 세부형태 파악과 복원, 출탕 및 슬래그 배출 시점의 판단과 완벽한 출탕작업, 실험 종료의 방식 등 다방면에 걸친 기술개선의 여지가 많이 남아 있어 이들에 대해서는 별도의 세부적인 개별연구가 필요한 상태이다.

이번 실험은 코로나의 여파로 온라인으로 시민들에게 중계되고 자문회의도 화상회의로 대체할 수밖에 없는 상황이었지만, 그 나름대로 새로운 방식의 실험운영이었고 별도의 효과도 있었다고 생각된다. 하지만 쇄부리축제의 일환으로 5년간 실시되어 왔던 울산쇄부리 제철복원실험은 많은 시민들과 관계자들이 자리를 같이하여 체험하면서 축제의 분위기에서 함께 느끼고 소통하면서 진행될 때 그 의미와 가치가 더 크다는 것도 절감하게 된 색다른 실험이었다고 생각된다.

이러한 실험이 큰 무리없이 성공적으로 잘 마무리된데 대해 울산광역시 북구청장님 이하 울산 북구청의 모든 관계자 여러분들, 어렵고 힘든 실험의 준비와 진행에 여러모로 애써주신 많은 참여자분들, 자문위원님들 그리고 중계방송을 맡아주셨던 분들 및 온라인으로 참여하여 주신 시민 여러분들께 진심으로 감사를 드리면서, 이미 준비가 착착 진행되고 있는 2021년의 쇄부리 제철복원실험이 더 발전된 모습으로 시민들을 만나볼 수 있게 되기를 기대해 본다.

2020

울산쇠부리
복원사업
연구보고서
SOEBURI

부록

1. 실험 기록
2. 2020 울산쇠부리축제
제철복원실험의 금속학적 분석
3. 자문의견서



1 실험 기록

1-1 실험기록

시간	실험 내용	비고
10/10 06:30	대탄 100kg 장입 시작으로 예열 시작	
08:00	예열로 인해 마사토 등 벽체(황토) 내부에 함유된 불순물 녹아 내려 초롱구멍과 잡쇠구멍 입구 일부 막음, 대탄 장입	
08:10	대탄 가마의 2/3 지점까지 장입	
08:11	목탄 장입방법 변경 : 중20kg-소20kg-중20kg-소20kg-대20kg의 장입 방식을 중10kg+소10kg(4회)-대20kg으로 변경	패각 너무 잘게 파쇄되어 가루상태, 패각의 비산 방지 위해 소탄 장입, 철광석 상부 공기 차단 보온효과
08:30	발풀무와 기계송풍의 풍량 측정, 풀무와 같은 양으로 기계송풍 조절, 노벽 갈라진 틈 보수	
09:10	송풍 시작(기계송풍)-여닫이 사용하지 않음(계속 송풍) 비소성 황토벽돌로 초롱구멍 및 잡쇠구멍 보수	
09:20	온도계 설치 완료, 실험내용 주지 등 미팅	
09:30	기계송풍 여닫이 사용 시 상부에 불뚱 비산-작업자 보호 가림막 설치 일정 온도 상승까지 송풍량 유지 평균온도 1,000℃ 상승 후 1시간 유지	723℃에서 금속철 조직 변태, 700~800℃ 일정시간 유지 후 1,000℃ 상승, 일정시간 유지 후 1,200℃ 상승시켜야 함-서서히 올려 유지 후 조금씩 상승 필요
09:55	현재 습도 62%	습도 40%에서 온도 100℃ 하강
10:07	송풍 수동 여닫이 사용	
10:21	판장쇠틀 제작 시작(가는 모래/황토/숯가루 비율 4/1.5/1) 목탄 30cm 하강, 목탄 장입	
10:57	뒤쪽 상부 온도 997℃, 나머지 1,200℃ 이상 유지	
11:10	철광석 장입, 슬래그 장입, 목탄 만장입 상태	
11:16	목탄 장입 판장쇠틀 수평 유지, 목형 외곽틀 놓고 내면에 바탕재료(모래+황토+목탄) 1/2 정도 채워 넣음-목형 판장쇠틀 찍은 후 주변에 황토가루 도포-목탄가루 도포-황토가루 도포-목형을 주변에 바탕재료 채워 높이 맞춤, 목판으로 주변 두드려 단단하게 함	
11:30	화상회의 : 자문위원-성정용, 신상용, 심재연, 조대연, 한지선	
12:03	앞쪽 상부(3번) 온도계 훼손. 앞쪽 온도 하강으로 광석은 뒤쪽 중심으로 장입. 온도계 교체(내벽 또는 온도계 센서 부분이 녹아내려 꼬챙이로 뚫은 후 교체함)	
12:10	광석 장입	

시간	실험 내용	비고
12:16	노벽 외벽 갈라진 틈 보강- 틈 사이 'V'자형으로 오려낸 후 황토 채움, 불꽃 주황색	파란색 불꽃은 아황산가스에서도 발생. 슬래그가 패각보다 빨리 녹고 반응 좋음
12:48	바람구멍과 골구멍 막혀 뚫음	
12:30	관찰공 확인 시 슬래그 관찰, 송풍구가 커서 녹아내리는 유(송풍구 주변의 벽체에서 자연유)가 심함	
13:34	1차 슬래그 배출 시작, 슬래그 느린 속도로 흘러 내림, 잡쇠구멍 앞 슬래그 배출로까지 흘러내리지 못함, 30cm 정도에서 멈춤. 쇠창으로 다시 뚫어 슬래그 계속 배출, 배출되는 슬래그 속에 선철 일부 함유(반짝반짝 불꽃이 됨). 풀무 강도 강하게 해 통풍 원활하게 함	
13:40	잡쇠구멍 통해 슬래그 계속 배출, 슬래그 점도 높음(온도가 낮아 빨리 냉각되는 것 같음). 슬래그에 선철 함량 많음, 선철 출탕 필요	
13:51~14:08	선철 출탕 관련 현장회의 진행(1차)	
14:19	14:47까지 중탄과 소탄 대신 대탄 장입	대탄 장입으로 온도 상승효과 예상
14:35	초롱구멍으로 선철 출탕 시작, 초롱구멍의 황토마개 부삽으로 받아 냄	
14:39	1차 선철 출탕, 판장쇠바탕 7개 정도 채움, 판장쇠바탕에 받아낸 후 슬래그와 섞여 일부 출탕-모래(판장쇠바탕의 재료)로 출탕구 막음	
14:44	선철과 판장쇠바탕에서 빼냄, 다음 출탕시간 분광 100kg 장입 후 출탕하는 것으로 결정	중·소탄을 대탄으로 교체함으로 써 온도 30℃ 정도 상승
15:00~15:30	자문위원 영상회의	
15:30	2차 슬래그 배출, 선철 상부에 슬래그 얹혀 상태로 배출	
15:46	2차 선철 출탕 준비, 초롱구멍 막혀 있어 쇠창으로 뚫음	
15:54	2차 선철 출탕-선철과 슬래그 혼합된 채로 출탕	슬래그 예상외로 많음 - 슬래그 제대로 배출되지 않아 선철 상부에 슬래그 덮어 버린 것으로 추정
16:00	유출되던 슬래그의 속도 느려짐, 초롱구멍 막고 잡쇠구멍으로 슬래그 배출하자는 의견 제시 슬래그 제때 배출하지 않아 막혀 있던 슬래그 배출되었음	
16:07~16:30	출탕관련 현장회의(2차)	
16:24	골구멍에 막혀 있던 슬래그 제거	
16:50	초롱구멍 막는 과정에서 선철 한줄기 흘러 내림-초롱구멍 바로 막음	
16:50	잡쇠구멍 뚫어 슬래그 유출 시도(슬래그는 쇠창에 묻어 떨어지지 않을 정도로 끈적거림), 잡쇠구멍 하단까지 흘러내리지 않음(노 내부 온도가 낮은 현상), 대탄 장입하여 온도 상승시켜야 함	
17:08	골구멍 막혀 뚫음. 2차 선철 출탕 후 온도 계속 하강, 골구멍 막혀 송풍 원활하지 않음, 잡쇠구멍 뚫은 후 골구멍 뚫음	온도 하강 및 송풍 중지로 괴련철 형성될 가능성 있음

시간	실험 내용	비고
17:17	잡쇠구멍 뚫는 중 선철 출탕됨	
17:20	막힌 골구멍 뚫음, 송풍 시작	가마 내 온도 낮음, 온도 상승 위해 대탄 장입해 송풍 원활히 하여 온도 높이자는 의견 제시
17:41	잡쇠구멍 계속 막혀 뚫음, 골구멍 양호하나 잡쇠구멍 굳은 상태, 잡쇠구멍과 초롱구멍 확장하여 뚫음-굳어서 괴상의 슬래그 배출	
7:45~ 8:08	괴상 슬래그 배출 후 끈적거리는 슬래그 배출(3차 슬래그 배출), 가마 내 온도 상승 위해 대탄만 장입 중	
17:59	대탄만 장입 온도 상승시킨 후 소탄 및 중탄으로 조절, 잡쇠구멍 막으면 굳어짐, 계속 열린 상태 유지	슬래그에 포함된 산화칼슘이 철과 불순물 분리 용이하게 함. 초반에만 슬래그 넣어 광석과 불순물 분리하게 한 후 후반에 넣지 않는 것이 좋겠다는 의견 제시
18:10	3차 선철 출탕 위해 판장쇠바탕 굳히기	
18:35	2차 선철 출탕 후 3차 선철 출탕 전까지 광석 100kg 장입, 2차 선철 출탕 15:54 으로부터 2시간 경과	선철 출탕 전에 슬래그 배출부터 해야 함
18:38	슬래그 배출 준비, 잡쇠구멍 뚫음	
18:44	골구멍 막힘, 불꽃 약함. 슬래그량 증가로 골구멍 역류함	
19:00	마지막 광석 장입	광석 장입 후 2시간 송풍 후 출탕 예정, 마지막 출탕시간은 21:00경으로 예상
19:02	4차 슬래그 배출	
19:02	판장쇠에 황토덩어리(슬래그 배출시 유입) 들어가지 않게 판장쇠바탕 위에 덮개 덮음, 덮개 위에 흘러내린 황토 제거(청소) 후 출탕 예정	
19:10	출탕 준비	
19:17	3차 선철 출탕, 판장쇠바탕 위로 선철 넘 쳐흐름	
20:15	출탕관련 현장회의(3차)	
20:23	잡쇠구멍 뚫기	
20:27	5차 슬래그 배출	1~4차 슬래그 배출시 초반에 끈적거리는 형태, 점점 점도가 낮아져 흘러내림 좋아짐
20:38	초롱구멍 뚫기 시작, 쇠망치와 쇠창 이용, 잡쇠구멍으로 흘러내린 슬래그 뜨거워 흠으로 슬래그 덮어 열기 차단, 초롱구멍 약 15분간 뚫음, 초롱구멍 주변의 아궁이 일부 무너짐	
20:52	4차 선철 출탕, 선철 불꽃이 폭죽처럼 튀어 오름, 선철 출탕 후 슬래그 유출로 선철 상부 덮음, 슬래그 출탕구 막음, 슬래그 사이 가는 줄기의 선철 출탕	
20:59	온도센서 회수 시작, 센서 주변의 보강 황토 망치로 두드려 제거 후 온도계 회수	
21:00	주변 정리	

1-2 장입기록

시간	분광		목탄						슬래그		패각		비고
			대		중		소						
	투입량	총량	투입량	총량	투입량	총량	투입량	총량	투입량	총량	투입량	총량	
06:30			100	100									예열 시작
08:30			170	270									
09:10													송풍 시작
09:58			40	310									
10:19			20	330									
10:33			20	350									
10:50			20	370									
10:57							10						
11:00							10	20					
11:10	10	10							2	2			목탄 만장입
11:15					10	10	10	30					
11:25	10	20									2	2	
11:27					10	20	10	40					
11:37	10	30							2	4			
11:38					10	30	10	50					
11:59	10	40									2	4	
12:00							10	60					
12:10	10	50							2	6			
12:11			20	390	10	40							
12:20	10	60									2	6	
12:22					10	50	10	70					
12:39	10	70							2	8			
12:40					10	60	10	80					
12:51	10	80									2	8	
12:52					10	70	10	90					
13:02	10	90							2	10			
13:03					10	80	10	100					
13:13	10	100	20	410							2	10	
13:40	10	110							2	12			13:34 1차 슬래그 배출
13:41					10	90	10	110					
13:50	10	120									2	12	
13:51					10	100	10	120					
13:58	10	130							2	14			
13:59					10	110	10	130					
14:07	10	140									2	14	
14:08					10	120	10	140					
14:21	10	150							2	16			
14:22			20	430									
14:35	10	160									2	16	
14:36			20	450									
14:46	10	170							2	18			14:39 1차 출탕

시간	분광		목탄						슬래그		패각		비고
			대		중		소						
	투입량	총량	투입량	총량	투입량	총량	투입량	총량	투입량	총량	투입량	총량	
14:47			20	470									
14:58	10	180									2	18	
14:59					10	130	10	150					
15:13	10	190							2	20			
15:14					10	140	10	160					
15:25	10	200									2	20	
15:27					10	150	10	170					15:30 2차 슬래그 배출
15:40	10	210							2	22			슬래그 장입 종료
15:41					10	160	10	180					15:54 2차 출탕
16:00	10	220									2	22	
16:01			20	490									
16:30	10	230											
16:31					10	170	10	190					
16:40	10	240									2	24	
16:41					10	180	10	200					
16:55	10	250											
16:56			20	510									온도 상승 위해 대탄만 장입 결정
17:08	10	260									2	26	골구멍 막힘, 송풍 일시 중지
17:19			20	530									17:20 송풍 시작
17:36			20	550									
17:51			20	570									
17:58	10	270											17:45~18:08 3차 슬래그 배출
18:04			20	590									
18:13	10	280									2	28	
18:15			20	610									
18:29	10	290											
18:30			20	630									
18:42	10	300									2	30	패각 장입 종료
18:44			20	650									
19:00	10	310											분광 장입 종료
19:01			20	670									19:02 4차 슬래그 배출 19:17 3차 출탕
19:23			20	690									
19:44			20	710									
19:54			20	730									
20:06			20	750									
20:18			20	770									20:27 5차 슬래그 배출 20:52 4차 출탕
총장입량		310		770		180		200		22		30	

1-3 온도기록

시간	온도(℃)										비고
	1	2	3	4	5	6	전체 평균	상부 평균 (3, 6번)	중부 평균 (4, 5번)	하부 평균 (1, 2번)	
9:20	890	1067	636	799	704	498	766	567	752	979	5분 단위 기록
9:25	931	1157	747	879	793	570	846	659	836	1044	
9:30	937	1164	783	903	815	581	864	682	859	1051	
9:35	950	1171	744	939	847	580	872	662	893	1061	
9:40	974	1183	792	969	908	577	901	685	939	1079	
9:45	1002	1200	814	1005	944	618	931	716	975	1101	
9:50	1014	1207	855	1032	974	657	957	756	1003	1111	
9:55	1030	1226	870	1063	1007	702	983	786	1035	1128	
10:00	1053	1232	911	1105	1047	735	1014	823	1076	1143	온도 평균 1,000℃ 도달, 1시간 지속 후 철광석 장입
10:05	1076	1237	953	1121	1074	775	1039	864	1098	1157	
10:10	1079	1234	964	1129	1081	804	1049	884	1105	1157	
10:15	1126	1253	1009	1144	1101	869	1084	939	1123	1190	
10:20	1108	1241	1011	1170	1097	868	1083	940	1134	1175	
10:25	1142	1245	1019	1156	1111	869	1090	944	1134	1194	
10:30	1158	1256	1032	1179	1140	926	1115	979	1160	1207	
10:35	1145	1251	1053	1192	1145	931	1120	992	1169	1198	
10:40	1179	1269	1072	1208	1155	952	1139	1012	1182	1224	
10:45	1203	1278	1102	1231	1174	963	1159	1033	1203	1241	
10:50	1219	1294	1144	1257	1210	984	1185	1064	1234	1257	
10:55	1237	1302	1151	1260	1214	990	1192	1071	1237	1270	
11:00	1248	1313	1152	1269	1221	998	1200	1075	1245	1281	
11:05	1252	1316	1161	1266	1226	1005	1204	1083	1246	1284	
11:10	1270	1330	1142	1262	1219	1021	1207	1082	1241	1300	
11:15	1282	1333	1145	1254	1223	1024	1210	1085	1239	1308	
11:20	1285	1331	1148	1250	1223	1018	1209	1083	1237	1308	
11:25	1285	1347	1151	1262	1235	1024	1217	1088	1249	1316	
11:30	1279	1334	1135	1261	1238	999	1208	1067	1250	1307	
11:35	1290	1336	1142	1278	1264	1003	1219	1073	1271	1313	
11:40	1292	1331	1130	1275	1234	990	1209	1060	1255	1312	
11:45	1305	1212	1134	1278	1238	1013	1197	1074	1258	1259	
11:50	1323	1324	1134	1296	1255	1024	1226	1079	1276	1324	
11:55	1334	1333	—	1297	1283	1032	1256	1032	1290	1334	3번 온도센서 고장
12:00	1322	1326	—	1272	1266	988	1235	988	1269	1324	3번 온도센서 교체
12:05	1329	1344	—	1292	1257	1028	1250	1028	1275	1337	
12:10	1309	1321	971	1262	1224	984	1179	978	1243	1315	
12:15	1327	1330	1126	1265	1240	998	1214	1062	1253	1329	

시간	온도(℃)										비고
	1	2	3	4	5	6	전체 평균	상부 평균 (3, 6번)	중부 평균 (4, 5번)	하부 평균 (1, 2번)	
12:20	1333	1336	1112	1278	1254	1008	1220	1060	1266	1335	
12:25	1315	1313	1099	1246	1319	956	1208	1028	1283	1314	
12:30	1325	1313	1128	1255	1229	967	1203	1048	1242	1319	
12:35	1328	1316	1124	1264	1239	972	1207	1048	1252	1322	
12:40	1322	1311	1085	1234	1215	933	1183	1009	1225	1317	
12:45	1322	1310	1091	1231	1233	925	1185	1008	1232	1316	
12:50	1321	1310	1105	1237	1221	938	1189	1022	1229	1316	
12:55	1312	1306	1095	1226	1203	927	1178	1011	1215	1309	
13:00	1315	1308	1106	1234	1217	926	1184	1016	1226	1312	
13:05	1320	1305	1097	1216	1190	886	1169	992	1203	1313	
13:10	1330	1308	1097	1212	1199	888	1172	993	1206	1319	
13:15	1325	1301	1090	1199	1189	869	1162	980	1194	1313	
13:20	1329	1300	1079	1204	1190	868	1162	974	1197	1315	
13:25	1324	1299	1070	1206	1203	867	1162	969	1205	1312	
13:30	1322	1295	1063	1207	1218	866	1162	965	1213	1309	
13:35	1306	1284	1058	1188	1183	839	1143	949	1186	1295	
13:40	1315	1280	1069	1204	1218	858	1157	964	1211	1298	
13:45	1317	1288	1082	1216	1223	857	1164	970	1220	1303	
13:50	1315	1306	1075	1211	1175	857	1157	966	1193	1311	
13:55	1338	1314	1091	1230	1191	868	1172	980	1211	1326	
14:00	1328	1316	1079	1205	1164	850	1157	965	1185	1322	
14:05	1331	1321	1085	1222	1172	858	1165	972	1197	1326	
14:10	1332	1318	1091	1221	1171	859	1165	975	1196	1325	
14:15	1337	1321	1096	1220	1182	892	1175	994	1201	1329	
14:20	1340	1320	1101	1227	1178	896	1177	999	1203	1330	
14:25	1340	1316	1105	1226	1171	874	1172	990	1199	1328	
14:30	1341	1321	1107	1246	1173	881	1178	994	1210	1331	
14:35	1338	1327	1117	1269	1190	883	1187	1000	1230	1333	
14:40	1338	1333	1139	1282	1227	888	1201	1014	1255	1336	
14:45	1340	1346	1114	1299	1264	898	1210	1006	1282	1343	
14:50	1338	1348	1107	1298	1265	884	1207	996	1282	1343	
14:55	1336	1346	1099	1292	1259	880	1202	990	1276	1341	
15:00	1326	1333	1085	1278	1244	852	1186	969	1261	1330	
15:05	1323	1326	1081	1280	1241	858	1185	970	1261	1325	
15:10	1319	1326	1077	1275	1235	855	1181	966	1255	1323	
15:15	1316	1321	1091	1265	1229	864	1181	978	1247	1319	
15:20	1315	1318	1118	1271	1245	884	1192	1001	1258	1317	
15:25	1315	1315	1115	1265	1243	878	1189	997	1254	1315	
15:30	1315	1316	1109	1261	1241	870	1185	990	1251	1316	

시간	온도(℃)										비고
	1	2	3	4	5	6	전체 평균	상부 평균 (3, 6번)	중부 평균 (4, 5번)	하부 평균 (1, 2번)	
15:35	1314	1311	1098	1255	1235	881	1182	990	1245	1313	
15:40	1310	1311	1092	1255	1221	852	1174	972	1238	1311	
15:45	1307	1311	1097	1255	1222	848	1173	973	1239	1309	
15:50	1304	1308	1103	1246	1229	849	1173	976	1238	1306	
15:55	1300	1313	1090	1248	1239	850	1173	970	1244	1307	
16:00	1294	1310	1089	1242	1236	850	1170	970	1239	1302	
16:05	1291	1307	1090	1237	1262	846	1172	968	1250	1299	
16:10	1290	1306	1091	1233	1261	843	1171	967	1247	1298	
16:15	1291	1295	1086	1212	1214	840	1156	963	1213	1293	
16:20	1291	1295	1075	1204	1204	836	1151	956	1204	1293	
16:25	1266	1280	1043	1180	1170	827	1128	935	1175	1273	
16:30	1264	1278	1040	1178	1167	826	1126	933	1173	1271	
16:35	1266	1286	1075	1182	1187	855	1142	965	1185	1276	
16:40	1271	1299	1087	1198	1207	869	1155	978	1203	1285	
16:45	1274	1300	1079	1188	1213	869	1154	974	1201	1287	
16:50	1276	1296	1068	1190	1240	876	1158	972	1215	1286	
16:55	1276	1289	1072	1211	1259	887	1166	980	1235	1283	
17:00	1276	1291	1075	1212	1258	882	1166	979	1235	1284	
17:05	1275	1287	1064	1210	1247	870	1159	967	1229	1281	
17:10	1273	1280	1072	1182	1228	844	1147	958	1205	1277	
17:15	1269	1268	1053	1166	1199	828	1131	941	1183	1269	
17:20	1263	1258	1039	1158	1185	823	1121	931	1172	1261	
17:25	1261	1256	1059	1181	1214	854	1138	957	1198	1259	
17:30	1270	1256	1064	1197	1251	866	1151	965	1224	1263	
17:35	1273	1254	1060	1202	1267	867	1154	964	1235	1264	
17:40	1270	1249	1075	1210	1256	866	1154	971	1233	1260	
17:45	1271	1251	1083	1241	1276	879	1167	981	1259	1261	
17:50	1272	1258	1087	1281	1295	892	1181	990	1288	1265	
17:55	1272	1261	1079	1281	1299	904	1183	992	1290	1267	
18:00	1271	1266	1088	1275	1303	911	1186	1000	1289	1269	
18:05	1273	1269	1099	1274	1295	909	1187	1004	1285	1271	
18:10	1274	1273	1104	1276	1292	920	1190	1012	1284	1274	
18:15	1277	1283	1126	1291	1312	929	1203	1028	1302	1280	
18:20	1279	1290	1135	1286	1327	925	1207	1030	1307	1285	
18:25	1282	1293	1137	1300	1340	933	1214	1035	1320	1288	
18:30	1284	1298	1137	1308	1345	945	1220	1041	1327	1291	
18:35	1284	1301	1127	1294	1348	929	1214	1028	1321	1293	
18:40	1284	1302	1125	1303	1343	933	1215	1029	1323	1293	
18:45	1283	1301	1126	1308	1331	926	1213	1026	1320	1292	

시간	온도(℃)										비고
	1	2	3	4	5	6	전체 평균	상부 평균 (3, 6번)	중부 평균 (4, 5번)	하부 평균 (1, 2번)	
18:50	1280	1295	1111	1312	1299	904	1200	1008	1306	1288	
18:55	1280	1294	1114	1311	1303	910	1202	1012	1307	1287	
19:00	1279	1292	1114	1308	1327	912	1205	1013	1318	1286	
19:05	1279	1293	1113	1319	1335	909	1208	1011	1327	1286	
19:10	1278	1295	1112	1307	1338	929	1210	1021	1323	1287	
19:15	1277	1296	1114	1294	1334	927	1207	1021	1314	1287	
19:20	1275	1296	1125	1301	1313	935	1208	1030	1307	1286	
19:25	1275	1296	1123	1301	1312	936	1207	1030	1307	1286	
19:30	1274	1297	1119	1293	1305	940	1205	1030	1299	1286	
19:35	1275	1295	1130	1297	1297	948	1207	1039	1297	1285	
19:40	1275	1293	1136	1293	1297	952	1208	1044	1295	1284	
19:45	1274	1294	1134	1296	1302	964	1211	1049	1299	1284	
19:50	1276	1296	1135	1294	1308	981	1215	1058	1301	1286	
19:55	1275	1296	1142	1290	1311	972	1214	1057	1301	1286	
20:00	1276	1301	1154	1324	1319	997	1229	1076	1322	1289	
20:05	1276	1301	1151	1325	1319	1000	1229	1076	1322	1289	
20:10	1277	1304	1150	1330	1319	1003	1231	1077	1325	1291	
20:15	1278	1307	1164	1338	1326	1014	1238	1089	1332	1293	
20:20	1278	1307	1167	1329	1321	1012	1236	1090	1325	1293	
20:25	1278	1310	1172	1331	1322	1020	1239	1096	1327	1294	
20:30	1280	1311	1172	1325	1318	1026	1239	1099	1322	1296	
20:35	1278	1311	1182	1312	1315	1024	1237	1103	1314	1295	
20:40	1277	1309	1190	1307	1312	1027	1237	1109	1310	1293	
20:45	1275	1309	1182	1304	1307	1028	1234	1105	1306	1292	
20:50	1275	1308	1180	1308	1307	1028	1234	1104	1308	1292	
20:55	1275	1306	1175	1313	1310	1027	1234	1101	1312	1291	
20:57	1274	1306	1187	1313	1310	1203	1266	1195	1312	1290	온도센서 분리
평균	1264	1292	1083	1234	1222	900	1166	991	1228	1278	온도센서 7개 사용(4개 고장)

2 2020 울산쇠부리축제 제철복원실험의 금속학적 분석

신경환²⁹⁾ · 이재용³⁰⁾

I. 분석대상 시료의 성격

1. 분석시료의 성격

원료는 배소처리 후 자력선별 전후의 철광석(분광)을 구분하여 채취하였고 이 철광석(분광)과 비교를 위하여 울산 대안동 쇠부리터 유적의 제련로 주위의 토철 저장소에서 채취된 토철과 이 토철을 수세과정을 거쳐 선광된 토철을 채취하여 분석하였다.

실험중에는 초롱구멍을 통해 출탕을 실시하며 생성되는 선철과 철재를 4차에 걸쳐 차수별로 구분하여 채취하고 배재구를 통해 유출되는 유출재와 선철을 6차에 걸쳐 구분하여 채취하였다.

실험중 송풍관확인 과정에서 용손된 송풍관편을 용손의 원인을 파악하고자 채취하였다. 실험완료 후 노냉을 거쳐 생성된 생성물에 대해 바닥층, 슬래그층, 선철층으로 나누어 시료를 채취하고 용손된 노벽을 좌우로 나누어 채취하였다.

시료번호	명칭	출토위치	크기(cm)			무게(g)	사진
			길이	너비	높이		
20U-4	배소 철광석	복원 실험장	-	-	-	-	
20U-8	배소 철광석 2차선별	복원 실험장	-	-	-	-	

29) 금속기술연구소장

30) 금속기술연구소 선임연구원

시료번호	명칭	출토위치	크기(cm)			무게(g)	사진
			길이	너비	높이		
20U-T0	토철 (절개지 채취)	울산 대안동 쇠부리터 북동쪽 토철 저장소	-	-	-	-	
20U-D1	토철 (토층 채취 자력선별)	울산 대안동 쇠부리터 북동쪽 토철 저장소	-	-	-	-	
20U-D2	토철 (토층 채취 자선, 수세)	울산 대안동 쇠부리터 북동쪽 토철 저장소	-	-	-	-	
20U-12	판장쇠용선	1차 출탕	16	5.0	5.0	223	
20U-13	철재	1차 출탕	5.7	4.7	3.0	105	
20U-14-1	선철	2차 출탕	6.2	2.8	1.6	50	
20U-14-2	철재	2차 출탕	8.2	5.5	4.2	118	
20U-15-1	선철	3차 출탕	4.7	2.3	1.2	24	

시료번호	명칭	출토위치	크기(cm)			무게(g)	사진
			길이	너비	높이		
20U-15-2	철재	3차 출탕	5.0	5.5	4.0	112	
20U-16	선철	4차 출탕	7.0	1.7	1.0	46	
20U-17	철재	1차 유출(1)	9.0	9.0	4.0	304	
20U-18	구형선철	1차 유출	1.4	1.2	0.7	5	
20U-19	선철	2차 유출	10.8	1.7	1.0	46	
20U-20	선철	3차 유출	7.4	5.3	2.2	117	
20U-21	철재	4차 유출	5.5	5.5	4.0	82	
20U-22	철재	5차 유출	5.5	3.7	3.0	55	

시료번호	명칭	출토위치	크기(cm)			무게(g)	사진
			길이	너비	높이		
20U-23-1	철재(녹색)	6차 유출	6.0	3.0	1.5	30	
20U-23-2	철재(흑색)	6차 유출	5.2	3.5	1.7	31	
20U-24	철재	송풍관	16.5	10.5	7.5	938	
20U-26	철재	1차 유출(2)	5.0	4.0	3.0	123	
20U-27-1	철재 (기포 다수)	2차 유출	8.0	6.0	3.5	183	
20U-27-2	철재 (기포 없음)	2차 유출	6.0	6.7	3.0	134	
20U-28	철재	형성물- 노벽 경계	8.0	4.7	3.5	89	
20U-29	철재	노바닥	3.0	2.0	0.7	5	

시료번호	명칭	출토위치	크기(cm)			무게(g)	사진
			길이	너비	높이		
20U-30	선철	슬래그대	3.5	2.5	1.0	7	
20U-31	괴련철	송풍구앞 선철대	2.7	1.5	1.3	11	
20U-32	노벽 용손(1)	좌측뒤편 송풍관 위쪽	14.0	10.0	5.0	891	
20U-33	노벽 용손(2)	우측 앞 배재구쪽	9.0	8.5	6.0	357	
20U-34	철재	형성물 상부	6.3	5.5	3.0	62	
20U-35	철재	형성물 하부	7.7	6.9	5.5	187	
20U-37-1	선철	노하부	5.5	4.3	1.0	50	
20U-37-2	철재						
20U-38	노벽	좌측	7.5	5.5	2.7	70	

시료번호	명칭	출토위치	크기(cm)			무게(g)	사진
			길이	너비	높이		
20U-39	노벽	우측	10.0	6.0	5.0	223	
20U-40	선철	형성물 상부	2.8	2.4	1.5	29	

〈표 20〉 분석대상 시료의 성격

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 만들고, Nikon MA200 금속현미경을 이용해 미세조직을 관찰한 후 주사전자현미경(hitachi SU-1500)을 통해 재조사하였다. SEM촬영을 위해서 코팅기(HITACHI E1010)를 이용해 시편의 표면을 코팅하였다. SEM에서 관찰된 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 μ m 이하의 분말로 만들고, 이를 150 $^{\circ}$ C 건조기에서 90분 동안 건조시켰다. 시료분말, Flux(Li3B4O7) 및 Binder(C80, H159O53B)를 5:2:3의 비율로 섞어 알루미늄 캡에 넣고 40톤의 압력으로 압축시켜 Pressed Pellet를 완성하였다.

III. 분석결과

1. 원료 철광석

원료 철광석은 배소과정을 거쳐 실험에 사용되었고 배소된 철광석을 먼지만 제거한 시료(20U-4)와 두 번의 자력선별을 거친 시료(20U-8)를 분석 하였다.

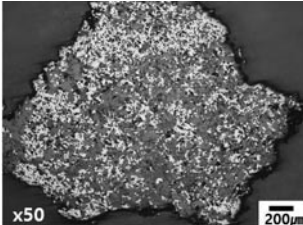
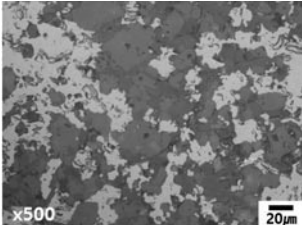
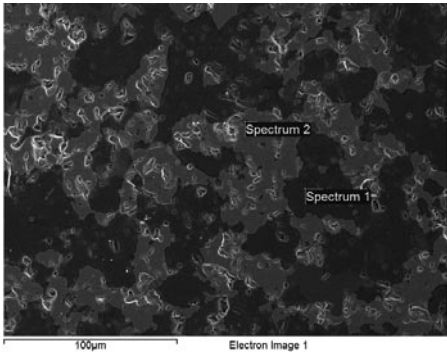
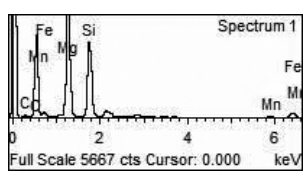
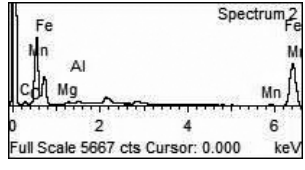
또한 울산 대안동 쇄부리터 토철 시료를 원료철광석과 비교하기 위해 분석을 실시하였다. 대안동 쇄부리터 북동쪽 토철 저장소에서 절개면에서 채취한 시료(20U-TO)와 저장소 토층에서 채취한 토철을 1차 자력선별한 토철(20U-D1)과 자력선별 된 토철을 수회에 걸쳐 세척을 실시한 시편(20U-D2)로 구분하여 분석을 실시하였다.

1.1 배소철광석(20U-4)의 분석결과

성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	As ₂ O ₃
20U-4	43.54	25.03	3.04	6.91	0.38	18.02	1.13	0.11	1.21	—

〈표 21〉 배소철광석(20U-4)의 XRF 분석결과(조성의 단위는 wt%)

1.2 배소철광석(20U-8)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	8.40	4.88	38.46	—	26.30	—	19.69	—	—	—	2.28
②	69.17	4.02	24.91	—	0.59	0.45	—	—	—	—	0.89

XRF(wt%)										
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
조성	42.91	25.71	2.29	3.40	0.11	23.46	0.67	0.10	0.06	1.07

〈표 22〉 배소철광석(20U-8)의 분석결과

배소 후 2차에 걸쳐 자력 선광된 시료(20U-8)의 XRF 분석결과는 비교적 낮은 철함량(42.91%FeO)이며 이 철광석(분광)에는 염기성 산화물인 MgO(23.46%) 및 CaO(3.40%)가 함유하고 있어서 제련시에 염기도를 높여주는 역할을 할 것으로 판단된다. 이것은 사문석의 성분이 나타나고 있다. 철광석의 주요 복합산화물은 (MgO·SiO₂) 및 Fayalite(Fe₂SiO₄)로 구성되어 있다.

1.2 토철(20U-D1,D2,TO)의 분석결과

원래 조선시대 석축형 제철로에 사용된 토철은 광산에서 흙으로 파낸 것으로 인근 골짜기에서 세척을 하여 선광하였고 선광된 사철(비중이 큰 토철)은 예비 배소를 실시하여 맥석을 분리하여 철광석 함량을 약 40%정도로 높여서 사용하였다. 이는 구충당 이의립(1621-1694)의 조감도에는 “세철지(洗鐵池)”로 표기 되어 있다.

성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	As ₂ O ₃
20U-TO	32.44	45.95	11.04	4.88	0.38	1.07	1.60	0.46	0.19	1.23	0.32
20U-D1	16.37	60.05	16.12	0.89	0.59	1.56	2.43	0.91	0.22	0.40	0.14
20U-D2	26.74	52.34	13.72	0.94	0.57	1.40	1.96	0.63	0.21	0.39	0.48

〈표 23〉 토철(20U-TO, D1, D2)의 XRF 분석결과(조성의 단위는 wt%)

2. 유출 생성물

유출 생성물은 복원실험 중 배재구를 통해 유출되는 철재와 선철을 차수별로 구분하여 시편을 채취하고 시료 분석을 실시하였다.

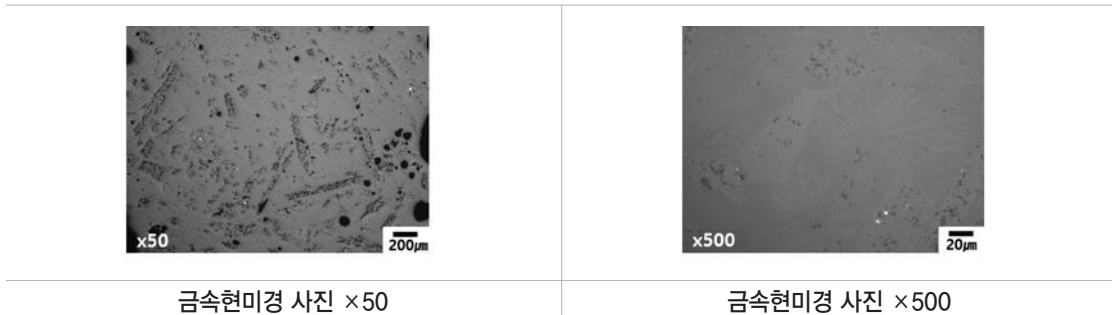
2.1 1차 유출 철재 1 (20U-17)

1) 시료의 채취

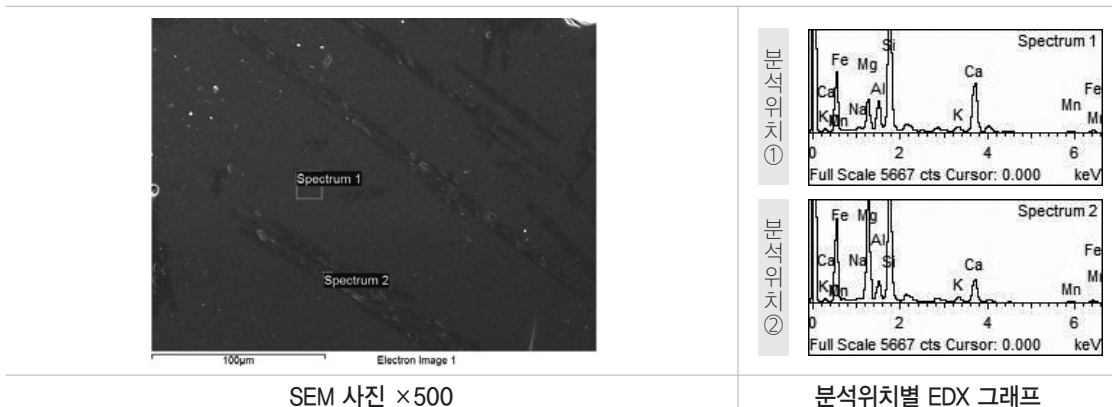


〈사진 117〉 1차 유출 철재 1 (20U-17)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과



SEM-EDX(wt%)



분석위치	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	3.16	—	39.68	0.53	5.60	5.13	23.64	1.74	18.93	—	1.59
②	2.88	—	40.78	0.48	17.55	3.59	22.48	1.79	8.70	—	1.75

XRF(wt%)										
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
조성	5.43	43.00	6.03	16.22	0.56	23.98	1.83	0.31	0.07	2.19

〈표 24〉 1차 유출 철재 1 (20U-17)의 분석결과

제1차 유출 철재의 현미경조직은 유리질 철재이며 전자현미경(SEM-EDX)분석의 Spectrum-①,②에서 철(Fe)함량이 2.88-3.16%Fe로 낮은 것은 환원이 잘 이루어진 결과이며 XRF분석에서 염기도는 $(CaO+MgO+K_2O)/(SiO_2)=0.98$ 로서 염기성 슬래그의 조성을 유지하고 있었다. 주요 조성은 $(MgO \cdot SiO_2)$ 와 $(CaO \cdot SiO_2)$ 으로 구성 되어 있다.

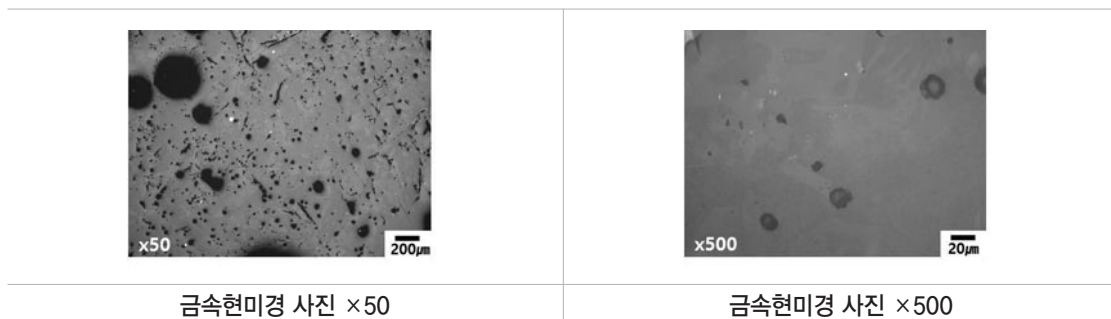
2.2 1차 유출 철재 2 (20U-26)

1) 시료의 채취

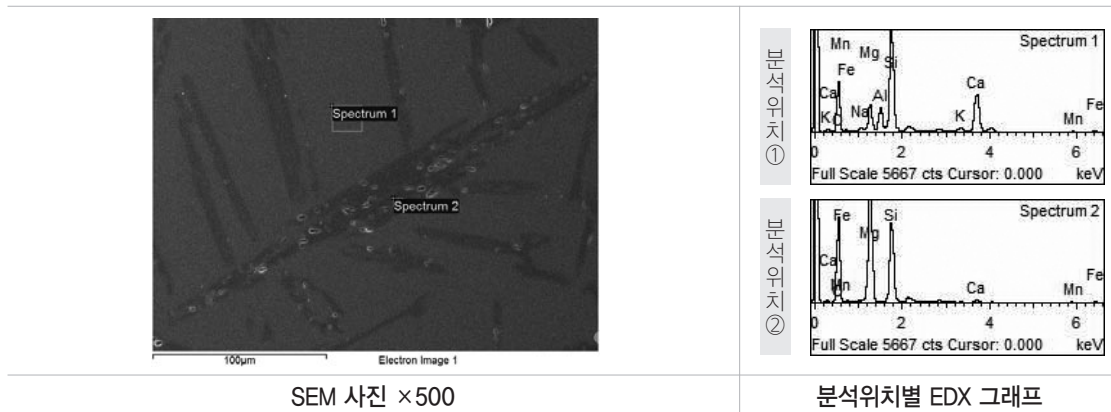


〈사진 118〉 1차 유출 철재 2 (20U-26)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과



SEM-EDX(wt%)



분석위치	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	1.87	—	41.38	0.72	5.88	5.00	23.81	1.66	18.35	—	1.32
②	2.35	—	41.53	—	32.11	—	21.64	—	1.15	—	1.22

XRF(wt%)										
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
조성	6.05	44.10	6.32	16.19	0.63	22.03	2.00	0.31	0.10	1.98

〈표 25〉 1차 유출 철재 2 (20U-26)의 분석결과

제1차 유출철재중 기포가 형성된 슬래그의 현미경조직도 유리질 슬래그이며 전자현미경 (SEM-EDX)분석 Spectrum-①,②에서 철함량(1.87-2.35%Fe)이 극히 낮은 것은 환원이 잘 이루어진 것이며 XRF분석에서도 같은 현상으로 낮은 철산화물(6.05%Fe)을 형성하고 있다. 특히 XRF 분석에서 염기도는 $(CaO+MgO+K_2O)/SiO_2=0.84$ 로 염기성 슬래그에 가까운 슬래그가 철회수율을 높여준 것으로 보인다. 여기서도 주요성분이 앞선 유출재1과 같은 $(MgO \cdot SiO_2)$ 와 $(CaO \cdot SiO_2)$ 로 구성되어 있다.

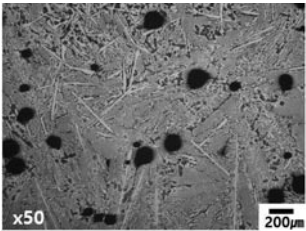
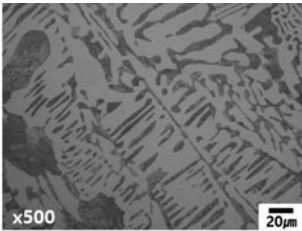
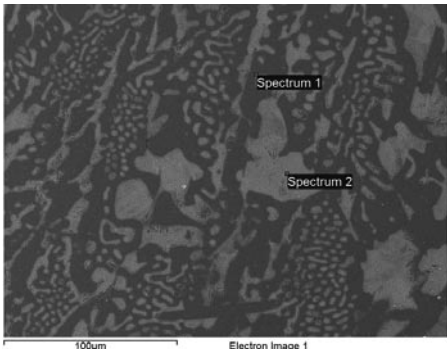
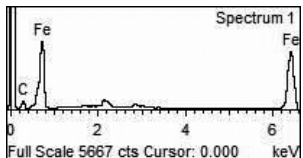
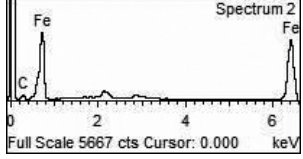
2.3 1차 유출 구형 선철(20U-18)

1) 시료의 채취

	
① 절단 위치	② 절단면

〈사진 119〉 1차 유출 구형 선철 (20U-18)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

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

분석위치	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	88.99	11.01	—	—	—	—	—	—	—	—	—
②	92.47	7.53	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C/S(wt%)											
성분				C				S			
조성				4.25				0.06			
경도(HMV)											
회수	1			2			3			평균	
Pearlite	379			358			350			362	
Cementite	640			616			628			628	

〈표 26〉 1차 유출 구형 선철(20U-18)의 분석결과

제1차 유출 생성물중에 구형 선철은 현미경상으로 백주철 조직이며 전자현미경(SEM-EDX)의 Spectrum-①,②에서는 과공정의 백주철의 조성을 갖고 있다. C/S분석결과 공정 백주철에 접근하는 조직이며 유출 후 급냉되어 흑연의 생성은 없었다. 이는 초기에 형성되는 용융선철 방울이 노하부에 모여서 선철 풀을 형성한다.

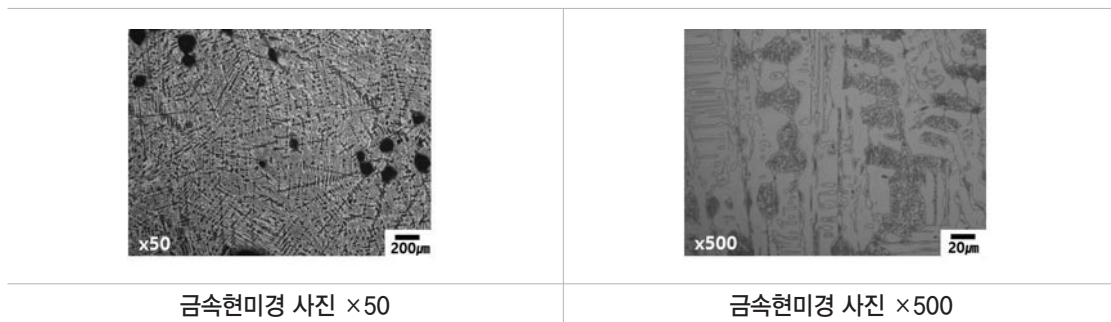
2.4 2차 유출 선철(20U-19)

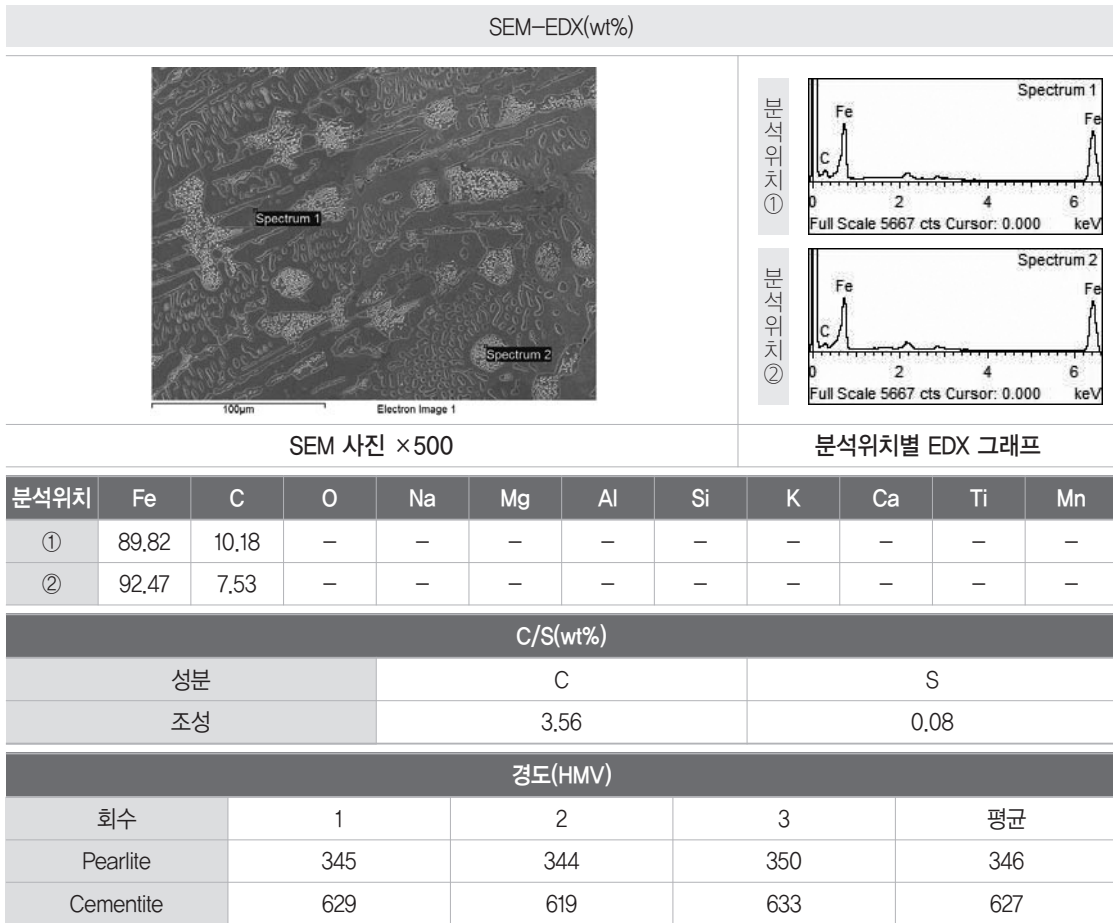
1) 시료의 채취



〈사진 120〉 2차 유출 선철(20U-19)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과





〈표 27〉 2차 유출 선철(20U-19)의 분석결과

제2차 유출 선철의 현미경조직은 수지상의 Dendrite 조직으로 백주철 조직이고 현미경 경도에서도 고경도의 값(627HMV)을 나타내고 있다. 전자현미경(SEM-EDX)조직에서 과공정 백주철의 조성을 형성하고 있으나 C/S 분석에서는 아공정 백주철조성(3.56%C)이며 전반적으로 급냉 조직으로서 흑연의 형성은 없었다.

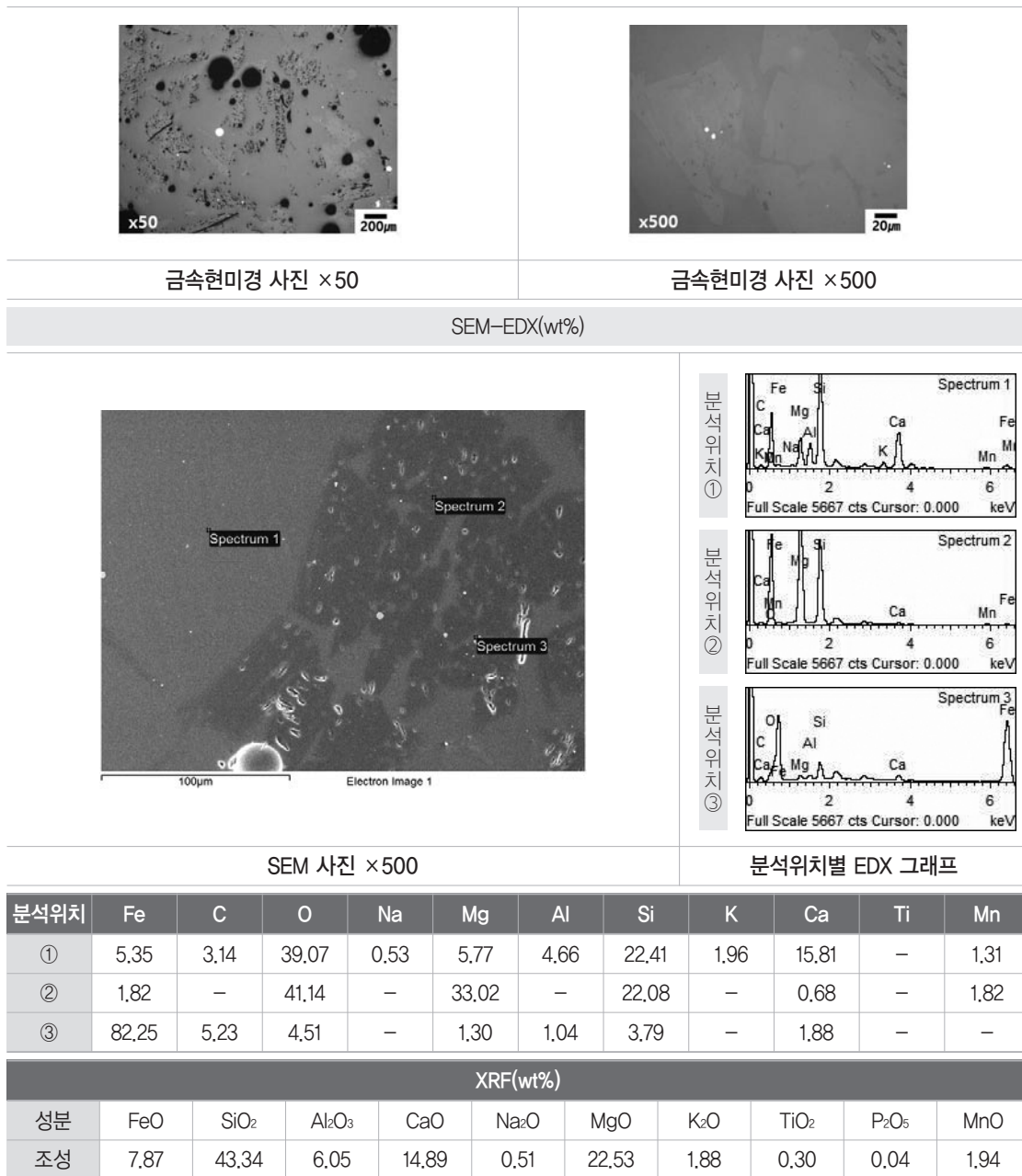
2.5 2차 유출 철재-기공다수(20U-27-1)

1) 시료의 채취



〈사진 121〉 2차 유출 철재-기공다수(20U-27-1)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석 결과



〈표 28〉 2차 유출 철재-기공다수(20U-27-1)의 분석결과

제2차 유출 철재의 현미경조직은 다공질의 유리질 슬래그이고 전자현미경(SEM-EDX)분석 Spectrum-①,②에서는 산화철 함량이 낮은 1.82-5.35%Fe의 슬래그가 기지조직을 형성하고 또한 고탄소 선철(Fe-5.23%C)도 잔존하고 있다 XRF분석에서 환원이 잘되어 낮은 FeO 함량이 형성되고 염기도에 있어서도 $(CaO+MgO+K_2O)/SiO_2=0.91$ 의 비교적 높은 염기도를 형성하며 철회수율이 높았던 것으로 보인다. 그리고 슬래그의 주요 조성은 $(MgO \cdot SiO_2)$ 및 $(CaO \cdot SiO_2)$ 로 나타난다.

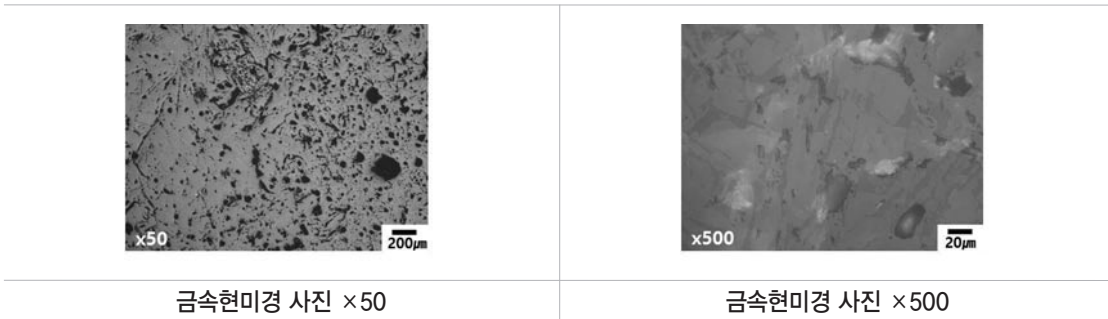
2.6 2차 유출 철재-기공소수(20U-27-2)

1) 시료의 채취

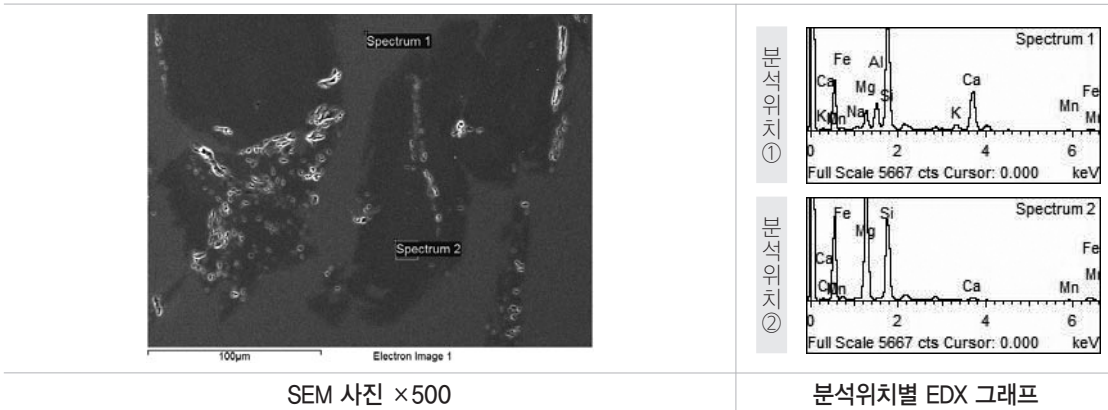


〈사진 122〉 2차 유출 철재-기공소수(20U-27-2)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석 결과



SEM-EDX(wt%)



분석위치	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	3.62	—	39.84	0.72	3.91	5.56	24.97	2.24	17.87	—	1.27
②	5.65	4.32	38.93	—	28.52	—	20.24	—	1.15	—	1.19

XRF(wt%)										
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
조성	8.13	44.66	6.48	12.98	0.62	22.40	2.16	0.30	0.04	2.03

〈표 29〉 2차 유출 철재-기공소수(20U-27-2)의 분석결과

제2차 유출 철재의 현미경조직은 비교적 기공이 적은 슬래그였으며 전자현미경(SEM-EDX)분석에서 낮은 철(Fe) 함량으로 높은 환원성 슬래그가 형성되었다. XRF분석에서도 철 산화물(FeO)의 함량은 낮았고 염기도는 $(CaO+MgO+K_2O)/SiO_2=0.85$ 로 유지되어 철회수율이 높게 형성되는 슬래그를 유지하였다. 슬래그의 주요 조성은 $(MgO \cdot SiO_2)$ 및 $(CaO \cdot SiO_2)$ 로 구성되어 있다.

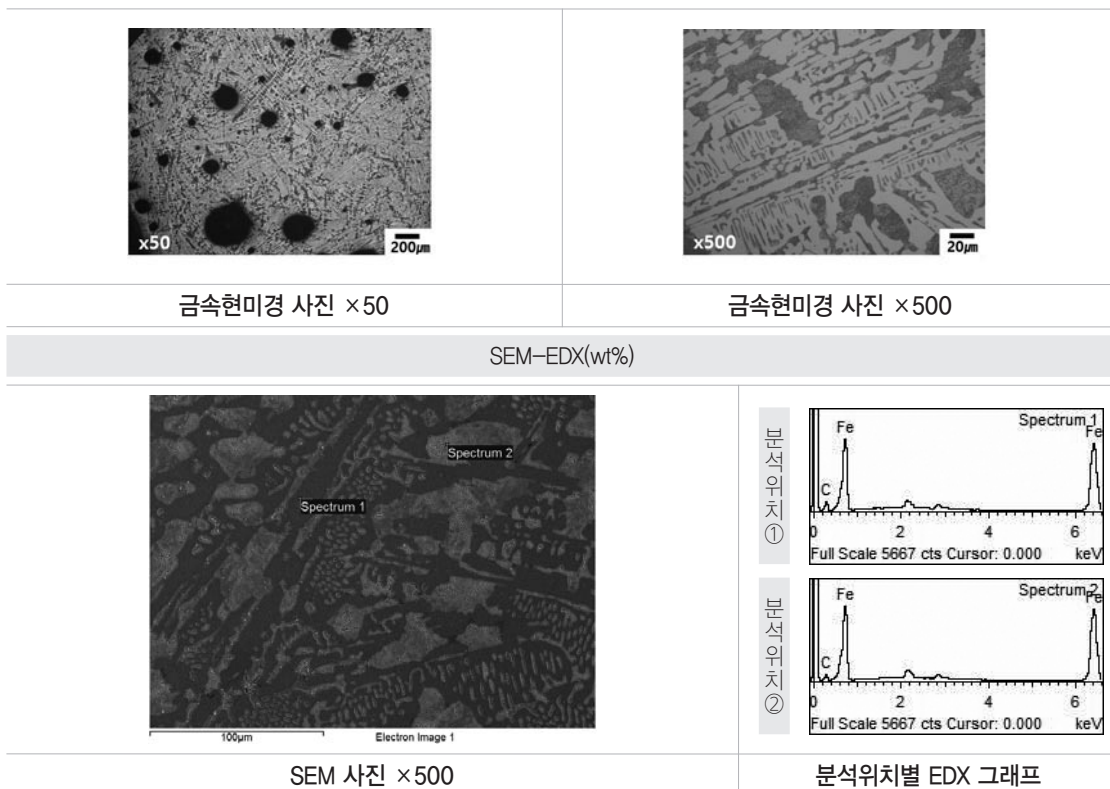
2.7 3차 유출 선철(20U-20)

1) 시료의 채취



〈사진 123〉 3차 유출 선철(20U-20)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과



분석위치	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	89.84	10.16	—	—	—	—	—	—	—	—	—
②	93.28	6.72	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C/S(wt%)											
성분				C				S			
조성				4.00				0.09			
경도(HMV)											
회수	1			2			3			평균	
Pearlite	373			365			358			365	
Cementite	603			627			617			616	

〈표 30〉 3차 유출 선철(20U-20)의 분석결과

제3차 유출 철재와 동반하여 유출된 선철의 현미경조직은 Ledeburite 형의 백주철 조직이며 전자현미경(SEM-EDX)분석 Spectrum-①,②에서는 고탄소의 과공정 백주철 조성이었다. C/S분석에서는 공정선철(4.00%C)에 접근하는 조성이며 현미경 경도 시험에서도 백주철의 높은 경도 값을 갖는다. 냉각속도가 빨라서 흑연이 형성은 이루어지지 않았다.

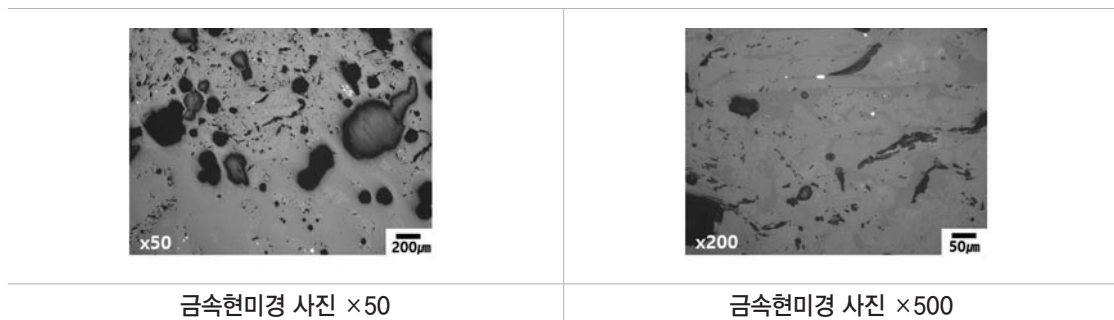
2.8 4차 유출 철재(20U-21)

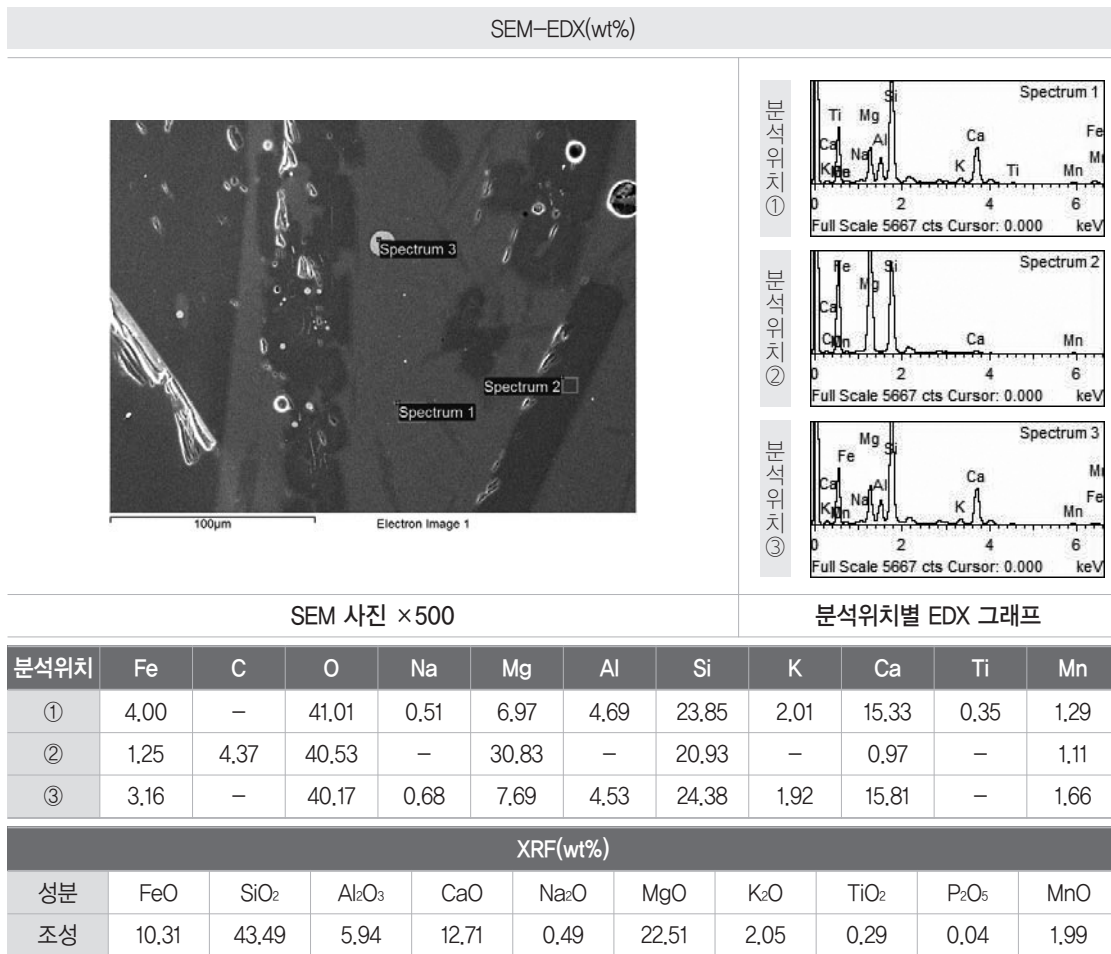
1) 시료의 채취



〈사진 124〉 4차 유출 철재(20U-21)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과





〈표 31〉 4차 유출 철재(20U-21)의 분석결과

기공이 잔존하는 제4차 유출 철재의 현미경조직분석결과 기지조직은 유리질이고 전자현미경(SEM-EDX)분석 Spectrum-①,②에서 낮은 철(Fe) 함량(1.25~4%)으로 환원이 잘된 것 같으며 XRF분석에서 염기도는 $(CaO+MgO+K_2O)/SiO_2=0.86$ 으로 비교적 높아서 환원이 잘 이루어진 것으로 보인다. 슬래그의 주요 조성은 $(MgO \cdot SiO_2)$ 및 $(CaO \cdot SiO_2)$ 로 나타난다.

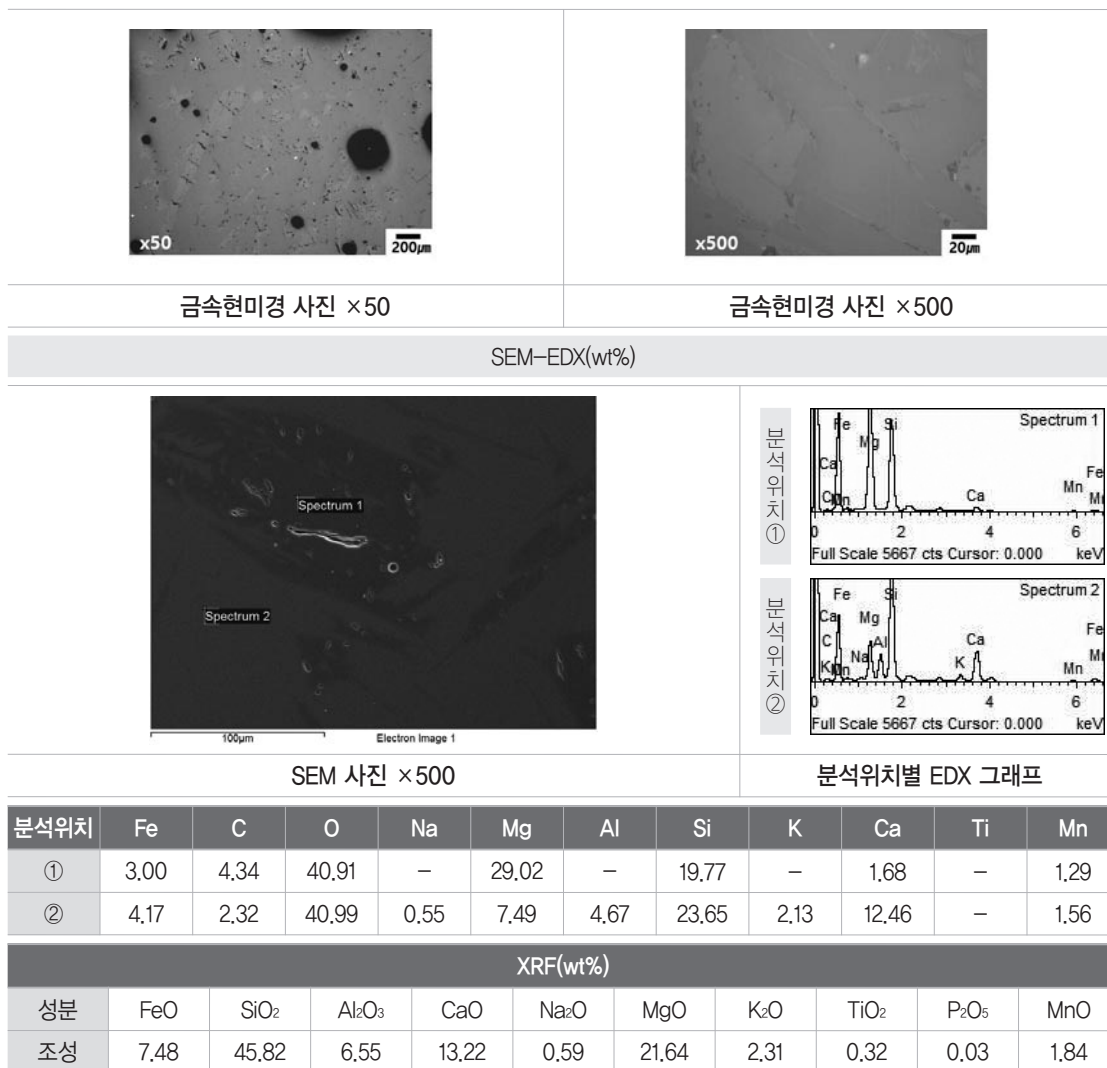
2.9 5차 유출 철재(20U-22)

1) 시료의 채취



〈사진 125〉 5차 유출 철재(20U-22)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과



〈표 32〉 2차 유출 철재-기공소수(20U-27-2)의 분석결과

제5차 유출 철재의 현미경조직은 기공이 없는 유리질 조직으로 형성되고 전자현미경 (SEM-EDX)분석 Spectrum-①,②에서 낮은 철(Fe) 함량(3.00-4.17%)으로 환원이 잘 이루어진 슬래그였다. XRF분석에서도 철산화물(FeO)함량(7.48%FeO)이 낮고 염기도는 $(CaO+MgO+K_2O)/SiO_2=0.81$ 로서 약 염기성의 조성을 보이고 있다. 슬래그의 주요 조성은 $(MgO \cdot SiO_2)$ 및 $(CaO \cdot SiO_2)$ 로 나타난다.

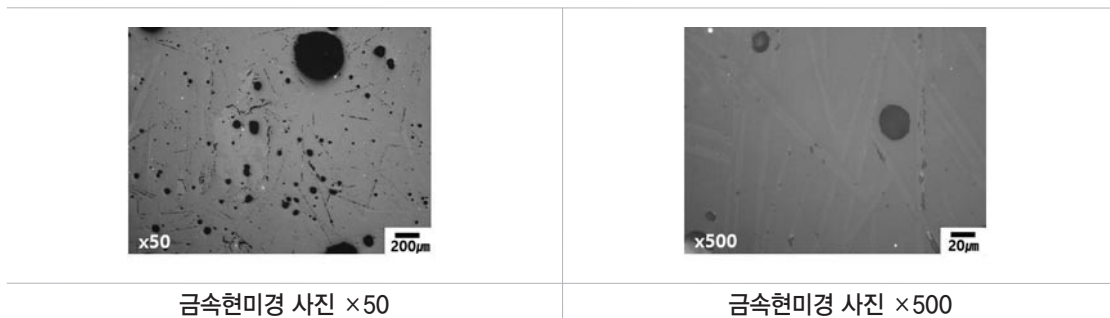
2.10 6차 유출 철재-녹색(20U-23-1)

1) 시료의 채취



〈사진 126〉 6차 유출 철재-녹색(20U-23-1)의 절단면 위치와 절단면

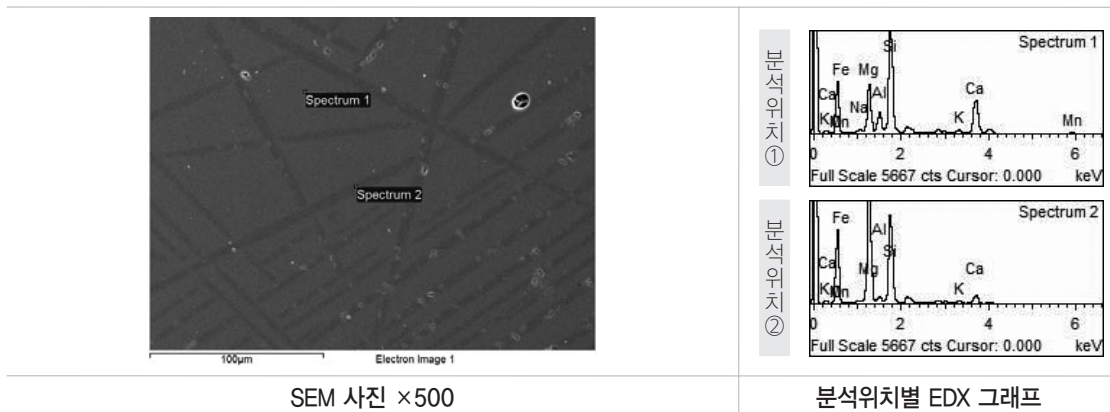
2) 분석결과



금속현미경 사진 ×50

금속현미경 사진 ×500

SEM-EDX(wt%)



SEM 사진 ×500

분석위치별 EDX 그래프

분석위치	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	1.24	—	40.24	0.53	10.31	4.15	24.63	1.34	16.11	—	1.46
②	1.15	—	40.97	—	27.04	1.51	23.10	1.05	4.02	—	1.16

XRF(wt%)

성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
조성	2.29	47.26	6.75	15.89	0.57	22.85	2.05	0.34	—	1.78

〈표 33〉 6차 유출 철재-녹색(20U-23-1)의 분석결과

녹색을 띠는 제6차 유출 철재의 현미경조직은 유리질이었으며 전자현미경(SEM-EDX)분석 Spectrum-①,②에서 매우 낮은 철함량(1.24-1.25%Fe) 환원이 매우 잘 이루어진 슬래그로 판단되며 동시에 XRF분석에서도 철산화물(FeO) 함량(2.29%FeO)로서 환원이 잘된 것으로 판단된다. 염기도는 $(CaO+MgO+K_2O)/SiO_2=0.86$ 로서 약염기성 조재제의 성격을 갖고 있다. 슬래그의 주요 조성은 $(MgO \cdot SiO_2)$ 및 $(CaO \cdot SiO_2)$ 로 구성되어 있다.

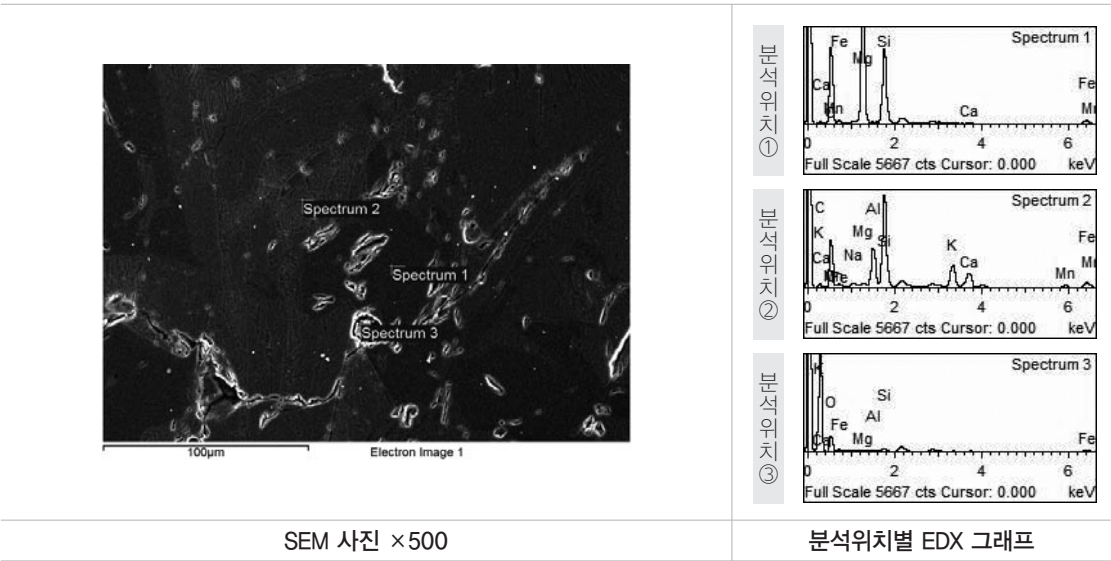
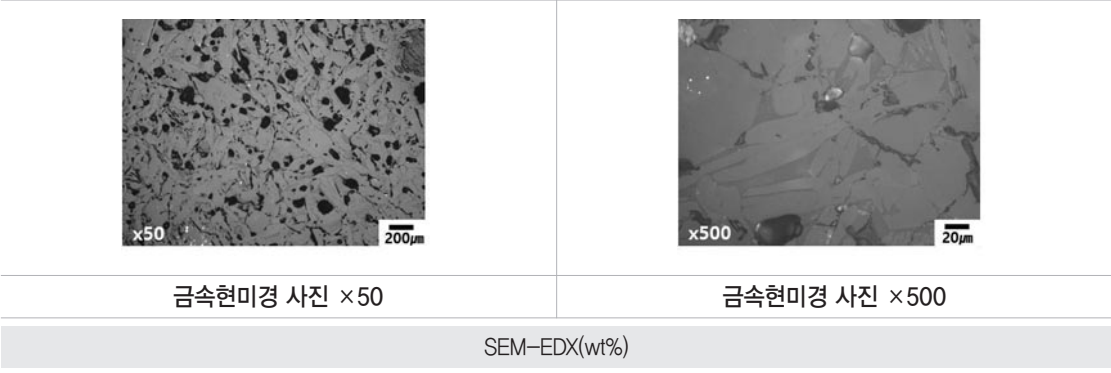
2.11 6차 유출 철재-흑색(20U-23-2)

1) 시료의 채취



〈사진 127〉 6차 유출 흑색(20U-23-2)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과



분석위치	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	7.72	—	38.67	—	30.27	—	21.73	—	0.67	—	0.94
②	8.97	4.09	36.07	0.71	0.52	7.92	21.95	9.77	6.67	—	3.34
③	35.19	—	47.34	—	2.17	2.41	6.82	2.65	3.43	—	—

XRF(wt%)										
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
조성	7.39	45.66	7.25	13.15	0.71	20.97	2.46	0.30	0.03	1.92

〈표 34〉 6차 유출 철재-흑색(20U-23-2)의 분석결과

흑색을 띠는 제6차 유출 철재의 현미경조직과 전자현미경(SEM-EDX)분석결과 복합산화물 슬래그로서 MgO계의 산화물이 다량 함유되어 있다. 일부에서는 철산화물의 국부적으로 잔존한다(Spectrum-③). XRF분석에서는 염기도는 $(CaO+MgO+K_2O)/(SiO_2)=0.80$ 을 유지하여 철산화물의 환원을 촉진시키고 있는 것으로 보인다. 슬래그의 주요 조성은 $(MgO \cdot SiO_2)$ 및 $(CaO \cdot SiO_2)$ 로 나타난다.

3. 출탕 생성물

출탕 생성물은 출탕구를 통해 출탕된 선철과 함께 유출된 철재를 차수별로 구분하여 시료를 채취하고 분석을 실시하였다.

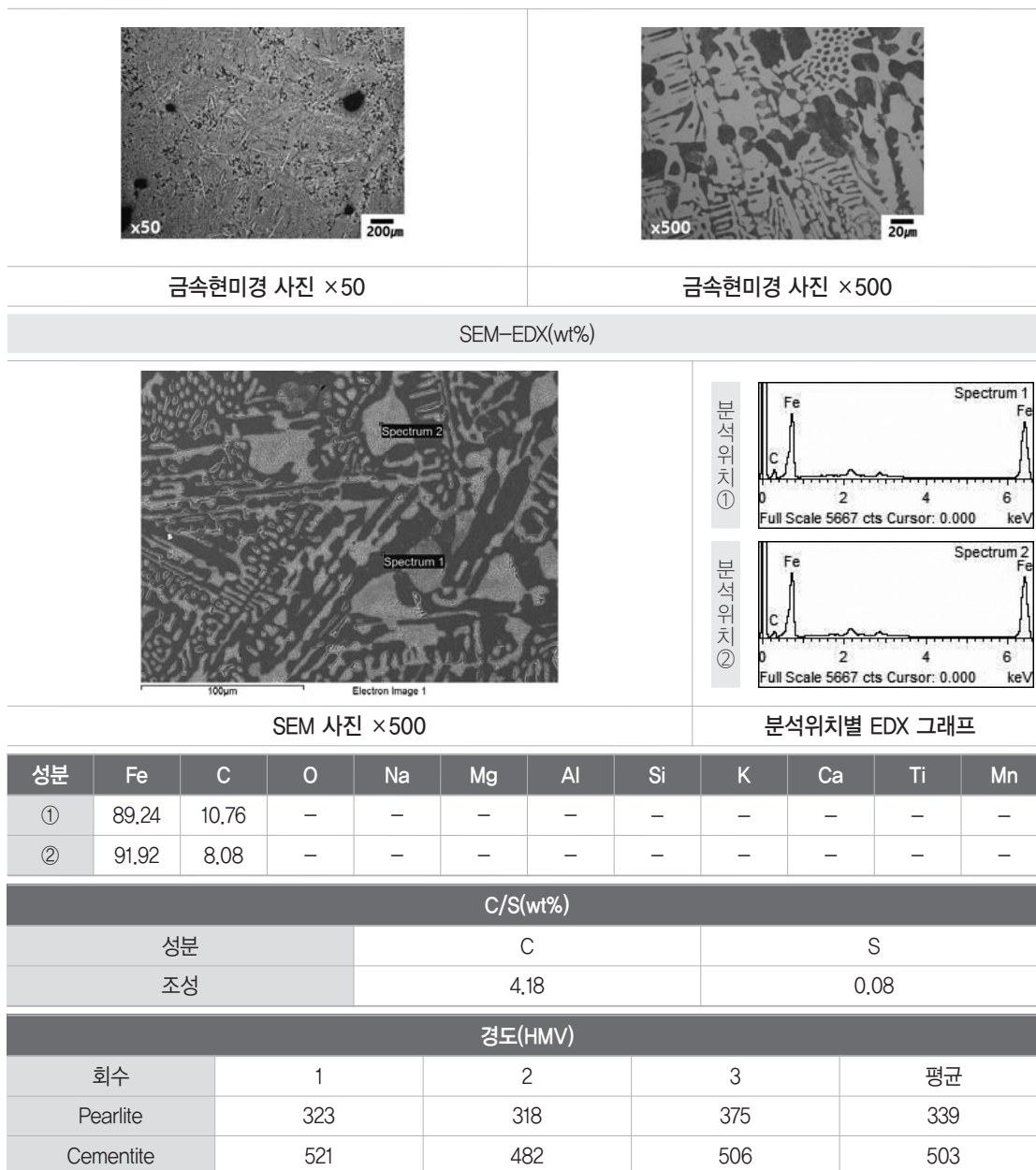
3.1 1차 출탕 판장쇠 용선(20U-12)

1) 시료의 채취



〈사진 128〉 1차 출탕 판장쇠 용선 (20U-12)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석 결과



〈표 35〉 1차 출탕 판장쇠 용선 (20U-12)의 분석결과

제1차 출탕시에 판장쇠 용법에 흘러나온 선철은 현미경 조사 결과 공정 선철에 유산한 Ledeburite 조직을 나타내고 있다. 또 이들 조직에 대한 전자현미경(SEM-EDX)조직에서 Spectrum-①, ② 모두 과공정 선철 조성을 구성하고 있으나 조직은 Ledeburite 조직으로 구성되어 있고 C/S분석 결과 탄소 함량이 4.18%C의 평균적으로 공정조성의 Ledeburite로 밝혀지고 있다. 현미경 조직 정도도 공정 Ledeburite 조직이다.

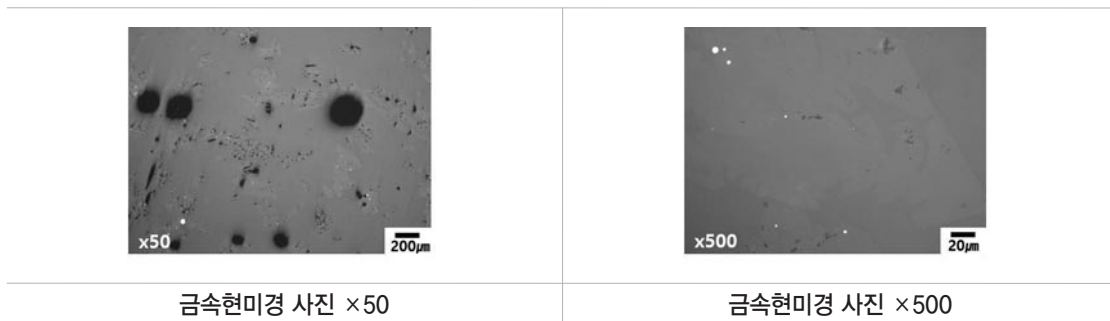
3.2 1차 출탕 철재(20U-13)

1) 시료의 채취



〈사진 129〉 1차 출탕 철재(20U-13)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과



SEM-EDX(wt%)



분석위치	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	2.33	—	39.91	0.54	8.38	4.52	23.33	1.79	16.98	0.43	1.81
②	3.20	—	39.43	—	32.18	—	22.79	—	1.22	—	1.17

XRF(wt%)										
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
조성	4.72	43.74	6.32	16.75	0.56	23.28	1.83	0.33	0.06	2.16

〈표 36〉 1차 출탕 철재(20U-13)의 분석결과

제1차 출탕시에 배재구에 흘러나온 철재는 유리질 철재였으며 전자현미경(SEM-EDX)분석 결과 철함량이 매우 낮은 Spectrum-①,②에서 (2.33-3.20%Fe) 환원이 잘 이루어진 슬래그를 형성하고 있었다. 여기서 슬래그의 XRF분석 염기도는 $(\text{CaO}+\text{MgO}+\text{K}_2\text{O})/(\text{SiO}_2)=0.96$ 으로서 높은 염기도를 형성하였다. 슬래그의 주요 조성은 $(\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2)$ 및 $(\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2)$ 로 나타난다.

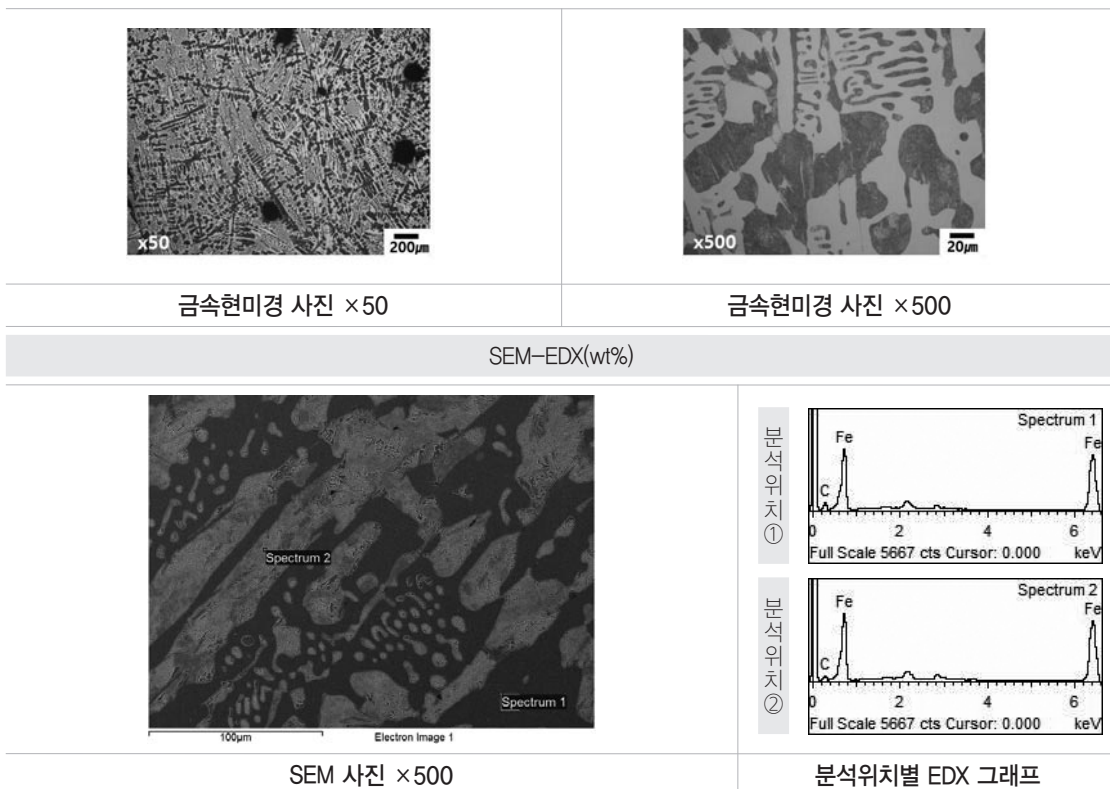
3.3 2차 출탕 선철(20U-14-1)

1) 시료의 채취



〈사진 130〉 2차 출탕 선철 (20U-14-1)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과



성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	89.19	10.81	—	—	—	—	—	—	—	—	—
②	93.59	6.41	—	—	—	—	—	—	—	—	—

C/S(wt%)	
성분	C
조성	3.53
	S
	0.08

경도(HMV)				
회수	1	2	3	평균
Pearlite	315	340	340	332
Cementite	621	611	636	623

〈표 37〉 2차 출탕 선철 (20U-14-1)의 분석결과

현미경조직 검사 결과 2차 출탕 선철의 조직은 Ledeburite조직이며 전자현미경(SEM-EDX)에서는 Spectrum-①,②에서 과공정 조성이나 C/S 분석에서 아공정 백주철 조직으로 판단된다. 이는 출탕시에 급냉에 의하여 흑연이 생성되는 시간적 여유가 없었다고 판단된다. 현미경 경도에서도 고경도 값을 갖는 공정 Ledeburite의 조직이다.

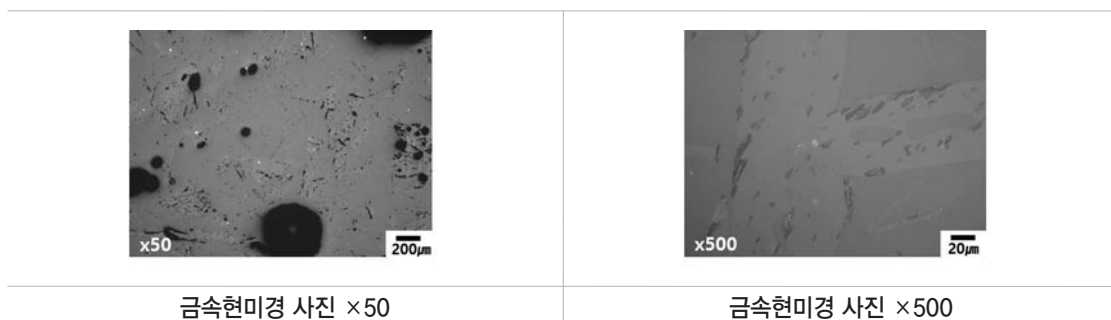
3.4 2차 출탕 철재 (20U-14-2)

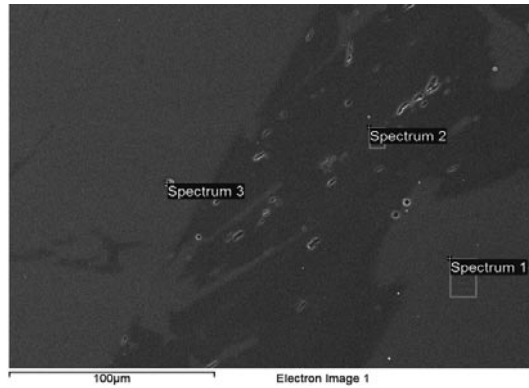
1) 시료의 채취



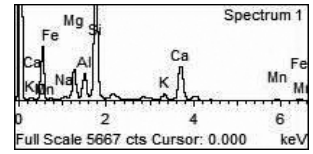
〈사진 131〉 2차 출탕 철재(20U-14-2)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

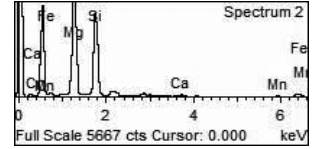




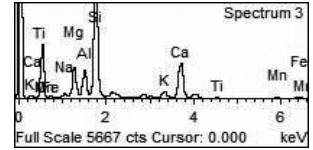
분석위치 ①



분석위치 ②



분석위치 ③



SEM 사진 ×500

분석위치별 EDX 그래프

분석위치	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	2.01	—	40.82	0.63	6.49	5.30	24.90	2.28	15.96	—	1.61
②	5.51	3.67	39.79	—	29.16	—	20.05	—	0.68	—	1.15
③	2.19	—	41.67	0.75	5.95	5.38	24.52	2.41	15.57	0.35	1.20

XRF(wt%)

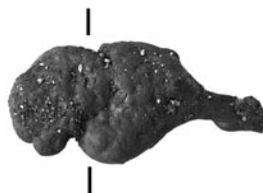
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
조성	7.69	44.28	6.30	14.76	0.53	21.98	1.92	0.32	0.04	1.96

〈표 38〉 2차 출탕 철재 (20U-14-2)의 분석결과

2차 출탕 철재의 현미경조사 결과 철재는 유리질 슬래그이며 전자현미경(SEM-EDX)에서는 Spectrum-①,②,③에서 철함량이 (2.01~5.51%Fe) 낮아 환원이 잘 이루어진 슬래그로 볼 수 있다. XRF 분석에서 슬래그의 염기도는 $(CaO+MgO+K_2O)/(SiO_2)=0.87$ 로서 염기성 분위기가 형성되었고 아공정 백주철 조성으로 판단된다. 슬래그의 주요성분은 $(MgO \cdot SiO_2)$ 및 $(CaO \cdot SiO_2)$ 로 구성되어 있다.

3.5 3차 출탕 선철 (20U-15-1)

1) 시료의 채취



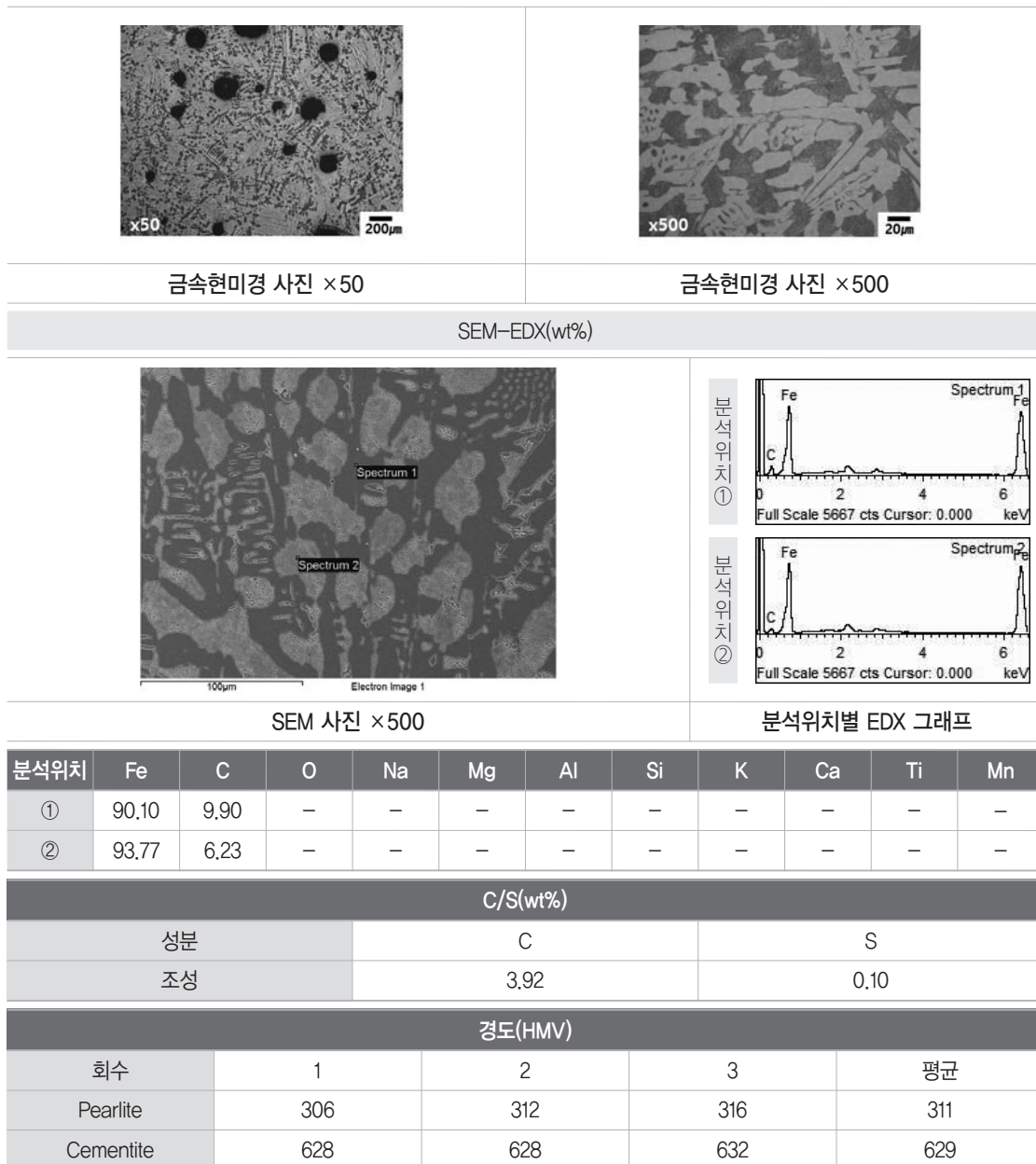
① 절단 위치



② 절단면

〈사진 132〉 3차 출탕 선철(20U-15-1)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과



〈표 39〉 3차 출탕 선철(20U-15-1)의 분석결과

제3차 출탕 선철의 현미경 조직은 Pearlite기지의 Ledeburite 석출 조직이며 전자현미경 (SEM-EDX)분석의 Spectrum-①,②에서 과공정 선철의 조성을 갖고 있었다. 그러나 C/S 분석 결과는 탄소함량이 3.92%C의 아공정 선철의 조성이었고 냉각속도는 빨라서 흑연은 생성되지 않았다.

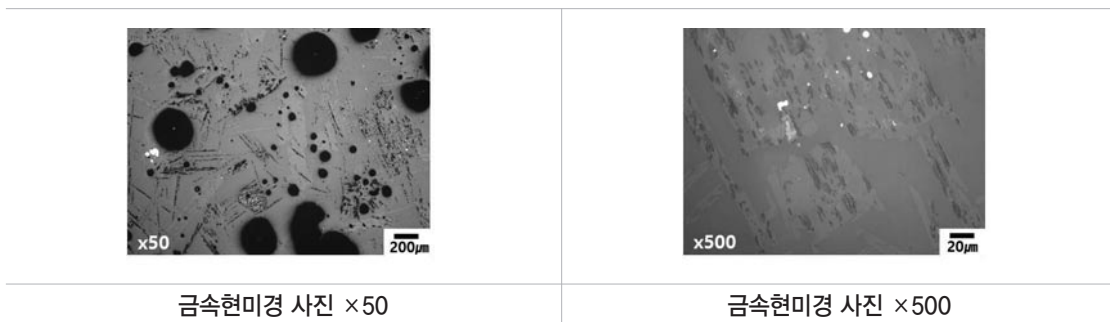
3.6 3차 출탕 철재 (20U-15-2)

1) 시료의 채취

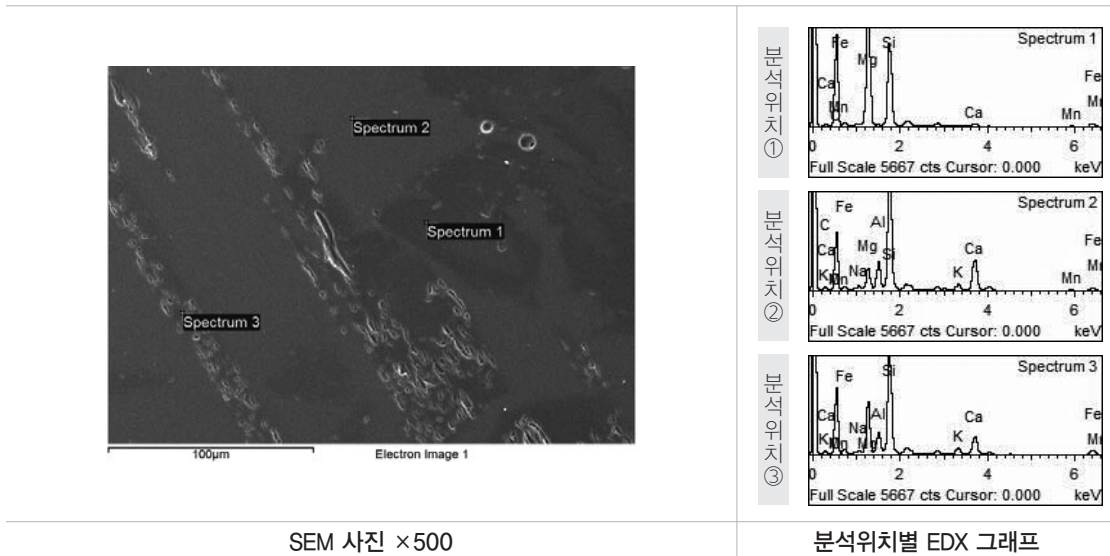


〈사진 133〉 3차 출탕 철재 (20U-15-2)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과



SEM-EDX(wt%)



성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	5.75	—	40.89	—	29.96	—	21.27	—	1.08	—	1.05
②	4.62	3.73	40.50	0.67	4.51	5.24	23.79	2.13	13.38	—	1.43
③	7.46	—	40.84	0.55	11.32	4.62	23.33	2.61	8.41	—	0.85

XRF(wt%)										
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
조성	12.65	43.83	6.38	12.96	0.56	19.27	2.10	0.31	0.05	1.74

〈표 40〉 3차 출탕 철재(20U-15-2)의 분석결과

제3차 출탕시 동반 유출되는 슬래그는 현미경조직으로 유리질 슬래그이며 내부에 기포가 잔존한다. 전자현미경(SEM-EDX)의 Spectrum-①,②,③에서 철함량이 적은 것은 환원이 원활한 증거이고 슬래그 중에 고탄소(3.73%C)가 잔존함은 환원분위기가 형성되었다고 할 수 있겠다. XRF분석에서 철산화물(12.65%Fe)이 낮은 것도 철환원율이 높았다고 할 수 있고 또한 슬래그의 염기도($(CaO+MgO+K_2O)/(SiO_2)=0.78$)로서 비교적 적절한 염기도를 유지하고 있었다. 슬래그의 주요성분은 $(MgO \cdot SiO_2)$ 및 $(CaO \cdot SiO_2)$ 로 구성되어 있다.

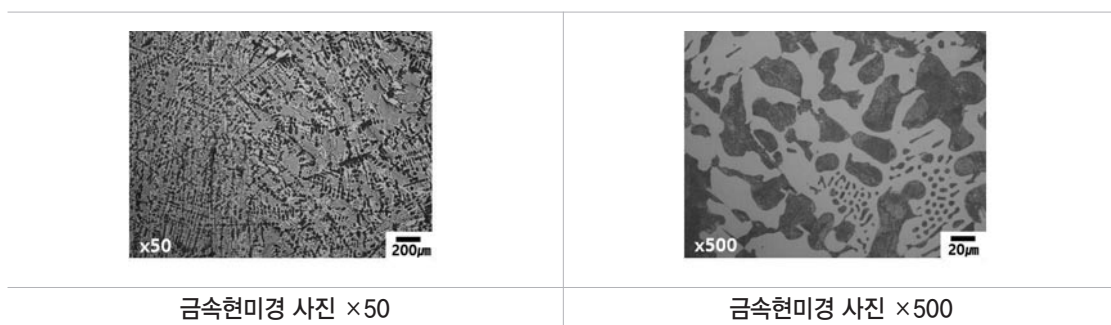
3.7 4차 출탕 선철(20U-16)

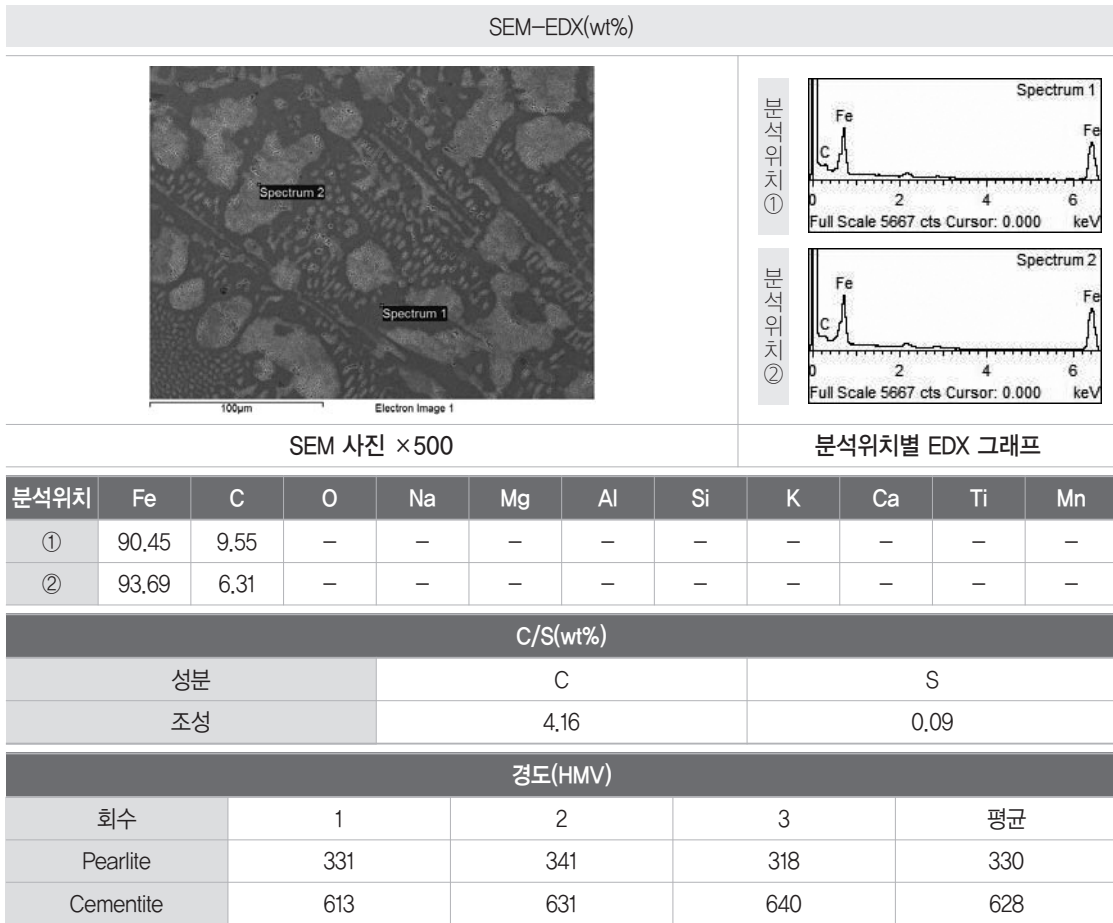
1) 시료의 채취



〈사진 134〉 4차 출탕 선철(20U-16)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과





〈표 41〉 4차 출탕 선철(20U-16)의 분석결과

제4차 출탕 선철의 현미경조직은 백주철조직이고 흑연이 형성은 없었다. 전자현미경(SEM-EDX)에서 과공정 선철의 조성(Spectrum-①, ②)을 갖고 있으며 C/S분석에서는 아공정 선철의 조성을 갖고 있으나 공정선철에 가까운 백주철 조직이며 출탕 후 냉각속도가 빨라서 흑연의 생성이 되지 못하였다. 현미경 경도도 고경도 값을 갖는 Ledeburite의 조직이다.

4. 형성물 철재

형성물은 복원실험 완료 후 노냉을 거쳐 노를 해체하여 노내에 형성된 형성물에 대해 위치별 시료의 종류별로 구분하여 정리하였고 이중 철재만을 분석하여 정리하였다.

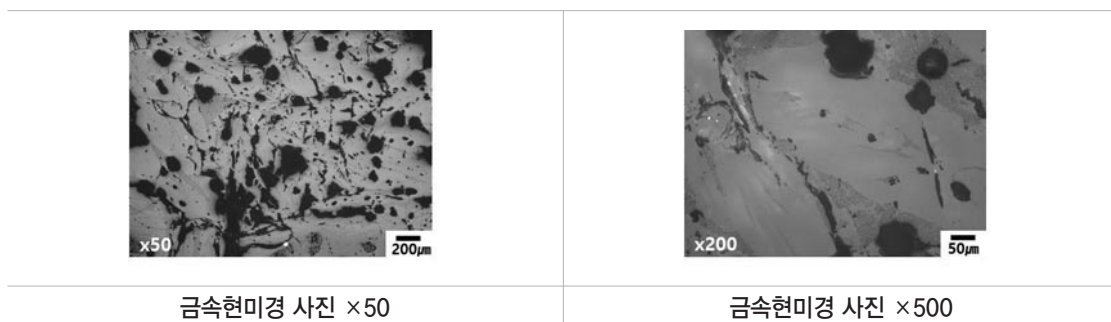
4.1 형성물 상부 철재(20U-34)

1) 시료의 채취

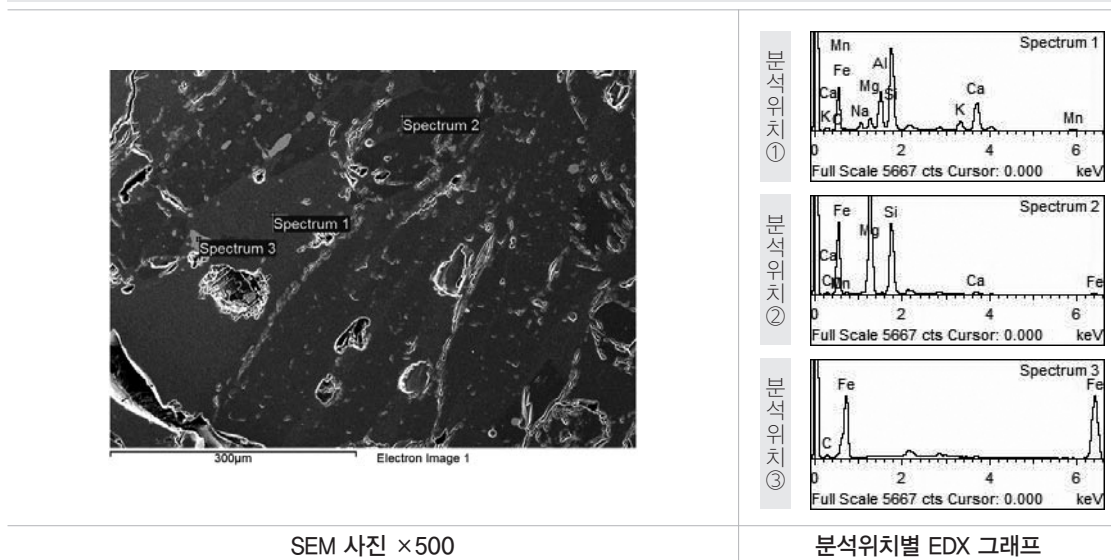


〈사진 135〉 형성물 상부 철재(20U-34)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과



SEM-EDX(wt%)



분석위치	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	1.05	—	39.70	2.12	2.66	9.20	22.54	4.62	15.61	—	2.50
②	3.42	4.92	39.91	—	29.45	—	20.12	—	1.39	—	0.78
③	95.41	4.59	—	—	—	—	—	—	—	—	—

XRF(wt%)										
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
조성	3.11	42.63	5.68	15.42	0.45	28.72	1.39	0.25	0.02	2.06

〈표 42〉 형성물 상부 철재(20U-34)의 분석결과

형성물의 상부 철재는 현미경조직 상으로 기공이 많이 존재하지만 철함량이 낮은 것(Spectrum-①, ②)과 높은 것(Spectrum-③) 그리고 일부 환원철이 같이 존재한다. 이들은 전자현미경(SEM-EDX)분석에서 복합산화물을 형성하고 있다. XRF분석에서 염기도는 $(CaO+MgO+K_2O)/SiO_2=1.06$ 으로 강염기성 슬래그를 형성하고 있다. 슬래그의 주요조성은 $(MgO \cdot SiO_2)$ 및 $(CaO \cdot SiO_2)$ 로 구성되어 있다.

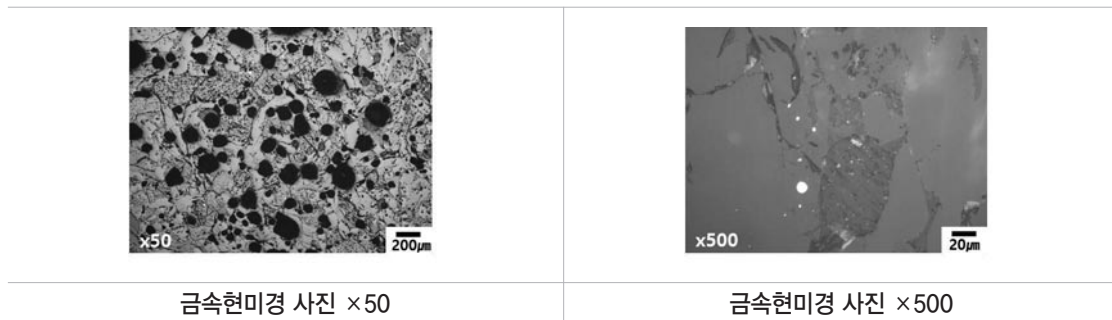
4.2 형성물 하부 철재(20U-35)

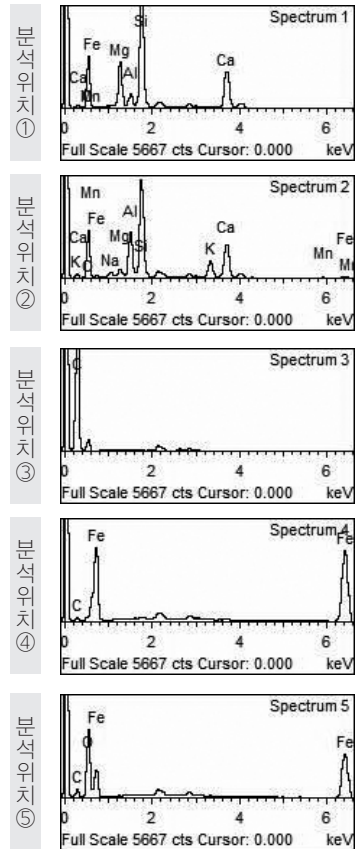
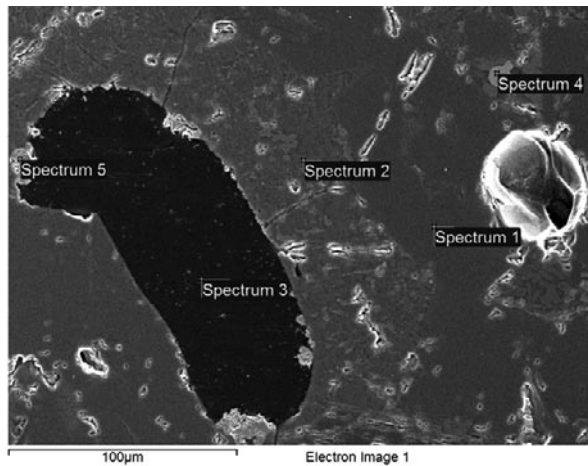
1) 시료의 채취



〈사진 136〉 형성물 하부 철재(20U-35)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과





SEM 사진 ×500

분석위치별 EDX 그래프

분석위치	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	0.71	—	41.36	—	9.76	2.60	26.72	—	18.19	—	0.64
②	2.74	—	39.16	1.14	1.36	9.24	22.42	6.96	15.94	—	1.04
③	—	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—
④	95.80	4.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—
⑤	67.60	7.55	24.85	—	—	—	—	—	—	—	—

XRF(wt%)

성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
조성	4.91	50.49	8.35	12.12	0.98	18.01	2.81	0.31	0.04	1.75

〈표 43〉 형성물 하부 철재(20U-35)의 분석결과

형성물의 하부 철재의 현미경 조직은 용융철재와 목탄편이 혼재하고 있다. 전자현미경(SEM-EDX)에서는 목탄편이 Cementite(Spectrum-④,⑤)와 함께 공존(Spectrum-③)한다. XRF분석에서는 $(CaO+MgO+K_2O)/(SiO_2)=0.65$ 의 낮은 염기도를 가지고 있다. 슬래그의 조성은 $(MgO \cdot SiO_2)$ 및 $(CaO \cdot SiO_2)$ 로 구성되어 있다.

XRF(wt%)

성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
조성	4.91	50.49	8.35	12.12	0.98	18.01	2.81	0.31	0.04	1.75

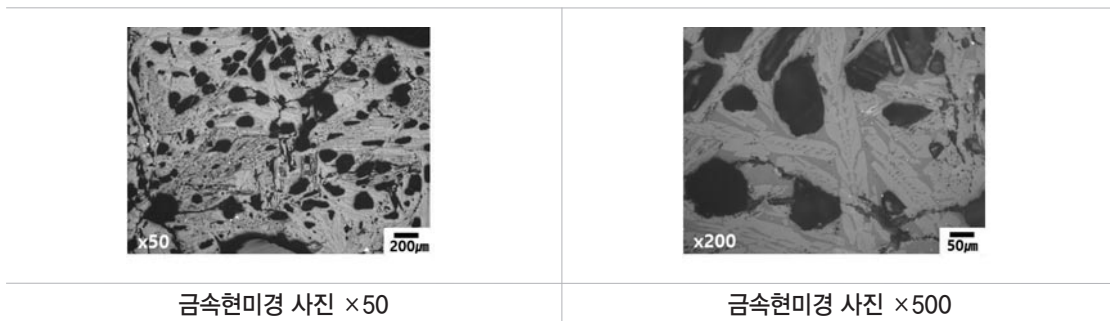
4.3 형성물-노벽 경계 철재(20U-28)

1) 시료의 채취

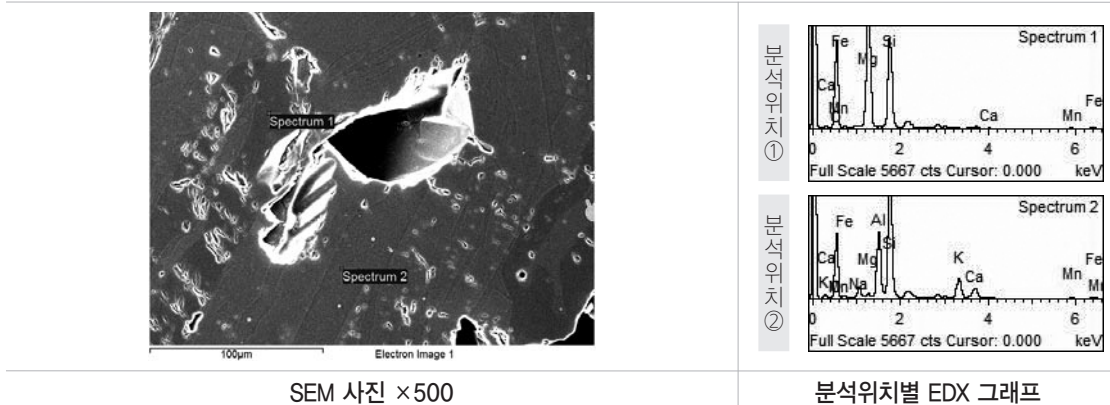


〈사진 137〉 형성물-노벽 경계 철재(20U-28)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과



SEM-EDX(wt%)



분석위치	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	1.98	—	39.98	—	33.14	—	22.78	—	0.78	—	1.34
②	2.53	—	41.65	2.31	0.45	12.57	26.73	7.97	4.35	—	1.43

XRF(wt%)										
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
조성	2.75	64.95	10.72	7.14	1.23	7.49	4.50	0.42	0.03	0.68

〈표 44〉 형성물-노벽 경계 철재(20U-28)의 분석결과

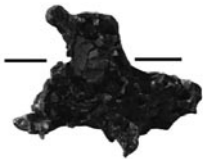
형성물의 노벽경계 철재의 현미경조직은 복합산화물 슬래그에 기공이 산재해 있고 전자현미경(SEM-EDX)분석에서는 낮은 염기성 슬래그($\text{CaO}+\text{MgO}+\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2=0.29$)로서 노벽 산화물의 영향을 받은 것으로 판단된다. 그리고 노벽 침식 원인은 낮은 융점인 (K_2O , SiO_2)산화물을 고려해 볼 수 있다.

5. 형성물 선철

형성물 선철은 복원실험 완료 후 노냉을 거쳐 노를 해체하여 노내에 형성된 형성물에 대해 위치별 시료의 종류별로 구분하여 정리하였고 이중 선철만을 분석하여 정리하였다.

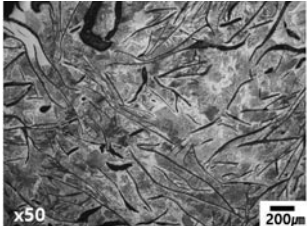
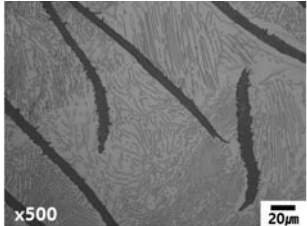
5.1 슬래그대 선철(20U-30)

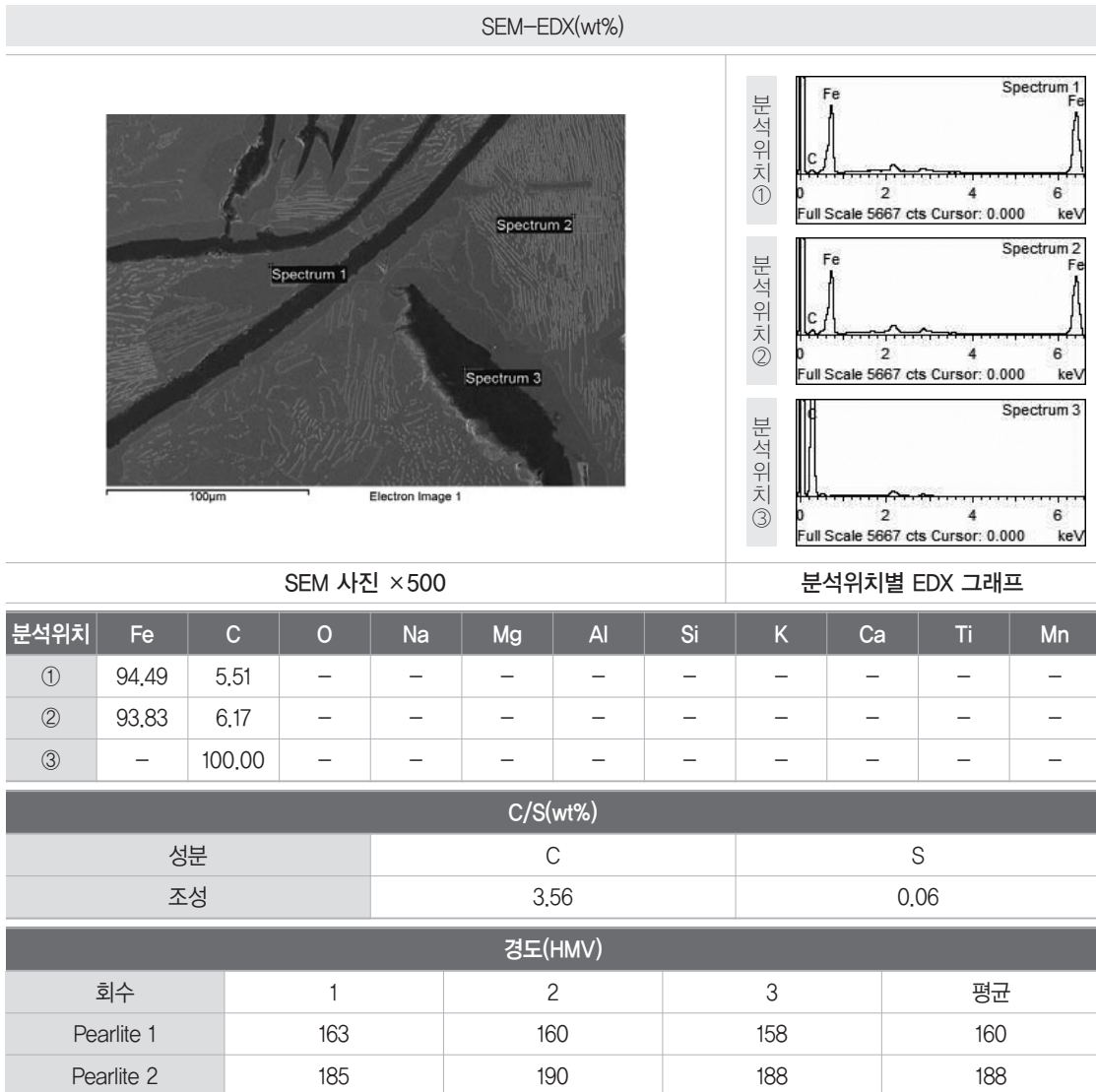
1) 시료의 채취

	
① 절단 위치	② 절단면

〈사진 138〉 슬래그대 선철(20U-30)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

	
금속현미경 사진 ×50	금속현미경 사진 ×500



〈표 45〉 슬래그대 선철(20U-30)의 분석결과

슬래그대의 선철의 현미경조직은 회주철 조직으로 기지조직은 Pearlite이고 입계에서 Cementite가 분해하여 편상흑연이 석출하였고 C/S분석에서는 탄소가 3.56%C로서 노내에서 서냉되어 생성된 아공정 회주철의 조성을 갖고 있었다. 그리고 기지조직의 현미경경도는 Pearlite의 경도(160~188HVM)를 갖고 있다.

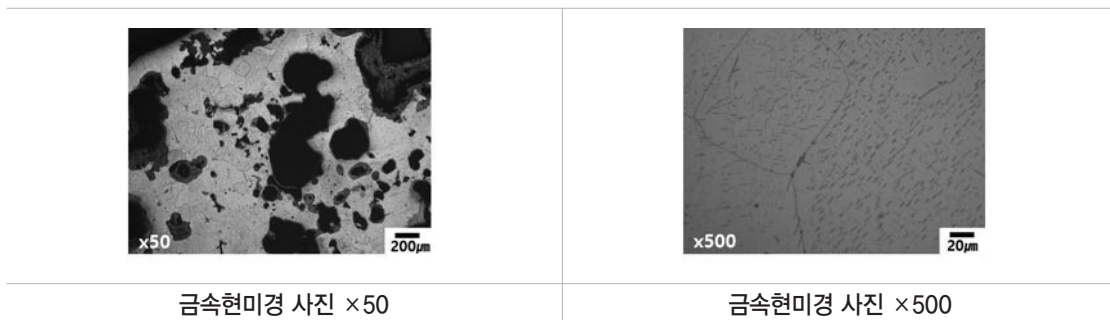
5.2 송풍구앞 선철대 선철(20U-31)

1) 시료의 채취

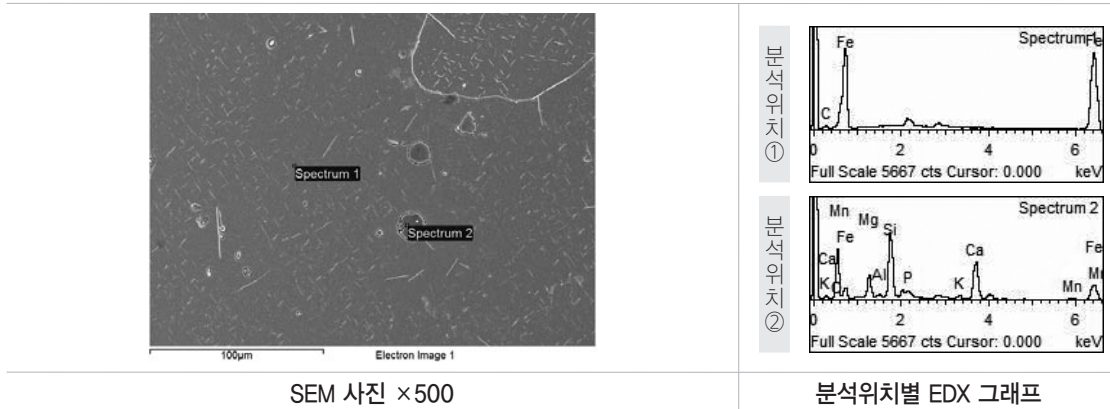


〈사진 139〉 송풍구앞 선철대의 괴련철(20U-31)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과



SEM-EDX(wt%)



분석위치	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Mn
①	95.85	4.15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
②	25.17	—	32.95	—	5.65	0.63	15.57	1.22	0.89	16.33	—	1.58

C/S(wt%)

성분	C	S
조성	0.01	0.03

경도(HMV)

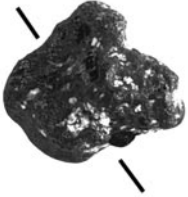
회수	1	2	3	평균
Ferrite	80	79	78	79

〈표 46〉 송풍구앞 선철대의 괴련철(20U-31)의 분석결과

송풍구앞 선철대의 현미경 조직은 기지조직이 Ferrite이고 표면과 내부 기공에 슬래그가 잔존하는 조직이다. 송풍구 주위에는 저탄소와 고탄소가 교차되어 있는 것이 보이지만 송풍구 주변에서는 C/S 분석에서 저탄소(0.01%C)의 Ferrite조직으로 평균경도가 79HVM로 낮은 정도 값을 나타내고 있다.

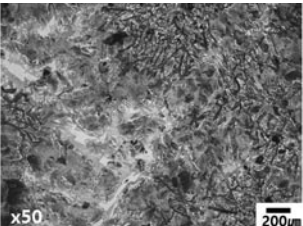
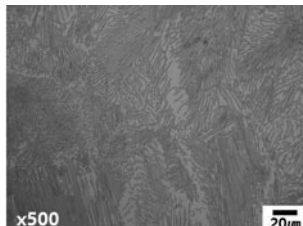
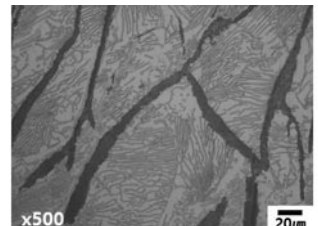
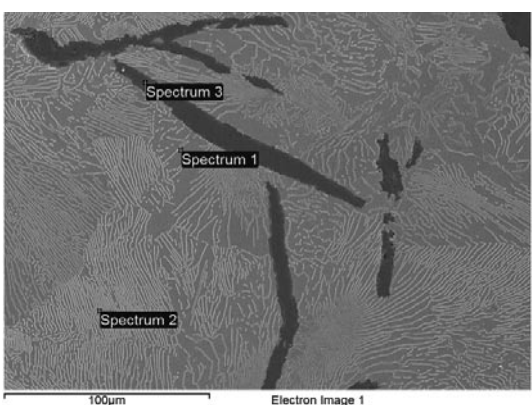
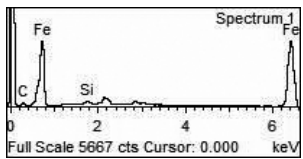
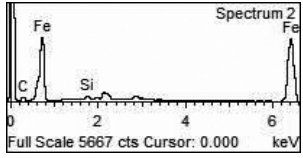
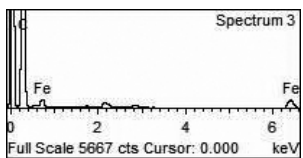
5.3 형성물 상부 선철(20U-40)

1) 시료의 채취

	
① 절단 위치	② 절단면

〈사진 140〉 형성물 상부 선철(20U-40)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

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

분석위치	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	94.76	4.58	-	-	-	-	-	-	-	-	-
②	93.78	5.45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
③	15.13	84.87	-	-	-	-	-	-	-	-	-

C/S(wt%)		
성분	C	S
조성	3.14	0.09

경도(HMV)				
회수	1	2	3	평균
Pearlite	344	340	336	340
Cementite	621	605	615	614

〈표 47〉 형성물 상부 선철(20U-40)의 분석결과

형성물의 상부에서 채취된 선철편은 Pearlite 기지조직에 입계에 편상흑연이 성장하는 회주철의 조직이다. 전자현미경(SEM-EDX)분석 Spectrum-①, ②에서는 과공정 주철의 조성을 갖고 있고 C/S 분석에서는 아공정 주철의 조성을 갖고 있다. 이들의 불균일 조성은 선철 형성물의 상부에서는 형성 반응물이 반응이 격렬한 상태이며 하부로 내려오면서 안정한 조성으로 변하게 된다. 현미경 정도에서도 아공정 백주철의 정도를 나타낸다.

6. 송풍구 및 노벽 용손

송풍구는 복원실험중 송풍구 확인시 막힌 송풍구를 뚫을 때 떨어져 나온 송풍관 부착 철재(20U-24)를 분석하였고 노벽 시료는 노벽 좌측(20U-38)과 우측의 노벽(20U-39)과 노벽이 용손(20U-32, 33)되어 철재가 흘러내린 형태의 시료를 채취하여 분석하였다.

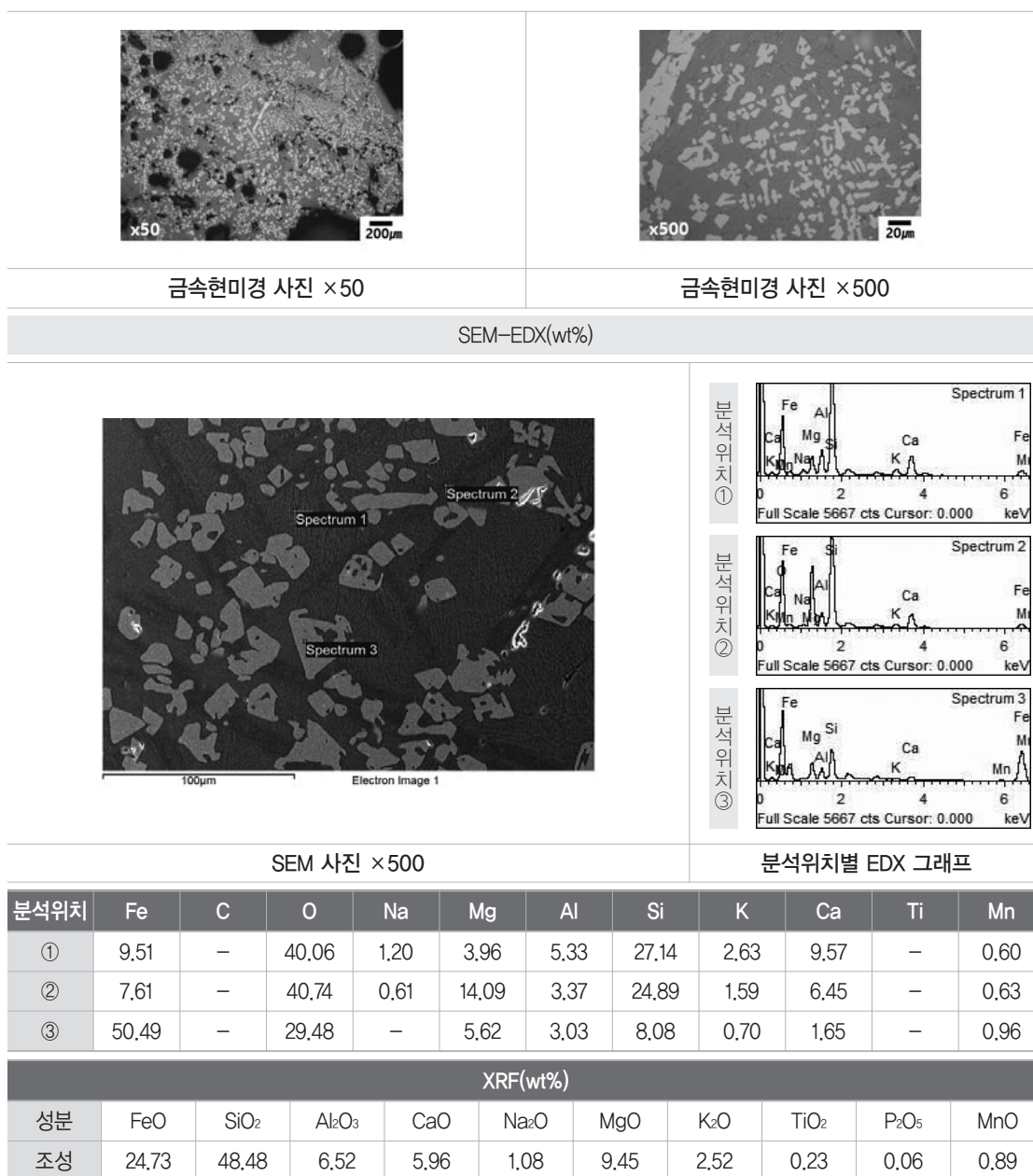
6.1 송풍관 부착 철재(20U-24)

1) 시료의 채취



〈사진 141〉 송풍관 부착 철재(20U-24)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

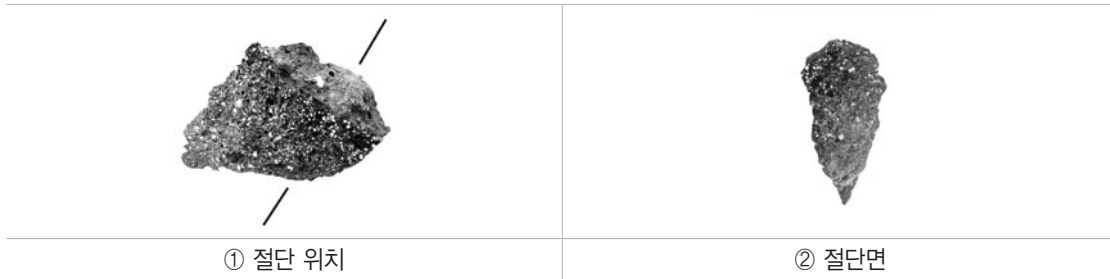


〈표 48〉 송풍관 부착 철재(20U-24)의 분석결과

송풍관 부착 철재는 현미경분석에서 점토질 기지조직에 환원원 Wüstite가 유착되어 있고 전자현미경(SEM-EDX)사진에서는 Wüstite의 융착부분(Spectrum-③)이 나타나고 XRF분석에서는 점토질(SiO₂, Al₂O₃)와 Wüstite가 혼합 융착되어 있다. 알칼리 산화물(K₂O)도 잔존한다.

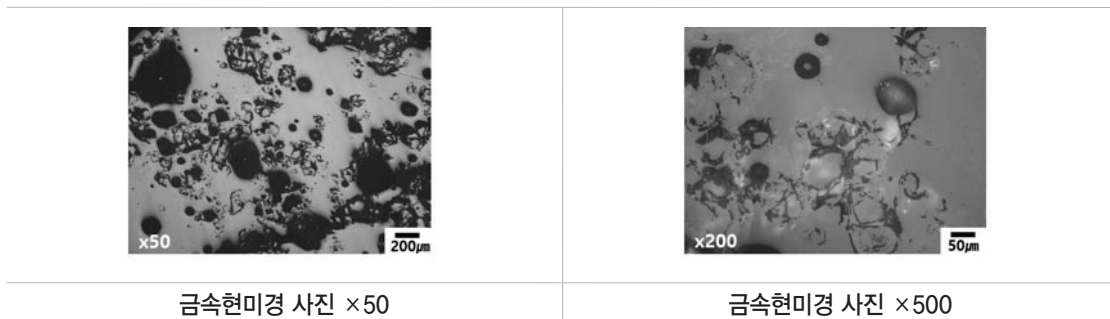
6.2 좌측 노벽(20U-38)

1) 시료의 채취

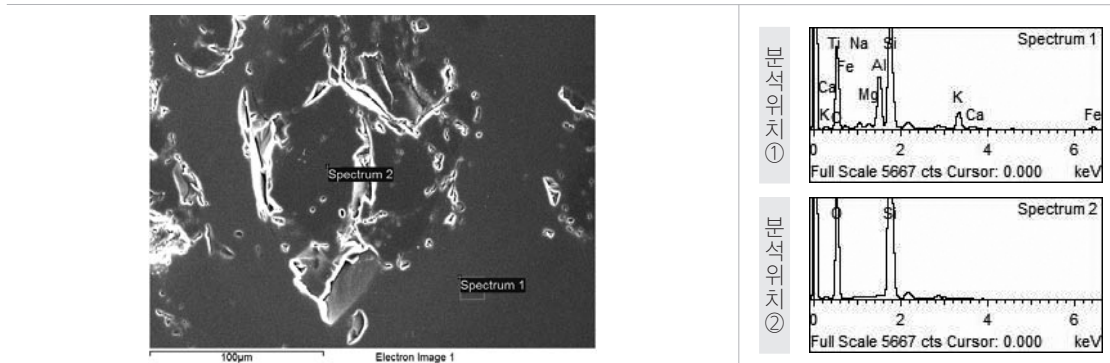


〈사진 142〉 좌측 노벽(20U-38)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과



SEM-EDX(wt%)



SEM 사진 ×500

분석위치별 EDX 그래프

분석위치	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	4.21	—	44.95	1.03	0.60	8.90	32.81	6.63	0.51	0.36	—
②	—	—	49.50	—	—	—	50.50	—	—	—	—

XRF(wt%)

성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
흑색	4.96	73.46	12.29	0.71	1.22	0.90	5.65	0.48	0.04	0.13
적색	2.66	77.93	12.56	0.08	0.66	0.23	5.32	0.40	0.04	0.03

〈표 49〉 좌측 노벽(20U-38)의 분석결과

좌측 노벽편(20U-38)을 현미경분석과 전자현미경(SEM-EDX)분석결과 일부에서 철(Fe)이 4.21%Fe정도 함유되어 있다. 이는 노벽에 철재가 부착된것이며 기지조직은 점토질이었다. 그리고 칼륨(K_2O)가 6.63%K로 나타난 것은 노벽의 알칼리성분이 나타난 것이다. XRF분석에서 철산화물(2.66-4.96%FeO)는 노벽 슬래그 유착을 의미하고 기지조직은 점토질(SiO_2 , Al_2O_3)이며 여기서도 알칼리 산화물(5.32-5.65% K_2O)이 나타나고 있다.

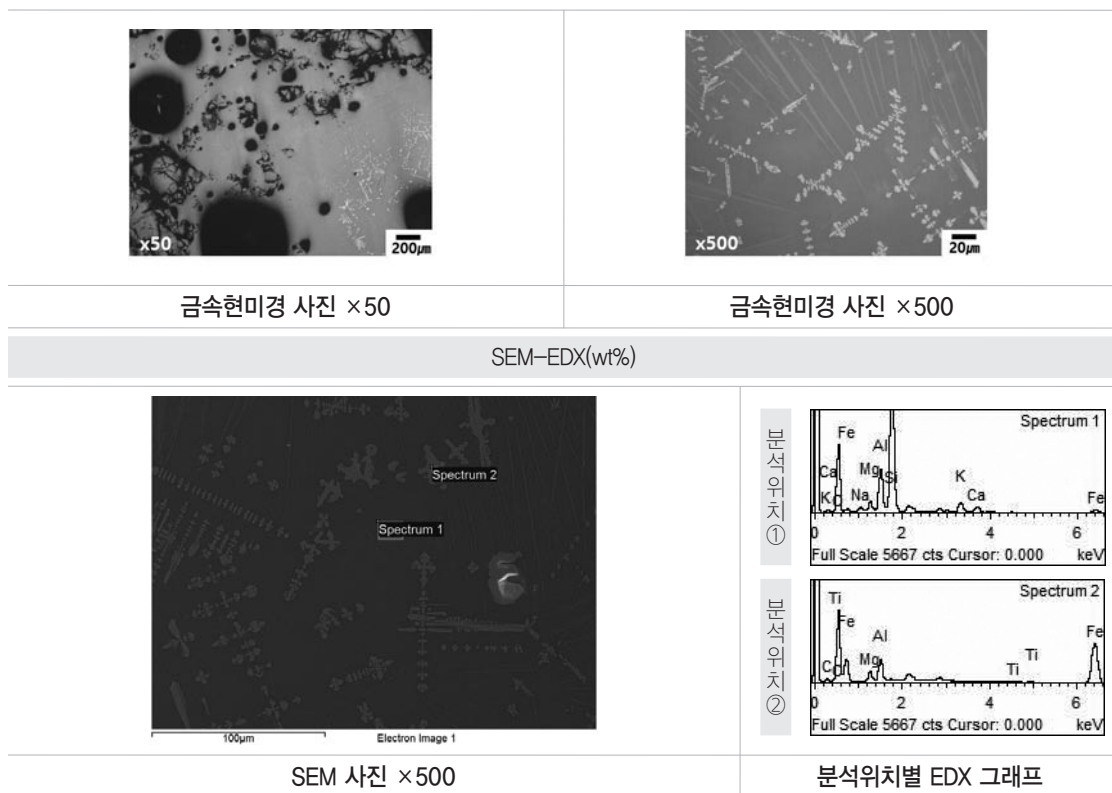
6.3 우측 노벽(20U-39)

1) 시료의 채취



〈사진 143〉 우측 노벽(20U-39)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과



분석위치	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	6.01	—	42.32	0.93	1.84	8.73	33.25	4.22	2.71	—	—
②	59.73	4.50	26.78	—	2.81	5.51	—	—	—	0.66	—

XRF(wt%)										
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
흑색	6.62	70.37	11.97	1.27	1.18	1.28	6.41	0.45	0.07	0.17
적색	2.85	76.62	13.14	0.07	0.82	0.26	5.55	0.47	0.04	0.03

〈표 50〉 우측 노벽(20U-39)의 분석결과

우측 노벽편(20U-39)을 현미경분석 결과 노벽에 부착된 슬래그가 구상의 기공으로 나타나고 노벽에 소량의 Wüstite(FeOx)가 수지상으로 생성되고 있다. 전자현미경(SEM-EDX)분석에서는 Spectrum-①②와 같이 노벽 부착 슬래그 철이 (6.01%Fe)부분과 환원괴와 반환원괴가 용합(Fe-C, FeOx)되어 나타나고 있다. XRF분석에서는 점토질(SiO₂, Al₂O₃)이 주성분을 이루고 있으며 철산화물이 일부 유착이 일어난 것으로 나타난다.

6.4 노벽 용손 1(20U-32)

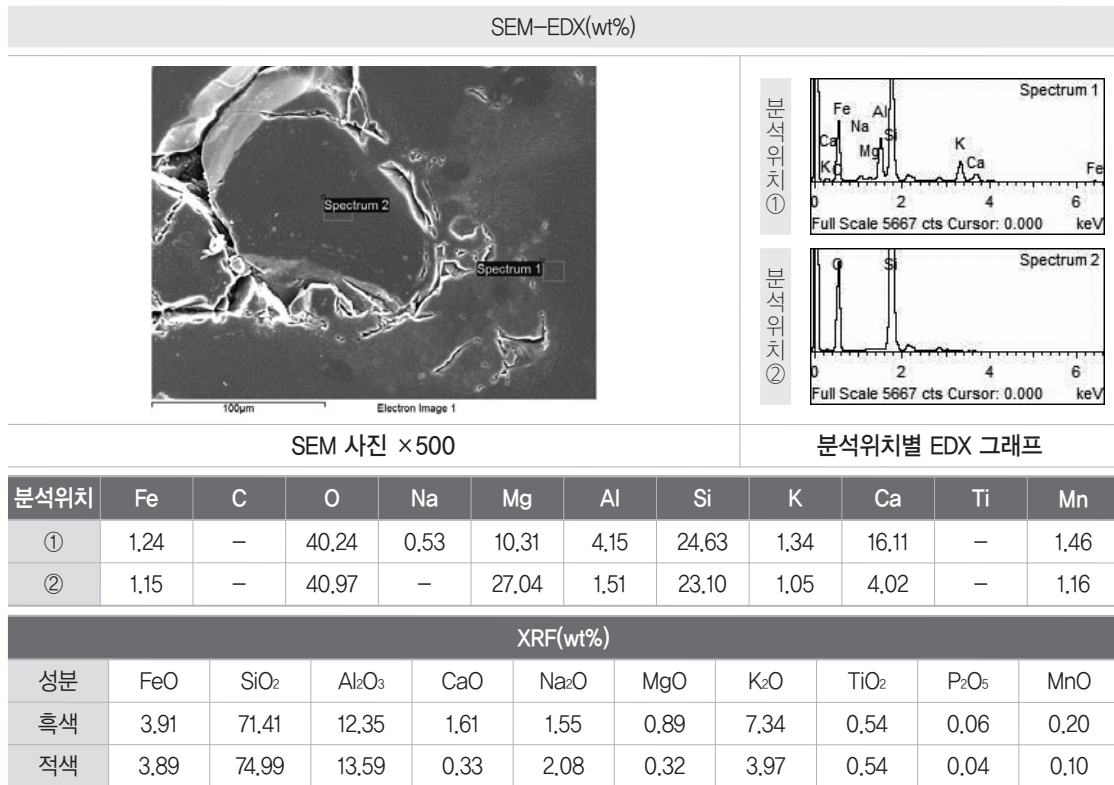
1) 시료의 채취



〈사진 144〉 노벽 용손 1(20U-32)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과





〈표 51〉 노벽 용손 1(20U-32)의 분석결과

노벽 용손편1의 현미경사진에서는 용융슬래그 유착 현상이 나타나고 전자현미경(SEM-EDX)분석 결과 염기성 슬래그에 환원이 완전히 일어나서 Spectrum-①, ②에서는 소량의 철(1.15-1.24%Fe)이 잔존하는 것으로 나타나고 XRF분석에서 주성분이 점토질(SiO₂, Al₂O₃)이며 노벽에서 순환된 알칼리 산화물이(3.97-7.34%K₂O) 다량 나타나고 있다.

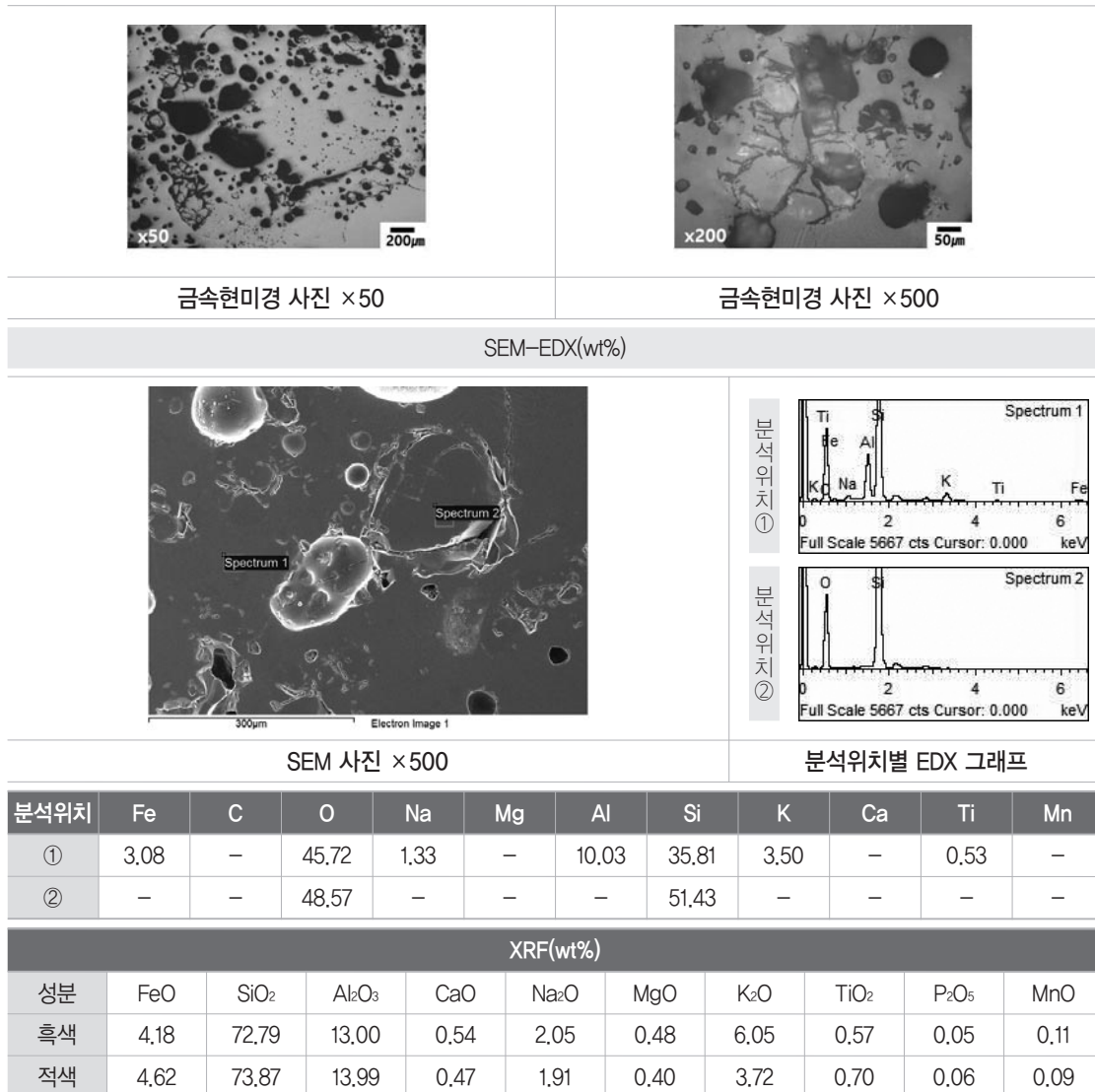
6.5 노벽 용손 2(20U-33)

1) 시료의 채취



〈사진 145〉 노벽 용손 2(20U-33)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과



〈표 52〉 노벽 용손 2(20U-33)의 분석결과

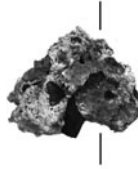
노벽 용손편2의 현미경사진에서는 용융 슬래그 유착 현상이 나타나고 전자현미경(SEM-EDX)분석 결과 산성 슬래그 반응을 나타내고 있다. XRF분석에서 미환원의 철산화물(4.18~4.62%FeO)을 함유한 환원 슬래그가 유착되어 있고 노벽체는 주성분이 점토질(SiO₂, Al₂O₃)로 형성하고 있다.

7. 노바닥부

형성물 하부와 노바닥 사이의 형성된 노바닥부의 선철(20U-37-1)과 철재(20U-37-2)를 구분하여 채취하고 노바닥의 철재(20U-29)를 채취하여 노바닥부의 상태를 확인하기 위해 분석을 실시하였다.

7.1 노바닥부 선철(20U-37-1)

1) 시료의 채취



절단 위치

〈사진 146〉 노바닥부 선철(20U-37-1)의 절단면 위치

2) 분석결과

금속현미경 사진 ×50	금속현미경 사진 ×500	금속현미경 사진 ×500
SEM-EDX(wt%)		
		분석위치 ① 분석위치 ② 분석위치 ③ 분석위치 ④ 분석위치 ⑤
SEM 사진 ×500		분석위치별 EDX 그래프

분석위치	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	89.87	10.13	—	—	—	—	—	—	—	—	—
②	94.65	5.35	—	—	—	—	—	—	—	—	—
③	94.66	5.34	—	—	—	—	—	—	—	—	—
④	89.90	10.10	—	—	—	—	—	—	—	—	—
⑤	—	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—

C/S(wt%)		
성분	C	S
조성	4.19	0.04

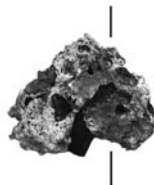
경도(HMV)				
회수	1	2	3	평균
Pearlite	210	217	215	214
Cementite	578	587	589	585

〈표 53〉 노바닥부 선철(20U-37-1)의 분석결과

노바닥부 선철의 현미경조직은 Pearlite기지에 편상의 흑연이 석출된 회주철(금속현미경사진②)과 ledeburite조직이 나타나는 백주철(금속현미경사진③)이 혼재된 조직이다. 전자현미경(SEM-EDX)에서 편상 흑연(Spectrum-⑤)이 나타나고 있다. C/S분석에서는 4.19%로서 공정조성과 유사한 조성을 가지고 있다. 현미경 경도도 Pearlite 회주철 경도를 보여주고 있다.

7.2 노바닥부 철재(20U-37-2)

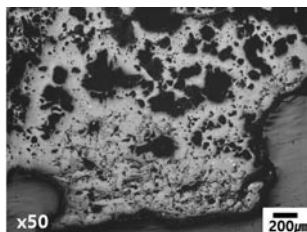
1) 시료의 채취



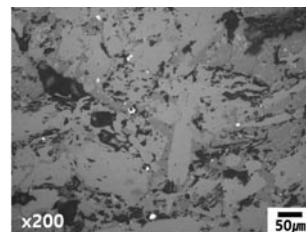
절단 위치

〈사진 147〉 노바닥부 철재(20U-37-2)의 절단면 위치

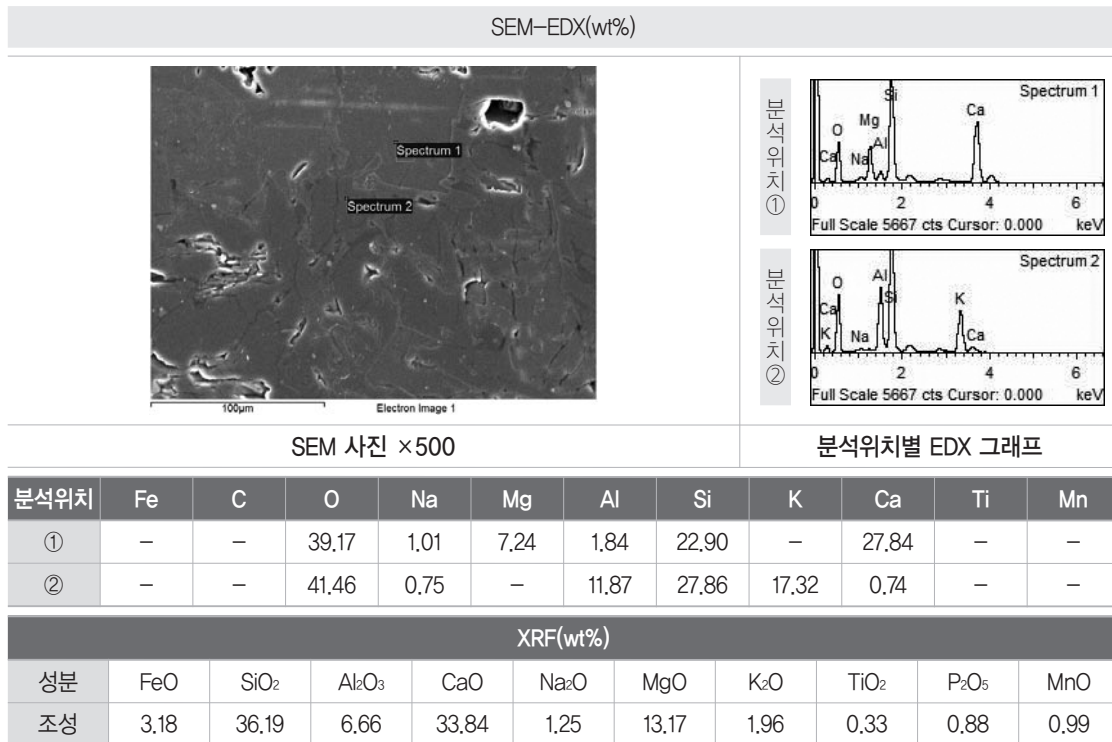
2) 분석결과



금속현미경 사진 ×50



금속현미경 사진 ×500



〈표 54〉 노하부 철재(20U-37-2)의 분석결과

노바닥부 철재의 현미경조직은 점토질 형상을 갖고 있으며 전자현미경(SEM-EDX)에서는 산성 슬래그 부분(Spectrum-②)과 염기성 슬래그(Spectrum-①)로 혼용되어 있고 국부적으로는 알카리 산화물이 높게 농축되어(17.32%K₂O) 나타나고 있다. XRF분석에서 염기도는 (CaO+MgO+K₂O)/SiO₂=1.35로서 높은 염기성 슬래그로 구성되어 있다.

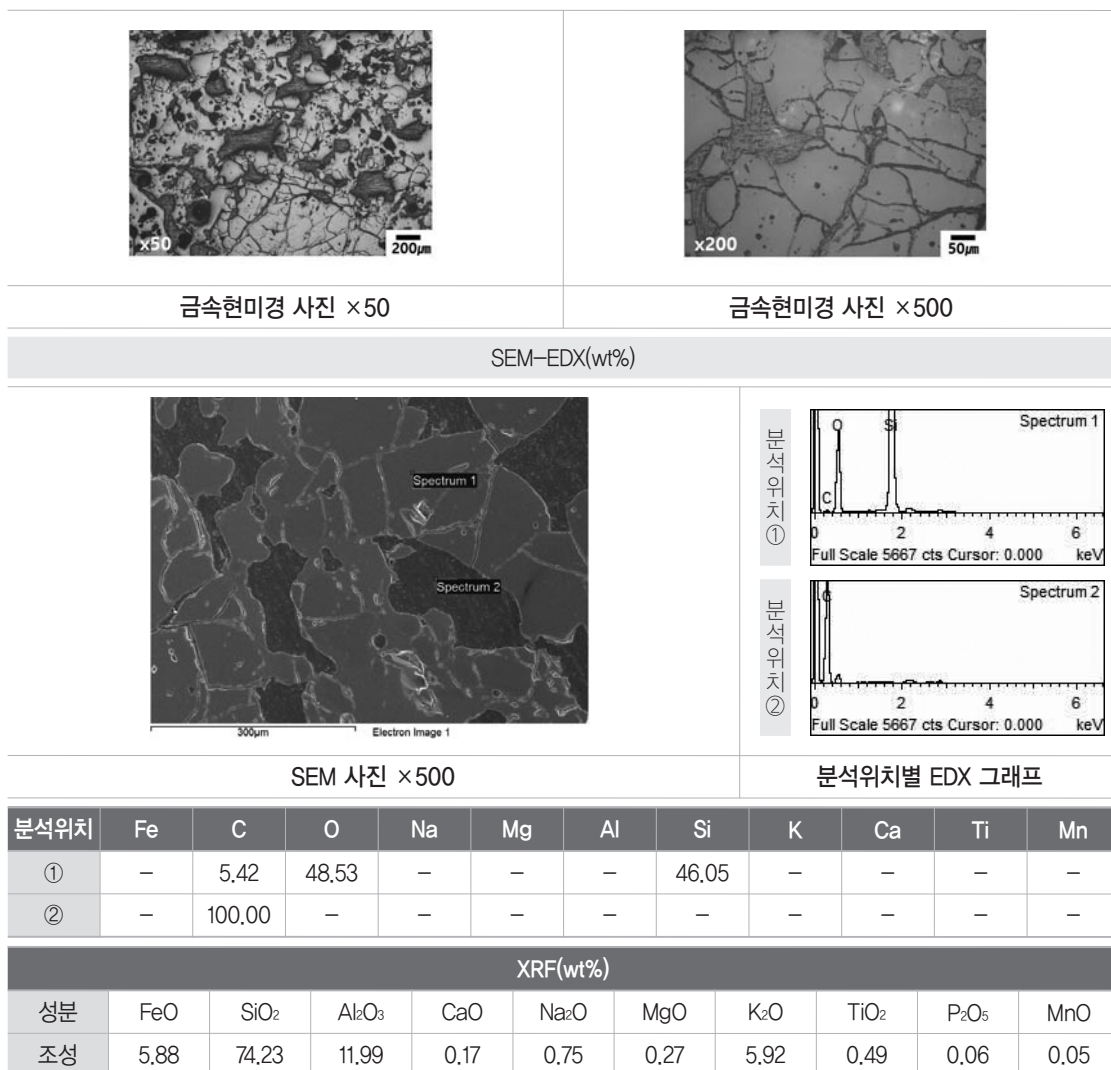
7.3 노바닥 철재(20U-29)

1) 시료의 채취



〈사진 148〉 노바닥 철재(20U-29)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과



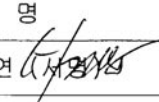
〈표 55〉 노바닥 철재(20U-29)의 분석결과

노바닥 철재의 현미경조직은 점토질 기지조직이며 전자현미경(SEM-EDX)에서는 노바닥 축조시에 형성시킨 Spectrum-②의 목탄(100%C)과 Spectrum-① 모래(SiO₂, Si-C)가 나타나고 있다. XRF분석에서는 주성분이 점토질조성(SiO₂, Al₂O₃)으로 구성되어 있음을 알 수 있었다.

3 자문의견서

자문위원 의견서		
사 업 명	2020년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험	
개최일시	2020년 10월 10일(토)	
자문내용	▶ 2020년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험에 대한 학술적 의견 ▶ 2020년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험 준비·진행·결과 및 향후 계획에 대한 의견	
자 문 의 견		
제철복원실험에 대한 의견	* 이번 6차 실험에서 초기 실험에 비해 조업시간이 조금씩 단축되는 듯 하면서 기본적으로 약 20%정도의 철 회수율을 보인 것은 일단 실험이 나름대로 성공적이었음을 보여주는 것으로 평가될 수 있을 것이나, 한편으로 금번 선철 생산량이 광석 투입량 대비 15%정도인 것은 조금은 아쉬운 결과일 수도 있음. * 소위 연속조업 또는 여러 차례 조업이 가능한 노 구조와 환경을 만드는 것도 목표인 바, SNS로 중계된 실험 상황에 의하면 노에 큰 손상없이 조업이 마무리 된 것으로 보여 실험 목표의 한 축을 어느 정도 달성한 것이 아닌가 평가될 수 있으며, 이는 여러 차례 실험을 통해 축적된 경험의 산물이라 할 수 있을 것임. * 일반적으로 가마 하부가 넓고 상부로 가면서 좁아지게 설계된 원형로와 달리, 가마 중부가 넓게 설계된 쇠부리가마의 효율성은 향후 반복적인 실험을 통해 검증되어야 할 것인 바, 결국 노 내 온도와 환원 분위기를 어떻게 관리·유지할 수 있는지가 핵심일 것으로 생각됨	
향후 추진방향	* 현재 선철 생산량이 광석 투입량 대비 15%정도인 바, 향후 철광석의 품위나 기본 조업환경 등이 비슷한 조건에서 25% 내외까지 회수율을 높일 수 있다면 대단히 성공적인 복원실험이 될 것으로 생각됨. * 지금까지는 대략 300kg 내외의 철광석을 1회 조업에 투입하였으나 이를 400~500kg 이상으로 늘려 실험하는 방향도 검토할 필요가 있음. 이 경우 조업 전체에서 목탄의 투입량이 줄어들 것으로 예상되는 바 이는 생산 단가와 직결될 수 있을 것이기 때문에, 조건을 달리하면서 반복적인 실험을 통해 가능하면 과거 최적의 조업조건을 찾아갈 수 있을 것임. * slag로 빠져나가는 양을 줄이고 철 회수율을 높이기 위해, 조제제의 양을 조금 조절하는 방안은 어떨지?	
기타 의견		
자 문 위 원		
소 속	전 공	성 명
충북대학교	역사고고학	성정용 
2020년 10월 16일		
울산쇠부리 복원사업단 귀하		

자문위원 의견서		
사 업 명	2020년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험	
개최일시	2020년 10월 10일(토)	
자문내용	▶ 2020년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험에 대한 학술적 의견 ▶ 2020년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험 준비·진행·결과 및 향후 계획에 대한 의견	
자 문 의 견		
제철복원실험에 대한 의견	- 가마의 높이가 커지고, 상하부의 직경 차이를 잘 활용하였음. - 광석, 목탄, 패각의 장입량을 잘 제어하여 실험하였음. - 송풍이 잘 이루어져서 온도의 편차가 적었음. - 이전에 조업한 슬래그를 활용함으로써 불순물 성분에 대한 환원이 잘 이루어졌음. - 선철의 배출을 관찰함으로써 판장쇠의 제작을 위한 과정을 중간중간 확인하였음. - 판장쇠의 제작을 위한 출탕구 조건과 이후 작업으로 연계되는 형태를 잘 활용하였음.	
향후 추진방향	- 가마의 크기와 주변 작업장에 대한 문헌 및 문화재 조사를 통한 일치기 필요함. - 철광석의 철 함유량을 기존 문헌이나 성분 분석으로 나온 토철과 맞춤 필요가 있음. - 목탄의 크기, 패각의 활용에 대한 구체적인 자료 조사가 더 필요함. - 기존 슬래그의 활용이 어느 정도 까지 가능한지에 대한 연구가 필요함.	
기타 의견	-이번 제철기술 복원실험이 매우 잘 이루어졌으므로, 그 결과와 과정을 잘 분석하여 향후 제철기술 복원실험에 적극 활용하여야 함.	
자 문 위 원		
소 속	전 공	성 명
울산대학교	금속재료	신상용 
2020년 10월 14일		
울산쇠부리 복원사업단 귀하		

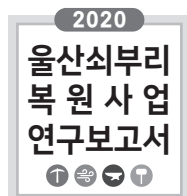
자문위원 의견서		
사 업 명	2020년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험	
개최일시	2020년 10월 10일(토)	
자문내용	▶ 2020년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험에 대한 학술적 의견 ▶ 2020년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험 준비·진행·결과 및 향후 계획에 대한 의견	
자 문 의 건		
제철복원실험에 대한 의견	1. 울산쇠부리 제철기술 복원실험 역사상 처음으로 zoom을 이용한 실험 참관이 이루어졌다. 그러나 기술적인 한계로 실험 과정을 입체적으로 파악하기에는 한계가 있다고 판단됨. 2. 이번 비대면 실험의 참관 결과를 경험으로 향후, 초래될 수도 있는 비대면 실험을 대비하여 보완책이 마련되어야 할 필요가 있음. 3. 제시된 요약보고서의 내용으로 보면 성공적인 실험이 진행되었다고 판단됨. 4. 향후, 시행될 생성물의 수거와 분류, 분석을 통하여 진전된 결과가 도출되기 바람.	
향후 추진방향	1. 이번 실험의 결과를 바탕으로 진전된 반복 실험이 이루어져야 할 필요가 있음 2. 실험에 조재제로 사용된 소성패각, 유출재에 대한 분석이 가능하면 이루어질 필요 있음. 3. 향후 실험을 위하여 연료의 열량분석이 이루어져야 함. 4. 주물사의 사용 여부에 대한 지속적인 논의 필요함	
기타 의견	1. 내년에도 현 covid-19가 진전되지 않을 것으로 예상되는 바, 다양한 대비책을 세우는 것이 필요함.	
자 문 위 원		
소 속	전 공	성 명
한림대학교 한림고고학연구소	고고학	심 재 연 
2020년 10월 일		
울산쇠부리 복원사업단 귀하		

자문위원 의견서		
사 업 명	2020년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험	
개최일시	2020년 10월 10일(토)	
자문내용	▶ 2020년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험에 대한 학술적 의견 ▶ 2020년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험 준비·진행·결과 및 향후 계획에 대한 의견	
자 문 의 견		
제철복원실험에 대한 의견	- 이번 실험의 원료를 양양산 철광에서 정선 예미광산 철광으로 교체했는데 이것이 실험 결과에 영향을 미쳤는지에 대한 면밀한 평가가 필요함. - 연료 역시 충북 백운참숯에서 울주군 하이참숯으로 교체한 것에 대한 평가가 필요함. - 첨가제로 슬래그를 투입한 것은 새로운 시도로서 적정량이 투입되었는지와 실험결과에 영향에 대한 면밀한 평가가 필요함.	
향후 추진방향	- 외관상으로는 이번 실험의 큰 틀이 작년에 비해 크게 달라진 것 같지 않지만 각종 연료, 원료, 첨가제, 조업시간 등 각종 변수들이 달라진 것에 유의하여 이것들이 조업 결과물에 미친 영향에 대한 평가가 이루어져야 할 것으로 판단됨. - 조업 결과와 관련해 철 회수율을 높일 방안들을 강구하길 바람.	
기타 의견		
자 문 위 원		
소 속	전 공	성 명
전북대	고고학	조 대 연 (서명)
2020년 10월 19 일		
울산쇠부리 복원사업단 귀하		

자문위원 의견서		
사 업 명	2020년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험	
개최일시	2020년 10월 10일(토)	
자문내용	▶ 2020년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험에 대한 학술적 의견 ▶ 2020년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험 준비·진행·결과 및 향후 계획에 대한 의견	
자 문 의 견		
제철복원실험에 대한 의견	○6차 실험에서 다량의 선철이 유출된 중요 원인은 배재부의 온도가 송풍관쪽 온도보다 약간 높거나 비슷했기 때문으로 추정됨. 그만큼 송풍관의 위치와 각도 등이 중요하게 작용했을 것으로, 배재부쪽이 고온상태에서 철의 유출이 원활했을 것임 ○조제제로서 처음으로 슬래그를 사용함. 패각과 슬래그의 사용이 철 내 CaO 함량비에 어떠한 영향을 주었는가는 분석을 통해 작년도 실험분과 비교가 필요함. 또한 슬래그가 얼마만큼의 영향을 주었는지도 판단이 필요한데, 다만, 실험 도중에 슬래그의 장입을 중단했듯이 슬래그층이 너무 많이 형성되어 송풍 등을 방해할 수 있다는 점도 확인할 수 있어 매우 유용한 결과임 ○6차실험로의 평균온도가 1,165°C로 그리 높지 않았음에도 불구하고 선철이 매우 원활하게 형성, 유출되었다는 점에서 노의 구조와 목탄(소-중-대탄의 적절한 장입)의 장입 내용, 조제제의 사용 등 관련이 높다고 추정됨. 향후 이러한 관련성에 대한 면밀한 검토가 필요함 ○실험단에서 지속적으로 회의를 통해 실험 상태를 공유하고 내용을 변경하는데 있어 신중을 기해 합의를 도출, 실행하는 모습에서 과거 조업 양상을 그대로 재현한 듯한 감흥이 있었음. 민간과 학계, 그리고 현대 장인 등이 결합된 이상적인 조합으로 실험을 성공적으로 이끌어낸 가장 큰 힘이었다고 생각됨.	
향후 추진방향	○이번실험은 조선시대 석축로를 모델로 한 최초의 실험이자, 판장쇠의 제작에도 성공한 매우 의미있는 실험이었음. ○자연과학적 분석 결과가 명확하게 나와야만 실험 내용을 보다 정밀하게 검토할 수 있어 한계가 있지만, 이번 실험과 작년 5차 실험의 비교를 통해 보다 당시의 조업을 복원하기 위한 조건을 완성하는데 도움이 될 것으로 추정됨. ○반복적인 실험을 통해 조업 매뉴얼을 완성하는 것이 필요함. 아직까지는 첫 실험으로서의 의미만 있음. 추가적인 실험계획을 구체적으로 수립되어야 함.	
기타 의견	○ 노의 구조상 하부를 좁혀 제작했는데, 이는 조선시대 석축로의 발굴조사상 내용이 반영된 것인지 검토 필요. 현대 공학적으로는 이러한 구조가 타당할 수는 있지만, 석축로 자체가 그러한 구조였는지는 검토가 필요함.	
자 문 위 원		
소 속	전 공	성 명
국립중원문화재연구소	고고학	한지선 (서명) 
2020년 10월 일		
울산쇠부리 복원사업단 귀하		

● ● ● 참고문헌

- 權丙卓, 1972, 『韓國經濟史特殊研究』, 嶺南大學校附設 産業經濟研究所.
- 권병탁, 2004, 『한국 산업사 연구』, 영남대학교출판부.
- 권용대, 2021, 「울산 쇠부리터 출토 목탄 -대안동 쇠부리터 출토 목탄을 중심으로-」, 『2021 울산쇠부리복원사업 워크샵 자료집』, 울산북구문화원·울산쇠부리복원사업단.
- 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.
- 신경환·김권일·최영민, 2015, 「석축형제철로(石築型製鐵爐)의 조업방식 연구」, 『야외고고학』, 제22호, 한국매장문화재협회.
- 신경환·이남규·황호순·이재용, 2020, 『전통 제련 복원실험의 물리화학적 해석연구(1차년)』, 국립중앙문화재연구소.
- 이남규, 2019, 「한국 고대 제철공정의 재검토-중국과의 비교적 시각에서-」, 『한국고고학보』 제111집, 한국고고학회.
- 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.



발 행 일 : 2021. 08.

발 행 인 : 박원희

집 필 자 : 이남규, 이태우, 신경환, 이은철, 김권일,
권용대, 강성귀, 이재용, 이민아

발 행 처 : 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 : 디자인 문

울산광역시 남구 삼산중로 131번길 42-10

전 화 : 052)260-1870

팩 스 : 052)269-5110

※이 책은 울산광역시 북구청 보조금으로 발행되었습니다.