

2021년도
울산쇠부리 복원사업
연구보고서

SOEBURI



울산광역시 북구문화원장 귀하

본 보고서를
‘2021년도 울산쇠부리 복원실험 연구’의
최종보고서로 제출합니다.

2022.04.30.

울 산 쇠 부 리 복 원 사 업 단

SOEBURI





CONTENTS

I. 머리말	13
II. 실험 목적 및 방법.....	17
1. 실험 목적	19
2. 실험 방법	20
3. 실험단 구성	21
III. 실험 준비	23
1. 가마의 구조	25
2. 실험 매뉴얼	29
3. 실험 준비 과정	32
IV. 실험 내용	43
1. 실험 과정	45
2. 실험 결과	56
V. 고찰	67
1. 실험 결과의 고찰	69
2. 금속학적 분석 결과의 고찰	73
VI. 맺음말	77
부록	81
1. 실험 기록	83
2. 실험에 대한 금속학적 분석 결과	93
3. 자문의견서	131
4. 판장쇠 분리실험 보고	141
5. 울산쇠부리 복원실험의 성과와 과제	151
참고문헌	163

대한민국 산업의 심장, 울산의 뿌리‘울산쇠부리’



박원희
북구문화원 원장

뜨거운 불꽃을 뿜어내던 울산쇠부리가마에서 그토록 기다리던 붉은 쇳물이 판장쇠틀을 가득 메웁니다. 이를 지켜보던 모든 이들의 탄성과 함께 360여년 전 조선의 철강왕 구충당 이의립 선생의 무쇠제조법은 시간을 거슬러 오늘 우리 앞에 그 모습을 드러내고 있습니다.

잊혀졌던 울산쇠부리 기술을 되살리겠다는 일념으로 국내 최고 권위의 학자와 장인 그리고 울산을 삶의 터전으로 살아 온 지역 주민들과 울산 북구의 지원으로 구성된 민·관·학 거버넌스인 울산쇠부리복원사업단이 발족되어 2016년 시작된 울산쇠부리복원사업은 올해로 일곱 번째 실험을 맞이하였고 그 어느 해보다 놀라운 성과를 거두었습니다.

산업도시 울산의 뿌리라 할 수 있는 울산쇠부리문화의 핵심인 전통제철 기술인 울산쇠부리 기술이 우리나라 최초의 철산지로 이천년 철의 역사를 품고 있는 달천철장에서 100여 년 전 붉은 쇳물을 토해내었던 대안동 쇳부리터를 바탕으로 국내에서는 유일하게 조선 후기 제철기술을 복원하여 성공적으로 판장쇠를 생산하였으며 이러한 성과를 바탕으로 문화재청에서 공모한 미래 무형유산 국민공모에 당당히 선정되었습니다.

2021 울산쇠부리복원사업의 성공은 참여자들의 땀과 열정이 없었다면 불가능했을 것입니다. 이남규, 이태우 공동단장님과 신경환, 이은철, 김권일, 권용대, 강성귀 연구원님, 울산쇠부리소리보존회 회원님들 그리고 자문위원님께 감사드리며 국립중원문화재연구소와 울산문화재연구원, 금속

기술연구소 관계자분들께도 감사의 마음을 전하고자 합니다.

마지막으로 지역의 소중한 문화자산을 바로 세우는데 행정적, 재정적 지원을 아끼지 않으시는 이동권구청장님과 임채오북구의회 의장님을 비롯한 북구의회 의원님들께도 감사의 마음을 전하고자 합니다.

2022년 4월

울산광역시 북구문화원장 박 원 희

울산쇠부리제철기술 복원실험 연구보고서 발간을 축하드립니다.



이 동 권
울산광역시 북구청장

울산쇠부리제철기술 복원실험 연구보고서 발간을 축하드립니다.

2016년 울산쇠부리 제철기술을 밝히기 위하여 시작한 복원실험이 어느덧 7차로 접어들었습니다. 제철기술에 대한 문헌의 부재, 복잡한 공정 등으로 인해 전통쇠부리기술을 복원하는 실험이 대단히 어려운 작업이었을 터인데 “구충당 이의립 선생”의 「토철제련법」 복원실험까지 이끌어 올수 있었던 것은 울산만의 독창적인 문화유산인 ‘울산쇠부리문화’에 관심을 가져 주신 많은 분들의 관심과 노력 덕분이라고 생각합니다.

제17회 울산쇠부리축제의 일환으로 실시된 제7차 실험은 조선 후기 토철 제련법을 복원하기 위하여 토철과 유사한 분광을 원료로 사용하여 강한 송풍으로 12시간에 걸친 조업과정을 거쳐 판장쇠바탕을 가득 채워 출탕하는 현장을 목격할 수 있었습니다. 제6차 실험에서 판장쇠 규격품 생산에 성공을 거둔데 이어, 제7차 실험에서는 좀 더 정밀한 판장쇠를 생산했다것은 코로나19의 사회적 혼란속에서 복원실험도 크게 위축되었던 한해였음에도 불구하고 큰 수확이라 할 수 있을 것입니다.

코로나19의 상황으로 주민들이 현장에서 생생하게 체험 할 수 없었다는 안타까움은 있으나 작업영상의 실시간 방송을 통하여 쇠부리복원의 현장을 전달할 수 있어서 조금이나마 아쉬움을 달랠수 있는 한 해였던거 같습니다.

고대 국가의 경쟁력을 높이고 농업 생산력 증대에 있어 주요 수단이었던 ‘철’의 생산기술이 오랜 시간 단절되어 단기간에 복원하기에는 어려움이 많을 것입니다.

그럼에도 칠곡번의 복원실험 동안 유의미한 성과를 창출해낼 수 있었던 것은 선조들의 지혜와 노력을 계승하여 울산 북구의 대표적인 문화자산인 ‘울산쇠부리문화’를 보존하고 복원하고자 하는 민·관·학 거버넌스 ‘울산쇠부리복원사업단’ 참여자분들의 끊임없는 노력 덕분이라고 생각합니다.

앞으로도 ‘울산쇠부리문화’의 기술적 수준과 역사성을 규명하고 이를 통해 한반도뿐만 아니라 동아시아 제철기술사적 흐름을 밝혀내어 역사적 의의를 규명해나가기 위해서 ‘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.

2022년 4월

울산광역시 북구청장 이 동 권

울산쇠부리 복원 연구는 우리 세대의 숙제이며, 미래시대에 넘겨주어야 할 자산



임 채 오
울산광역시 북구의회의장

철은 고대 국가의 근간을 이루는 물질이었습니다. 철기 시대에 이르러서야 인류는 비로소 대규모의 중앙집권적인 나라의 모습을 갖출 수 있었고 문명 변영의 길로 들어설 수 있었습니다.

철기의 발전은 풍부한 철 원료와 철을 자유롭게 다룰 수 있는 제철 기술의 발달이 같이 이루어져야 했고 고대부터 이러한 입지를 만족시키는 곳 중 하나가 바로 ‘달천철장(達川鐵場)’이었습니다. 삼한시대부터 최근까지 약 2,200년간 철을 생산하던 곳. 그 까마득한 시간동안 달천철장의 쇳물은 뜨겁고도 끊임없이 흘러 우리 지역의 삶을 윤택하게 해주었습니다.

울산쇠부리 제철기술복원실험을 통해 과거 조상님들의 철 주조 방식을 연구한 지 벌써 6년이 되었습니다. 2016년 고대 원통형 제련로 구조 복원으로 괴련철 생산부터 시작하여 3차부터 구충당 이의립 선생의 ‘토철제련법’을 복원 목표로 실험이 진행되었고, 2021년에는 드디어 4차례 쇳물을 출탕하여 판장쇠를 성공적으로 생산하였습니다. 수많은 분들의 연구와 실험이 있었기에 가능한 일이었습니다.

특히 ‘울산쇠부리’ 복원을 위해 불철주야 노력하시는 박원희 문화원장님과 이태우 울산쇠부리소리보존회 회장님, 한신대학교 이남규 교수님, 이은철 장인과 여러 연구원님 및 자문위원님, 이외에 발간을 위해 애써 주신 모든 관계자 분들의 열정과 노고에 박수를 보냅니다.

지난 12월에는 울산쇠부리기술이 문화재청에서 선정한 ‘국민들이 공감·선호하는 문화유산 목록’에 등재됐다는 반가운 소식을 접했습니다. 이는 오랜 시간 들인 노력의 결실에 한걸음 더 다가가고, 앞으로도 묵묵히 나아갈 수 있게 해주는 격려와 동기가 되었습니다.

지속적인 울산쇠부리 복원 연구는 우리 세대의 숙제이며 미래시대에 넘겨주어야 할 자산입니다. 또한 지역의 재발견으로 울산쇠부리에서 파생되는 문화자원이 더욱 풍성하게 확보된다면 우리 지역 문화에 자부심을 갖게 되고, 주민들을 더욱 단단하게 결속시켜 줄 것입니다.

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.

2022년 4월

울산광역시 북구의회 의장 임 채 오

I

머리말



S O E B U R I

I. 머리말

울산쇠부리축제는 고대에 그 뿌리를 두고 시작되어 조선시대에 크게 번성하였고 20세기 초까지도 지속되었던 이 지역 전통제철문화의 정신을 보존·계승하면서 단절된 기술을 복원하고 그와 관련된 철 문화를 국민들과 함께 향유하는데 그 목적을 두고 있다. 이 행사는 17년간 지속적으로 개최되어 현재 울산의 중요한 축제로 자리잡아가고 있다.

2005년에 시작되어 2022년에 18회를 맞는 이 축제는 ‘철(쇠)’을 기본 개념으로 하는 다양한 프로그램을 갖추고 있는데, 그 가운데에서도 ‘울산쇠부리복원실험’은 ‘타악페스타’와 함께 양대 킬러 콘텐츠로 수행되고 있다. 축제의 전반기에는 행사의 일환으로 울산쇠부리를 중심으로 한 학술대회가 수차례 개최된 바 있고, 실험은 2016년에 실시되기 시작하여 2021년까지 7차례 이루어졌다.

초기의 1·2차 실험(2016~2017)은 고대 원통형 가마를 이용한 철 제련기술을 복원하는데 초점이 맞추어져 괴련철 생산작업이 이루어졌고, 3·4차(2017~2018년) 실험은 이 지역의 특성을 갖는 울산 쇠부리가마를 모델로 해 선철을 생산하는 전통쇠부리기술을 복원하는데 목적을 둔 예비실험의 성격으로 실시되었다. 이후 5차 실험(2019년)부터는 조선 후기 구충당 이의립의 토철제련법 복원실험을 본격적으로 진행하게 되었다.

현재 울산-경주에 중심을 두었던 조선시대의 전통쇠부리와 관련된 장인들은 물론 그에 대한 기억을 갖고 계셨던 분들도 모두 타계하셨고, 확인된 곳만도 60개소를 넘는 조선시대의 각종 쇠부리 시설들도 폐허화된 유적으로만 남아 거의 대부분 방치된 상태이다. 그나마 다행히 1960년대부터 경제사학적 측면에서 쇠부리기술에 대한 현지조사와 탐문조사 등을 실시하여 부분적으로나마 당시 기술의 일면을 파악해 놓은 故 권병탁 교수님의 노력 덕분에 여러 부분에 대한 기초적 지식을 얻을 수 있었고, 몇 군데 유적의 발굴을 통해 하부구조를 중심으로 한 제철시설의 성격이 어느 정도 파악되기는 하였다.

하지만 이러한 조사와 연구는 대부분 이 분야의 비전문가들에 의해 수행되어 초보적 수준의 기술적 정보만을 파악하는데 그칠 수밖에 없었고, 그 때문에 실제로 쇠부리복원실험을 추진하는데 필요한 세 부적 기술지식들에 대해서는 현재도 정확히 파악되지 못하고 있는 부분들이 적지 않다.

이러한 악조건 하에서 전통쇠부리기술을 복원하는 실험은 대단히 어려운 작업이 아닐 수 없다. 하지만 40여 년간 제철고고학에 대한 융합연구를 수행하여 온 고고학과 금속공학 분야 전공자들 및 신진연구자들이 울산쇠부리소리보존회 회원분들과 공동연구팀을 구성하고 제한된 자료와 정보에 기초하여 시행착오를 거듭해가면서 지난 6년간 7차에 걸친 실험을 무난히 실시하여 단절된 쇠부리기술의 많은 부분을 파악해낼 수 있었던 점은 대단히 큰 수확이라 할 수 있다.

상기한 바와 같이 3·4차의 예비실험을 거쳐 5차부터 석축형 쇠부리가마에서 토철(분광)을 제련하는 본격적인 울산쇠부리복원실험이 진행되었다. 2020년 6차부터는 실험 장소를 북구청 앞마당에서 달천철장 유적공원으로 이전하고, 울산 대안동 쇠부리가마의 사례를 1/2 규모로 축소한 쇠부리가마와 지붕구조물을 설치하여 2회에 걸친 실험을 실시하였다.

모처럼 이 지역의 쇠부리와 관련된 역사의 현장에서 본격적으로 제대로 된 시설을 갖추어 실험을 하게 되었으나, 갑자기 닥쳐온 코로나19의 비상상황에서 쇠부리축제와 복원실험은 2년간 크게 위축되고 행사에 여러 가지 차질을 빚게 되었다. 무엇보다도 이 중요한 쇠부리복원실험의 현장을 국민들에게 생생하게 보여드리지 못하게 된 점은 가슴 아픈 일이 아닐 수 없었다. 그렇다 하더라도 작업영상의 실시간 방송과 연구자와의 인터뷰 등을 통한 보다 밀착된 전달방식으로 새롭게 시민들에게 다가갈 수 있었던 점은 나름대로의 의미 있는 성과였다고 여겨진다.

실험의 제조건이 여러 부분에서 부족하고 이러한 여건의 변화도 해결해 나아가야 하는 상황 속에서도 작업의 준비와 진행은 차분히 이루어져 조선후기 울산쇠부리기술이 하나씩 구명(究明)되어가고 있다고 할 수 있으며, 조만간 확고한 매뉴얼에 기초하여 안정적으로 판장쇠를 생산할 수 있는 날도 멀지 않았다고 생각된다.

현재 원료와 연료, 송풍, 첨가제 사용 여부, 출탕기술 등의 부문에서 미해결의 문제점들을 안고 있고 그 해결이 결코 쉽지는 않은 상태이다. 따라서 실험은 이러한 부분들에 대해 보다 역점을 두고 연구단간에 집중적이고 열띤 논의와 토론 등을 통해 문제점들을 해결하려고 열심히 노력하고 있다.

지난 6년간 여러모로 부족한 여건 속에서도 오로지 단절된 울산쇠부리기술을 복원해야 한다는 공통의 목적과 책임 하에 고된 작업도 마다하지 않고 즐거운 마음으로 성심성의껏 실험에 참여하여 주신 여러 분야(연구원, 연구보조원, 연구위원, 자문위원 및 기타)의 참여자분들께 먼저 감사의 마음을 표하는 바이다. 아울러 이러한 작업에 물심양면으로 지원해주고 계신 울산 북구청의 이동권 구청장님 이하 여러 관계자분들과 울산쇠부리축제 추진위원회의 정재화 국장님을 비롯한 실무담당자 여러분들께도 심심한 사의를 표하는 바이다.

II

실험 목적 및 방법

1. 실험 목적
2. 실험 방법
3. 실험단 구성



S O E B U R I

II. 실험 목적 및 방법

1. 실험 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 6차에 걸쳐 실험이 진행되었는데, 1~2차는 고대 원통형 가마 복원을 통한 괴련철 생산, 3차는 분광 원료의 선철 제련 가능성 타진, 4차는 조선후기 울산 쇠부리가마 선철 제련 예비실험의 성격으로 진행되었으며, 5~6차 실험은 이러한 결과들을 종합한 본격적 조선후기 울산쇠부리 선철 제련실험으로 진행하였다. 이 실험들의 결과는 모두 보고서로 작성되어(이남규 외 2016·2017·2018·2019·2021) 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 금속공학적 연구가 이루어지게 되었다. 고대의 경우 기왕의 연구를 통해 원통형 가마에서 철광석을 제련해 괴련철을 생산하는 기술체계가 어느 정도 규명이 되었으며, 이러한 기술은 울산뿐만 아니라 전국 대부분 지역에서 공유했던 것으로 파악되고 있다. 고려시대 철 제련기술에 대한 연구는 상당히 미미하다 할 수 있는데, 충주를 중심으로 한 충북지역에서 평면 타원형 혹은 말각장방형 가마가 조사되어, 이전시기 원통형을 벗어나는 새로운 구조의 가마 및 이와 연계된 제련기술의 존재 가능성이 제시된 바 있다.(최영민·이현진 2020, 김권일 2022)

조선시대 후기가 되면 달천광산을 중심으로 한 울산 및 가까운 청도·경주에서는 다른 지역에서 볼 수 없는 아주 독특한 제철기술이 성행하게 된다. 그것은 바로 1657년경 구충당 이의립 선생에 의해

개발되고 1910년경까지 그 후손들에 의해 운영된 것으로 알려진 ‘토철 제련법’이다. 이 기술은 달천광산에서만 산출되는 특이한 형태의 광석인 토철(土鐵)에서 유래된 것으로, 이 토철을 제련했던 가마가 바로 울산 쇠부리가마 혹은 석축형제철로(石築型製鐵爐)이다(김권일 2009·2012·2020, 신경환 외 2015).

이러한 울산쇠부리기술은 20세기 초반까지 성행했으나 1910년경 달천광산이 일제에 강탈당하면서 점차 소멸되어 이제는 그 명맥이 끊어져 버리게 되었다. 하지만 1960~70년대 권병탁 교수의 자료 수집과 연구를 시작으로 1990년 이후 각종 제철유적의 발굴조사를 통해 그 본형(本形)과 중요성이 점점 부각되게 되었다. 이후 여러 연구자들의 노력으로 울산쇠부리기술의 실체가 서서히 드러나게 되었다. 본 연구는 이처럼 명맥이 끊어진 울산쇠부리기술을 복원해, 소중한 우리 전통기술유산을 보존·전승하는데 그 목적이 있다.

2. 실험 방법

앞에서 언급한 바와 같이 울산쇠부리복원사업단에서는 2016~2020년도 1~6차 실험연구를 진행해 왔으며, 1·2차는 고대 원통형 가마의 구조를 복원하여 괴련철을 생산하는 실험을 실시하였다. 전통제철기술연구단(단장 이남규)의 복원실험연구와 연계한 다수의 실험을 통해 고대 원통형 가마 복원은 어느 정도 성과가 있는 것으로 평가되자, 지역사회를 중심으로 조선후기 울산지역 특유의 제철기술이라 할 수 있는 구충당 선생의 ‘토철제련법’을 복원하자는 의견이 대두되게 되었다¹⁾.

이에 2017년도 제3차 실험에서는 원통형 가마에서 토철과 비슷한 형태인 분광의 제련 가능성을 타진했고, 2018년도 제4차 실험에서는 방형 가마에서 분광을 제련해 소량의 선철 출탕에 성공한 바 있으며, 2019년도 제5차 실험에서는 비록 1본(本)을 다 채우지는 못하였으나 판장쇠바탕에 선철을 주입시키는데 성공하였다. 2020년도 제6차 실험에서는 3차례의 판장쇠바탕 출탕 등 모두 4차례의 쇠물 출탕에 성공하여 72.25kg의 선철을 생산하였다. 즉 해를 거듭할수록 울산쇠부리기술에 점점 다가서는 실험이 진행되고 있는 것이다.

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

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

실험의 원료는 달천철장의 토철을 사용해야 하지만 현재 달천광산은 울산광역시 기념물 제40호로 지정되어 있어 토철을 채취할 수 없다. 이에 기존의 강원도 양양산 철광석의 쇄분(碎粉)을 선별해 사용하였다. 풀무는 2019년까지 인력송풍으로 운용해 왔으나 지난 2020년도부터는 코로나19의 여파로 인해 비대면으로 진행하게 되어 기계송풍과 겸용할 수 있도록 하였고 이는 이번 제7차 실험도 마찬가지이다. 실험 결과물과 관련해서는 1본 6매 규격의 판장쇠바탕을 제작해 일정 규격의 판장쇠 제작을 더욱 정밀하게 하는데 주안점을 두었다.

실험 기획 및 준비, 진행, 결과물 수습 등의 전 과정을 기록하였으며, 그 과정에서의 원료, 결과물, 파생품 등에 대해서는 시료를 채취해 금속분석을 진행하였다. 이러한 내용들을 정리·분석해 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 못하고 말았다. 대신 준비과정과 실험과정을 담은 영상물을 제작해 실험 실시간 및 온라인 콘텐츠로 활용하였다. 향후 코로나19가 진정되면 울산 시민들과 연구자 등 많은 사람들과 함께 하는 흥미롭고 재미있는 문화콘텐츠로서의 역할을 할 수 있을 것이다.

3. 실험단 구성

이번 울산쇠부리기술 복원실험 및 보고서 작성에는 많은 인원의 참여가 있었다. 실험에 필요한 예산은 울산광역시 북구(북구청장 이동권)에서 울산광역시 북구문화원(원장 박원희)을 통해 지원하였으며, 공동단장 이남규·이태우를 비롯한 9명의 연구진과 13명의 연구자문위원단으로 구성되었다. 실험의 준비와 진행은 울산쇠부리소리보존회 회원들이 도맡아 주었으며, 한국야철문화연구소의 김남석님은 이은철 장인(匠人)과 함께 고난도의 실험과정을 수행해 주었다. 또한 한신대학교박물관 김태은 연구원과 중부고고학연구소 정경화 연구원이 실험에 참여해 많은 도움을 주었다. 이외 국립중앙문화재연구소의 김서진 학예연구사가 실험을 참관하고 여러 가지 학술적 조언을 해 주었다.

- 사 업 총 괄 : 박원희(울산광역시 북구문화원 원장)
- 단 장 : 이남규(책임연구원, 한신대학교 한국사학과 명예교수)
이태우(울산쇠부리소리보존회 회장)
- 연 구 원 : 신경환(공동연구원, 금속기술연구소 소장)
이은철(공동연구원, 한국야철문화연구소 소장)
김권일(공동연구원, 신라문화유산연구원 학예연구실장)
권용대(공동연구원, 울산대곡박물관 관장)
강성귀(공동연구원, 한국문화재단 연구원)

- 연구보조원 : 이재용(금속기술연구소 선임연구원)
 이지은(국립중원문화재연구소 연구원)
- 연구위원 : 윤석원(울산쇠부리축제 추진위원회 위원)
 (가나다순) 박은정(울산광역시 북구청 문화체육과장)
 이정민(울산광역시 북구의회 의원)
 조여문(울산광역시 북구청 행정지원국장)
 정상태(울산쇠부리축제 추진위원회 위원)
 정외경(울산광역시 북구의회 의원)
- 학술자문위원 : 김구한(울산대학교 연구교수, 울산광역시 문화재위원)
 성정용(충북대학교 고고미술사학과 교수)
 신상용(울산대학교 첨단소재공학부 교수)
 심재연(한림대학교 연구교수, 문화재청 문화재전문위원)
 조대연(전북대학교 고고문화인류학과 교수)
 최영민(아주대학교도구박물관 학예연구사)
 한지선(국립중원문화재연구소 학예연구사)
- 행정지원 : 정재화·김문주(울산쇠부리축제 추진위원회)
 김경곤·류희영(울산광역시 북구문화원)
 이원섭·김현기(울산광역시 북구청 문화체육과)
- 사진촬영 : 이순희(문화재전문 사진작가)
- 실험참여 : 정낙현·이지은(국립중원문화재연구소), 정경화(중부고고학연구소),
 김태은(한신대학교 박물관), 박용범(영남대학교 대학원), 김남석(대목장)
 박실·김상욱·양진하·윤귀철·조기오·류경수·지상길·김원수·
 황문규·김정호·김명진(울산쇠부리소리보존회)

앞에서 언급한 바와 같이 이번 축제 및 실험 역시 코로나19로 인해 우려가 높았지만, 축제 장소 및 기간을 분산시켜 대면축제를 가능하게 하였다.

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

실험 과정 및 결과물에서 채취된 시료 22점에 대해서는 신경환·이재용이 금속학적 분석 및 고찰을 맡아 주었다.

III

실험 준비

1. 가마의 구조
2. 실험매뉴얼
3. 실험 준비 과정



S O E B U R I

III. 실험 준비

1. 가마의 구조²⁾

울산쇠부리가마의 구조에 대해서는 기왕의 연구(권병탁 2004, 김권일 2009·2012)에 의해 개략적인 연구가 진행되어 있다. 이에 따른 조업방식이 제시된 바 있고(신경환 외 2015) 2017년과 2018년의 제 3·4차 실험에서는 직경(한 변) 80cm의 가마를 축조해 실험을 진행하였다. 이 실험은 울산쇠부리가마 복원실험의 예비실험에 해당되는 것으로, 개략적인 크기를 축소·설정하고 토철을 대신해 분광을 장입해 실험을 실시하였다. 실험을 통해 울산쇠부리가마에서 분광을 제련해 선철을 생산하는 것이 가능하다는 결과를 얻을 수 있었다.

한편 2019년도 제5차 실험보고서에는 기존 두 번의 조업을 통해 선철을 생산하는 방식과 달리, 한 번의 조업에서 곧바로 선철을 생산할 수 있는 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 북한 회령 인근의 전거리에서는 당시 석축이 설치되고 중앙부의 제철로가 석축보다 사람 키만큼 돌출된 구조에서 사철을 이용해 선철을 생산하였다. 둘째, 2019년도 울산 대안동 쇠부리터가 발굴되었는데, 동벽의 가마 벽체가 석축 상부보다 약 50cm 돌출되어 있다는 점이 확인되어 전거리 제철로와 같이 울산쇠부리가마도 석축보다 가마가 더 높게 돌출되었을 가능성이 있다는 점이다. 셋째, 2018년도에 실시된 제4차 실험에서 높이 220cm의 가마에서 분

2) 이번 실험에 사용한 쇠부리가마는 2020년도 제6차 실험에 사용한 가마를 보수하여 사용하였다. 제6차 실험 후 가마 바닥에 형성된 슬래그를 모두 제거하고 하부구조(방습시설)를 재정비하였으며, 골구멍에 사용된 석재 역시 전면 교체하였다. 벽체 하부 내면에 용착된 슬래그도 모두 제거하고 내벽 전면을 점토로 다시 미장하였다. 이러한 보수 외 석축을 포함한 가마의 기본적인 구조 및 제원은 동일하므로, 본 항목에서는 제6차 실험 보고서에서 바뀐 몇 가지 내용들만 수정해 그대로 게재한다.

광을 제련해 쇳물 24kg을 유출시키는 등 모두 61.9kg의 선철을 생산한 점이다. 이어 2020년도 이를 심화한 논고(김권일 2020)에서는 2019년도의 울산쇠부리복원실험 결과 및 일본 타타라제철(たたら製鐵)과 가고시마(鹿兒島)지역 석조제철로(石造製鐵爐)와의 가마 구조 및 조업방식의 차이점과 유사점이 비교 검토됨으로서 분광의 경우 고로(高爐) 형태가 아니어도 선철의 생산이 가능하다는 점이 더욱 뚜렷하게 나타났다. 이러한 점은 2020년도 실험에서도 그대로 재차 확인되었다(표 1 참조).

즉 울산쇠부리가마는 대안동 쇠부리터의 가마 및 북한 전거리 제철로와 같이 석축보다 더 높이 가마가 돌출되었을 가능성이 확인되어 높이 3~4m의 고로 구조일 가능성이 확인되었으며, 설령 높이가 그렇게 높지 않은 200~250cm 구조에서도 분광을 사용하면 선철의 생산이 가능하다는 점이 파악된 것이다.

〈표 1〉 2018~2020년도 울산쇠부리 복원실험 개요

구분	4차	5차	6차	비 고
	2018.05.11~13	2019.05.10~12	2020.10.09.~11	
가마 내면 크기(cm)	80	80	70×90	가마 하부·중부 기준
가마 높이(cm)	220	250	250	가마 바닥(爐床) 기준
원료	분광	분광	분광	
분광 장입량(kg)	300	380	310	
목탄 장입량(kg)	1,230(610-600-20)	1,380(630-750)	1,150(390-660-100)	장입 총량(분광 장입 개시 전·후)
슬래그/ 패각 장입량(kg)	60	60	30/22	
장입 비율 분광/목탄/(슬래그)/패각	1/4.1/0.2	1/3.63/0.16	1/3.7/(0.071)/0.097	목탄 장입 총량 기준
	1/2.06/0.2	1/1.97/0.16	1/2.45/(0.071)/0.097	분광 장입 개시 후 목탄량
평균 최저온도(℃)	1,192	1,165	1,121	분광 장입 개시 후
평균 최고온도(℃)	1,316	1,267	1,266	
평균 온도(℃)	1,269	1,219	1,191	분광 장입 후 안정온도부터의 평균
송풍 개시	9:50	09:15	09:10	본격 송풍 개시
분광 장입 개시	13:51	11:06	11:10	
선철 출탕 시작	20:38	17:02	14:39	
분광 장입 종료	20:03	20:03	19:00	
송풍 종료	21:10	23:31	20:27	5차-최종 출탕까지 송풍 지속
철 생산량(kg)	188.3(선철 61.9)	83.95	72.25	
철 회수율(%)	62.76	22.09	23.3	
생산품의 함탄량(%C)	3.10~4.70	3.85~4.50	3.56~4.25	아공정백선철 및 공정선철
참고 사항	* 2018년도 4차 실험 : 유출-24.0kg, 가마 내 형성-164.3kg(선철 37.9kg, 혼합철괴 126.4kg), 총 선철-61.9kg * 2018년도 4차 실험에서는 철괴와 철재의 분류가 다소 불충분한 것으로 판단됨			

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, 앞창, 초롱구멍·잡쇠구멍, 송풍시설, 판장쇠바탕 등으로 구성하였으며, 규모는 최근 발굴조사된 울산 대안동 쇠부리터 가마를 1/2로 축소한 것으로 설정하였다. <표 2>에서 보는 바와 같이 대안동 가마는 내면 기준 길이 204cm, 너비 168cm, 잔존높이 250cm이지만, 이 크기를 그대로 적용할 경우 실험에 소요되는 비용과 시간, 인원이 과다하기 때문에 현실적으로 불가능하다. 따라서 절반 크기로 줄이는 것으로 결정하였으며, 이외 구조와 관련된 다양한 부분은 기 발굴된 유적 및 연구성과를 참고하였다.

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 600cm로 하였는데, 이는 가마 바깥지름이 170cm이므로 석축 전체 길이는 13.7m가 되도록 하였다. 대안동 가마 석축의 최대 너비는 중앙부가 430cm인데, 중앙부 앞부분이 함몰된 상황도 있고, 실험장에서는 이를 그대로 구현해 내기 어려워 가마 너비와 동일한 150cm로 하였다. 가장자리를 석재로 쌓고 내부에 잡석과 흙을 채워 넣는 것으로 설정하였으며, 높이는 가마가 있는 중앙부 최대높이가 150cm가 되도록 해 양단으로 갈수록 낮아져 지면과 닿도록 하였다.

가마의 하부구조는 방습시설과 가마 바닥(爐床)으로 구분할 수 있다. 방습시설은 가마가 들어설 자리에 굵은 모래-고운 모래+황토-목탄분을 각각 10cm 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.

<표 2> 울산 대안동 쇠부리터 가마의 제원

구분	규모(cm)		폴무터 (cm)	배재구 (cm)
	석축	가마		
현황	길이	1,500	204	730
	너비	430	168	150~175
	높이(깊이)	160	250	45
	벽체 두께		10	골구멍 한번 17
복원	길이	1,300	90	300
	너비	150	70	130
	높이(깊이)	150	250	70
	벽체 두께		40	골구멍 한번 15

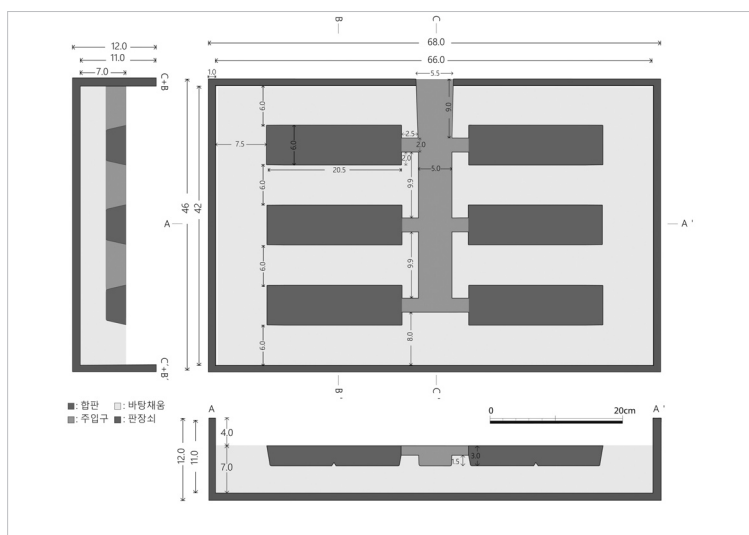
가마는 앞에서 밝힌 바와 같이 울산 대안동 쇠부리가마를 1/2 크기로 축소하는 것으로 설계하였는데, 1/2 크기는 길이와 너비가 각각 102cm, 84cm가 되지만 내벽 점토의 침식 20~30cm를 감안해 180×140cm로 상정하고 이를 1/2로 축소해 내벽은 길이 90cm, 너비 70cm로 복원·설계하였다. 좀 더 세부적으로 기술하면, 가마의 외면은 길이 170cm, 너비 150cm가 되고, 내면은 상부 길이 70cm, 너비 50cm, 중부 길이 90cm, 너비 70cm, 하부 길이 60cm, 너비 40cm가 되도록 하였다. 높이는 가마 바닥에서부터 250cm가 되도록 하였는데, 더 높게 하자는 의견도 있었으나 2018년도 실험 결과 및 실험 리스크를 줄이기 위해 너무 높게 하지는 않았다.

가마의 형태는 평면 장방형이고, 단면은 내면을 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 55cm, 중부 40cm, 상부 25cm 정도이다. 온도센서가 설치될 위치의 벽체는 얇게 조성하였는데, 벽체 조성 시 지름 10cm의 나무막대를 꽂았다가 제거 후 설치하는 방법을 사용하는 것으로 하였다. 벽체의 구축은 석축 중앙에 30cm 크기의 석재와 점토를 층층이 쌓아 방(房) 모양을 조성하고, 안쪽에 10×10×15cm 크기의 비소성 황토블록을 쌓고, 내면에 내화점토를 5cm 두께로 미장하기로 하였다.

초롱구멍과 잡쇠구멍은 가마의 앞창에 설치되는데, 앞창은 가마 앞쪽에 높이 60cm, 너비 40cm의 오각형으로 조성하고 좌·우에 소성벽돌을 세우고 상면에 불목돌³⁾을 설치하는 것으로 설계하였다. 앞창의 두께는 벽체 상단에서 하단으로 갈수록 얇게 해 초롱구멍 부분은 10cm 이하가 되도록 하였으며, 반건조 점토를 이용해 앞창을 설치하고 초롱구멍(출탕구)과 잡쇠구멍(배재구)을 설치하도록 하였다. 초롱구멍은 가마 바닥과 연결해 약 15°로 경사지게 설치하며 지름은 10cm가 되도록 해 판장쇠바탕으로 연결해 쇳물을 출탕할 수 있도록 하였다. 잡쇠구멍은 초롱구멍 10cm 위, 2cm 우측에 지름 7cm 크기로 제작하는 것으로 설계하였으며, 가마 바닥에서는 23.5cm 위가 된다.

송풍시설은 풀무와 바람골(바람골의 가마 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 나무판재와 판석으로 한 변 15cm 크기의 도랑모양 틀을 만들고 외면을 점토로 밀봉해 설치한 2019년도의 구조를 그대로 재현하기로 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 바람골 길이는 150cm로 해 송풍구의 개방이 용이하도록 하였다.

판장쇠바탕은 한 번의 출탕으로 판장쇠 6매가 생산될 수 있도록 설계하였으며, 이러한 바탕 4분을 제작하도록 하였다. 판장쇠 1매의 규격은 길이 20cm, 너비 6cm, 높이 3cm로 하여, 1매의 무게가 2.83kg【20cm×6cm×3cm×7.87(비중)】이



〈그림 1〉 판장쇠바탕 설계도

3) '불목돌'이란 울산쇠부리가마에 사용하던 돌로, 경주시 산내면 상목리에서만 생산되는 열에 잘 견디는 납작돌을 말한다(권병탁 2004, 651). 현대의 주택건축에서는 '이맛돌'이라고 하여 베트남산 현무암 등이 사용된다.

되도록 하였다. 즉 1회 출탕으로 16.98kg【2.83×6매】의 판장쇠가 생산되며, 3분을 제작해 3회를 출탕 시키면 총 판장쇠의 무게는 50.94kg【16.98kg×3분】이 된다. 다만 냉각 후 판장쇠 분리의 용이를 위해 판장쇠 윗부분이 넓고 아랫부분이 좁아지도록 해야 한다는 의견이 수용됨에 따라, 무게 보전을 위해 길이를 20.5cm로 다소 늘이게 되었다(그림 1).

판장쇠바탕은 10mm 두께 원목 합판으로 사방과 바닥을 짜고 바닥에 공기구멍을 조성하며, 내부에 모래와 주물사 등을 채워 제작하도록 하였다. 바탕에서의 판장쇠 분리를 용이하게 하기 위해 판장쇠들의 아래쪽이 약간 좁아지도록 하고, 출탕 및 냉각 후 탕도(湯道)에서 판장쇠를 잘 분리하기 위해 탕도와와의 연결부 및 판장쇠 길이방향 중앙부 하단에 홈을 두도록 설계하였다. 특히 이번 실험에서는 상기한 바와 같이 판장쇠바탕을 이동식으로 하여 출탕 시에만 바탕을 탕구 아래로 이동시키고, 출탕 후 즉시 이동보관할 수 있도록 하였다⁴⁾.

〈표 3〉 실험 가마의 속성

가마				석 축			
구 분		내용(cm)	비고	구 분		내용(cm)	비고
평면형태		장방형	안쪽 모서리는 약간 둥글게	길이	전체	1,200	
단면형태		통형	상단 80cm부터 좁아짐, 하단 90cm부터 좁아짐		동쪽	600	
높이 (깊이)	전체	250	가마 바닥→상단, 내경/높이=1/3.125		서쪽	600	
	하부구조	30	가마 바닥 아래, 목탄-모래+황토-굵은 모래	너비		150	
	석축	150	가마 바닥에서 석축까지	높이	방습시설	180	방습시설 설치면에서
	상부	80	좁아지는 부분에서 상단까지		가마바닥	150	가마바닥에서부터

2. 실험 매뉴얼

여러 차례의 회의를 거쳐 제6차 실험과 동일한 울산쇠부리가마에서 안정적인 선철 판장쇠 생산 계획을 수립하였다. 원료는 4mm 이하 크기의 분광을 사용하며, 제6차 실험과 동일하게 배소를 해 분광 중에 함유되어 있는 아황산가스, 비소⁵⁾ 및 수분을 제거하여 온도 상승에 효과를 높이도록 한다.

가마는 제6차 실험에서 사용된 가마를 보수하여 사용한다. 실험 중 고열에 의해 용융된 가마 벽의 일부와 실험 후 가마 내부에 잔존한 부산물을 제거하는 과정에서 탈락된 앞창, 가마 바닥과 송풍시설을 보수하여 재사용하는 것으로 한다.

초롱구멍은 가마 바닥의 중앙에 지름 10cm의 원형으로 뚫고, 잡쇠구멍은 이보다 7cm 정도 높게

4) 2019년 제5차 실험과 2020년 제6차 실험에서의 판장쇠바탕도 당초는 이처럼 이동이 가능하도록 설계하였으나, 실제 준비과정에서는 충분한 시간 및 노하우가 없어 탕구 앞쪽에 비이동식으로 설치한 바 있다.

5) 비소는 달천광산의 광석에 함유되어 있는 성분으로 650℃에서 균열이 발생하여 광석 중에서 제거된다. 달천광산은 현재 채굴이 불가능한 관계로 본 실험에서는 정선 신예미광산 채광분을 사용하였다. 따라서 비소는 함유되어 있지 않다.

설치하며, 잡쇠구멍을 통해 철재 및 선철의 형성이 확인되면 초롱구멍을 통해 선철을 출탕하는 것으로 한다. 가마 바닥에 용융선철이 형성되면 비중이 낮은 철재는 그 위에 부유하게 되는데, 선철이 10cm 정도 형성되었을 시 철재는 송풍관으로 역류할 우려가 있기 때문에 이 때를 선철의 유출 시점으로 한다. 선철은 초롱구멍 앞에 만들어진 판장쇠바탕으로 흘러 들어가게 해 굳힌 다음 수습하기로 한다. 판장쇠 1본의 무게는 16.98kg⁶⁾으로 4회 출탕하는 것으로 한다.

실험은 아래 <표 4>와 같이 실험매뉴얼을 작성해 이에 따라 진행한다.

실험 전날 10월 22일 15:00 고유제를 지내고, 15:30에 점화를 해 실험 당일까지 예열하기로 한다. 23일 08:30 대탄의 만장입을 진행하며, 만장입 후 송풍을 시작으로 본격적인 조업을 시작한다. 온도는 목탄을 만장입한 상태로 평균온도 1,000℃ 이상을 1시간 이상 유지해야 하며, 온도가 1,250℃ 이상 상승되면 원료(분광)를 장입한다. 분광은 매 10kg씩 15분 간격으로 40회 장입하고, 원료 장입 5분 후 첨가제(슬래그) 2kg, 다시 5분 후 연료(목탄) 20kg의 순으로 장입한다. 목탄은 가마 장입구에서 20cm 깊이를 유지하면서 중탄+소탄 20kg-대탄 20kg의 순서로 장입하는 것을 원칙으로 한다. 다만 가마 내부의 분위기 등 조업환경에 따라 목탄의 크기를 조절할 수 있다. 분광이 모두 장입된 후 1시간 40분 동안 대탄 100kg을 20분 간격으로 5회 장입한다. 첨가제는 제6차 실험에서 배출된 슬래그⁷⁾를 2kg씩 나눠서 40회 장입하여 분광 내의 분순물 분리를 용이하도록 한다. 총 9시간 45분 동안 원료(분광) 400kg, 첨가제(슬래그) 80kg, 연료(목탄) 800kg을 장입하여, 원료:첨가제:연료의 비율은 1.0:0.2:2.0으로 한다.

송풍은 풀무꾼의 피로도 및 코로나19로 인한 인력 부족으로 발풀무의 풍량을 측정해 그와 유사한 풍량으로 조절해 기계송풍을 한다. 원료와 첨가제의 장입을 종료한 2시간⁸⁾ 후까지 연료(목탄)를 장입하면서 송풍을 더하여 가마 내부의 내용물을 모두 연소시킨다. 이후 가마 하부에 잔류하는 선철과 슬래그를 제거하는 것으로 한다.

실험 중 매뉴얼 변경이 불가피한 경우 연구원의 요청 및 책임연구원(이남규)의 승인에 의해 변경할 수 있도록 한다.

조업기록은 원료·연료·조제제·온도 기록 담당자가 미리 표를 작성하여 실험현장에서 기재하며 실험 후 정리해 제출한다. 온도계는 가마 앞면(앞창쪽) 하부에 2개, 뒷면(송풍관쪽) 중간부 2개, 앞면과 뒷면 상부에 각 1개씩 총 6개를 설치하고, 이동식온도계(1,600℃까지 측정 가능)는 1대를 사용한다. 그리고 조업기록의 정확성을 기하기 위해 기록자들이 공동으로 볼 수 있는 시계를 준비한다.

6) 판장쇠바탕은 2.83kg짜리 판장쇠 6매로 판장쇠 1본의 중량은 16.98kg이다.

7) 슬래그는 제6차 복원 실험(2020년도 쇠부리 복원실험) 시 유출된 것을 파쇄해 사용하기로 하였다.

8) 제6차 실험 시 분광 첫 장입 시간은 11:10이었고, 1차 선철 출탕시간은 14:39로 분광 장입 후 약 3시간 29분 정도 지난 시점에 출탕되었다. 마지막 분광 장입은 19:00이며, 마지막 출탕 시간은 20:52으로 1시간 52분 정도 송풍한 뒤였다. 따라서 마지막 분광은 장입 후 약 2시간 정도 지나야 출탕이 가능할 것으로 추정된다.

〈표 4〉 2021년도 울산쇠부리복원실험(제7차) 실험매뉴얼

날짜	시간	조업 내용	비고
2021년 10월 22일 (금)	09:00~18:00	• 실험 준비	• 준비사항 체크
	15:00~15:30	• 고유제	• 박원희 원장 주관
	15:30~	• 점화, 가마 예열	
	16:00~17:00	• 실험 최종 점검회의	• 이남규 단장 주관
2021년 10월 23일 (토)	08:30~09:00	• 조업 준비사항 점검 및 목탄 만장입 • 송풍 개시	
	10:00~24:00	• 원료 장입(분광 총 400kg) - 분광 총 400kg, 최초 목탄 만장입 및 하부 1,300℃ 이상, 중부 1,250℃ 이상 상승 시, 10:00 최초 10kg 장입(잔량 390kg), 이후 평균 15분 간격으로 매 10kg씩 39회에 걸쳐 19:45까지 390kg 장입, 9시간 45분 동안 장입 예상. 원료는 나무 삼으로 투입 • 첨가제 장입(슬래그 80kg) - 분광 장입 후 10:05부터 평균 15분 간격으로 매 2kg씩 40회 장입, 19:50까지, 9시간 45분 동안 장입 예상 • 연료 장입(목탄 450/600/100kg) - 목탄 총 1,350kg, 분광 장입 전 하단~중단까지 대탄 장입, 상단은 소탄 장입, 약 450kg 만장(잔량 900kg), 분광 장입 후 10:10부터 평균 15분 간격으로 중·소탄 20kg→대탄 20kg씩 번갈아 각각 20회에 걸쳐 19:55까지 800kg 장입, 9시간 45분 동안 장입 예상. 이후 약 2시간 동안 100kg 장입(20분 간격 대탄 5회 장입) • 분광 장입 개시 후 9시간 55분 경과 후 분광·첨가제 장입 종료, 11시간 35분 경과 후 목탄 장입 종료	• 평균 1,250~1,300℃ 책임연구원 판단 하에 분광 장입 개시. • 분광 장입 개시 후 분광/첨가제/목탄 비율을 1.0/0.2/2.0 유지. • 가마 상단에서 20cm 이하를 유지하면서 장입, 장입 간격·무게 등은 변동되겠지만 비율은 그대로 유지.
2021년 10월 24일 (일)	09:00~12:00	• 조업 결과물 확인 및 평가회의 - 결과물 확인 및 정리 - 사진촬영, 노트, 기록 정리 - 실험장 전시 및 관람 해설 - 분석시료 선정, 파생품 및 생산품 일부 • 앞창 개방 - 가마 내 변화 관찰 위해 앞창 일부 개방	• 11월 06~07일 - 생성물 수습 및 정리
	13:00~17:00	• 실험장 정리 및 해산(13:00~17:00)	

3. 실험 준비 과정

1) 원료, 연료, 첨가제 준비

(1) 원료

원료인 철광석은 양양군 철산마을에서 생산된 분광 1,050kg을 준비하였다. 당초 2021년 6월 9일(수요일) 음성 철박물관과 사전협의를 거쳐 철광석 4mm 이하 1,000kg을 운송할 계획이었다. 음성 철박물관에 가서 원료 선광을 시도하였으나 괴광 외에는 너무 가는 분광이어서 원하는 크기의 원료를 확보할 수 없었다. 따라서 논의 끝에 국립중원문화재연구소 보관 원료를 조업에 사용하기로 결정하였다. 같은 날 국립중원문화재연구소에서 원료 선광 작업을 실시하여 1,050kg을 울산으로 이송하였다.



〈그림 2〉철광석 선광 및 운반



〈그림 3〉배소가마 축조 및 건조

본 실험 준비에 앞서 철광석은 배소를 실시하였다. 2021년 8월 28일(토요일) 실험장 앞에 길이 390cm, 너비 280cm, 깊이 25cm 크기의 수혈 배소가마를 조성하였다. 수혈 굴착면을 정면한 후 굴광면 가장자리에 황토반죽(황토 5 : 마사 5 : 모래 1)을 3cm 정도 두께로 깔고, 그 위에 황토블록(길이 25cm, 너비 17cm, 높이 15cm)을 쌓아 가마의 높이를 높였다. 따라서 가마의 전체 깊이는 43cm 정도이다.

황토블록 밖으로는 수혈 굴착 시에 나온 흙으로 뒤채움하였다. 가마의 바닥은 황토반죽(마사는 채에 걸러 사용)으로 미장하였다. 배소가마는 화목과 잡탄(180kg)에 불을 붙여 건조시키고, 전력송풍기를 이용해 가열하였다.



〈그림 4〉 철광석 배소

다음날 8월 29일(일요일) 예열된 목탄 상부에 철광석을 골고루 장입해 배소를 진행하였다. 철광석은 전체 885kg을 6차례 나누어 장입하였고 화목 2마대, 목탄 570kg(대탄 10kg×57박스), 잡탄 180kg(30kg×6마대)을 사용하였다. 송풍기 바람이 닿는 곳의 온도는 900℃ 내외, 바람이 닿지 않는 곳은 650℃ 정도였다.

일주일 뒤인 9월 4일(토요일) 배소된 철광석을 수습하였다. 조업에 사용하기 위해 4mm 채로 먼저 쳐서 걸러내었다. 그리고 풍구를 이용하여 철 함량이 낮고 너무 미세한 입자를 분리하였다. 채로 친

다음 풍력 선광한 철광석 무게는 622.9kg이었다. 이어서 9월 5일(일요일) 자력선광 1회를 실시한 후 마대자루에 10kg 단위로 담아 보관하였다. 최종 선광을 거친 철광석은 440kg으로, 약 50%의 불순물이 제거되었다.



〈그림 5〉 철광석 자력선광

〈표 5〉 울산 쇠부리 1~7차 실험 철광석

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)	7차(2021. 10.22~24)
준비량(kg)	500	660	440(240/200)	400	382	470	430
장입량(kg)	460	425	170	300	380	310	300
광석 산지	양양산 자철광석	양양산 자철광석	정선 신예미광산	정선 신예미광산	정선 신예미광산	정선 신예미광산	양양산 자철광석
크기	2~5cm 괴광	3cm 내외 괴광	3cm 내외 괴광, 1cm 이하 분광	4mm 이하 분광	4mm 이하 분광	4mm 이하 분광	4mm 이하 분광
배소 여부	○	○	○	×	×	○	○

(2) 연료

연료인 목탄은 울주군 언양읍 하이숲에서 참나무 백탄 2,100kg을 구입하였다. 주문은 15cm 길이의 대탄 1,050kg(105Box), 10cm 길이의 중탄 450kg(45Box), 5cm 길이의 소탄 600kg(60Box)을 박스당 10kg 단위로 하였다. 배송된 목탄은 크기별 대·중·소탄으로 구분해 두었다.



〈그림 6〉 연료 준비

(3) 첨가제

첨가제는 2020년 6차 실험에서 출탕된 유출재(슬래그)를 파쇄 후 사용하였다. 2021년 10월 21일(목요일) 실험장 좌측에 마련된 공간에서 파쇄하였다. 유출재는 2~5cm 크기로 파쇄하여 2kg 단위로 자루 40개(80kg)에 담아두었다.



〈그림 7〉 첨가제(슬래그) 파쇄 및 포장

2) 가마 보수

(1) 가마 벽

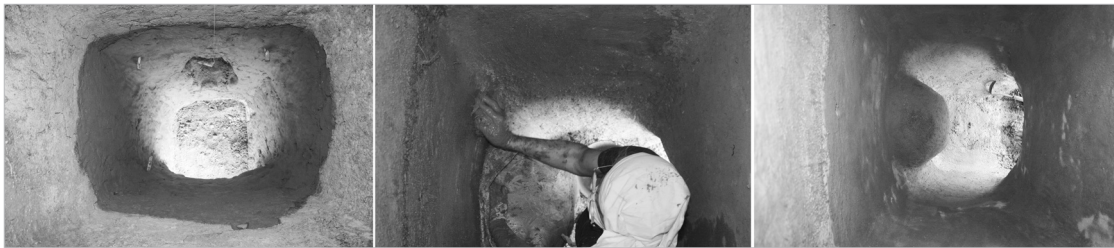
본 실험에서는 제6차 실험 때 축조된 가마를 보수하여 사용하기로 하였다. 6월 26~27일 가마 내부 상태를 점검하고 가마 내벽 보수를 진행하였다. 가마 바닥은 잔존 부산물을 제거하는 과정에서 10cm 정도 결손된 상태였고, 가마 내벽은 앞창을 중심으로 앞벽과 뒷벽은 가마 바닥에서부터 최대 132cm 높이까지(잔존 118cm), 좌벽은 140cm 높이까지(잔존 110cm), 우벽은 125cm 높이까지(잔존 125cm) 미장부가 용융·탈락되었으며, 미장 내부의 비소성 황토블록이 노출되어 있거나 미장부와 황토블록 사이가 벌어진 상태로 확인되었다. 네 모서리 부분의 미장은 일부 잔존하였다. 용융·탈락된 부분의 상위는 회청색으로 경화되었으며, 상단에서부터 50cm 정도 아래까지는 요철면 없이 매끈한 잔존상태를 보여주고, 그 아래는 콩알 크기 정도의 용융된 철광석 가루가 부착되어 있다.

가마 내벽의 보수는 우선 부실해진 미장은 제거하였으며, 양호한 벽은 솔질을 한 후 벽을 정리하였다. 미장이 제거된 가마 하부는 2회 미장을 실시하였다. 미장에 사용된 점토는 황토 4 : 마사토 5 : 모래 2의 비율로 제6차 가마 벽 축조할 때의 점토 비율과 동일하게 재료를 섞었다. 미장은 2~3cm 두께로⁹⁾ 6월에 1차 미장 후 건조, 9월에 2차 미장 후 건조를 진행하여 미장을 완료하였다.

9) 부실해진 기존 미장부위를 제거한 후 벽체에 황토 물칠을 하고 비율대로 섞은 점토덩어리를 벽에 붙인 후 2~3cm 두께로 얇게 떠 미장을 하였다.



〈그림 8〉 가마 내벽 보수 과정(좌: 탈락-용융부 확인, 중: 1차 미장 점토채움, 우: 점토채움 세부)



〈그림 9〉 가마 내벽 보수 과정(좌: 1차 미장, 중: 2차 미장 중, 우: 미장 완료 후)

가마 외벽은 장입구의 결손이 다소 심한 상태였다. 갈라진 벽은 제거하였고, 탈락된 석재는 새로 놓아 사이 사이에 점토를 채워 보수하였다. 석축은 약간의 갈라짐이 확인되지만 잔존상태는 양호하였다. 갈라진 틈의 일부를 얇은 철판으로 ‘V’자 형태로 홈을 내어 틈 사이를 잘 정리하였고, 황토 4 : 마사 5 : 모래 1의 비율로 섞어 점토 반죽을 만든 후 갈라진 틈 사이를 메워주었다.



〈그림 10〉 장입구 보수과정



〈그림 11〉 가마 외벽 보수

가마 벽의 보수는 본격적인 실험이 진행된 10월 23일까지 관찰하면서 갈라진 틈을 여러 차례 점토 반죽으로 메워주었다.

(2) 송풍시설

송풍은 기계송풍을 주로 하고, 발풍무는 필요에 따라 병행하는 것으로 매뉴얼을 설정하였다.

① 풀무

발풍무는 4인용으로 풀무의 상판을 분리해 내부의 불순물을 제거하였다. 풀무 틀은 재정비를 하였고, 풀무 사방 목재판의 무더진 부분은 초질을 해 부드럽게 하였다. 이 후 2명씩 나눠 양쪽에서 밟아 풍량을 확인하였다.

기계송풍기는 새로 구입한 풍량조절 가능 송풍기의 풍량을 측정하였다. 풍량과 풍압이 예상했던 것 보다는 약하였다. 풍량과 풍압을 조절해 가며 여러 차례 측정해 보았지만, 실험에 적용하기에는 부적합하여 6차에서 사용하였던 기계송풍기를 재사용하기로 하였다. 송풍기의 풍량을 측정하여 풍압과 속도를 조정하였고, 발풍무의 날숨과 들숨 효과를 내기 위해 여닫이를 달아 열고 닫기를 조절하였다.



〈그림 12〉 풀무 수리

송풍구와 골구멍은 목재로 제작된 단면 방형의 바람구멍과 가죽으로 연결하였다. 목재 바람구멍은 가마 내부의 상황을 관찰하기 위해 여닫이가 가능한 관찰구를 뚫어 가마 내부의 송풍이 원활하지 않을 때마다 열고 관찰하였다.



〈그림 13〉 바람구멍(좌: 풀무와 바람구멍 연결, 중: 바람구멍 세부, 우: 여닫이 사용)

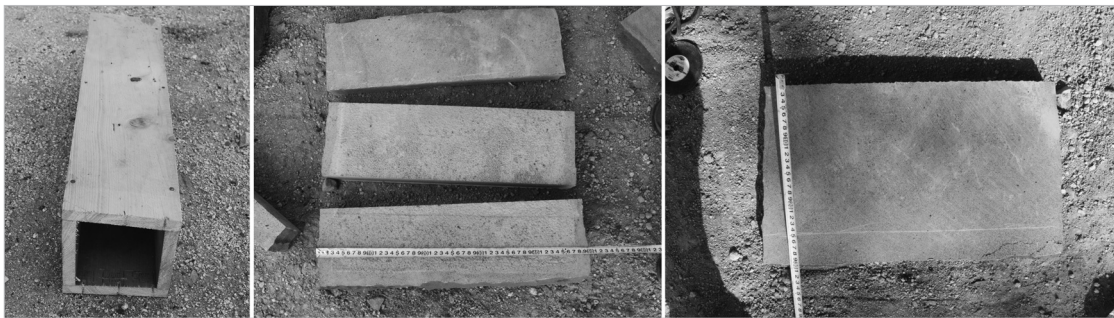
② 골구멍 조성

6차 실험 후 골구멍에 사용되었던 석재는 가마 내 돌출부는 박락되었고, 가마 벽에 조성된 부분은 잔존상태가 양호하였다. 골구멍의 조성을 위해서 잔존하는 석재를 제거하였고, 그 과정에서 골구멍이 확장되었다. 이 부분은 점토반죽으로 채워넣어 크기를 조정하였다. 골구멍의 조성은 우선 목판으로 바깥지름 15×15cm의 방형 틀을 80cm 길이로 제작하였다. 골구멍에 사용된 석재는 두께 5cm의 인

조판석으로 아래·윗면에 놓을 판석은 길이 40cm, 너비 25cm짜리 4매, 측면에 놓을 판석은 길이 40cm, 너비 15cm짜리로 4매를 전기톱으로 잘랐다. 골구멍이 축조될 위치, 즉 가마 바닥에서 20cm 높이, 외벽에서 20° 각도로 내벽 20cm 안쪽까지 돌출되도록 아랫면에 너비 25cm의 판석 2매를 연결¹⁰⁾하여 놓고, 그 위에 목판틀을 올렸다. 목판 틀 양 측면에 너비 15cm의 판석을 올렸으며, 윗면에는 다시 너비 25cm의 판석을 올려 판석의 단면형태는 ‘표’자형이 되도록 하였다. 판석을 고정된 후 판석 주변의 빈 공간은 점토반죽¹¹⁾을 채웠으며, 내벽 돌출부는 점토반죽을 두껍게 발라 배가 부른 형상이 되도록 하였다. 이후 판석 내부의 목판은 제거하였고 건조를 실시하였다.



〈그림 14〉 골구멍 잔존상태 및 석재 제거 후



〈그림 15〉 목재 틀 제작 및 인조판석



〈그림 16〉 골구멍 축조 과정

10) 가마 외벽에서 가마 내벽 돌출부 말단까지의 골구멍 길이는 65cm 정도인데, 가마 외벽의 바람구멍과 연결을 위해 가마 외벽으로 더 연장시켜 전체 길이는 80cm 정도이다.

11) 점토반죽은 황토 5 : 마사토 8 : 백토 2 : 모래 1의 비율로 섞었다.

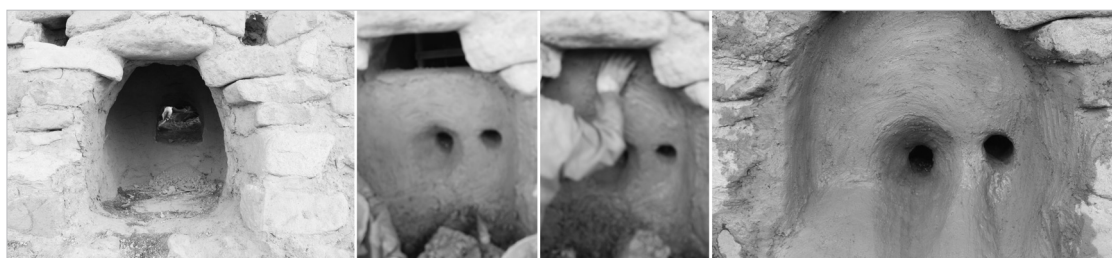


〈그림 17〉 골구멍 축조 후 미장과 건조

(3) 앞창

앞창은 가마 내벽의 보수와 골구멍 조성 및 가마 바닥에 10cm 두께로 굵은 모래를 깔아 바닥을 마무리 한 후 가장 나중에 축조하였다. 크기는 높이 60cm, 너비 40cm이며, 형태는 오각형(아치형)이다. 양 측면에 소성벽돌을 쌓아 올려 미장을 하였으며, 상부는 불목돌을 올려 축조하였다. 양측면에 쌓아올린 벽돌과 미장부가 결실되었으나 잔존상태가 양호하였다.

앞창의 보수는 양측면에 소성벽돌¹²⁾과 점토반죽을 층층이 쌓아 올렸고, 소성벽돌의 내외면은 점토 반죽으로 미장하였다. 앞창의 두께는 상부 40cm에서 차츰 줄어들어 하부는 10cm로 설계하였으나 앞창의 높이가 낮아 두께를 측정하면서 축조를 할 수 없어 전체를 20cm 정도 두께로 축조하였다.



〈그림 18〉 앞창 축조과정-1



〈그림 19〉 앞창 축조과정-2 (좌: 출탕구와 배재구 축조, 중: 건조, 우: 완성된 초롱구멍과 잡쇠구멍)

앞창의 하부 중앙, 즉 가마 바닥과 같은 높이에는 지름 10cm의 원형 초롱구멍을 뚫었고, 그 우측 7cm 위쪽에는 지름 7cm의 잡쇠구멍을 뚫었다. 초롱구멍 앞에는 판장쇠바탕과 연결되도록 15° 경사지

12) 소성벽돌은 15×10×10cm와 25×17×15cm 크기의 2종류로, 제6차 실험 시 가마 벽 축조를 위해 제작하였던 점토블록이다. 가마 벽 축조 후 건조 시 아궁이의 입구를 막는 과정에서 자연스럽게 소성된 것들을 사용하였다.

게 탕도를 만들었다. 잡쇠구멍 앞쪽에는 탕도로 잡쇠가 배출되지 않도록 우회하여 잡쇠가 빠져나가는 구(溝)를 조성하였다. 탕도와 잡쇠구 사이에는 턱을 두어 서로 넘치지 않도록 하였다. 초롱구멍과 잡쇠구멍은 점토반죽을 얇게 하여 막아두었다.

(4) 판장쇠바탕

제6차 실험에서는 2.83kg짜리 판장쇠 8매로 이루어진 판장쇠바탕을 제작하여 3회 출탕시켰다. 제6차 실험 평가회의에서 앞의 출탕과 다음 출탕 사이의 간격¹³⁾이 길다는 지적이 있었다. 이에 제7차 실험에서는 출탕량을 줄이고 출장 횟수를 늘리자는 의견이 제시되었다. 또한 판장쇠 분리 시 '凹'면이 형성되면 분리가 훨씬 쉽다는 의견도 제시되었다. 제시된 의견을 반영하여 판장쇠바탕 1본의 크기는 16.98kg으로 2.83kg짜리 6매로 제작하였다. 판장쇠 1개의 크기는 길이 20.5cm, 너비 6cm, 높이 3cm로 바탕에서 분리를 쉽게 하기 위해 하부로 갈수록 좁아지도록 약간의 경사를 주었으며, 각 판장쇠의 중간부위, 즉 10cm 간격의 아랫면에 '凹'면을 주는 방식으로 앞의 <그림 1>과 같이 판장쇠바탕 설계도면을 작성하였다.

설계도면대로 판장쇠바탕에 사용되는 외곽틀은 1cm 정도 두께의 목판으로 사방을 제작하고, 상하부는 막지 않았다. 판장쇠바탕틀은 3cm 두께의 목재로 제작하였다.

판장쇠바탕 제작과정은 다음과 같다.

가. 얇은 합판 1장을 바닥에 깔기

나. 그 위에 목판 외곽틀 놓기

다. 목재 판장쇠바탕틀의 아랫면(凹면이 있는 면)이 보이도록 뒤집어 합판에 놓기

라. 형틀 주변의 빈 공간에 주물사¹⁴⁾ 채우기

마. 형틀 상부와 외곽틀 상면까지 주물사 채워 목봉으로 다지기

바. 얇은 합판 1장을 덮어 못으로 고정하기

사. 상하부 뒤집기

아. 윗면의 합판 제거하기

자. 내부의 목재 형틀 제거하기

차. 토치로 주물사 겉면을 건조하여 주물사가 흐트러지는 것을 잡아 주기

카. 상부에 짚, 숯, 건조목을 올려 건조하기

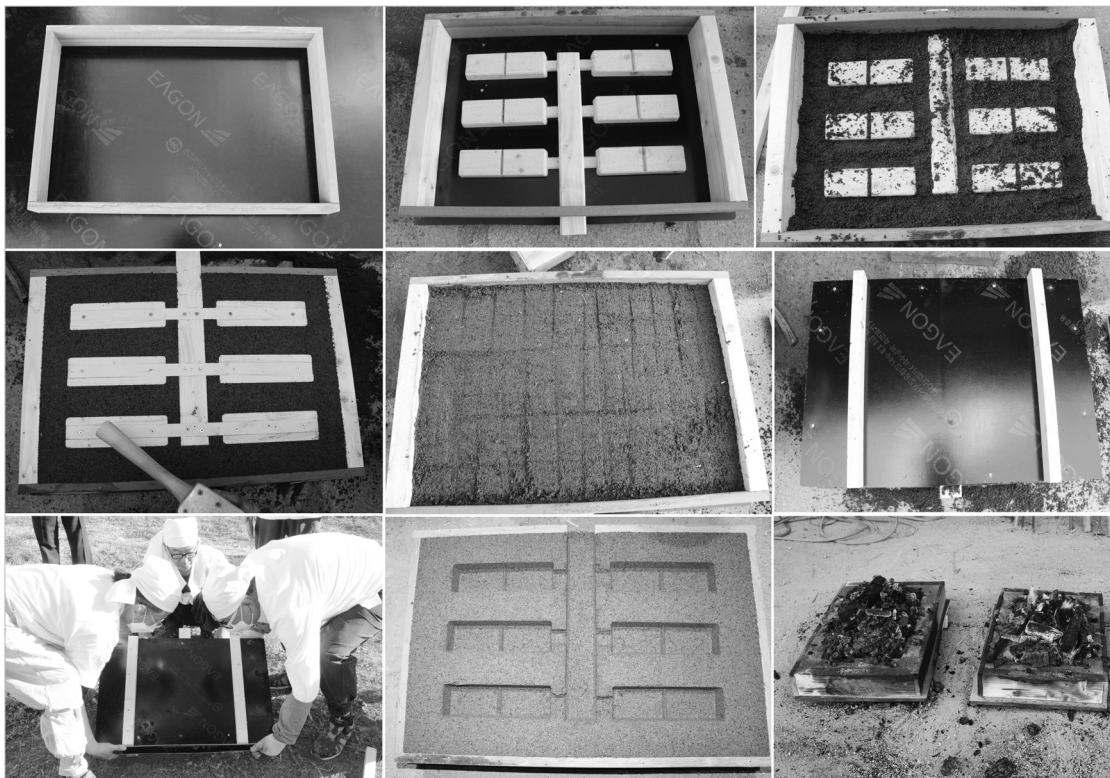
13) 제6차 실험에서는 총 4차례 출탕하였다. 1차와 2차 출탕 간격은 1시간 15분, 2차와 3차는 3시간 23분, 3차와 4차의 출탕 간격은 1시간 35분이었다.

14) 주물사는 황토 2 : 모래 8 : 숯가루 3.5 의 비율로 섞어 사용하였다.



〈그림 20〉 판장쇠바탕 목재형틀 제작 과정

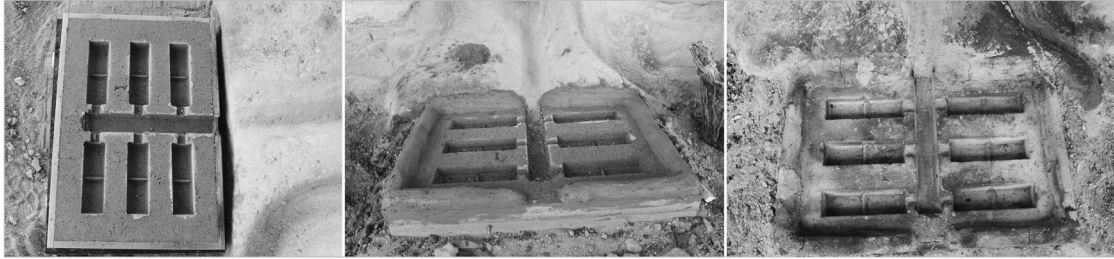
위의 순서대로 판장쇠바탕은 10월 22일~23일 2일에 걸쳐 4본을 제작하였다. 당초 판장쇠바탕의 주물사 건조 시간을 고려하여 실험 4일 전 제작하여 건조하는 것으로 일정을 설정하였으나 목재의 공급 및 기술자의 섭외가 쉽지 않아 본 실험 전날 판장쇠바탕을 제작하게 되었고, 1시간 이상 건조목과 목탄 등으로 건조를 진행하였다.



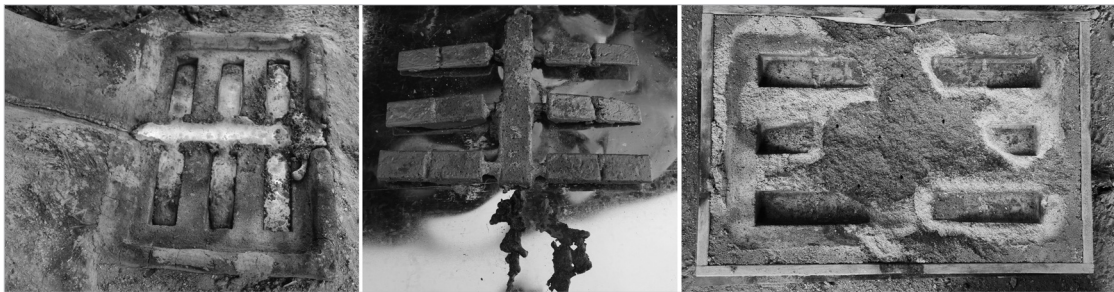
〈그림 21〉 판장쇠바탕 제작 과정(좌상→우하)

판장쇠바탕은 탕도 앞으로 이동시켜 탕도와 높이를 맞춰 위치시켰고, 판장쇠바탕과 탕도 사이의 공간은 점토반죽을 메워 빈 공간이 없도록 고정시켰다. 충전된 점토반죽은 목탄으로 건조시켜 수분을 증발시켰다. 출탕 후 판장쇠바탕에서 분리시킨 판장쇠 하부에는 작은 기공이 확인되었으며, 판장쇠

바탕의 주물사는 완전히 건조되지 못하고 축축한 모습이었고, 판장쇠의 열기로 수분을 방출하고 있는 상태로 확인되었다.



〈그림 22〉 판장쇠바탕을 탕도 앞에 고정시키는 과정



〈그림 23〉 선철 출탕 및 출탕 후 판장쇠바탕 모습

IV

실험 내용

1. 실험 과정
2. 실험 결과



S O E B U R I

IV. 실험 내용

1. 실험 과정

1) 준비 점검

10월 22일 담당업무 분장에 따라 업무를 나누어 맡았으며, 원활한 실험 진행을 위해 준비상황들을 점검하였다. 실험 진행에 필요한 물품은 실험장 배치도에 맞게 재료들을 위치시켰다. 가마의 앞쪽(앞창쪽)을 기준으로 우측에는 원료와 첨가제, 좌측에는 연료를 준비해 놓았다. 우측 앞쪽에는 조업기록과 온도 측정을 위한 기록대를 배치하였고, 좌측 앞쪽 이동선 맞은편에는 별도의 전시 공간을 마련하였다. 원료는 4mm 크기 분광 430kg을 10kg 단위로 43자루, 첨가제는 슬래그 80kg을 2kg씩 40자루를 준비하였고, 목탄은 대탄 1,050kg, 중탄 450kg, 소탄 600kg을 10kg의 박스로 나누어 준비하였다. 송풍기와 바람구멍, 바람구멍과 골구멍을 연결하여 송풍상황을 점검하였고, 온도계 설치를 준비해 두었다.



〈그림 24〉장입물 점검(좌: 연료, 중: 원료, 우: 첨가제)



〈그림 25〉 기계 송풍기 전력량 점검



〈그림 26〉 업무분장 회의

2) 원료, 연료, 첨가제 장입

원료(분광)는 송풍을 시작으로 예열한 지 2시간 39분이 지난 11:46에 첫 10kg을 장입하였다. 첫 장입 후 15:10에 1차 선철이 출탕되기 전(14:49)까지 10kg씩 12회 120kg을 장입하였다. 이때까지 평균 장입 간격은 15분이다. 1차 선철 출탕 후 분광 200kg 장입 후 선철을 출탕하기로 계획하였고, 1차 선철 출탕 후 80kg을 더 장입한 16:54에 200kg이 장입되었다. 1차 출탕 후부터 2차 출탕 전까지 분광의 평균 장입 간격은 15.6분이다. 3차 출탕은 분광 260kg을 장입한 시점에 출탕하는 것으로 계획을 하였으나 17:45에 잡쇠구멍으로 슬래그가 확인되어 선철 출탕이 임박함을 확인하였다. 이때 분광 장입량은 230kg으로, 2차 출탕 후 30kg이 더 장입된 시점이었다. 설계된 판장쇠바탕의 출탕량을 고려하여 분광을 250kg 장입한 후 출탕하는 것으로 계획을 변경하였고, 동시에 4차 출탕은 역시 분광 50kg을 더 장입 후 출탕하는 것으로 계획하였다. 2차 출탕 후부터 3차 출탕 전(18:30)까지 분광 50kg을 장입하였고, 장입 간격은 19.2분이다. 이후 20:20에 마지막 분광을 장입으로 분광 장입을 종료하였다. 3차 출탕 후부터 마지막 분광 장입까지 1시간 50분이 소요되어 장입 간격은 22분이다.

원료(분광)는 11:46 첫 장입을 시작으로 마지막 장입 20:20까지 8시간 34분 동안 300kg을 장입하였다. 장입 간격은 200kg을 장입한 시점까지는 평균 15분이었고, 이후 300kg이 장입되는 시점까지는 약 21분이었다.



〈그림 27〉 원료(분광) 장입 준비 및 장입 모습

연료(목탄)는 예열을 위한 초기 장입에 대탄 380kg과 소탄 50kg 등 총 430kg을 장입하였으며, 소탄 20kg은 분광 장입 전 목탄 상부에 덮어 분광이 목탄 사이로 빠지는 것을 방지하고자 하였다. 분광 장입 후 분광:목탄의 비율은 1:2, 목탄 크기별 장입 비율은 소탄 1 : 중탄 1 : 대탄 2로 설계하였다. 목탄의 장입 순서는 분광(10kg)과 첨가제(2kg) 장입 5분¹⁵⁾ 후 소탄 10kg+중탄 10kg - 대탄 20kg을 번갈아 각각 20회 장입하는 것으로 설계를 하였으나 12:43 온도 상승을 위해 대탄 20kg을 더 장입한 상태에서 분광과 첨가제를 장입하게 되었다. 따라서 장입 순서는 목탄-분광-첨가제의 순으로 변경되었다. 14:00경까지 위의 장입 순서대로 목탄을 장입하였다. 14:00경부터 온도가 약간씩 하강하기 시작하여 대탄을 연속 장입해 온도를 상승시키고자 하였다. 14:12~15:20까지 대탄만 4회 80kg을 장입하였다. 이후부터는 안정적인 온도를 유지하였고 20:16까지 위의 장입 순서대로 장입을 진행하였다.



〈그림 28〉 연료 만장입 및 장입구 화염

분광 장입 완료 후 대탄 20kg씩 5회 100kg을 장입하여 가마 내의 분광을 완전히 환원시켜 출탕하는 것으로 매뉴얼을 설정하였고 이에 따라 20:39 목탄 20kg을 장입하였다. 그러나 13:40경부터 용융되기 시작한 골구멍의 인조판석이 20:00 이후에는 거의 용융되었고, 또한 골구멍으로 슬래그가 역류하는 현상으로 송풍이 원활하지 않게 되었다. 따라서 목탄은 장입을 중지하고, 송풍만 30분 정도 더 진행한 후 선철을 출탕하는 것으로 결정하였다.



〈그림 29〉 연료(목탄) 장입 준비 및 장입 모습(1)

15) 원료, 첨가제, 연료의 장입 시간을 고려하여 원료 장입 5분 후 첨가제 장입, 5분 후 연료를 장입하는 매뉴얼을 설계하였으나 실험에서는 예상했던 것보다 장입 시간이 길지 않아 2~3분 정도의 간격으로 장입이 진행되었다.

목탄은 예열을 위한 첫 장입 08:55부터 마지막 장입 20:39까지 11시간 44분 동안 1,050kg을 장입하였다. 예열을 위해 430kg, 분광을 장입하는 동안 600kg, 분광 장입 후 20kg을 장입하였고, 이 중 대탄이 740kg, 중탄 130kg, 소탄 180kg이 소요되었다. 목탄 크기별 비율은 대탄:중탄:소탄이 5.7:1:1.4(70.5%, 12.4%, 17.1%)이다. 분광을 장입하는 동안 목탄은 대탄 340kg, 중탄 130kg, 소탄 130kg으로 비율은 2.6:1:1(56.6%, 21.7%, 21.7%)이다.



〈그림 30〉 연료(목탄) 장입 모습(2)

첨가제(슬래그)는 6차 실험 시 배출된 슬래그를 1~2cm 정도 크기로 파쇄하여 2kg씩 소분해 두었다. 첫 분광 장입 3분 후인 11:49 첫 번째 첨가제를 장입하였고, 이후 분광 장입 2분 후마다 장입하였다. 분광 장입 2시간 40분이 경과한 14:30 잡쇠구멍을 개방하였으나 슬래그의 유동성이 떨어지고 점성이 높아 잡쇠구멍으로 슬래그가 자연 배출되지 않았다. 슬래그의 유동성이 떨어지는 이유로 분광 내의 불순물 분리가 잘 이루어지지 않아 슬래그가 덩어리 형성되었을 가능성을 상정하였다. 이에 불순물 분리가 제대로 이루어지지 않은 노 내부의 생성물은 초롱구멍을 열어 모두 제거한 후 분광을 다시 장입하는 것으로 결정하였다. 그러나 초롱구멍을 열었을 때 가마 바닥에 형성되었던 선철은 유동성 좋게 출탕되었다. 이후 잡쇠구멍을 열어 슬래그 배출을 시도하였고 슬래그는 약 50분 동안 많은 양을 배출하였다. 앞서 선철 출탕을 완료한 후 슬래그 배출을 위해 잡쇠구멍을 개방하였을 때, 장입된 분광에 비해 슬래그량이 많음을 확인하였으며, 슬래그의 유동성도 좋지 않음을 확인하였다. 슬래그가 다량 형성된 원인은 가마 벽재로 사용된 황토가 녹아 산성조재제의 역할을 하고 있으나, 유동성이 떨어지는 이유는 녹아 내린 황토가 저온으로 인해 완전한 조재제의 역할을 하지 못하기 때문으로 추정하였다. 따라서 가마 벽재가 조재제의 역할을 하고 있기 때문에 더 이상 첨가제의 장입은 불필요함을 회의를 통해 결정하였고, 15:32 장입한 슬래그를 마지막으로 첨가제 장입을 종료하였다.

첨가제(슬래그)는 11:49 첫 장입 후 15:32까지 3시간 43분 동안 28kg을 장입하였고, 이 중 $\text{CaO}^{16)}$ 장입량은 약 4kg이다.

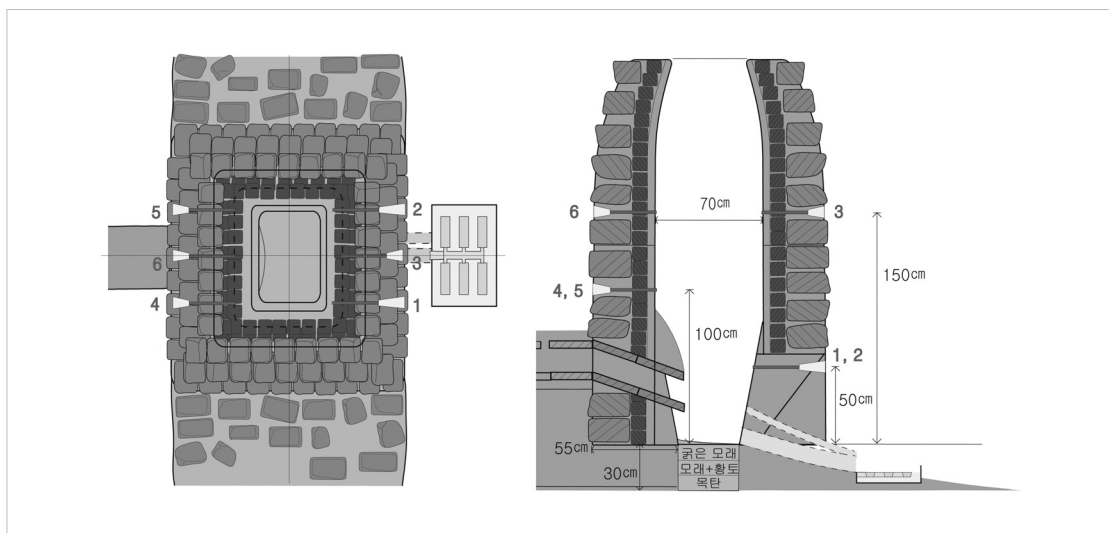
본 7차 실험에서 원료, 연료, 첨가제는 08:55 목탄 장입을 시작으로 20:39 마지막 목탄 장입까지

16) 2020년 제6차 실험 후 배출된 슬래그 14건의 분석결과 CaO 의 조성은 12.12~16.22%이며, 평균 14.4%이다. 6차 슬래그를 파쇄하여 장입한 7차 실험의 슬래그 장입량이 28kg으로 평균 조성비를 대입하여 계산하면 약 4kg의 CaO 가 산출된다.

11시간 44분 동안 원료 300kg, 연료 1,050kg, 첨가제 28kg을 장입하였다. 장입비율은 1:3.5:0.093의 비율이며, 원료인 분광을 장입하는 동안에는 1:2.0:0.093의 비율을 나타낸다.

3) 송풍 및 온도 변화

온도계는 본체와 6개의 센서로 구성되었으며, 센서의 위치는 상·중·하부로 구분된다. 하부는 앞창 좌측(1번)·우측(2번), 중부는 골구멍 좌측(4번)·우측(5번), 상부는 앞창 상부(3번)와 골구멍 상부(6번)에 설치하였으며, 각각 1~6번의 번호를 부여하였다. 가마 바닥을 기준으로 센서의 높이는 하부가 50cm, 중부 100cm, 상부는 150cm에 위치한다. 설치된 온도센서의 설치 위치는 <그림 31>과 같다.

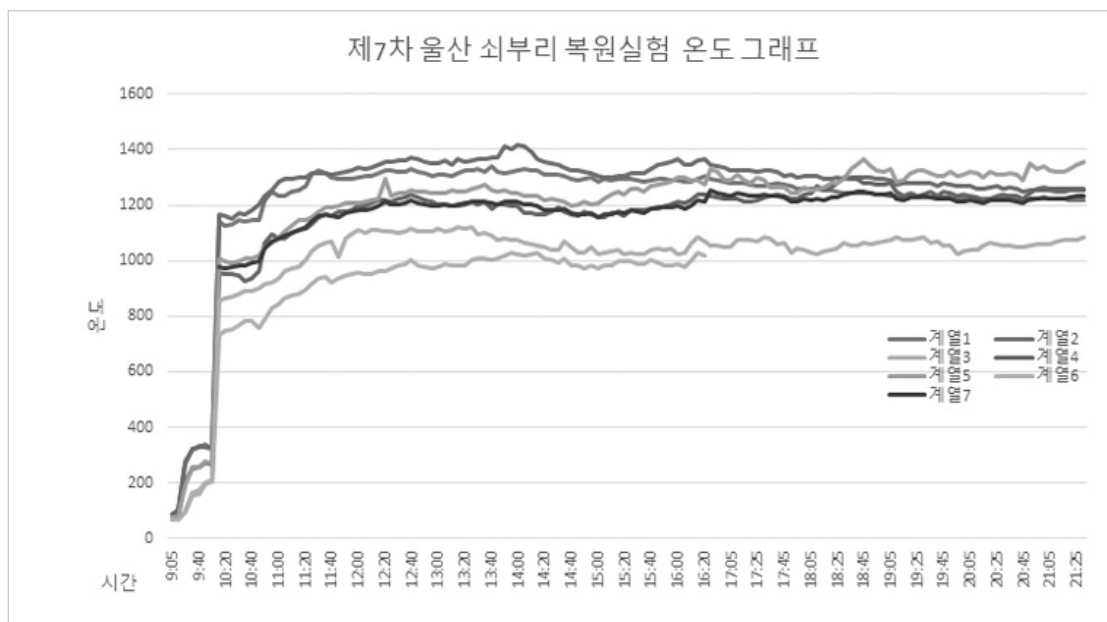


<그림 31> 온도센서 위치



<그림 32> 온도센서 설치 모습

온도 센서가 설치되는 지점의 벽체 보수 시 지름 10cm의 막대기를 꽂았다가 벽체 보수 완료 후 제거하고 그 위치에 센서가 가마 벽의 내부로 1cm 정도 돌출되도록 삽입하였다. 온도계 설치는 09:00에 완료하고 10분 간격으로 온도를 기록하였으나, 기록모드 오류로 10:00까지의 온도기록은 활용이 불가능하게 되었다. 10:00 이후부터 기록모드를 변환하여 기록 종료 시점인 21:30까지 5분 간격으로 온도를 기록하여 총 11시간 30분 동안의 가마 내부의 온도 변화를 확인하였다. 온도 변화는 <그림 33>의 그래프와 같다.



<그림 33> 온도 변화 그래프

송풍은 09:07부터 시작하였다. 목탄이 가마의 장입구에서 20cm 아래 지점까지 만장입된 시점부터 송풍을 시작하였으며, 약 5분 정도 지난 09:13부터 여닫이를 사용하여 서서히 온도를 상승시켰다. 10:45 온도의 상승 속도가 느려 송풍의 세기를 높였고, 1시간 정도 송풍하여 11:45 평균온도 1,156.5℃ 일 때 분광을 장입하였다. 이후 송풍은 21:49에 앞창과 골구멍을 개방하여 자연 연소시키기까지 지속하였다. 이번 실험에서 송풍이 이루어진 시간은 총 12시간 42분이다.

온도 계측이 시작된 10:00부터 하부 온도는 1,100℃ 이상, 골구멍 5번 온도계는 1,000℃ 이상 상승하였다. 약 50분이 경과한 10:50에 평균온도 1,045℃ 이상 상승하였으나 하부 온도가 1,220℃, 중부 온도가 1,057℃, 상부 온도는 850℃로 앞창과 골구멍의 온도차는 160℃ 정도, 앞창과 상부의 온도차는 370℃로 컸다. 분광을 장입하는 시점인 11:45에 평균온도는 1,156.5℃였으나, 1~4번 온도계의 평균온도는 1,246℃였다.

위치별 온도의 특징을 살펴보면, 하부 좌측 온도는 광석 장입 후부터 종료시점까지 평균온도 1,274.7℃였다. 12:00가 지난 시점부터 16:20까지 1,300℃ 이상을 유지하였고, 13:40에 최고온도 1,339℃를 기록하였다. 16:50에 1,295℃를 기록하였고, 이후 서서히 하강하여 21:30 종료시점에는

1,220℃였다. 하부 우측 온도는 분광 장입 후부터 종료시점까지 평균온도 1,317.4℃로, 6개의 온도 중 가장 높은 온도를 기록하였다. 11:20~18:40까지 7시간 20분 동안 1,300℃ 이상을 유지하였으며, 특히 13:50~14:05까지는 1,400℃ 이상 상승하였고, 이때 최고온도 1,417℃를 기록하였다. 14:50~15:20은 1,309℃로, 1,300℃ 초반까지 하강하였다가 이후 17:20까지 1,345℃로 다시 상승하였다. 17:20 이후부터는 서서히 하강하여 종료시점에는 1,254℃를 기록하였다.

중부 좌측 온도는 분광 장입 후부터 종료시점까지 평균온도 1,220.2℃이며, 분광 장입 시점에는 1,175℃였다. 12:10부터 1,200℃ 이상 상승하여 1,200℃ 초반대를 유지하였으나, 14:00경부터 1,200℃ 이하로 하강하기 시작하였고 15:00경 1,155℃까지 하강하였다. 이후 온도는 서서히 상승하기 시작하였고, 16:00경 1,200℃를 다시 회복하였으며, 19:05에는 1,279℃의 최고온도를 기록하였다. 이후 종료시점까지 온도는 서서히 하강하였으나 종료시점의 온도가 1,259℃로 전체적으로 안정적인 온도를 기록하였다. 중부 우측 온도는 광석 장입 후부터 종료시점까지 평균온도 1,275.1℃이며 분광장입 시점 1,200℃였다. 12:40경 1,250℃ 상승하여 14:00경까지 유지하였다. 이후 14:00경 1,243℃를 시작으로 하강하기 시작하여 15:00에 1,200℃까지 하강하였다. 이후 다시 상승하기 시작하였으며, 16:50에는 1,333℃까지 상승하였다. 17:50경 1,242℃까지 하강하였으나 이후 기록 종료시점까지 1,280~1,350℃를 유지하였다.

상부 앞창측 온도는 평균 989.5℃로 평균온도 1,000℃까지 상승하지 못하였고, 16:20 고장으로 더 이상 온도를 측정 할 수 없었다. 고장 시점인 16:15분경 1,028℃로 최고 온도를 기록하였다. 상부 골구멍측 온도는 평균 1,064.8℃이며, 11:20경 1,000℃ 기록한 이후 12:00~13:25까지 평균 1,110℃를 기록하였으나 이후 1,024~1,092℃ 사이를 유지하였다.

이를 종합해 보면, 분광 장입시점(11:45)의 평균온도는 1,156.5℃이며, 분광 장입 후 온도는 서서히 상승하였으나, 14:10~14:30경부터 온도가 하강하기 시작하였다. 온도를 상승시키기 위해 15:20까지 대탄 4회(80kg)을 장입하였고, 이후 16:20까지 온도는 서서히 상승하였다. 이후 하부 온도는 종료시점까지 서서히 하강한 반면, 중부 온도는 19:00경까지 서서히 상승하였다. 이후 하강하는 추세를 보였지만 기록 종료시점의 온도가 각각 1,259℃와 1,354℃로 하부 온도보다 높았고, 큰 변화 없이 안정적인 것이었다.

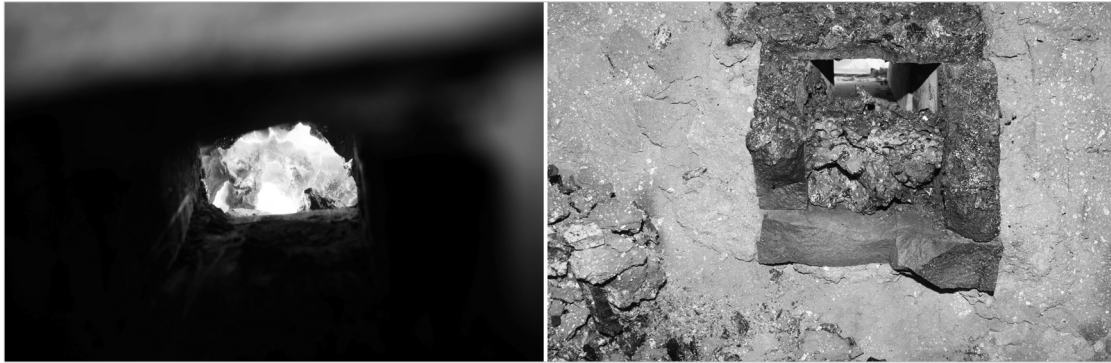
이번 실험에서 온도 계측이 이루어진 시간은 총 11시간 30분으로, 전체 평균 온도는 1,170℃이며, 분광 장입 후~종료시점까지의 평균온도는 1,190℃이다. 평균 최고온도는 3차 선철 출탕 후 1,250.8℃이며, 평균 최저온도는 1,156℃로 분광 장입 개시 시점이었다. 하부(앞창)의 평균온도는 1,296℃, 중부(골구멍)의 평균온도는 1,247℃로 하부가 49℃ 더 높았으며, 상부의 평균온도는 1,027℃로 하부 온도보다 269℃ 낮았다.

선철 생산이라는 동일한 목표를 가진 실험이었던 2019·2020년 제5·6차 실험의 온도 변화와 비교하였을 때 평균온도는 5차에 비해 30℃ 낮았으며, 6차와는 큰 변화가 확인되지 않았다.

이번 실험에서 골구멍은 13:39, 14:14~14:49, 16:31, 17:25, 18:25, 19:08, 19:20, 20:10, 20:29, 20:43, 20:46 등 여러 차례 개방하여 가마 내부의 상태를 확인하였으며, 주로 송풍이 원활하지 못할 때이다. 14:14경부터 골구멍으로 사용된 석재의 가마 내 돌출부가 용융됨을 확인하였다. 18:25경부

터는 골구멍으로 역류하는 슬래그를 제거하기 시작하였고, 19:00 이후에는 수시로 골구멍을 개방하였다.

개방할 때마다 용융된 석재와 슬래그를 제거하여 송풍을 원활하게 하고자 노력하였다. 골구멍이 개방되는 시간에는 송풍을 중지하였다.



〈그림 34〉 골구멍 상태(좌: 실험 중 골구멍 모습, 우: 실험 후 골구멍 내 슬래그 모습)

4) 출탕

(1) 1차 출탕

13:39, 14:14~14:49 골구멍 축조에 사용된 석재가 고온에 녹아내리고, 슬래그가 증가하면서 골구멍으로 역류하는 현상이 계속 발생하였다. 그러면서 가마 상부로 붉은색 불길이 계속 올라왔다. 이에 14:20 잡쇠구멍을 뚫어 슬래그를 배출을 시도하였다. 가마 내 온도가 낮아 유동성이 떨어지고 있으며, 침탄은 많이 진행된 상태로 파악되었다. 15:02 불길이 계속 붉은색을 띠고 잡쇠구멍이 뚫리지 않으므로, 출탕을 해서 통기를 시켜야 한다는 의견이 제시되었다. 초롱구멍이 열리면 온도는 하강하지만 불필요하게 내려온 슬래그를 배출시킬 수 있고 선철의 상태도 확인할 수 있다고 판단하여 15:06 출탕을 결정하였다.

14:49 분광 10kg(총 120kg), 이어서 슬래그 2kg(총 24kg)이 장입되고, 15:10에 1차 출탕이 진행되었다. 판장쇠바탕 바닥이 완전히 건조되지 않고 수분이 남아 있어서 쇳물이 튀는 현상이 발생하였다. 쇳물이 압력에 의하여 하단, 중단, 상단 순으로 채워졌으나 각 단에 충분하게 차지는 않았다. 그리고 최초에 하단 중앙으로 쇳물이 빠져나오는 현상이 발생하였다.

선철을 출탕 시킨 후 슬래그 배출을 시도하였다. 16:03 잡쇠구멍은 뚫리지 않고 완전히 막힌 상태여서 슬래그가 배출되지 않았다. 16:05 골구멍도 함께 막혔다. 16:13 잡쇠구멍이 뚫리고 슬래그를 배출시키기 시작하였다. 16:31 골구멍이 다시 막혀 뚫었으며, 슬래그는 16:50까지 잡쇠구멍을 통해 배출을 완료하였다.



〈그림 35〉 슬래그 배출과 1차 출탕

(2) 2차 출탕

16:30 회의 결과, 슬래그가 배출되면서 선철도 함께 빠져나올 수 있어서 잔류하는 선철이 없을 수 있다고 판단하여 출탕을 결정하였다. 슬래그 층이 너무 끈적끈적해서 선철이 통과하기 어려운 상태이며, 유동성도 좋지 않은 것으로 판단하였다. 16:54 분광 10kg(총 200kg) 장입 후, 17:02에 2차 출탕을 실시하였다. 선철이 하단, 상단, 중단 순으로 채워졌으며, 하단 우측은 판장쇠바탕 위로 흘러 넘쳤다.

17:40 골구멍이 막히고, 불꽃이 높이 오르지 못하였다. 17:44 잡쇠구멍을 뚫기 시작하였고, 슬래그 배출이 시작되는 듯하였으나, 17:54 완전히 막혀 뚫리지 않았다. 18:11 잡쇠구멍은 뚫었으나 슬래그가 나오지 않았다. 18:16 슬래그가 배출되기 시작하여 18:30까지 계속 빼내었다. 18:25 골구멍이 뚫리고, 잡쇠구멍으로 슬래그 배출이 이어지면서 불길이 잘 타올랐다.

3차 출탕은 분광 총 250kg 장입 후, 4차 출탕은 분광 총 300kg 장입 후에 시작하기로 결정하였다.



〈그림 36〉 슬래그 배출과 2차 출탕

(3) 3차 출탕

18:30 분광 10kg(총 250kg) 장입 후 18:35에 3차 출탕을 실시하였다. 선철 출탕 후 초롱구멍으로 슬래그 배출작업도 이루어졌다. 이 과정에서 선철 일부도 슬래그와 혼합되어 나왔다. 선철이 처음에는 상단, 중단, 하단 우측 순으로 채워졌으며, 이후 하단, 중단, 상단 좌측 순으로 채워져 올라왔다. 이 순간에 계속해서 불꽃이 튀어 올랐다.

19:08 골구멍이 다시 막혀 19:13에 뚫었다. 19:20 골구멍으로 용착된 철재괴를 꺼내었다. 잡쇠구멍도 잘 뚫리지 않고 막혀 있는 상태이다. 19:20 잡쇠구멍이 조금 열렸으나 여전히 잘 뚫리지 않았다. 19:27 슬래그가 조금 배출되었다. 온도가 낮아 잘 빠져나오지 못하는 것으로 판단되었다.



〈그림 37〉 슬래그 배출과 3차 출탕

(4) 4차 출탕

19:26 회의 결과 분광 총 300kg까지만 장입하고 이후 1시간 30분 후쯤 출탕하기로 하였다. 20:10 골구멍이 막혀 다시 뚫었다. 20:45 출탕준비를 하면서 20:51 잡쇠구멍도 뚫기 시작하였다. 20:20 분광 10kg(총 300kg) 장입 후 21:04에 4차 출탕을 실시하였다. 선철이 아주 느리게 상단과 중단 좌측을 먼저 채웠으나 유동성이 좋지 않고 양도 충분하지 못하였다.

21:15 가마 내에 선철이 잔존하지 않을 것으로 추정하여 목탄을 자연 연소하기로 하였다. 잡쇠구멍과 초롱구멍은 막혀 뚫기가 힘들었고, 초롱구멍 상단에 또 다른 1개의 구멍을 뚫었으며, 뚫는 과정에서 이곳을 통해 슬래그 일부가 배출되었다.



〈그림 38〉 슬래그 배출과 4차 출탕

5) 실험 종료

3일 진행된 실험은 21:03, 4차 선철 출탕 후 주변을 정리하고 21:39 온도계를 회수하는 것으로 실험을 종료하였다. 21:14~21:46 앞창 제거 작업을 실시하였으나 쉽게 뚫리지 않았다. 뚫린 구멍으로 볼 때 상단은 목탄, 하단은 슬래그로 채워져 있었다. 21:49 송풍을 중지하고 골구멍은 개방하였다.

21:55 목탄은 장입구 상부에서 60cm 정도 내려가 있었다.



〈그림 39〉 실험 종료 후 앞창

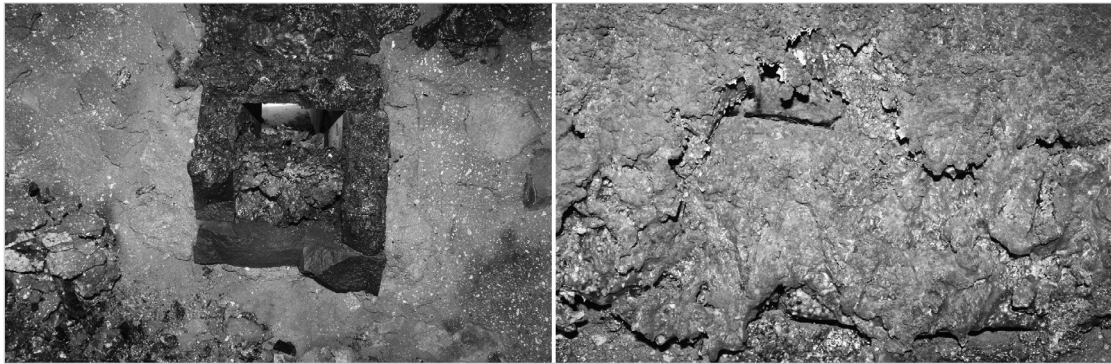
10월 24일(일요일) 09:00 목탄이 110cm 정도, 10:16에는 120cm 정도까지 하강하였다. 목탄이 완전히 하강하지 않았고, 앞창은 개방할 수 없었다. 전날 출탕된 판장쇠와 슬래그 등을 1차 관찰 기록 후 정리를 하였다.

10월 28일(목요일) 오후 잡쇠구멍 상단 높이 40cm 정도를 완전히 개방하였다. 12월 11일(토요일) 생성물이 가마 상단에서 220cm 정도까지 내려가 있었다. 골구멍은 2cm 정도 열려 있었다. 하부와 상부는 모두 막힌 상태이고 중앙부만 조금 열려 있었다.

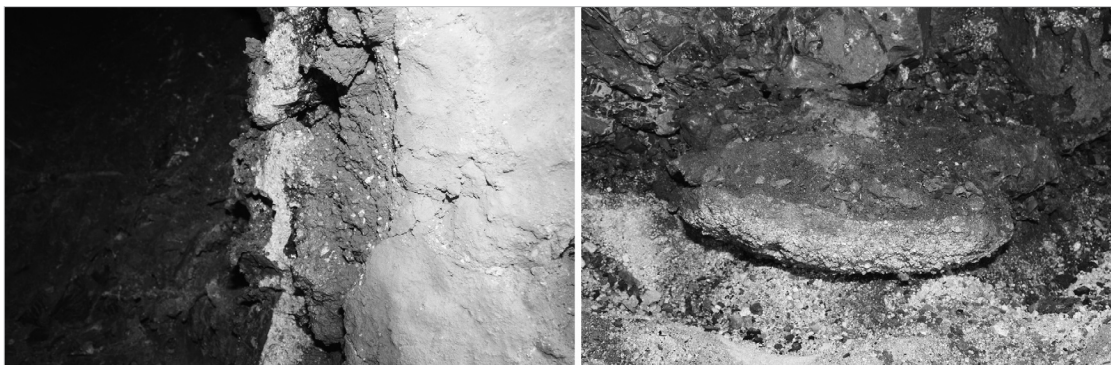


〈그림 40〉 실험 종료 후 앞창 일부 제거 및 가마 내 형성물 절단 모습

가마 내부에서 좌·우 방향으로 절반을 절개하여 드러내고 단면을 관찰하기로 하였다. 가마 하부는 선철과 슬래그, 벽면은 목탄과 슬래그가 용착된 상태로 남아 있었다. 가마의 앞창 안쪽 벽면은 세 차례에 걸쳐 미장한 흔적이 그대로 노출되었다. 벽면 일부에서 녹아내린 흔적도 관찰된다. 가마의 바닥은 유리질화되어 있지 않아 온도가 낮았음을 추정케 한다. 하부 2~5cm 정도는 선철 층, 그 위 10cm는 고탄소 슬래그 층, 맨 위는 목탄+슬래그 층이 15cm 두께로 형성되어 있었다.



〈그림 41〉 실험 종료 후 골구멍과 가마 내 벽면 모습



〈그림 42〉 실험 종료 후 앞창 단면과 가마 바닥 형성물

2. 실험 결과

1) 생산품 및 가마 내 형성물

(1) 선철

2021년 10월 23일(토) 진행된 실험에 대한 결과물은 다음날인 10월 24일(일요일)과 12월 11·12일(토·일요일), 3일에 걸쳐 정리 및 관찰하였다.

선철의 출탕은 10월 23일 11:46 분광 첫 장입 후 3시간 24분이 지난 15:10에 1차를 시작으로 5시간 54분 동안 총 4차례 이루어졌다. 슬래그는 분광 첫 장입 후 3시간 6분이 지난 14:52, 잡쇠구멍을 뚫기 시작하여 5시간 51분 동안 크게 4차례 배출시켰다.

1~4차에 걸쳐 출탕된 선철은 판장쇠바탕에 받아 냉각시켰으며, 슬래그와 함께 유출된 선철도 일부 있었다. 1~4차 출탕된 선철은 차수별로 사진촬영과 무게를 기록하여 아래의 〈표 6~12〉와 같이 정리하였다. 선철은 생산품을 정리한 결과 총 84.25kg이었다.

※ 개별 판장쇠의 일련번호는 출탕구와 가까운 상단 좌·우부터 하단 좌·우 순으로 명명하였다.

〈표 6〉 선철 출탕 현황

차수 및 수습 위치	출탕 시간	중량(kg)	
		판장쇠	총중량
1차	15:10	9.95	10.05
2차	17:02	18.1	20.75
3차	18:35	9.05	11.0
4차	21:04	10.75	11.35
가마 바닥 중심 선철괴	—		13.9
가마 바닥 골구멍 선철괴	—		17.2
총중량(kg)	—	47.85	84.25

〈표 7〉 1차 출탕 판장쇠 전·후면

출탕시간	중량(kg)	특징	사진
15:10	10.05 (판장쇠:9.95, 기타:0.1)	• 판장쇠 전체 : 길이 50cm, 너비 39.7cm. • 판장쇠는 6개 모두 형성됨, 쇳물의 양이 적어 두께는 3cm 이하임. 판장쇠에는 전체적으로 기포가 형성됨. 일부 추가 유출된 선철이 상면에 용착되어 있음. 색조는 흑회색. • 판장쇠 1번의 1/2과 5·6번은 탕도 냉각품에 붙어 있음. • 2번은 길이 19cm(탕도 제외), 너비 5.3cm, 두께 0.5~1.7cm.	

〈표 8〉 2차 출탕 판장쇠 전·후면

출탕시간	중량(kg)	특징	사진
17:02	20.75 (판장쇠:18.1, 기타:2.65)	• 판장쇠 전체 : 길이 50.5cm, 너비 42.0cm. • 본 실험 생산품 가운데 상태가 가장 양호하며, 상면에는 추가 유출된 선철이 부분적으로 용착되어 있음. 하면에는 탕도를 중심으로 모래가 용착되어 있으며, 전체적으로 소량의 기포가 형성되어 있음. • 6번의 판장쇠가 분리되었으나 나머지 5개는 탕도와 붙어 있음. • 6번 판장쇠는 길이 20cm, 너비 6cm, 두께 2.8cm.	

〈표 9〉 3차 출탕 판장쇠 전·후면

출탕시간	중량(kg)	특징	사진
18:35	11.0 (판장쇠:9.05, 기타:1.95)	• 판장쇠 전체 : 길이 50cm, 너비 40cm, 두께 1.8cm. • 1번 판장쇠가 1/2 분리되었으나 나머지는 탕도에 부착되어 있음. 전체적으로 쇳물의 양이 적어 1번과 2번은 평면형태가 제대로 형성되지 않았음. 3~6번은 평면형태가 완성되었음. 두께는 최대 1.8cm 정도로 얇음. 상·하면 모래가 소량 부착됨. 하면에는 기공이 잔존함.	

〈표 10〉 4차 출탕 판장쇠 전·후면

출탕시간	중량(kg)	특징	사진
21:04	11.35 (판장쇠 :10.75, 기타:0.6)	• 판장쇠 전체 : 길이 41cm, 너비 48cm. • 판장쇠 5번과 6번 평면형태가 형성되지 않았음. • 최대 두께는 3cm 이하로 충분한 선철량이 형성되지 못함. • 상·하면에 모래가 다량 부착됨. 기포가 다수 확인됨. 상면에는 선철이 3~4차례 유출되면서 층을 이룸.	

〈표 11〉 가마 바닥 철괴

중량(kg)	특징	사진
13.9	• 길이 34.5cm, 너비 24cm, 두께 5~8cm. • 가마 바닥 위에 형성된 용선 pool로 유출되지 못하고 잔류한 것임. • 오목한 가마 바닥 위에 형성되었던 것이 분리. 평면 부정형. 바닥은 볼록하며, 자성이 강함. 일부는 매우 강함. 기공은 거의 형성되지 않고 밀도가 높은 것으로 추정. 바닥면에는 부분적으로 목탄이 용착. 나머지 바닥면은 가마 바닥과 분리된 표면이 모래의 영향을 받아 회백색을 띰.	

〈표 12〉 가마 바닥 골구멍쪽 철괴

중량(kg)	특징	사진
17.2	• 길이 47.5cm, 너비 17cm, 두께 16cm. • 골구멍 아래쪽의 가마 바닥 부분으로 윗면은 다수의 선철과 소량의 슬래그로 이루어짐. 다수의 구슬방울과 기공이 관찰됨. 아랫면은 모래로 인해 회백색을 띠며, 두께는 2~3cm. 윗면과 아랫면 사이에는 층상으로 목탄이 포함되어 있음.	

(2) 슬래그

슬래그는 유동성이 부족하여 비교적 가볍다. 1~3차 잡쇠구멍 배출 슬래그는 녹색계열에 표면이 매끄럽다. 거품 형태 슬래그로, 환원된 선철방울을 함유하고 있으며, 기포가 형성되어 있다. 4차 초롱구멍과 골구멍에서 수습된 슬래그는 검은색 계열이며, 역시 선철방울을 함유하고 있다. 표면은 1~3차에 비해 거친 편이다. 그 현황을 정리하면 〈표 13·14〉와 같다.

1차 선철 출탕 전 슬래그 배출을 시도하였으나 유동성이 없는 슬래그 일부가 배출되었다. 본격적인 슬래그 배출은 1차 선철 출탕 후이며, 중량 계측 역시 1차 출탕 후부터 이루어졌다. 배출된 슬래그의 무게는 총 69.25kg이다. 가마 바닥 정리 과정에서 확인된 슬래그도 있었으나 선철과 분리한 다음 모두 폐기하였으며, 무게를 측정하지 못하였다.

〈표 13〉 잡쇠구멍 슬래그 배출 현황

차수	유출시간	중량(kg)	사진
1차	16:13~16:50 1차 선철 출탕 후 잡쇠구멍 배출	41.1	
2차	17:51~18:30 2차 선철 출탕 후 잡쇠구멍 배출	15.5	
3차	19:20~19:31 3차 선철 출탕 후 잡쇠구멍 배출	6.9	
4차	21:15 4차 선철 출탕 후 초롱구멍 배출	1.25	
총		64.75	

〈표 14〉 골구멍 슬래그 배출 현황

유출 위치	유출시간	중량(kg)	사진	
골구멍	19:20	3.5		송풍구 용착
	20:10	1.0		송풍구 용착
총		3.5		

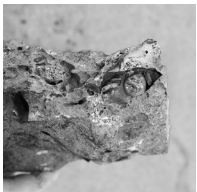
(3) 가마 내 형성물

가마 내부에 잔존하는 형성물은 좌우 석축 방향으로 절개하여 단면을 관찰하였다. 가마 바닥에서 상부 35cm 정도 높이로 형성물이 확인되었다. 최하부에는 오목하게 가마 바닥이 그대로 드러났으며, 그 하부에 실리콘 카바이드도 확인되었다. 그 상부에는 목탄+선철+슬래그층이 섞여 있었다. 이들을 가마 밖으로 꺼집어 내어 슬래그와 분리하였고, 형성물을 종류별로 분리, 수습 및 관찰을 진행하였다. 그 특징은 다음 〈표 15~20〉에 정리하였다.

〈표 15〉 가마 바닥

중량(kg)	특징	사진
3.35	길이 30cm, 너비 24cm, 두께 3cm의 평면 타원형에 가 까움. 중앙부는 오목하며, 쇳물과 가마 바닥에 깔았던 굵은 모래가 반응하여 실리콘 카바이드(카본베드) 층을 형성하였음. 윗면은 흑색, 기공이 부분 확인됨. 아랫면은 굵은 모래층. 윗면과 아랫면 경계부 아래가 0.5~1.0cm, 위가 2cm 내외의 두께, 유적 출토 가마 바닥과 좋은 비교 자료임.	 

〈표 16〉 슬래그

중량(kg)	특징	사진
다수 중 1개 1.95	가장 긴 것 : 길이 17cm, 너비 12.5cm, 두께 8cm 가마 바닥 선철 상부에 형성된 두께 35cm의 형성물 속에 포함되어 있던 슬래그. 대체로 질은 회색을 띠. 기공 확인됨. 부분적으로 선철방울이 박혀 있음. 회백색 광택이 확인됨.	  선철방울세부

〈표 17〉 아궁이 우측 하단부 벽체

특징	사진
• 탈락된 벽체 두께 4.0 ~ 5.5cm • 미장된 내벽부는 청회색으로 용융, 상부 및 가마 내부에서 형성된 슬래그가 5~8cm 두께로 용착됨. 슬래그는 연한 녹갈색, 광택을 띠는 부분도 있고, 미환원된 토철이 용착된 부분도 있음. 슬래그의 단면부는 석회, SiO₂로 인해 회백색을 띰.	

〈표 18〉 골구멍 하부 형성물

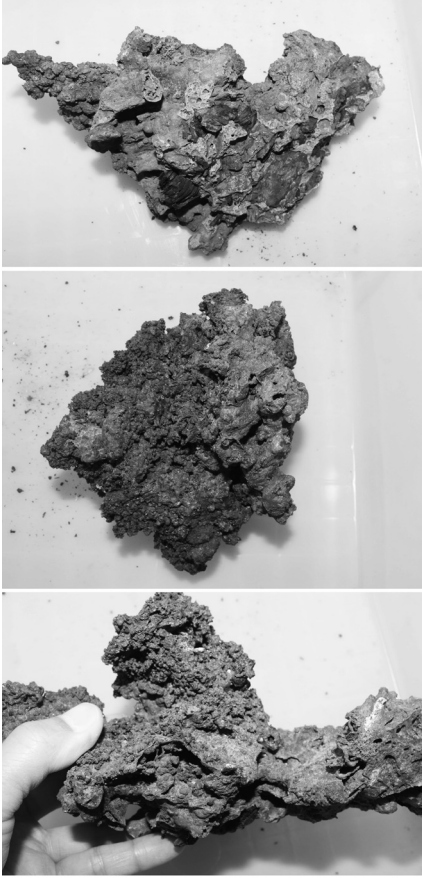
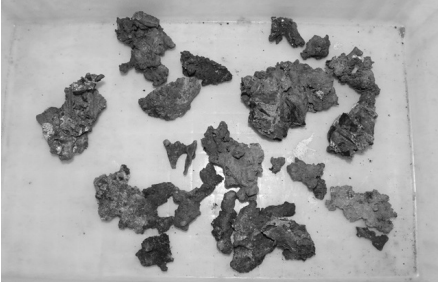
특징	사진
• 중량 1.5kg • 윗면은 회색 환원괴 바깥면에 다소 어두운 색의 얇은 편상의 반환원괴가 덮여있는 부분도 있음. 아랫면은 바닥에 모래의 영향으로 회백색 규소질을 이룸.	

〈표 19〉 골구멍 내 석재 및 슬래그

특징	사진
• 중량 1.65kg • 골구멍에 사용된 석재 단부에 슬래그 부착. 골구멍에 사용된 석재는 인조 판석이며, 단부가 용융되어 슬래그와 용착됨. 슬래그는 황회색으로 일부 규소에 의해 회백색 광택질이 있음. 일부에는 목탄이 남아 있음.	

〈표 20〉 가마 해체 수습물(토철이 환원되어 가는 과정의 부산물들)

구분	특징	사진
철탄화물	• 가장 큰 것 : 길이 9.3cm, 너비 5.3cm, 두께 6.0cm, 중량 250g • 장입된 분광이 환원되는 가장 초기 형태, 미세한 요철이 매우 심함, 아래쪽에는 선철 구슬모양 5개 정도 형성, 좀 더 환원이 진행되어 덩어리 지는 형태.	

구분	특징	사진
철탄화물+ 반환원괴	• 길이 23.4~6cm, 너비 14~6cm, 두께 3~12cm로 다양함. ① 길이 23.4cm, 너비 14.0cm, 두께 12cm / 1.45kg • 전체적으로 아래가 볼록한 두터운 편상. 아랫면에 광석이 반환원되어 편상으로 펼쳐지고, 일부 목탄 잔존. 기포는 많지 않으며, 자성 강함. 윗면에는 보다 덜 환원된 반환원괴가 부착, 전체적으로 청회색, 아랫면은 부분적으로 자색을 띠. 윗면의 반환원부는 장입된 분상 광석이 용융되는 초기단계이고, 아랫면은 좀 더 진행된 단계, 자성은 윗면이 더 약함. ② 길이 22cm, 너비 11cm, 두께 11.5cm, / 중량 1.08kg • 철탄화물과 거의 유사. 윗면은 분상광석이 환원되는 초기 단계. 특별한 형태를 띠고 있지 않음. 분상광석이 약간 녹아 엉겨붙은 양상. 아랫면은 환원이 더 진행되어 편상(片狀)으로 펼쳐지거나 더 용융되어 두터운 양상. 아랫 표면에는 목탄 일부 잔존, 목탄과 슬래그 반응하여 카본베드 형성.	 상부의 분상광석과 하부의 반환원괴세 부
반환원괴	• 부정형, 길이 3~12cm, 너비 8.8cm, 두께 1~5.5cm / 1개의 중량 350g • 조업 후 가마 바닥 상부에 있던 반환원괴, 광석이 반응 용융되어 얇은 편상을 띠. 일부는 자색, 일부는 어두운 회청색을 띠. 목탄 및 목탄 부착흔 확인.	

2) 가마의 변화

실험이 종료된 후 두 달이 조금 못 미치는 12월 11일 가마 내부에 대한 정리 및 관찰이 실험장에서 이루어졌다. 먼저 앞창의 상단부를 개방해 내부 현황을 관찰하였다. 가마 내부에는 골구멍(송풍구) 높이까지 슬래그가 차올라 냉각되어 있었으며, 초롱구멍(출탕구)과 잡쇠구멍(배재구)은 슬래그로 인해 모두 막힌 상태였다. 특히 초롱구멍에는 원통형으로 녹갈색을 띠는 슬래그가 형성되어 있었다.



〈그림 43〉 조업 후 가마 현황



〈그림 44〉 작업 광경

1차로 가마 내부에 생성된 슬래그를 제거하였는데, 슬래그 속에는 선철 등 철 성분이 거의 남아 있지 않았다. 앞창을 모두 개방하고 슬래그를 제거하자 가마 바닥(爐床)에 평면이 둥근 형태의 바닥재가 확인되었다. 바닥재의 색조는 회청색이고 두께는 10cm 정도이다. 가마 바닥재의 앞쪽 약 1/2을 절단해서 가마 밖으로 배출하였다. 단면 상태를 보면 모래층 상면에서부터 약 35cm까지 목탄+슬래그+선철이 섞인 층이 차례대로 확인된다. 상면은 다소 요철이 있지만 대체로 평탄하고 모서리 부분은 완만하게 굴곡을 이룬다. 중앙부에는 둥근 형태로 선철 층이 형성되었는데, 두께는 1~5cm이다. 선철 층 아래 나머지는 모두 카본-베드(실리콘 카바이드)¹⁷⁾가 형성되었다.



〈그림 45〉 앞창 상단부 개방 및 내부 현황

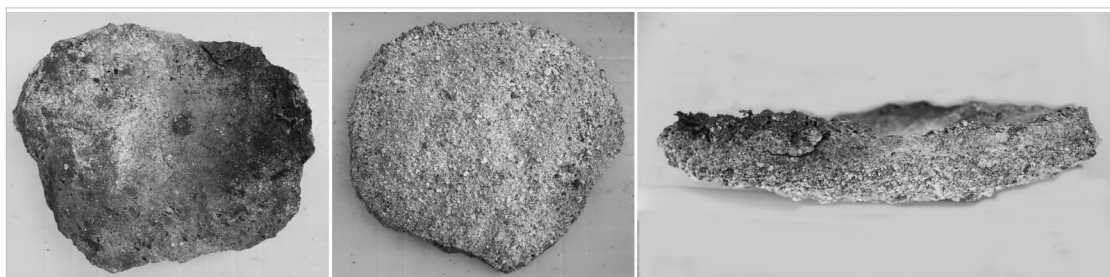
17) 실리콘카바이드는 가마 바닥의 모래가 상부에서부터의 고온과 선철로 인해 팽창된 것으로, 장입된 목탄과 반응하여 SiO_2 를 형성한 것이다. 강도가 매우 강하다.

앞창을 정면에서 보았을 때 왼쪽 바닥과 벽체 경계면에 목탄이 다수 남아 있었다. 이 외에도 바닥에 형성된 슬래그 층에도 다량의 목탄이 완전히 연소되지 못하고 남아 있었다.

가마 내벽 미장재는 내화성을 가진 점토를 사용하여야 한다. 이번 실험에서는 황토가 다량 포함된 흙을 사용한 관계로, 벽면이 녹아내리면서 함께 흘러내린 (산성)슬래그와 엉겨 붙어 자연스럽게 하강 하였으나 잡쇠구멍을 통해 유출되지는 못하였다.



〈그림 46〉 앞창 개방 후 생성물 정리 과정



〈그림 47〉 바닥재의 현황(좌-상면, 중-하면, 우-측면)

벽체는 바닥재에서부터 양쪽 약 50cm 높이까지 슬래그가 어지럽게 용착되어 있었다. 바닥재에서 약 100cm 높이까지는 용융대, 100~160cm는 가열대, 160~230cm는 산화대가 형성되어 있다. 가열대는 하부에서 상부로 갈수록 약해지며, 산화대는 흑색 혹은 짙은 갈색으로 변색되었다. 가마 최상부 20cm는 공동화 구간으로 거의 변화가 없다.

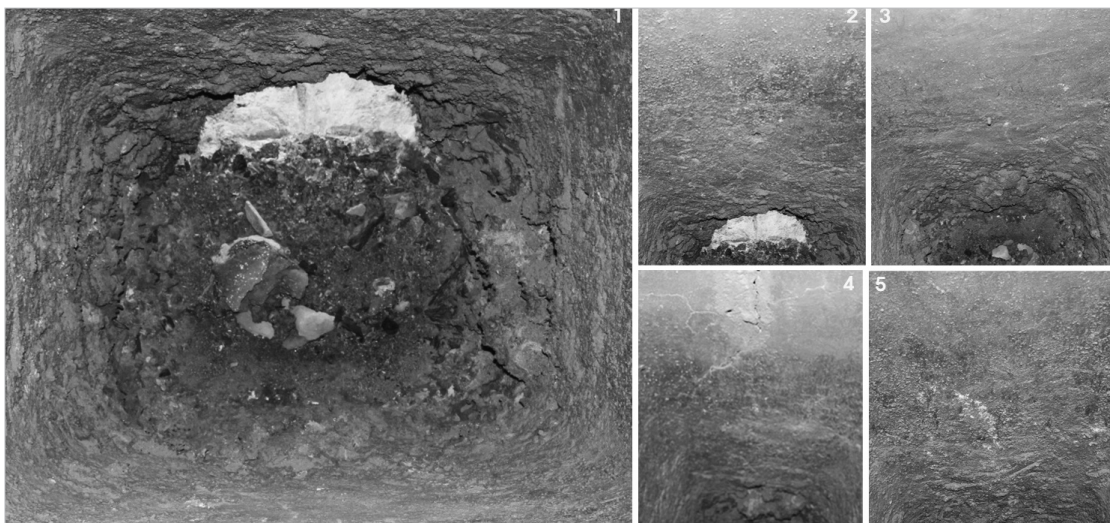
앞창 부분 가마 벽체의 단면은 크게 4개의 층으로 구분할 수 있다. 가장 바깥쪽의 I 층은 조업 전 가마 벽체의 색조인 적갈색이고, II-1층은 연한 황등색, II-2층은 백황색, II-3층은 연한 황등색이다. III-1층은 연한 자색, III-2층은 짙은 자색이고, IV 층은 평면 회청색 혹은 옅은 자색이고 단면은 회백색이다.



〈그림 48〉 가마 상단부 현황

I	II-1	II-2	II-3	III-1	III-2	IV
---	------	------	------	-------	-------	----

〈그림 49〉 가마 벽체 단면



〈그림 50〉 가마 바닥(1)과 벽체 현황(앞-2, 뒤-3, 좌-4, 우-5)



〈그림 51〉 가마 바닥 정리 후(좌) 및 벽체 단면(좌-중, 우-우)

골구멍의 내측은 전술한 바와 같이 상위 일부를 제외하고는 슬래그가 용착되었다. 슬래그를 제거하자 단부를 제외한 나머지는 대체로 원상태가 잘 남아 있었다. 다만 가마 내부의 열기를 그대로 받은 단부는 석재가 녹아내렸는데, 자연석이 아닌 인조 판석을 사용했기 때문으로 추정된다.



〈그림 52〉 골구멍 정리 과정

V

고 찰

1. 실험 결과의 고찰
2. 금속학적 분석 결과의 고찰



S

O

E

B

U

R

I

V. 고찰

1. 실험 결과의 고찰

1) 준비과정의 고찰

(1) 장입물(원료, 연료, 첨가제)의 준비 문제

실험의 준비는 2021년 6월 9일 분광 소재인 양양산 철광석을 확보하는 작업부터 시작되었다. 본 실험에서 지속적으로 제기되는 문제는 과거의 제철원료였던 토철을 울산지역에서 확보할 수 없어 국내 산 철광석 파쇄품으로 대체해서 사용해야 한다는 점인데, 나아가 국내에서 적절한 광석을 구입하기조차 곤란한 상황이 큰 문제로 남아 있다, 그나마 다행히 이번 실험에서는 국립중원문화재연구소로부터 강원도 양양산 철광석 1,050kg를 협조받아 원료 문제를 일단 해결할 수 있었는데 향후의 지속적이고 안정적인 공급을 위해서는 별도의 특별한 조치가 있어야 할 것이다.

이러한 제철원료에 대해서는 사전에 철저히 분석하여 전철량을 정확히 예측해 놓아야 한다. 현재 철 회수율을 조업에 투입된 원료의 무게와 출탕 선철의 무게를 비교하여 산정하는 방식을 취하고 있으나, 그보다는 분광에 포함된 전체 철성분의 함량을 기준으로 철회수율을 산출하는 방식이 좀 더 적절해 보인다,

연료는 한때 강원도 횡성산을 구매해 사용하기도 하였으나 이번 실험에서는 울주군 언양읍 하이쉴을 사용하게 되었다. 이처럼 제철실험에서 재지의 자원과 소재를 확보하여 사용하는 것이 원칙이라 하겠으나, 원료와 가마 내벽 미장용 점토처럼 현실적 조건이 그렇지 못한 경우들이 있는 점은 감안해야 하는 상황이다.

한편 선철의 생성과 원활한 배출을 위하여 현대제철에서는 다량의 염기성 첨가제(조제제)를 투입

하고 있고, 일부 고대 제철유적에서 패각 등을 사용한 증거가 확인되기도 한다. 하지만 조선후기 울산 쇠부리에서 그러한 첨가제를 사용했다는 기록이나 조사내용이 없어 그 사용 여부를 결정하기가 쉽지 않았다. 앞서의 실험들에서 패각을 사용해 철재의 배출을 용이하게 하기는 하였으나 철재 내의 산화칼슘(CaO) 함량이 과다하여 일반적인 제철유적 철재와는 다른 성질을 보이고 있다는 점이 문제로 지적되어 왔다. 이러한 문제의식에서 패각 대신 제6차 실험에서 생성된 슬래그를 사용하기로 결정을 보게 되었다. 이 슬래그의 투입량은 매뉴얼상으로 일단 80kg을 준비하였으나, 이 슬래그의 경우 패각을 첨가제로 이용한 조업의 결과물이어서 그 성분에 대해 명확한 파악이 필요하다.

(2) 실험구조물의 준비 문제

6월 하순에 실시된 가마 구조물에 대한 준비작업 중 가마 내 벽면의 보수에 쓰이는 재료를 점토 4 : 마사토 5 : 모래 1로 하여 5cm 두께로 미장하였는데, 실험 후 결과에 대한 평가에서 이러한 재질은 쉽게 용융되고 용재로서는 과다하게 작용하여 조업에 부정적인 영향을 주게 되었다는 지적이 나왔다. 이러한 문제를 개선하기 위하여 가마 내벽 미장은 적절한 성격의 점토를 보다 얇게 바르는 방식으로 하는 것으로 결정을 보게 되었다.

제철작업에서 가장 중요한 부분 중 하나인 송풍시설은 여전히 문제가 되었다. 전통제철기술복원에 발포무를 사용하는 것이 바람직하나 코로나19 국면으로 조건과 상황이 갖추어지지 않아 부득이 기계 송풍 방식으로 하게 되었다. 그러한 방침에 따라 송풍조절이 가능한 송풍기를 구입하였으나 풍압문제로 인해 6차 실험용으로 쓰던 송풍기로 송풍하면서 인력으로 여단이를 사용하는 방식을 취하게 되었다. 차후 적정 풍압을 지속적으로 유지할 수 있는 송풍장치의 마련도 앞으로 해결해야 할 중요과제가 되고 있다.

송풍시설 가운데 항상 문제가 되었던 부분은 조업 중 가마 내에서 가장 고열의 상태가 되는 송풍구에 어떠한 성격의 재료를 사용하는가 하는 점이었다. 조사된 울산 쇠부리가마의 경우를 참고해서 골구멍 조성에 석재를 사용하기로 하였는데, 준비과정에서 내화도를 충분히 파악하지 못하고 인조 판석을 사용한 점이 송풍작업에 큰 장애가 되는 결과를 초래하였다. 송풍 도중 인조 판석은 쉽게 녹아 내려 골구멍의 형태가 지속적으로 유지되지 못하였고, 이로 인해 적정송풍 상태가 지속되지 못하였고 결과적으로 가마 내 온도를 충분히 상승시키지 못하는 주요 요인이 되었다. 이러한 시행착오를 통해 차후 높은 내화도를 갖는 자연석의 사용이 필요함을 인지하게 되었다.

조업 사후의 구조에 대한 논의과정에서 앞창의 잡쇠구멍 높이와 골구멍 아랫부분 레벨이 같아 상호 차이를 두어야 한다는 지적이 있었다. 이에 현 구조물의 여건상 골구멍의 높이 조절이 불가능하여 가마 바닥 부분과 함께 잡쇠구멍의 높이를 10cm 낮추는 방식을 취하기로 결정을 보게 되었다. 또한 골구멍의 경사각도 20°에서 40°로 경사를 더 주어 송풍 방향이 가마 바닥(爐床)과 앞창 경계부를 향하게 하는 것이 바람직하다는 의견이 도출되었다.

본 실험이 선철을 생산하는데 목적이 있고 이를 규격화된 형태로 받아내기로 함에 따라 판장쇠바탕의 마련도 중요한 생산기술적 요소로 되었다. 앞선 실험에서는 바깥 틀로 철판을 이용하기도 하였으나, 이번 실험에서는 목재를 사용하고 판장쇠 1매의 형태에도 약간의 변화를 주기도 하였다. 문제가

되었던 것은 판장쇠바탕을 미리 제작하기로 하였음에도 이에 따른 준비가 부족해 축제에 돌입해서야 제작하게 되었다. 따라서 바탕 내부에 주물사용 흠을 채우면서 물을 부어 같이 반죽했는데, 제작 후 표면을 질과 토치 등으로 가열·건조시켰으나 표면만 건조되는데 그쳤다. 실험 후 내부를 살펴보니 표면만 건조되고 안쪽은 수분을 그대로 지니고 있었다. 이러한 점은 판장쇠에 그대로 영향을 주어 많은 기공이 형성되는 문제로 나타났다.

이와 관련하여 판장쇠바탕의 재료, 전체적 구조, 판장쇠 형태의 개선, 충분한 시간적 여유를 갖는 사전 제작 등에 대한 논의가 이루어졌고, 안성주물 현장견학 및 김성태 대표의 학술자문위원 위촉과 같은 조치가 이루어졌고, 향후 제8차 실험에 적극 반영하기로 하였다.

2) 진행과정의 고찰

실험은 2021년 10월 22일 08:55부터 목탄 장입이 시작되고, 21:49에 송풍을 종료하여 총 12시간 42분이 소요되었다. 그 기간 중 가마 내의 평균온도는 1,170℃였고 하부온도는 1,287℃ 정도를 유지하였다. 이러한 온도는 기대하였던 온도보다 다소 낮은 것으로서, 결과적으로 선철의 형성과 출탕에 바람직하지 않은 영향을 미치게 되었다.

〈표 21〉 제6·7차 실험 조업 비교표

구분		6차 실험(2020.10.09~11)	7차 실험(2021.10.22~24)	7차 실험 매뉴얼
분광 장입량(kg)		310	300	400
목탄 장입량(kg)		1,150	1,050	1,350
첨가제 장입량(kg)		슬래그 22/패각 30	슬래그 28	슬래그 80
장입비율 분광:목탄:첨가제		1:2.13:(0.071, 0.097)	1:2.0:0.093	1:2.0:0.2
송풍시간		677분(11시간 17분, 09:10~20:27)	762분(12시간 42분, 09:07~21:49)	775분(12시간 45분, 09:00~21:55)
장입시간		470분(7시간 50분, 1:10~19:00)	514분(8시간 34분, 11:46~20:20)	585분(9시간 45분, 10:00~19:45)
첨가제 장입시간	슬래그	268분(4시간 28분, 11:12~15:30)	223분(3시간 43분, 11:49~15:32)	585분(9시간 45분, 10:05~19:50)
	패각	437분(7시간 17분, 11:25~18:42)	×	×
선철 출탕량(kg)		72.25	총 84.25 판장쇠 47.85, 가마 내 31.1, 기타 5.3)	50.94kg 예상

이번(제7차) 실험 내용의 개요는 〈표 21〉에 제시한 바와 같은데, 매뉴얼과 대비해 볼 때 분광·목탄·첨가제의 투입과 조업시간에 있어 대소의 차이를 보이며 축소된 결과를 보였다. 이 가운데 특히 첨가제의 경우는 조업 도중 가마 내벽에 미장한 점토성분이 과다하게 용융되어 철재화됨에 따라, 애초 80

kg을 사용하기로 계획되어 있었으나 28kg을 사용한 시점에서 긴급회의를 통해 추가 투입을 중지하기로 하였다. 그에 따라 장입시간도 585분에서 223분으로 대폭 축소되었다. 이와 같은 가마 내면 용식에 따른 문제의 발생을 막기 위하여 다음 실험에서는 그 재질을 황토 중심에서 점토 중심으로 바꾸기로 결정을 보았다.¹⁸⁾

송풍은 계획했던 풍압 조절장치가 제대로 기능하지 못해 예전의 송풍기에 여단이를 이용한 방식을 취하였는데 불길에 큰 문제는 일단 없었다. 가마 외벽에서의 방열현상도 이전보다 적었으며, 온도계의 기록상으로는 큰 무리가 없는 듯이 보였다. 하지만 출탕 시의 쇳물 빛깔이나 유동성을 기준으로 하여 보았을 때 가마 하부가 원래 기대했던 만큼의 온도까지 상승하지 못한 것으로 판단되었다. 차후 출탕 선철에서 붉은 빛이 나지 않도록 가마 아래쪽의 온도를 더 높이는 방법을 취해야 할 것이다. 이와 관련된 가장 큰 문제점은 앞서 지적하였듯이 골구멍의 조기 용식에 따른 송풍 장애였던 만큼, 차후에는 평편한 자연석을 사용하여 이 부분의 형태가 지속적으로 유지될 수 있도록 하는 방식으로 하기로 결정을 보게 되었던 것이다.

이번 실험에서 얻어진 선철은 모두 84.25kg에 이르지만, 4차례의 출탕을 통해 판장쇠로 받아낸 것은 47.85kg로서 전체의 57% 정도가 된다. 매뉴얼상으로는 1회 출탕에 16.98(2.83×6)kg을 받아 4회 실시할 경우 총 67.92kg을 생산하는 것으로 설계되었으나 2차 출탕의 경우에만 예상치를 1kg 정도 초과하는 성과를 거두었을 뿐 나머지 3회는 10kg 전후의 분량만 판장쇠바탕을 채웠다. 판장쇠바탕을 가득 채우지 못할 경우 규격화된 선철괴를 만들지 못할 뿐만 아니라 상품성을 지니지 못하는 결함도 갖게 되는 만큼 서둘러 출탕하지 말고 충분한 양의 선철이 가마 바닥에 형성된 이후 출탕작업을 실시해야 할 것이다.

출탕시간은 1~2차에 1시간 52분, 2~3차에 1시간 33분, 3~4차에 2시간 29분이 소요되었는데, 2차 출탕 시 선철이 판장쇠바탕에 가득 찬 점을 참고하여 출탕 시간을 설정할 필요가 있다. 다만 3~4차의 경우 시간이 2시간 29분 경과했음에도 불구하고 10.75kg 정도 밖에 얻지 못한 점은 조업 후반기 가마 내에서의 선철 형성이 원활히 이루어지지 못한 결과로 보이므로 차후 그 원인을 밝히는 작업이 필요하다. 그리고 이번 실험의 출탕 결과를 면밀히 검토하여 차후 매뉴얼상에서 출탕시간을 보다 적절하게 설정해 놓을 필요가 있다.

매번 실험 때마다 야기되는 문제는 조업 말미의 송풍 중단과 조업 종료방식인데 이번 실험의 경우도 그다지 적절한 시점에서 이루어졌다고 말하기는 어려워 보인다. 왜냐하면 출탕으로 판장쇠를 47.85kg 받아낸데 비해, 조업 후 가마 바닥 중심과 골구멍 부분에 선철이 31.1kg이나 남아 있었던 것이다. 앞으로는 송풍의 종료시점을 늦추고 장입물이 조금 더 하강한 시점에서 최종적으로 출탕을 시도하여 가마 내 잔존 선철의 양을 최소한으로 줄이는 방식으로 나아가야 할 것으로 보인다.

18) 현재 울산 일원에서는 적절한 점토를 구하기 어려워 다음 8차 실험에서는 경남 산청산을 구입해 사용하기로 하였다. 이처럼 관외의 재료를 이용하지 않고 경주-울산 일대의 토양을 이용하는 방식의 모색이 필요해 보인다.

2. 금속학적 분석 결과의 고찰

2.1 원료 철광석

제7차 복원실험의 원료 철광석은 제6차 울산쇠부리복원실험과 같이 달천광산 지역의 토철을 사용하였던 것을 복원하고자 하는 취지에서 사용되는 원료 철광석은 달천광산 지역의 토철과 유사한 원료를 사용하고자 노력하였다.

현재에는 달천광산이 폐광되고 아파트가 건립되어 조선시대의 토철을 획득할 수 없어서 이와 유사한 성분을 갖고 있는 양양산 괴광석을 파쇄하고 4mm 이하로 채질하여 사용하였다. 제3차에서 제6차 복원실험에서 사용한 정선 신예미광산의 괴광석은 화학성분상으로 울산지역의 철광석과 차이가 있어서 사용을 배제하기로 하였다.

토철 대신에 사용한 분광은 크기 4mm 이하로 채질한 후 사용하였다. 4mm 이하 분광의 제조는 먼저 4mm 채로 걸러 선별하였다. 이후 1) 배소(배소가마에 목탄(잡탄)을 넣고 불을 붙여 예열한 다음, 철광석과 목탄(대탄)을 번갈아 장입하여 800~900℃×3시간 정도 소성) → 2) 풍력 및 자력선광하여 원료를 준비하였다.

원료 철광석 시료는 배소 전후에 각각 1점씩 준비하여 분석을 실시한 것이다. 조선시대 이의립 선생이 사용하였던 토철은 유적지에서 흙으로 채취할 때의 철광석 품위는 약 25%Fe₃O₄(자철광)이었으나 이를 골짜기에 설치된 세철지(洗鐵池)에서 선광을 하여 40%Fe₃O₄(세철된 토철)이상으로 만든 다음 이를 다시 배소처리하여 사용하였다고 판단하였으며, 복원실험에 사용된 원료인 분광의 분석결과는 다음의 <표 22>와 같다. 원료철광석의 분석에는 4mm 이하로 제조된 분광을 비롯하여 달천 광산의 토철 및 대안동쇠부리터 토철을 상호 대비 분석하였다.

<표 22> 유적지 토철 및 7차 사용 분광의 XRF분석결과

구분		Fe ₃ O ₄ Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	MnO	As ₂ O ₃
토 철	20U-T0	32.44	45.95	11.04	4.88	0.38	1.07	1.60	0.46	1.23	0.32
	20U-D1	16.37	60.05	16.12	0.89	0.59	1.56	2.43	0.91	0.40	0.14
	20U-D2	26.74	52.34	13.72	0.94	0.57	1.40	1.96	0.63	0.39	0.48
배소 전 분광		39.51	28.73	2.62	4.94	—	21.77	0.67	0.11	1.20	—
배소 후 분광		45.20	25.31	2.35	3.18	0.19	21.29	0.67	0.11	1.24	—

<표 22>에 나타난 바와 같이 본 실험에 사용된 분광은 토철에 비하여 SiO₂ 및 Al₂O₃ 함량이 비교적 낮고 MgO가 높으며 비소(As₂O₃)는 포함되어 있지 않았다.

2.2 재사용 조재제(첨가제)

첨가제로는 재사용 조재제가 사용되었고 철광석 중에 함유되어 있는 맥석산화물을 철광석으로부터 분리하기 위하여 제6차 복원실험에서 생성된 슬래그(유출재 및 가마 내 형성재)를 파쇄하여 재사용하

였고, 이들은 염기도가 0.81-0.99로서 염기성 조제제이며 사용 전후에 다음의 <표 23>과 같은 조성을 보여주고 있었다.

제7차에 사용된 첨가제는 제6차에서 생성된 슬래그를 재사용하였고 분광대비 첨가제 사용비율은 (1/0.2)로서 분광 장입 후 5분 후에 1kg 단위로 투입하였다. 그 결과 제7차 실험의 생성슬래그는 <표 23>과 같이 염기도가 떨어져서 0.81/0.99 → 0.69/0.82로 되었고 이는 철광석 중의 SiO₂와 가마 벽 미장제의 오염으로 용점이 높아져서 유출재를 형성하지 못하고 가마 바닥 형성재로 남아 있음이 확인되고 있다.

<표 23> 첨가제의 사용 전후의 XRF 분석결과

구분		FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	MnO	염기도
6차 철재	20U-17	5.43	43.0	6.03	16.22	0.56	23.98	1.83	0.31	2.19	0.99
	20U-27	7.87	43.34	6.05	14.89	0.51	22.53	1.88	0.30	1.94	0.95
	20U-21	10.3	43.49	5.94	12.71	0.49	22.51	2.05	0.29	1.99	0.87
	20U-23	7.39	45.66	7.25	13.05	0.71	20.97	2.46	0.30	1.92	0.81
7차 철재	21U-5	7.50	45.29	6.64	13.00	0.62	21.68	2.31	0.38	2.24	0.82
	21U-6	6.49	47.19	6.75	11.64	0.62	21.59	2.47	0.47	2.54	0.77
	21U-8	6.34	46.29	6.79	12.11	0.68	21.99	2.45	0.45	2.67	0.80
	21U-14S	3.88	50.95	7.89	16.43	2.07	13.19	3.50	0.32	1.17	0.69

본 실험에서 유출슬래그는 철광석에 포함되어 있는 맥석산화물을 철광석으로부터 분리하는 기능이며, 이것이 초기유출 슬래그인데 이는 계획한대로 형성되지 못하였다. 잡쇠구멍을 통하여 정상적으로 유출되지 못한 슬래그는 가마 내벽 보수과정에서 가마 벽에 부착된 황토성분의 미장제와 반응하여 용점이 상승되어 유출이 불가해 가마 바닥 형성물 슬래그로 바닥에 엉키게 되었다.

2.3 유출재와 가마 내 형성재의 고찰

정상적인 형성물 슬래그는 가마 바닥 용융선철의 상층에 용융슬래그층을 형성하여 미환원의 철산화물로부터 최종적으로 철을 환원하는 기능이 있으나, 본 실험에서는 용융슬래그층이 형성되지 않았고 다만 반환원 산화물과 가마 벽 용손물이 융착된 반응용산화물이 엉키어 있는 상태이다.

결국 형성물 슬래그는 6차 실험의 슬래그(첨가제)와 가마 벽 용손물이 화학적으로 용체를 형성하지 못하고 물리적으로 결합된 상태로서 최종환원 반응은 거의 일어나지 않았다고 볼 수 있겠다.

형성물 슬래그는 일반적으로 유출슬래그에 비하여 용점이 높고 복합산화물로 구성되어 있으며, 환원철과 융착되어 있거나 용융선철과 층상으로 분리(윗층-슬래그, 아래층-용융선철층)되어서 계면에서 상호 분배반응, 자유에너지 반응 등이 일어나는 것이 일반적이다.

그러나 본 실험에서는 유출슬래그가 형성되지 못하고 형성물 슬래그도 용융상을 형성할 수가 없게 되었다.

2.4. 유출선철과 가마 바닥 형성 선철의 고찰

가마 내에 형성된 용융선철은 제련로의 가장 밑바닥인 가마 바닥에 용융상을 정상적으로 형성하였으나 용융선철 윗층에는 용융슬래그가 형성되어 있지 않았다. 따라서 용융선철은 제1차 출탕에서 제4차 출탕까지 매번 판장쇠바탕에 거의 가득 주입되었으나 가마 바닥에 용융슬래그층이 형성되지 못하여 온도가 빨리 떨어지게 되었다.

매번 주입마다 선철시료를 채취하여 분석한 결과는 다음의 <표 24>와 같다. 1차~4차까지 유출선철은 모두 백주철 조직이었고 가마 바닥에 형성된 선철은 가마 벽체의 서냉효과에 의하여 흑연이 석출하여 회주철로 나타났다.

<표 24> 유출선철 및 가마 바닥 선철의 현미경 조직(SEM-EDX)

구분	기지 조직	입계 조직	형성 탄화물	비 고
1차 주입	Ledeburite(백주철)	Pearlite+Fe ₃ C	기공+ 산화물	사형탈수미흡
2차 주입	Ledeburite(백주철)	Pearlite+Fe ₃ C	기공+ 산화물	사형탈수미흡
3차 주입	Ledeburite(백주철)	Pearlite+Fe ₃ C	기공+ 산화물	사형탈수미흡
4차 주입	Ledeburite(백주철)	Pearlite+Fe ₃ C	기공+ 산화물	사형탈수미흡
가마 바닥 형성선철	Pearlite(회주철)	Pearlite+Ferrite+흑연	산화물	사형탈수미흡

용융선철의 용점은 탄소함량이 4.3%C일 때 1,200℃이나 탄소함량이 이보다 많거나 적을 때는 용점이 높아지게 되며 일단 용융선철이 형성되면 용선내부에 잔존하는 산화물이나 메탈로이드의 반응과 분배가 일어난다. 또한 선철이 응고 시에 냉각속도에 따라서 Cementite(Fe₃C)나 흑연(Graphite)이 생성되고 기지조직도 Ferrite, Pearlite, Ledeburite 등으로 변화한다.

2.5 선철의 형성을 위한 물리화학인 고찰

장입구에서 장입된 토철(분광)은 함께 투입된 목탄과 반응하여 환원이 개시되고 온도의 상승에 따라 반환원 산화물(Wüstite; FeOx)과 철광석 중 SiO₂가 저융점의 Fayalite(2FeO·SiO₂) 및 가마 벽에서 녹아 나온 알칼리 산화물(K₂O)의 영향으로 신속히 유출재를 형성하여 철광석으로부터 분리된다.

그리고 염기성 산화물의 첨가로 환원이 완료된 철은 용융침탄을 통하여 용융선철이 형성되어 가마 바닥에 용선(鎔銑)을 형성하고 용융선철 위에는 용융슬래그가 형성되어 선철이 생산되는 것이 일반적이다.

그러나 본 실험에서는 환원과정에서 황토로 조성된 가마 내벽 부착물이 슬래그와 함께 녹아내려 유출 슬래그를 형성하지 못하고, 또한 용점이 높아져서 용융선철 위에 용융슬래그도 형성되지 못하였다. 따라서 용융슬래그와 용융선철 계면에서는 철산화물(FeO)의 분배반응과 메탈로이드(Si, Mn, Al, Ca, Mg 등)의 자유에너지 반응이 일어날 수 없게 되었다.

유출재가 형성되지 못하더라도 가마 내 반응은 과량으로 투입된 목탄의 사용으로 탄소에 의한 환원

가스(CO)가 과포화 상태를 유지함으로써 분광의 환원과 침탄반응이 원활하게 일어난 결과로 선철의 형성은 정상적으로 이루어진 것으로 보인다.

2.6 골구멍 및 가마 벽 용손 분석

본 복원실험에 골구멍은 인조판석을 조합하여 만들어진 4각관이 사용되었으며, 이는 제련과정에서 가장 반응이 격렬하게 일어나는 골구멍 주변과 가마 벽에서는 산화물간의 화합에 의하여 내화물의 용식이 일어나게 되었다.

이에 대한 원인분석을 위하여 관련시료를 채취하여 분석한 결과, 일반적으로 골구멍의 용손 원인은 철광석의 반환원 과정에서 형성된 Wüstite(FeO_x)가 골구멍과 덧살에 부착되어 Fayalite($2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$)의 형성으로 알려져 있었으나, 본 실험에서는 황토로 숙성된 덧살과 알카리 산화물(K_2O , Na_2O)의 순환과 집적에 의해 상당한 영향을 받을 수 있다는 해석도 무시할 수 없는 실정이다.

본 실험에 사용된 가마 벽의 내벽은 황토와 왕모래를 물로 반죽하여 숙성한 미장재를 50mm 두께로 부착하여 수리해 사용되었는데, 이 가마 내벽 상부 및 가마 바닥 부착물들은 제련과정에서 반환원 생성물과 반응하여 과량의 가마 바닥 슬래그를 형성하고 있었다.

미장재로 사용된 황토는 주성분이 $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 로서 비중이 낮고 이중의 SiO_2 는 반환원산화물(FeO_x)이나 첨가제 중의 CaO , MgO 와 반응하여 슬래그($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$, $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$)를 형성하여 가마 벽을 침식하지만 과량의 가마 벽 산화물이 녹아내려 가마 바닥 슬래그를 형성하였다.

가마 바닥 형성물은 하부의 왕모래층, 선철과 융착된 모래층으로 형성되어 있고 그 위쪽에는 형성물 슬래그(맥석산화물+가마 벽 미장재 용손물)가 두텁게 가마 바닥 형성물층을 이루고 있었다.

VI

맺음말



S O E B U R I

VI. 맺음말

이번 쇠부리복원실험은 코로나19의 영향으로 봄의 행사가 연기되어 2021년 10월 22~24일에 개최된 울산쇠부리축제의 일환으로 실시되었다. 그 목적은 철광석을 파쇄하여 전통시대의 토철과 유사한 분광을 만들고, 이를 쇠부리가마 중심부에 위치한 높이 250cm, 내경 80cm의 가마에 넣고 강한 송풍으로 장시간 가열하여 선철을 생산하는 것이다. 2016년부터 시작된 전체 7회의 울산쇠부리복원실험 중 본격적인 선철 생산 실험은 2019년부터 실시되어 이번이 3회차가 된다.

6월부터 본격적으로 시작된 준비작업을 통해 원료·연료·첨가제가 마련되었고, 이어서 풀무 등 송풍 시설, 앞창, 가마부분 등의 보수작업이 큰 무리 없이 이루어졌으며, 판장쇠바탕은 준비가 늦어져 실험 당일이나 제작될 수 있었다.

실제 실험은 12시간 42분(총 762분)에 걸친 조업 과정에서 300kg의 분광과 28kg의 첨가제(6회 실험에서 생성된 슬래그만 사용)가 투입되었다. 쇳물은 1~4차에 걸친 출탕작업을 통해 47.85kg을 받아냈고, 가마 내에 잔존한 선철 등을 합하면 그 생산량은 84.25kg에 달하여 철광석 대비 철회수율은 28% 정도에 달한다. 이를 전철량을 기준으로 하면 그 수치가 70%에 이르러 그 비율은 상당히 높은 편이라 할 수 있다. 다만 생성된 선철이 2차 출탕 시에만 판장쇠바탕을 가득 채웠을 뿐이어서 이에 대한 개선책이 필요해 보인다.

조업 도중 쇠부리가마에서 가장 중요한 부분이라 할 수 있는 골구멍의 인조판석이 용융되어 송풍에 문제가 발생하였으며, 가마 내면에 미장한 황토성분이 많이 녹아내려 슬래그의 형성이 정상적으로 이루어지지 않았다. 그 결과 가마 하부의 온도가 충분히 올라가지 못하여 출탕 선철의 색깔이 다소 붉은 빛을 띠기도 하였고 유동성도 그다지 좋다고는 할 수 없는 상태였다. 판장쇠바탕은 주물사용으로 사용된 흙에 물을 과다하게 투입함으로써 완전히 건조가 되지 못한 채 실험에 사용되어, 생산된 판장쇠에 기공이 다수 발생하는 문제를 야기하기도 하였다. 이와 같은 제문제점은 실험 종료 직후부터 지

적되어 수차례의 논의를 거쳐 제8차 실험에서는 적극적으로 개선하는 방향으로 논의가 이루어졌다.

지난 6년간의 실험 과정에서 많은 시행착오를 겪으면서 다양한 부분의 기술요소들이 파악되어 왔는데, 향후 위에서 지적한 바와 같은 부분들이 제대로 개선된다면 핵심적인 기술 부분들의 문제는 대체적으로 해결된 것이라고 말할 수 있겠다.

이와 같은 실험은 다양한 부분들의 기술요소들을 총합적으로 이해한 연구자들에 의해 대단히 치밀하게 기획되고 충분한 준비과정을 거친 후 실행되어야 하는 것인데, 현재의 연구 참여자들은 그러한 부분들을 큰 문제없이 잘 수행해 주었다.

본 실험의 연구결과는 전통제철기술 복원실험의 직접적 실행자들인 연구원, 연구보조원 외에 연구목표를 향해 연구단 전원은 앞으로 더욱 정진할 것을 굳게 다짐해 본다.

부 록

1. 실험 기록
2. 실험에 대한 금속학적 분석 결과
3. 자문의견서
4. 판장쇠 분리실험 보고
5. 울산쇠부리복원 실험의 성과와 과제



S
O
E
B
U
R
I

