

●

2019 울산쇠부리
제철기술 복원실험 연구보고서

V

고찰

////////////////////////////////////

1. 실험 결과의 고찰
2. 금속학적 분석결과의 고찰

제 V 장. 고찰

1. 실험 결과의 고찰

1) 준비과정의 고찰

지난 4년간 울산 북구에서 제철실험을 5회 실시한 바 있고, 쇠부리가마 제철복원실험은 이번이 2회째가 된다. 이와 같은 실험은 준비, 진행, 결과의 정리 분석 및 보고에 장시간이 소요되는 작업이어서 초기 기획을 가능한 일찍 시작할 필요가 있다. 하지만 울산쇠부리축제 기간에 맞추어 본 실험이 5월 10일경에 이루어지는데 비해 그 기획회의는 당해연도 초에나 개최되곤 하여 준비에 필요한 물리적 시간을 충분히 갖지 못하고 사업이 긴급하게 진행되어 많은 애로가 있었다. 향후 제철실험이 지속된다면 그에 대한 기획작업은 늦어도 전년도 하반기에 이루어져 준비할 시간을 여유 있게 확보하여야 할 것이다.

(1) 시설의 준비

가. 가마의 구조, 규모 및 공간배치 결정에 대한 고찰

가마의 축조 부분에 대하여 먼저 살펴보면 그에 관련된 문제점들에 대해 논하자면 다음과 같다. 현재 석축형 쇠부리가마의 실험은 유적이 원래 대규모여서 동일한 크기로 가마를 축조하여 조업을 하는 것은 현실적으로 곤란하다. 만일 울산 일원에서 발굴된 유적과 동일한 규모로 축조하여 작업할 경우 막대한 양의 원료, 연료의 소모는 물론 조업시간의 연장 및 노동 연인원의 증가로 인해 그 비용도 크게 급증하여 현재의 여건으로는 수용 불가능하다고 보여진다. 하지만 실험이 보다 많이 진행되어 제철기술에 대한 노하우가 제대로 복원된 시점에서는 한 번 시도해보아야 할 과제이기는 하다.

이러한 여건 하에서 그 크기를 1/2 정도로 축소하여 실시하게 되었고 기존에 고대의 원통형 제철로를 실험하던 울산시 북구청의 앞마당의 적업시설도 소규모여서 제철실험의 여러 면에서 제한이 주어질 수 밖에 없었다.

그리고 가마의 구조와 규모 이외에도 제철장의 전체 구조를 원형에 맞게 갖추는 것도 필요하다. 예를 들어 원료와 연료의 치장(置場)과 제대로 된 배재부의 설치 그리고 기타 공간의 배치가 적절히 이루어져야 할 것이다. 차후 달천공원에 정식으로 쇠부리가마를 설치할 경우 이러한 점들을 적극 고려하여야 할 것이다.

나. 가마 축조과정

가마의 축조과정에서 검토가 필요한 부분들에 대해 지하 방습시설 작업부터 가마 최상부의 축조에 이르는 순서로 언급하고자 한다.

제일 먼저 실시하는 작업이 지하의 방습시설 마련이다. 기존에 보고된 발굴자료들을 보면 지하의 방습시설에 대해 철저하게 발굴하여 보고한 사례가 없어 임의적 방식으로 작업을 하게 되었다. 방습시설은 먼저 30cm 깊이로 굴광을 하고 다시 30cm를 파들어가 축조하는 방식이었는데 직경 80cm의 가마 지하부를 목탄분과 모래를 혼합하여 20cm 두께로 깔고, 그 상부에 마사토와 황토를 1:1 비율로 혼합해 10cm 두께로 깔았다.

이 때 하부 굴광의 주위에 석재를 돌리고 점토로 충전하였는데 이러한 석재를 돌려 배치하는 것이 방열의 결과를 초래하지 않았는지 확인해볼 필요가 있다. 그리고 지하부의 축조시 장시간 불을 때서 방습효과를 꾀하는 방식이 필요했던 것으로 보인다⁵¹⁾. 석축형 쇠부리가마는 가마의 좌우벽이 장입용 경사면과 붙어 있어 충분히 가열건조 하지 않을 경우 양측으로부터의 습기영향이 있을 수 있어 보인다.

가마벽을 쌓아올리는 작업에서 젖은 점토를 사용한 후 가열건조작업이 충분했는지도 점검이 필요하고, 외부를 석축으로 쌓은 것이 열의 방출을 쉽게 하여 가마 온도를 높이는데 크게 악영향을 끼친 점도 시급히 개선해야 할 사항이다⁵²⁾.

과거 조선시대에도 가마의 전면을 대형 석재로 쌓아 명칭 그대로 석축형 쇠부리가마를 만들고 한 변 1.5m 정도, 높이 3m 이상(추정)의 가마 본체에서 무난히 선철을 생산하여 판장쇠로 만드는 기술문화가 존재하였다. 하지만 이 번 실험에서 가마를 축조하여 작업하면서도 그러한 기술수준에 이르지 못했던 원인은 무엇이였을까를 집중적으로 검토하여 개선책을 마련하여야 한다.

현재 그러한 구조물을 계속 축조하여 실험을 해야하는 상황에서 그와 같은 문제를 해결하기 위해서는 가마벽의 열 방출 차단에 효과가 있는 내화토를 내면에 충분히 피복해서 축조하는 방식으로 가야 할 것으로 보인다. 그리고 그러한 문제를 극복하면서 온도를 상승시키기 위해 연료와 송풍부문의 분석이 필요해 보인다. 예를 들어 열량 높은 목탄(소나무 목탄 같은)을 사용하거나 송풍의 강도를 높여 연료를 더 집중적으로 태우는 방식도 고려해 볼 필요가 있다.

하여튼 이번 실험에서의 중요 문제 중 하나는 가마의 온도가 기대한 만큼 상승하지 않았고 특히 저부의 온도가 평균 1,200℃ 이하로 지속되어 출선(出銑)시 판장쇠가 제대로 만들어지지 못했던 점이다. 이에 대해 실험단은 출탕시 쇳물의 유동성을 일정 시간 동안 유지시키기 위해서는 가마 내 하부에 1,300℃ 정도의 혹은 그보다 높은 쇳물이 제대로 생성되어 있어야 하는 것으로 생각하게 되었다.

제철의 성패에 있어 가장 중요한 기술요소인 송풍의 문제에 있어 기존의 고대 제철로의 토제송풍관 방식과는 달리 목제틀로 골구멍을 조성하는 방법으로 변경하였는데 이에 대한 검토가 필요하다.

51) 충주 칠금동의 고대 제련로 지하 상태를 보면 과다할 정도로 불을 땀 흔적이 확인되었고, 일본 다다라의 경우 지하방습시설의 축조에 한달간 대 규모의 화력으로 건조를 시킨 것으로 알려져 있다.

52) 조업시 가마의 전면에 손을 대기 어려울 정도로 열기가 심하게 느껴졌다. 특히 석재 부분의 온도가 점토부분 보다 더 높은 상태였다.

이번 실험에서 송판으로 길이 50cm, 내부 한변 15cm의 사각 외형틀을 바닥방향을 향해 20° 각도로 가마 내면 20cm 안쪽까지 들어가게 설치하고(바닥에서 30cm 높이) 송풍구 부분을 납작한 석재와 점토로 배부른 형태로 만들었다.

일단은 이러한 방법으로 작업하여 선철 생산을 하기는 하였으나 보다 효과적인 철생산을 위한 송풍구의 정확한 위치가 어디인지에 대해서는 차후 유적의 사례들과 실험의 결과를 면밀히 검토하면서 찾아나아가야 할 것이다.

제철조업시의 충분한 온도 상승을 위해서는 가마 축조과정에서의 건조작업이 대단히 중요하다. 이번 실험에서 지면에서 50cm 높이까지 가마벽을 축조하고 장작과 짚으로 1시간 30분 동안 가열 건조작업을 하였고 축조 후에도 가마 내부에 숯불을 계속 피우면서 건조를 꾀하였는데⁵³⁾ 그러한 정도의 건조작업이 불충분하지는 않았는지, 그리고 그로 인해 가마 온도가 기대한 만큼 상승하지 못한 것은 아닌지 검토를 요한다.

온도계의 장착에 있어 가마의 좌우가 슬리프로 되어 있어 온도측정이 가능한 위치가 한정될 수밖에 없었고 결국 하부에 3개, 중간부에 3개씩을 설치하는 방식을 취하였다. 문제는 제철조업 시 하부에 생성된 선철의 온도가 지속적으로 1,300℃ 정도는 되어야 판장쇠를 만들기 위한 출선 작업이 수월한데 이를 제대로 계측하기 위한 온도계의 설치를 염두에 두지 못했던 점이다.

그리고 가마의 설계와 축조에서 세밀하지 못했던 부분이 직경 10cm의 초롱구멍과 직경 7cm의 잡쇠구멍의 위치, 크기 및 경사도에 관한 것이었다. 이에 관해 가장 중요한 점이 이 부분의 가마 벽 두께를 최대한 얇게 해야하는 것이었는데 너무 두껍게 축조하여 출탕시 초롱구멍을 개방하는 작업이 원활히 이루어지지 못하였다. 차후 초롱구멍의 가마벽 두께를 5cm 정도까지 얇게 하여 이 작업이 수월히 이루어질 수 있게 할 예정이다.

그 외에 연료와 목탄 등을 투입하기 위한 장입로가 좌측 460cm, 우측 520cm의 길이로 하고, 약 20°의 경사를 주었는데 과연 적절하였는지에 대해서도 논의가 필요하다.

(2) 원료, 연료 및 첨가물의 준비

쇠부리기술 복원실험의 여러 난제 중 하나가 과거의 토철을 어떻게 확보하느냐 하는 문제였다. 이번 실험에서 일단 정선 신예미광산의 철광석을 4mm 입자의 분광으로 만들어 사용하였는데 이에 대한 준비과정에 많은 시간과 인력이 투입되고 경비의 부담도 증가하여 이에 대한 개선책을 꾀할 필요가 있다. 아울러 토철의 정확한 성격이 아직도 모호하여 이에 대한 연구도 지속되어야 할 것이다.

연료인 목탄은 백운 참숯으로 제련용 1300kg, 단야용 100kg, 예비용 200kg을 구입하고 대탄 550kg, 중탄 350kg, 소탄 700kg으로 총 1,600kg을 준비하였는데 조업시 소모 속도가 매뉴얼상의 계획보다 빨라 투입 시간 간격이 짧아지는 결과를 낳았다. 차후 목탄 소모 시간을 정확히 파악하고 목탄의 크기에 따른 소모량을 잘 예측하여 준비하는 것이 바람직해 보인다.

53) 이에 소비된 연료의 총량과 건조시간을 정확히 기록하지 못했던 점도 개선 사항이다.

목탄의 종류도 현재는 참나무숯을 쓰고 있으나 빠르게 고열을 낼 수 있는 소나무숯을 마련하여 실험해 볼 필요도 있다. 이와 관련하여 제철유적의 조사시 목탄의 수종(樹種)에 대한 분석이 절실히 필요한 상황이다,

첨가제로 거제도산 패각을 65kg 준비하고 60kg을 투입하였는데 이 조재제용의 패각을 막연히 사용할 것이 아니라⁵⁴⁾ 제철유적에서 채집된 철재의 CaO 함량과 투입 패각의 양을 비교분석하여 향후 그 적정사용량을 정확히 파악하거나 혹은 이를 사용하지 않는 기술의 개발도 검토해야 할 사안이다.

(3) 판장쇠 바탕

선철의 생산에서 고려해야 할 중요 사항으로 생성된 쇳물을 어떻게 처리하는가 하는 문제이다. 권병탁의 쇳부리가마 조사 내용에는 판장쇠틀을 마련하고 이곳에 선철을 주입하여 판장쇠를 만드는 것으로 되어 있으나 그 세부적 설명은 부족한 상황이다.

이번 실험에서 철판으로 제조한 틀에 점토를 넣고 구워 판장쇠틀을 제작하였으나 두꺼운 철판으로 인해 중량이 과다하여 운반에 어려움이 있었고 황토물과 송탄재를 섞어 만든 이형재는 나름대로 효과를 보았다. 이러한 틀을 그대로 사용할 경우 냉각속도가 빨라 조업이 원활하지 않을 것으로 예상되는 만큼 가열하여 사용하는 실험도 필요하다.

2) 진행과정

(1) 원료, 연료 및 첨가제의 장입

본격적인 조업 시작 후 1회에 광석 10kg, 목탄 20kg, 패각 2kg을 투입하여 총 6시간 17분 동안 광석 300kg, 목탄 600kg, 패각 60kg을 소모하였다. 이후 20:00경까지 장입작업은 계속되어 광석은 370kg까지 사용되었고 목탄의 총 사용량은 1,380kg에 달하였다. 이러한 작업에 있어 각종 장입물의 양과 투입의 종료 및 조업 종료에 대한 기준이 아직 마련되지 않은 상태인데 이에 대해서도 적절한 매뉴얼이 필요해 보인다.

(2) 송풍

제철의 최대 관건은 송풍의 성공여부인데 풀무의 바람양과 세기가 적절하였는지도 중요 점검사항인데 계속해서 가마의 온도가 상승하지 않은 상황에서 바람의 강도조절에 대한 노력이 부족했다고 생각된다,

가마의 온도상태는 온도계에서 뿐만 아니라 가마 상부의 불꽃 색깔로도 판단 가능하다. 이번 실험에서 그러한데 대한 지속적 관찰과 온도 하강시의 신속한 조치가 제대로 이루어지지 못했던 점도 중요한 문제로 지적된다.

54) 이번 실험에서는 철광석 : 목탄 : 패각 비율을 1.0 : 2.0 : 0.2로 하였다.

또한 풀무작업에 참여하신 분들이 대부분 고령이어서 강한 송풍을 계속 요구하기는 어려웠던 점도 개선사항이고, 실제 풀무밟기에 있어 너무 다양한 사람들이 참여하면서 풀무대장이 가마의 온도와 불꽃의 상태를 예의주시하면서 송풍의 강도를 조절하는 노력을 주도적으로 하지 못한 점은 개선이 필요하다.

이전의 괴련철 생산에 있어서는 일정 시간이 경과한 후부터 흘러내린 철재가 송풍구 앞을 막는 현상이 계속되어 송풍을 저해하고 가마의 온도도 하강하는 결과를 가져왔는데 이번 실험에서 철재의 송풍구 폐쇄현상은 후반부에 부분적으로 나타나 이를 제거해 가면서 송풍작업을 진행하였다. 그러함에도 불구하고 가마의 하부가 기대치 보다 낮은 온도를 계속 보인 점에 대해서는 철저한 원인분석이 필요하다.

(3) 온도의 계측

송풍 개시 후 2시간여의 시간이 경과한 시점에 가마의 온도가 1,200~1,250℃ 정도로 상승하여 원료를 장입하기 시작하였는데 그 이후 온도가 기대치 만큼 충분히 상승하지 않고 1,100℃~1,200℃의 범위에서 정체되는 양상을 보여 선철생산이 원활하지 못할 것으로 염려되었다. 그러할 때 송풍 강도가 상승하도록 강하게 풀무밟기를 해줄 것을 독려하기도 하였으나 그러한 관리가 조업 내내 지속되지는 못하였다. 게다가 온도 측정 도중 일부 온도계가 고장을 일으켜 측정에 지장을 주기도 하였다. 차후 석축형 쇠부리가마의 온도 계측을 위한 효율적 방법의 모색이 필요하다.

(4) 판장쇠 작업

앞서 언급한 판장쇠 바탕의 설치와 출선을 통한 판장쇠 생산은 처음하는 작업으로서 이에 대한 구체적인 발굴자료가 없어 구조와 설치의 방식에 대한 지식이 막연한 채 실험이 진행되었다. 그러한 상태에서 작업당일 설치방법에 대한 논의를 거쳐 16:00경 수평으로 설치하였고, 1시간 정도 후 잡쇠구멍에서 선철이 유출되자 초롱구멍을 뚫기 시작하였으나 작업이 원활하지 않았다. 이는 앞서 지적하였듯이 이 구멍 부분의 벽 두께가 너무 두꺼웠기 때문이었다. 이를 통해 이 부분의 설계에 문제가 있었음을 인지하게 되었다.

결국 어렵게 초롱구멍을 뚫어 선철을 유출시키고 판장쇠 바탕에 흘려보냈으나 양이 충분하지 않아 일부분에만 주입되었고 그나마도 빠르게 냉각되어 제대로 형태를 갖추지 못한 채 굳어버렸다. 이와 같은 결과를 얻게 된 것은 판장쇠 바탕의 여섯 개 홈부분에 충분히 채울 수 있을 만큼의 선철이 생성되지 않아 가마하부에서 초롱구멍을 통해 유출되는 선철의 유출압력이 약하였고 그 온도도 높지 않았기 때문이라 할 수 있다. 따라서 향후 이러한 작업을 실시할 경우 이러한 중요 사항들을 철저히 개선하여 조업에 임하여야 할 것이나 사실 그에 대한 노하우를 제대로 터득하기 위해서는 많은 실험경험이 필요해 보인다.

3) 정리와 분석

실험의 결과물 정리는 출탕된 생성물을 중심으로 실시되었으며 가마 내부의 잔존물은 현장에 존치해 놓았다. 사실 실험 후에 송풍구 부분을 포함한 가마 내의 상태를 면밀히 살피고 그에 대한 기록과 검토가 철저히 이루어져야 하지만 시간과 기타 여건의 부족으로 미진했음을 인정하지 않을 수 없다. 사실 조선시대에 석축형 쇠부리가마를 축조한 후 짧은 시간 내에 조업을 종료하고 가마 내부를 파괴하지는 않았을 것으로 여겨진다. 실제적으로는 경제성을 고려하여 장시간 조업 후 생성물을 모두 배출시키고 나서 앞면을 헐고 내부를 수리하여 재작업하는 방식이 일반적이지 않았을까 생각된다. 그러한 점에서 현재 시행중인 실험은 부분적 작업에 해당하는 셈이다.

앞서 지적하였듯이 이러한 석축형 쇠부리가마 작업에서 가장 중요한 관건은 쇠물의 생성과 그에 대한 처리방식으로서 원활한 출탕과 그를 틀에 주입하여 판장쇠를 만드는 것으로 이해되고 있다. 하지만 2차 출탕시 판장쇠작업이 실패하는 등 실험이 기획한대로 진행되지 못하고 결국은 수차례에 걸쳐 부분적으로 선철과 철재를 배출하는 방식이 되었다. 출탕은 17:00경 시작하여 6시간 30분 동안 총 9차례 실시되었고 이 때 유출된 선철과 철재의 무게는 총 181.1kg에 달하고 그 가운데 선철은 80.3kg이 수습되어 철회수율은 21.7%로 적당한 성과를 거둔 셈이다. 다만 선철을 일괄처리하지 못한 점은 필히 개선해야 할 사안이다.

〈표 19〉 배출 선철의 성격

배출 회수	성격	무게	비고
1차	흐르다가 굳은 상태	0.95kg	대, 중, 소
2차	판장쇠	9.75kg	부분적 주조
3차	판상 및 입상	1.4kg	철재위에 입상선철
4차	부정형	6.0kg	
5차	길게 흐르다 굳은 형상	2.55kg	
6차	부정형	12.75kg	
7차	부정형	40.0kg	대형, 중형
8차	괴상 외	2.25kg	
9차	부정형	4.95kg	
계		80.3kg	

차후 이와 같은 배출방식을 지양하고 충분한 양의 선철이 1,300℃ 정도의 비교적 높은 온도로 가마 하부에 생성된 후 이를 신속하게 초롱구멍으로 배출시켜 판장쇠를 제작하는 실험이 제대로 실시되어야 한다.

2. 금속학적 분석결과와 고찰

1) 제1, 2, 4차 및 5차 복원실험 주요항목 대비

울산쇠부리 제철기술 복원실험은 지금까지 5차에 걸쳐서 단계적으로 수행해왔으며 그 실험결과를 체계적으로 요약한 결과가 <표 20>에 나타나 있다. 표의 요약에서 나타나듯이 제1, 2차 실험에서는 괴련철이 생산되었고 제4, 5차 실험에서는 선철이 생산되었다. 이는 원료장입량에 대비한 목탄사용량(목탄비)이 약 1.0 정도일 때에 괴련철이 형성되고 목탄비가 약 2.0 정도일 때 선철이 형성됨을 알 수 있었다.

또 선철이 형성되기 위해서는 최종침탄시간이 필요하기 때문에 초기철재 배출시간이 괴련철 형성(약 4~6시간)에 비하여 선철 형성(약 8~11시간)은 긴 시간이 소요되었다.

<표 20> 단계별 제철복원 실험요약

구 분	제1차 제철복원	제2차 제철복원	제4차 제철복원	제5차 제철복원
1)가마의형식	원통형	원통형	장방형(80/80)	장방형(80/80)
2)목탄비/원료	초기대탄(277kg) 1.05=483/460	초기중탄(250kg) 0.90=383/425	초기대탄(620kg) 2.07=610/300	초기대탄(630kg) 1.97=750/380
3)철광석 원료	괴광(460kg)	괴광(425kg)	분광(4mm)=290	분광(4mm)=380
4)조재제	황토(47)/패각(72)	패각(68)/흡습	패각(60kg)	패각(60kg)
5)초기철재배출	4시간 13분	5시간 58분	10시간 46분	7시간 50분
6) 형성물	괴련철(69.7kg)	괴련철(113.15kg)	선철(61.9kg) 혼합괴(126.4kg)	선철(185.2kg)

2) 철광석의 환원과 선철의 형성

사용된 철광석은 제4차 실험과 같이 신예미광산 철광석을 채질하여 4mm이하의 분광을 <표 21>과 같이 사용하였는데 화학성분은 FeO기준으로 43.94%(4차/41.95%)로 저품위로 밝혀지고 있으며 이에 비하여 대안동의 토철은 63.19%(FeO)로서 상대적으로 높았다.

그런데 4차, 5차에 사용된 철광석에는 석회(CaO)이외에 다른 염기성 산화물을 다량 함유하고 있어서 환원과정에서 슬래그의 염기도 개선에 크게 기여하고 있었다.

<표 21> 철광석 성분 분석결과 대비

구분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
4차	41.95	25.69	2.51	2.76	-	25.09	0.58	0.09	0.06	1.04
5차	43.94	25.42	2.51	3.09	-	23.11	0.55	0.10	0.05	1.01
토철	63.19	25.50	6.03	1.46	0.22	0.71	0.66	0.18	0.18	0.99

3) 염기성 슬래그의 형성과 반응

슬래그의 염기도 검토는 기존에 간편한 공식 (염기도= CaO/SiO_2)으로 사용되었으나 CaO이외에 다른 염기성 산화물이 다량 함유되어 있어서 이를 보완하여 수정된 공식(염기도= $(\text{CaO}+\text{MgO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/(\text{SiO}_2)$)으로 비교하였다.

3차, 5차, 8차 유출 슬래그의 염기도는 <표 22>와 같이 각각 1.11, 1.02 및 0.94로서 약 1.0에 접근하고 있으며 이러한 염기도의 개선으로 유출 슬래그 중의 철산화물은 1.39%, 1.95% 및 1.20%로 매우 낮아져서 최종적인 철 회수율을 향상시키고 있는 것으로 나타났다.

<표 22> 유출 슬래그의 염기도

구분	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SiO ₂	염기도	FeO
3차유출	22.31	23.99	0.40	1.08	43.00	1.11	1.39
5차유출	21.52	22.00	0.47	1.46	44.40	1.02	1.95
8차유출	18.38	23.20	0.51	1.79	46.49	0.94	1.20

4) 선철의 성분과 조직

선철의 형성은 가마 내에서 장입된 철광석이 목탄의 반응으로 환원되고 철광석중의 맥석 산화물은 조재제(폐각)와 반응하여 슬래그로 배출되면 환원피가 가마바닥에서 침탄반응이 일어나서 선철을 형성하였다.

초기에 형성된 용융선철은 유출철재와 동반하여 배출되거나 가마바닥하부에 용탕을 형성한다. 따라서 유출재와 함께 동반하여 배출된 선철(4차, 8차)의 탄소함량은 4.50%C, 4.38%C이고 현미경 조직은 Pearlite조직에 입계에 Cementite(Fe_3C)가 형성되거나 흑연(Graphite)을 형성하고 있다.

가마바닥에 용탕을 형성한 선철은 탄소함량이 4.24%C이고 기지조직은 Pearlite이고 입계에는 Cementite(Fe_3C)를 형성하였다. 그리고 제련과정에서 가마바닥상부에서 형성된 구형선철의 분석결과 탄소함량이 4.35%C이고 현미경조직은 Pearlite 기지조직에 입계에 흑연이 형성되어 있었다.

따라서 제5차 실험에서 용융온도가 가장 낮은 공정선철을 제조할 수 있었음이 확인되었다.

<표 23> 선철의 화학성분과 현미경조직

구분	화학 성분		현미경 조직	
	C	S	금속현미경 조직	조직 경도
4차유출	4.50	0.05	Pearlite + 흑연	HMV268.2
8차유출	4.38	0.06	Pearlite+Cementite	P(249.1)/C(691.7)
하부선철	4.24	0.06	Pearlite+Cementite	P(273.5)/C(684.2)
구형선철	4.35	0.06	Pearlite + 흑연	HMV255.0

5) 송풍관의 용손

송풍관을 통하여 취입된 산소(O_2)는 일차적으로 발열반응을 일으켜서 가마 내 장입물의 온도를 상승시키고 이차적으로 철광석을 환원하여 제련작업이 진행되는 것이다. 이러한 승온과 환원반응 그리고 선철생산의 경우에는 침탄반응이 동반되어 일어나기 때문에 송풍관 선단에서는 극열한 화학반응이 진행되어 용손이 일어나고 있다. 이러한 송풍관 선단의 극심한 용손은 조업을 불안하게 하거나 조업중단(송풍중단)을 일으키는 원인이 되고 있다.

따라서 용손원인을 밝히는 것이 매우 중요하여 송풍관 부착물에 대한 분석을 실시하고 그 요약의 결과가 <표 24>에 나타나 있다. 송풍관 선단과 부착계면의 화합물은 $K_2O \cdot FeC \cdot SiO_2 \cdot Al_2O_3$ 의 복합화합물을 형성하고 있으며 이들의 염기도는 0.13/0.20 정도로 낮아서 염기도의 상승에 따른 용손은 아니다.

오히려 부착반응 생성물이 모두 ($SiC \cdot SiO_2$)로 나타나서 산성산화물(SiO_2)와 탄화물(SiC)에 의한 용손으로 볼 수 있겠다.

<표 24> 송풍관의 부착 생성물

구분	염기도	부착 계면	부착반응 생성물
송풍관1	0.13	$K_2O \cdot FeC \cdot SiO_2 \cdot Al_2O_3$	$SiC \cdot SiO_2$
송풍관3	0.20	$K_2O \cdot FeC \cdot SiO_2 \cdot Al_2O_3$	$SiC \cdot SiO_2$

6) 가마벽의 침식

가마벽 부착 슬래그의 주요성분은 철광석 성분과 가마 내 슬래그 성분에 영향을 받고 있으며 이에 대한 분석결과가 <표 25>에 나타나 있다. 이에 대한 근거가 $FeO(5.11-8.79\%)$, $CaO(2.53-3.43\%)$, $K_2O(5.96-7.88\%)$ 으로 나타나서 원래의 점토질 성분인 가마벽의 성분으로부터 많은 차이가 나타나고 있다.

<표 25> 가마벽 부착 슬래그의 주요성분

가마벽	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O
1위치	8.79	64.6	10.10	3.43	1.91	2.28	7.88
5위치	5.11	71.4	10.82	2.53	1.98	1.27	5.96

●
2019 울산쇠부리
제철기술 복원실험 연구보고서

VI

맺음말

////////////////////////////////////

제VI장. 맺음말

구체적 실험계획이 다소 늦게 이루어지고 짧은 기간 동안 가마를 축조하면서 원료, 연료 및 기타 재료들을 준비하느라 대단히 분주한 시간을 보내고 5월 11일 본 실험에 착수할 수 있었다.

금년도 실험도 2018년에 이어 토철을 원료로 하여 선철을 생산하는 석축형 쇠부리가마 방식으로 진행되었다. 전년도의 작업은 사실상 구조면에서 석축형 쇠부리가마의 방형가마 부분만 토축으로 변용하여 사용한 것이었다. 그에 비해 금년도에는 가마의 한 변 80cm의 크기는 유지하면서 높이를 250cm로 이전 보다 약간 높여 선철의 생성이 보다 용이하도록 한 외에, 가마 좌우측에 장입로를 설치하여 명실상부한 석축형 쇠부리가마의 면모를 갖추게 되었다.

외면에 석축을 하고 내부를 돌과 흙으로 충전하여 만든 장입로는 가마 좌측 460cm×95cm, 우측 520cm×90cm 규모에 경사도는 약 20°로서 양측으로부터 토철과 목탄을 운반하여 가마 내 장입이 원활하게 이루어질 수 있었다.

원료는 신예미광산의 광석을 4mm 크기로 분쇄하여 토철 상태로 300kg을 사용할 계획이었으나 370kg을 소비하였고, 연료는 1380kg, 폐각은 60kg이 투입되었다.

원료와 연료 만장입 후 09:15부터 발포무 송풍이 시작되었고, 23:31까지 9회에 걸친 출탕작업을 진행한 후 송풍을 중지하였다. 그 결과 가마 내에서 출탕된 생성물 181.1kg 가운데 선철은 80.3kg 포함되어 있어 철회수율이 21.7%에 달하였다.

이와 같은 조업을 통해 선철이 생산되기는 하였으나 개선해야 할 과제들을 많이 확인하게 된 실험이 되었다.

무엇보다 중요한 것은 가마 내의 온도가 기대한 만큼 충분히 상승하지 않고 석축부분의 방열이 과다했다는 점이다. 그 결과 가마하부에 선철이 생성되기는 하였으나 출탕과 판장쇠 제작에 많은 어려움을 경험하게 된 것이다. 이에 대해서는 조속히 면밀한 검토와 논의를 통해 개선책을 마련해나갈 예정이다.

그 외에도, 다양한 기술요소를 포함한 작업인 만큼 여러 부분들에서 개선점들이 파악되어 그에 대한 검토와 분석을 진행하고 있다. 그러한데 기초하여 차후의 실험은 보다 진전된 성과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

이와 같은 제철복원실험은 전통문화를 단순히 복원하는데 그치지 않고 과거 선조들이 우리의 역사를 지켜나아가기 위해 제철이라는 극한노동을 하면서 보여주었던 그 노고와 정신을 기억하고 계승하는 소중한 노력이다. 뿐만 아니라 현재 정부가 중요문화재의 보존에 필요한 철물의 공급에 전통제철방식을 도입하려하고 있는 시점에서 단절된 과거의 제철기술을 필히 복원해 내야 하는 현실적 중요 과제이기도 하다.

이에 본 실험단은 그러한 정신과 책임의식으로 향후 더욱 정진해 나아갈 예정이다.

●

2019 울산쇠부리
제철기술 복원실험 연구보고서

부록

- ////////////////////////////////////
1. 금속학적 분석결과
 2. 자문의견서
 3. 실험 과정 진행표
 4. 온도 변화표

1. 금속학적 분석결과

2019 울산쇠부리

제철기술 복원실험의 금속학적 분석 및 고찰

신경환¹⁾ · 이재용²⁾

I. 분석대상 시료의 성격

1. 분석시료의 성격

형성물의 시료채취에 앞서 본 실험의 원료인 철광석(분광)과 비교를 위하여 대안동 유적의 토철 시료 채취와 조재제로 사용된 패각을 시료로 채취하였다.

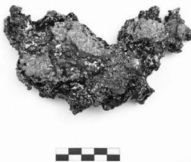
또, 송풍관의 용손 원인을 파악하고자 송풍관 선단 부분의 부착철재시료를 채취하고 제련 조업 과정에서 9차에 걸쳐서 유출되는 철재와 선철을 시료로 채취하였다.

〈표 1〉 분석대상 시료의 성격

시 료 번 호	명 칭	출토위치	크 기(cm)			무 게(g)	사 진
			길 이	너 비	높 이		
19U-2	철광석	실험전	-	-	-	125	

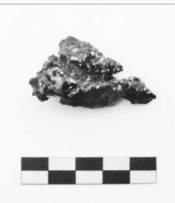
1) 금속기술연구소장

2) 금속기술연구소 선임 연구원

시 료 번 호	명 칭	출토위치	크 기(cm)			무 게(g)	사 진
			길 이	너 비	높 이		
19U-3	토철	대안동 토철	-	-	-	70	
19U-1	패각	실험전	-	-	-	25	
19U-4	송풍관1	송풍관 윗부분 철재	13.5	7	2	180	
19U-5	송풍관2	송풍관 윗부분 철재	9	6	3	110	
19U-6	송풍관3	송풍관 윗부분 철재	9	5	4	120	
19U-7	송풍관4	송풍구 철재	7	6.5	2.5	150	
19U-8	1차유출	잡쇠구멍 확인선철	8	2	1.5	50	
19U-9	2차유출	주형틀 선철 (채취전)	2.5	2	1	20	

시 료 번 호	명 칭	출토위치	크 기(cm)			무 게(g)	사 진
			길 이	너 비	높 이		
19U-10S	3차유출	철재	9	8	6.5	450	
19U-10M		선철	6	2	1	25	
19U-11S	4차유출	철재	13	5.5	4	320	
19U-11M		선철	4	3	0.6	25	
19U-12S	5차유출	철재	8	5	3.5	90	
19U-12M		선철	12	3	1	150	
19U-13S	6차유출	철재	8	7	3	210	
19U-13M		선철	11	3	1.5	105	
19U-14S	7차유출	철재	8	5.5	4	270	

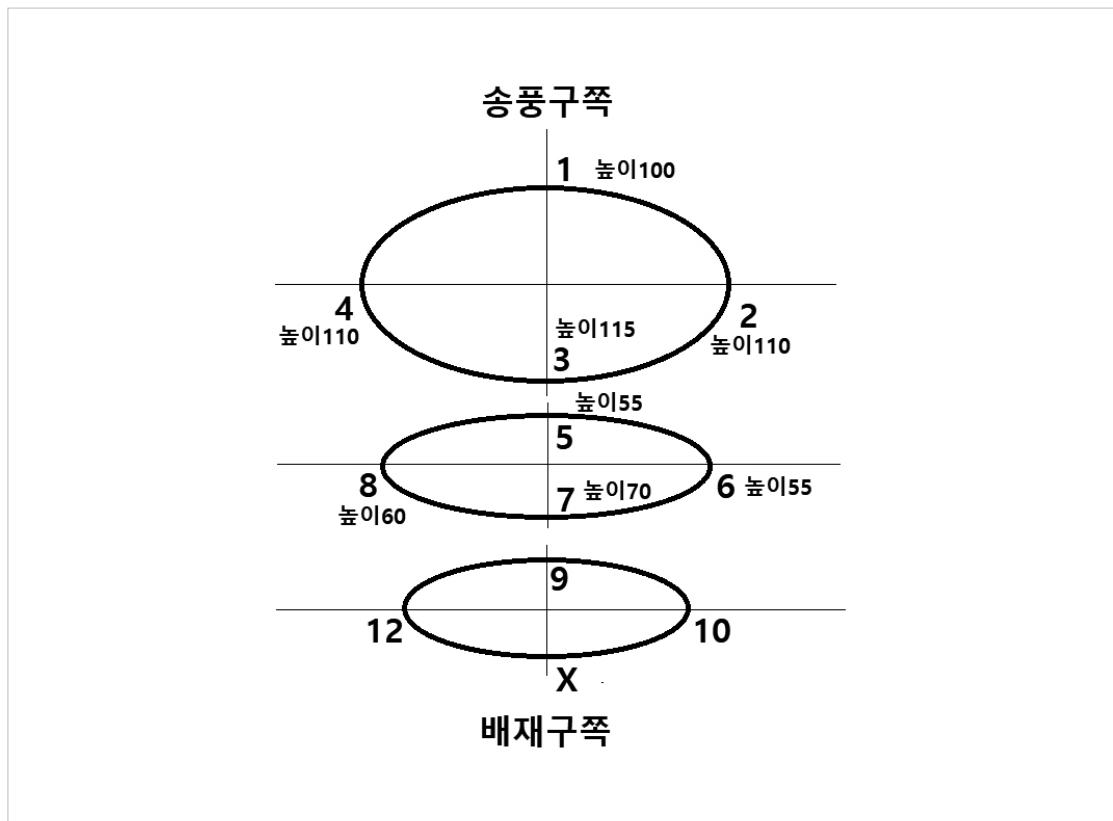
시 료 번 호	명 칭	출토위치	크 기(cm)			무 게(g)	사 진
			길 이	너 비	높 이		
19U-14M	7차유출	선철	3.5	2	1	30	
19U-14G		괴련철	10.5	8	3.5	310	
19U-15S	8차유출	철재	8	4.5	4	120	
19U-15M		선철	7	3	1.3	70	
19U-15R		구형선철	5	4	25	45	
19U-16S	9차유출	철재	6	4	4	70	
19U-16M		선철	15	3.5	1.5	190	
19U-17MB	하부	선철	9	5	1.5	160	

시 료 번 호	명 칭	출토위치	크 기(cm)			무 게(g)	사 진
			길 이	너 비	높 이		
19U-17MU	상부	선철	8.5	6	4	270	
19U-18S	노해체	입구철재	7.5	7	5	290	
19U-18W	노해체	입구철재	12	10	5	600	
19U-19	1위치노벽	철재 (형성물)	4	3	1	20	
19U-20	2위치노벽	철재 (형성물)	9	5.5	3.5	130	
19U-21	3위치노벽	철재 (형성물)	13	11	5	510	
19U-22	4위치노벽	철재 (형성물)	9	6	3.5	115	
19U-23	5위치노벽	철재 (형성물)	4	4	2.5	35	

시료 번호	명칭	출토위치	크기(cm)			무게(g)	사진
			길이	너비	높이		
19U-24	6위치노벽	철재 (형성물)	5	4	2.5	50	
19U-25	7위치노벽	철재 (형성물)	9	5.5	2	80	
19U-26	8위치노벽	철재 (형성물)	6	3.5	2	35	
19U-27	9위치노벽	철재 (형성물)	10	8	3	200	
19U-28	10위치노벽	철재 (형성물)	6	2.5	3.5	35	
19U-29	11위치노벽	철재 (형성물)	14.7	7.5	6	370	

2. 노벽 부착물의 시료 채취 위치

노벽 부착물의 구조는 크게 3개층(상부, 중간 및 바닥층)으로 구분하였고 각층별로 단면상으로 4방향(송풍구, 배재구, 좌측 및 우측)에서 각각 시료를 <그림 1>과 같이 채취하였다.



〈그림 1〉 노벽 형성물의 샘플 채취 위치(시료번호:19U-19~28)

II. 분석 방법

시료의 조직분석에는 금속현미경(Olympus GX51)을, 조직의 정성분석에는 주사전자현미경(SEM)-에너지분산분석기(EDX) 분석(hitachi SU-1500)을, 정량분석에는 X선형광분석(XRF) 및 C/S분석을 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, Olympus GX51 금속현미경을 이용해 미세조직을 관찰한 후 주사전자현미경(SEM, JEOL사 JSM-5610)을 통해 재조사하였다. SEM 촬영을 위해서 코팅기(HITACHI E1010)를 이용해 시편의 표면을 코팅하였다. SEM에서 관찰된 각 조직에 대해서 EDX분석기를 사용하여 조직 내 성분을 파악하였다.

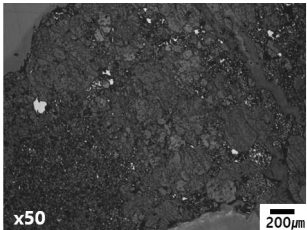
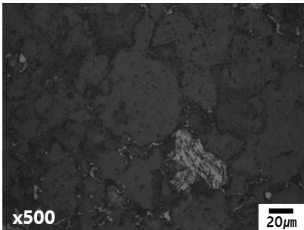
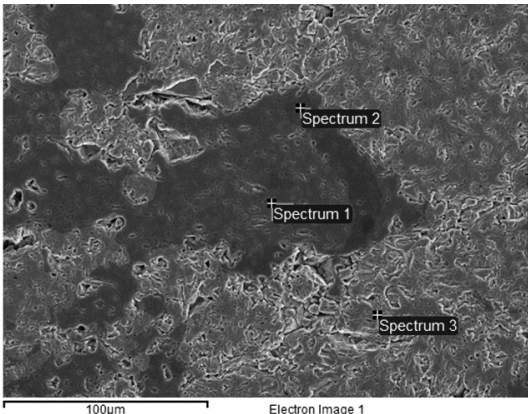
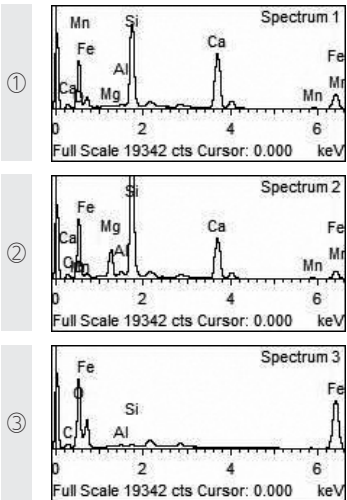
X선형광분석을 통한 시료의 정량적 분석을 위해서는 유물에서 채취된 시료를 먼저 Gyrat Grinder로 분쇄하였다. 이렇게 얻어진 시편가루를 200메쉬의 체로 걸러 50 μm 이하의 분말로 만들고, 이를 150 $^{\circ}\text{C}$ 건조기에서 90분 동안 건조시켰다. 시료분말, Flux(Li3B4O7) 및 Binder(C80, H159O53B)를 5:2:3의 비율로 섞어 알루미늄 캡에 넣고 40톤의 압력으로 압축시켜 Pressed Pellet를 완성하였다.

III. 분석결과

1. 원료 철광석

1) 분광(19U-2)의 분석결과

〈표 2〉 철광석(19U-2)의 분석결과

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

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	22.22	—	35.87	—	0.17	0.19	17.77	—	22.91	—	0.89
②	10.25	4.59	37.96	—	5.40	0.83	24.02	—	15.95	—	0.99
③	70.66	4.38	24.07	—	—	0.49	0.40	—	—	—	—

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	43.94	25.42	2.51	3.09	—	23.11	0.55	0.10	0.05	1.01

분광의 XRF 분석결과는 비교적 낮은 철함량(43.94%FeO)이며 이 철광석(분광)에는 염기성 산화물인 MgO(23.11%) 및 CaO(3.09%)가 함유하고 있어서 제련시에 염기도를 높여주는 역할을 할 것으로 판단된다.

2) 토철(19U-3)의 분석결과

〈표 3〉 토철(19U-3)의 XRF 분석결과(조성의 단위는 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	63.19	25.50	6.03	1.46	0.22	0.71	0.66	0.18	0.18	0.99

본 토철은 제련시에 사용되지는 않았지만 석축형 쇠부리가마에서 토철을 사용하여 제련을 하였다는 역사적인 기록과 발굴유물에 따라 최근에 발굴한 울산시 대안동 유적지에서 채취한 토철을 시료로 채취하였다.

토철이 쌓였던 유적지에서는 대부분이 검은색으로 산화되어 있었고 종전의 분석자료는 철함량이 매우 낮았으나 금번에 산화상태가 낮은 것을 시료로 채취하여 XRF 분석한 결과 철함량(63.19%FeO)로 높게 나타나고 나머지 산화물은 분광의 분석값과 유사하고 다만 MgO나 CaO 성분은 상대적으로 낮았다.

2. 패각(19U-1)

1) 패각(19U-1)의 분석결과

〈표 4〉 패각(19U-1)의 XRF 분석결과(조성의 단위는 wt%)

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

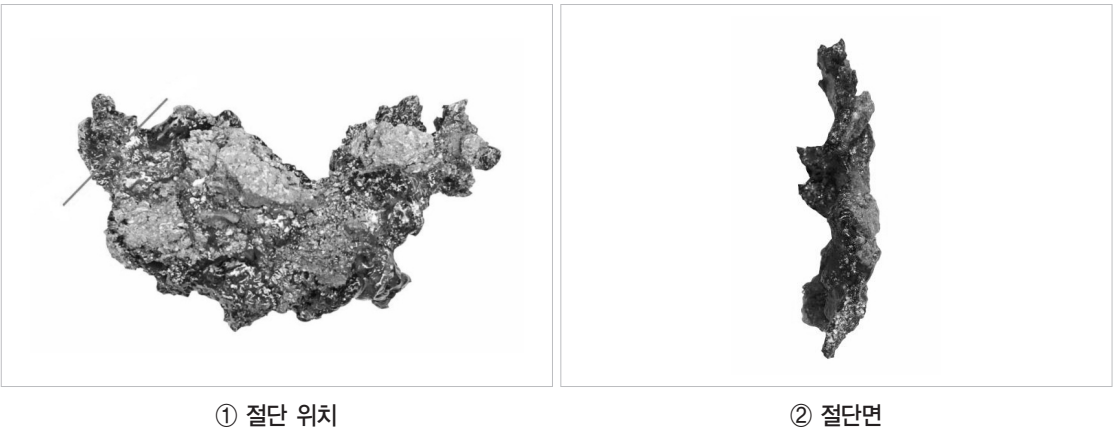
조제제로 사용되는 패각의 XRF분석결과는 〈표 4〉와 같으며 주성분은 CaO가 92.29%로서 대

부분을 구성하고 다음으로 Na_2O (2.16%), Cl (1.62%), MgO (0.99%) 및 SiO_2 (0.95%)이며 이는 완전한 염기성 슬래그의 조재제로 밝혀지고 있다.

3. 송풍관 부착물

1) 송풍관1(19U-4)

(1) 시료의 채취

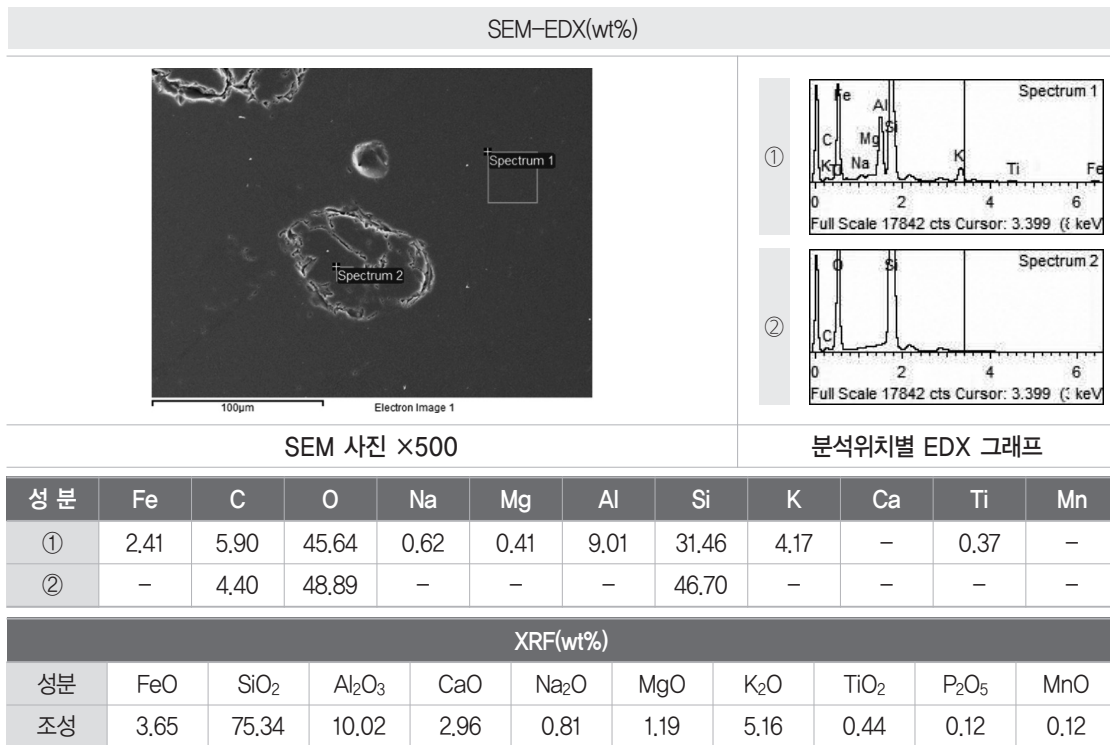


〈사진 1〉 송풍관1(19U-4)의 절단면 위치와 절단면

(2) 분석 결과

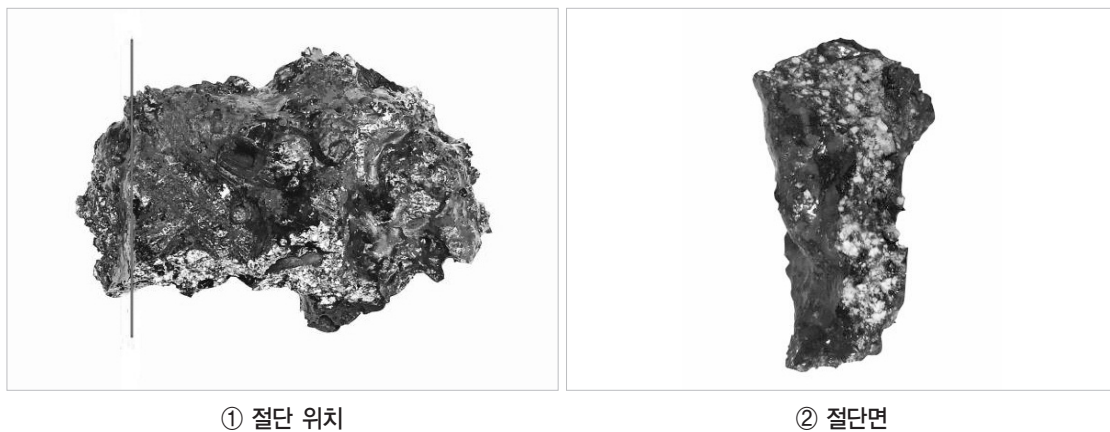
〈표 5〉 송풍관1(19U-4)의 분석결과

금속현미경 사진 ×50	금속현미경 사진 ×500



2) 송풍관2(19U-5)

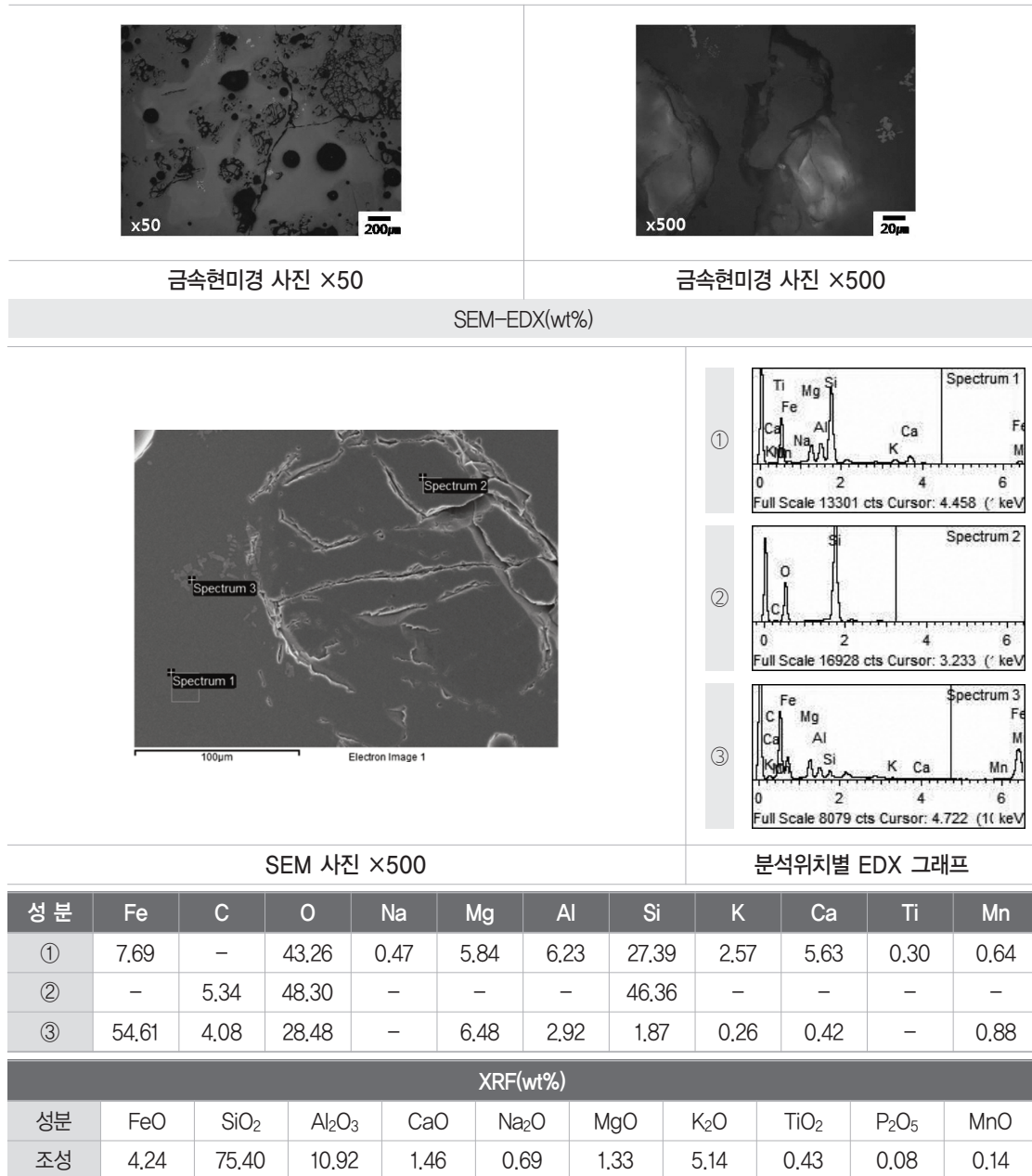
(1) 시료의 채취



〈사진 2〉 송풍관2(19U-5)의 절단면 위치와 절단면

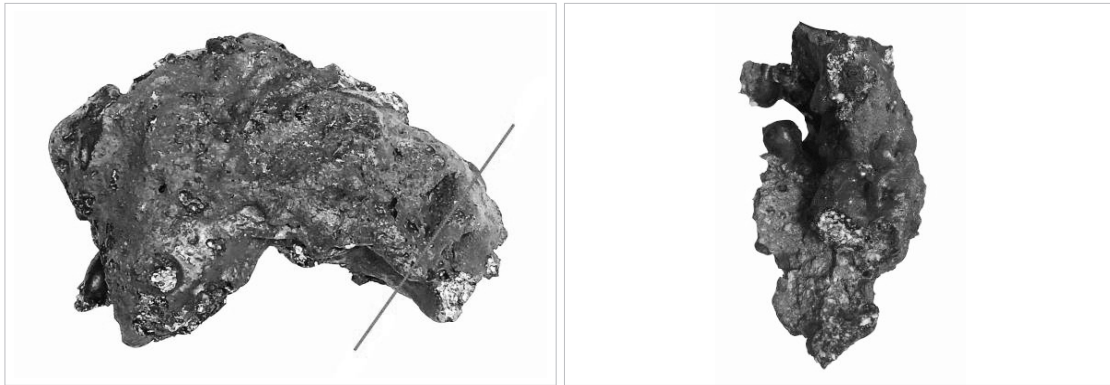
(2) 분석 결과

〈표 6〉 송풍관2(19U-5)의 분석결과



3) 송풍관3(19U-6)

(1) 시료의 채취



① 절단 위치

② 절단면

〈사진 3〉 송풍관3(19U-6)의 절단면 위치와 절단면

(2) 분석결과

〈표 7〉 송풍관3(19U-6)의 분석결과

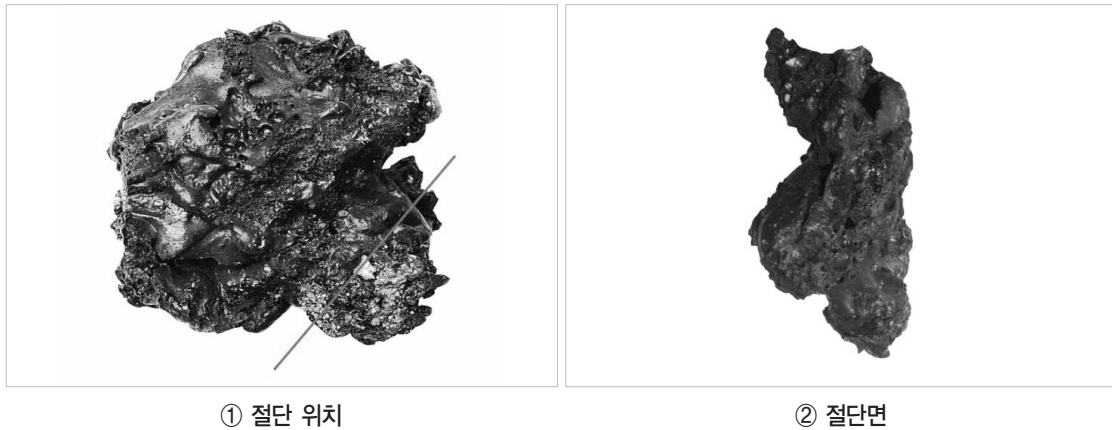
금속현미경 사진 ×50	금속현미경 사진 ×500
SEM-EDX(wt%)	
SEM 사진 ×500	분석위치별 EDX 그래프

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	2.32	-	46.82	1.02	0.28	9.16	34.45	4.78	0.83	0.31	-
②	-	4.88	48.47	-	-	-	46.65	-	-	-	-

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	6.61	68.87	9.98	4.55	0.86	3.79	4.26	0.43	0.11	0.39

4) 송풍관4(19U-7)

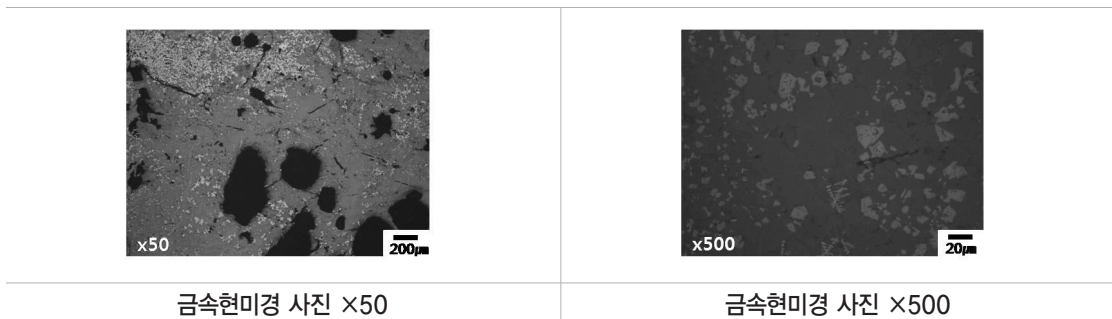
(1) 시료의 채취

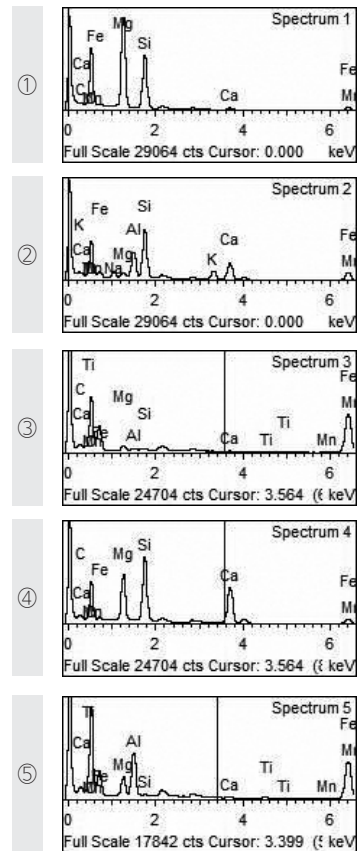
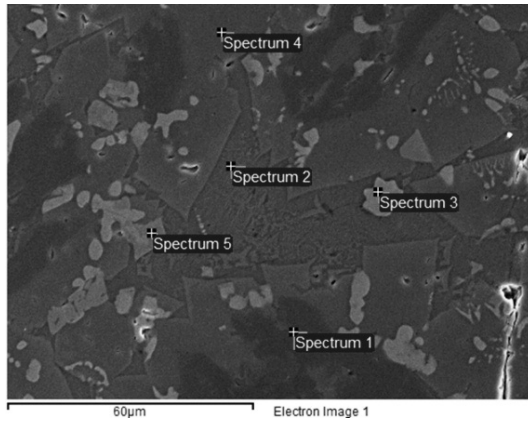


〈사진 4〉 송풍관4(19U-7)의 절단면 위치와 절단면

(2) 분석결과

〈표 8〉 송풍관4(19U-7)의 분석결과





SEM 사진 ×500

분석위치별 EDX 그래프

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	7.63	4.15	39.33	—	27.49	—	19.50	—	1.26	—	0.63
②	17.47	—	36.99	2.37	1.55	7.89	17.19	4.62	10.86	0.29	0.78
③	67.44	4.99	23.60	—	1.57	0.62	0.18	—	0.37	0.24	0.99
④	9.18	6.02	35.74	—	12.19	—	17.23	—	18.66	—	0.98
⑤	52.57	—	29.89	—	5.09	10.26	0.26	—	0.35	0.68	0.90

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	19.36	41.41	5.76	15.10	0.74	13.90	2.06	0.25	0.10	1.13

〈송풍관 용손의 해석〉

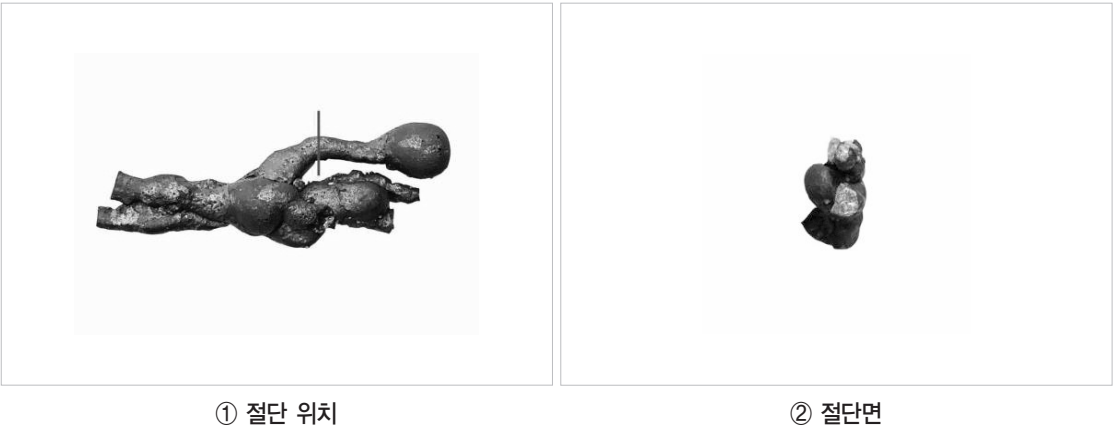
송풍관 1, 2, 3(윗부분) 및 송풍구 철재 4의 XRF분석을 비교한 결과 철산화물 함량에서 송풍관 윗부분은 철함량(3.65–6.61%FeO)이 낮고 송풍구의 경우는 19.36%FeO로서 형성 슬래그가 송풍구로 흡입되는 것으로 보인다. 또, 부착물의 계면에 대한 EDX 분석결과는 복합산화물과 탄화물이 혼합된 (SiC, SiO₂), (FeC, SiO₂)로서 송풍관의 용손원인이 되기도 한 것이다.

괴런철 제련의 경우는 Fayalite($\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$)가 용손의 원인이었으나 선철 제련의 경우 탄화물도 용손의 원인으로 작용하게 된 것으로 판단된다.

4. 전기 유출철재와 선철

1) 1차유출 선철(19U-8)

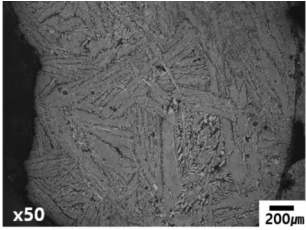
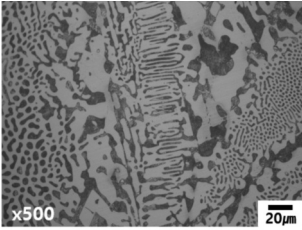
(1) 시료의 채취



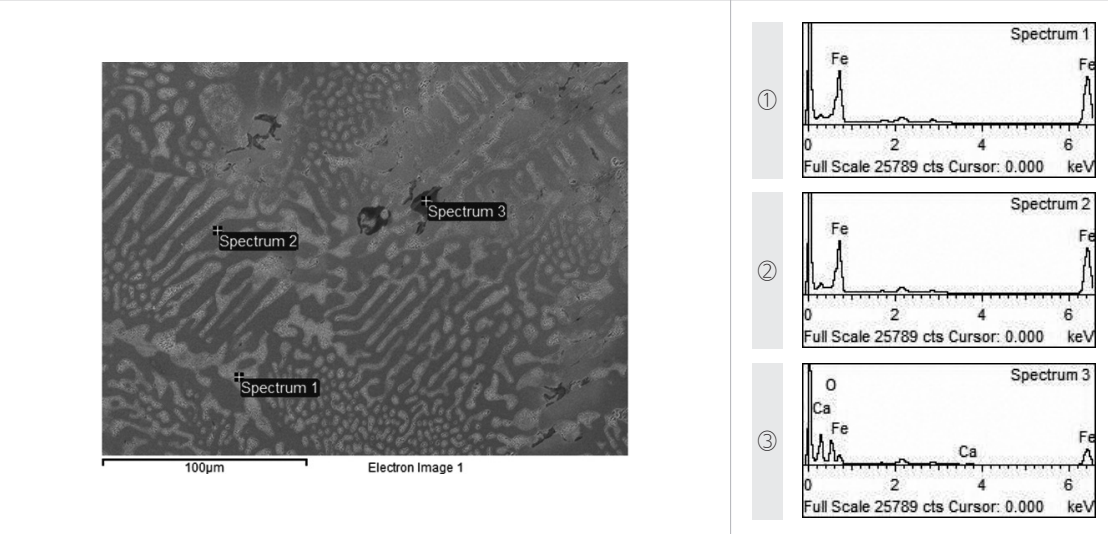
〈사진 5〉 1차유출 선철(19U-8)의 절단면 위치와 절단면

(2) 분석결과

〈표 9〉 1차유출 선철(19U-8)의 분석결과

	
금속현미경 사진 ×50	금속현미경 사진 ×500

SEM-EDX(wt%)



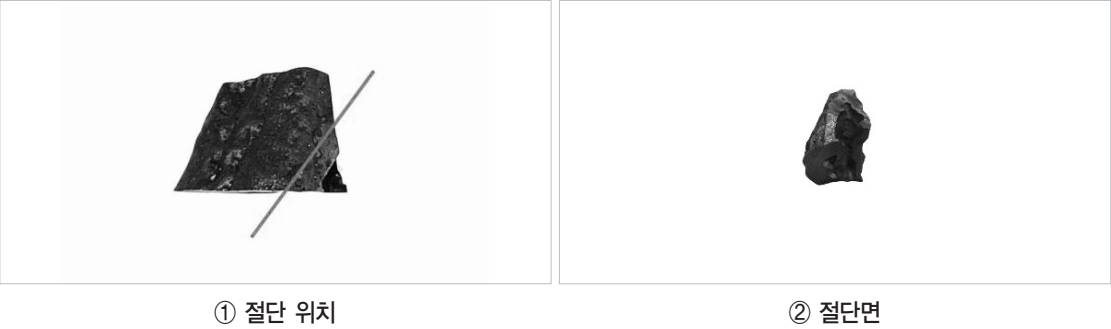
SEM 사진 ×500								분석위치별 EDX 그래프			
성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
②	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
③	73.28	25.38	—	—	—	—	—	—	1.35	—	—

C/S(wt%)		
성분	C	S
조성	4.35	0.02

경도(HMV)				
횟수	1	2	3	평균
Cementite+Pearlite	662.7	674.2	624.5	653.8

2) 2차유출 선철(19U-9)

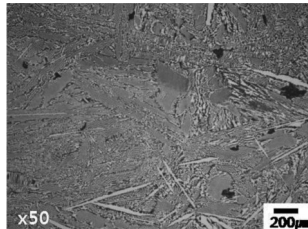
(1) 시료의 채취



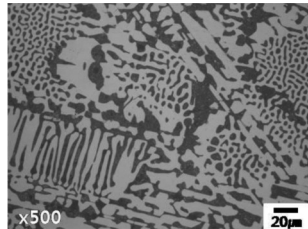
〈사진 6〉 2차유출 선철(19U-9)의 절단면 위치와 절단면

(2) 분석결과

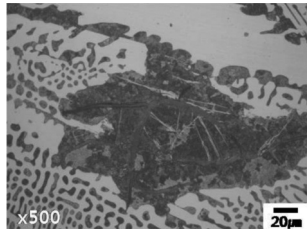
〈표 10〉 2차유출 선철(19U-9)의 분석결과



금속현미경 사진 ×50

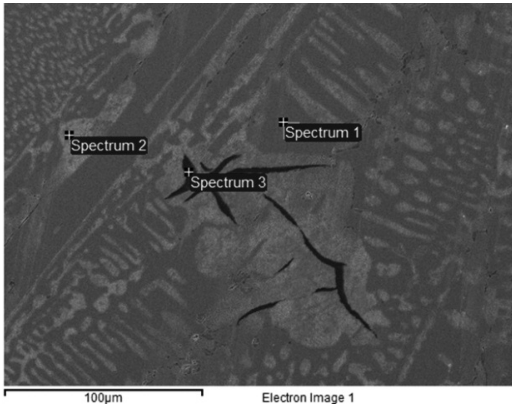


금속현미경 사진 ×500

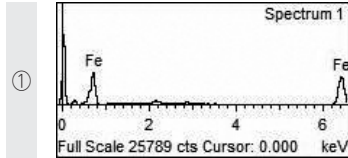


금속현미경 사진 ×500

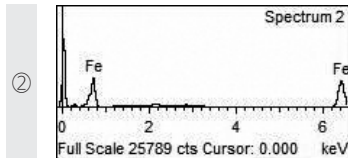
SEM-EDX(wt%)



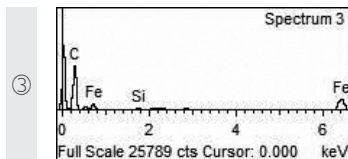
SEM 사진 ×500



①



②



③

분석위치별 EDX 그래프

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
②	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
③	37.96	61.85	—	—	—	—	0.19	—	—	—	—

C/S(wt%)		
성분	C	S
조성	4.38	0.05

경도(HMV)				
횟수	1	2	3	평균
Cementite	875.5	897.0	875.5	882.7
Pearlite	270.5	281.8	274.2	275.5

3) 3차유출 철재(19U-10S)

(1) 시료의 채취



① 절단 위치

② 절단면

〈사진 7〉 3차유출 철재(19U-10S)의 절단면 위치와 절단면

(2) 분석결과

〈표 11〉 3차유출 철재(19U-10S)의 분석결과

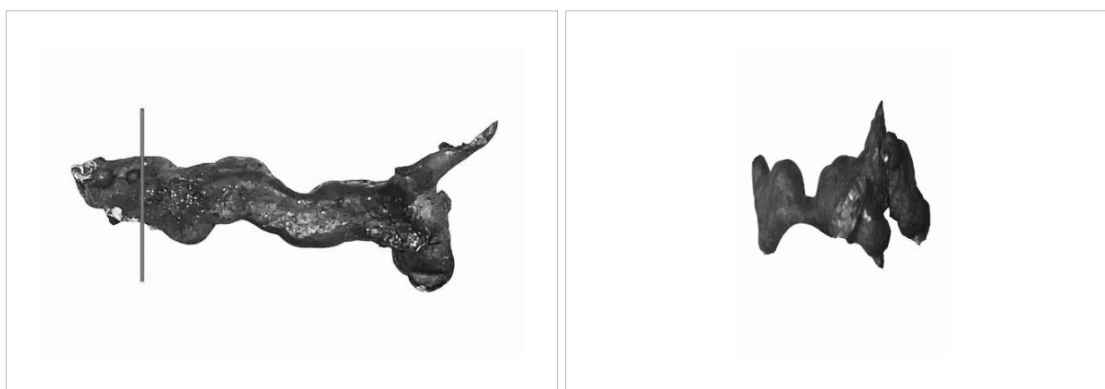
금속현미경 사진 ×50	금속현미경 사진 ×500
SEM-EDX(wt%)	
SEM 사진 ×500	분석위치별 EDX 그래프

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	84.06	—	5.62	—	7.01	—	2.95	—	0.37	—	—
②	0.53	—	41.48	0.56	3.96	6.38	23.17	1.69	20.81	0.26	1.16
③	—	4.01	41.17	—	31.71	—	20.70	—	1.76	—	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
조성	1.39	43.00	5.51	22.31	0.40	23.99	1.08	0.26	0.03	1.64

4) 3차유출 선철(19U-10M)

(1) 시료의 채취



① 절단 위치

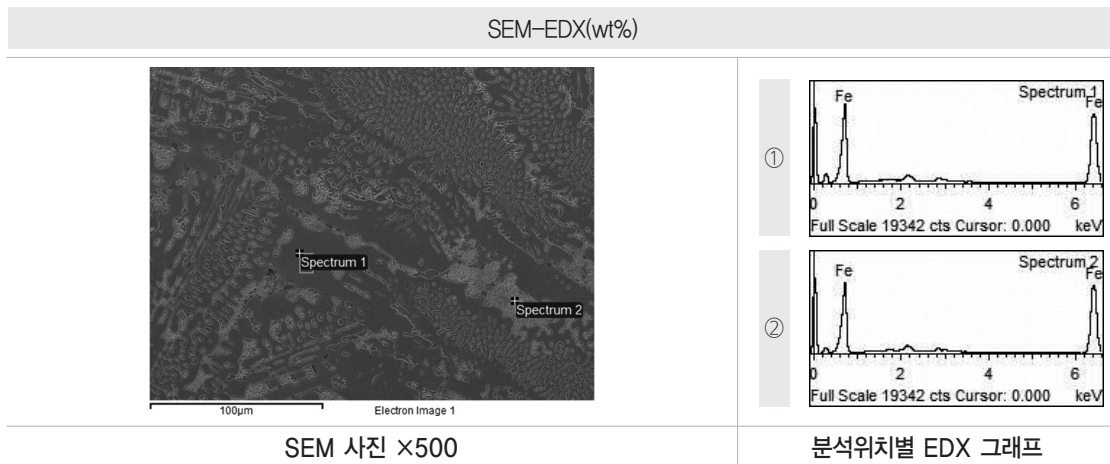
② 절단면

〈사진 8〉 3차유출 선철(19U-10M)의 절단면 위치와 절단면

(2) 분석결과

〈표 12〉 3차유출 선철(19U-10M)의 분석결과

금속현미경 사진 ×50	금속현미경 사진 ×500



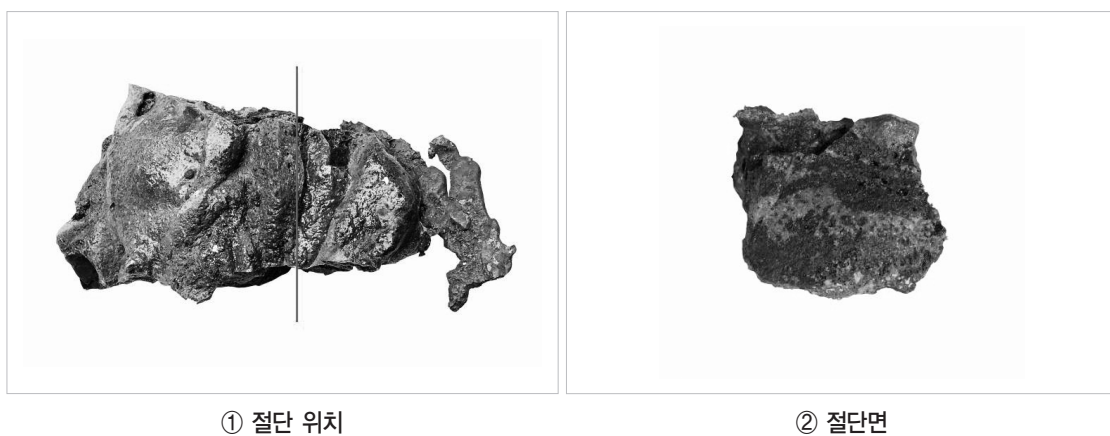
성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
②	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

C/S(wt%)		
성분	C	S
조성	4.34	0.05

경도(HMV)				
횟수	1	2	3	평균
Cementite+Pearlite	609.2	624.5	614.2	616.0
Pearlite	246.7	266.9	246.7	253.4

5) 4차유출 철재(19U-11S)

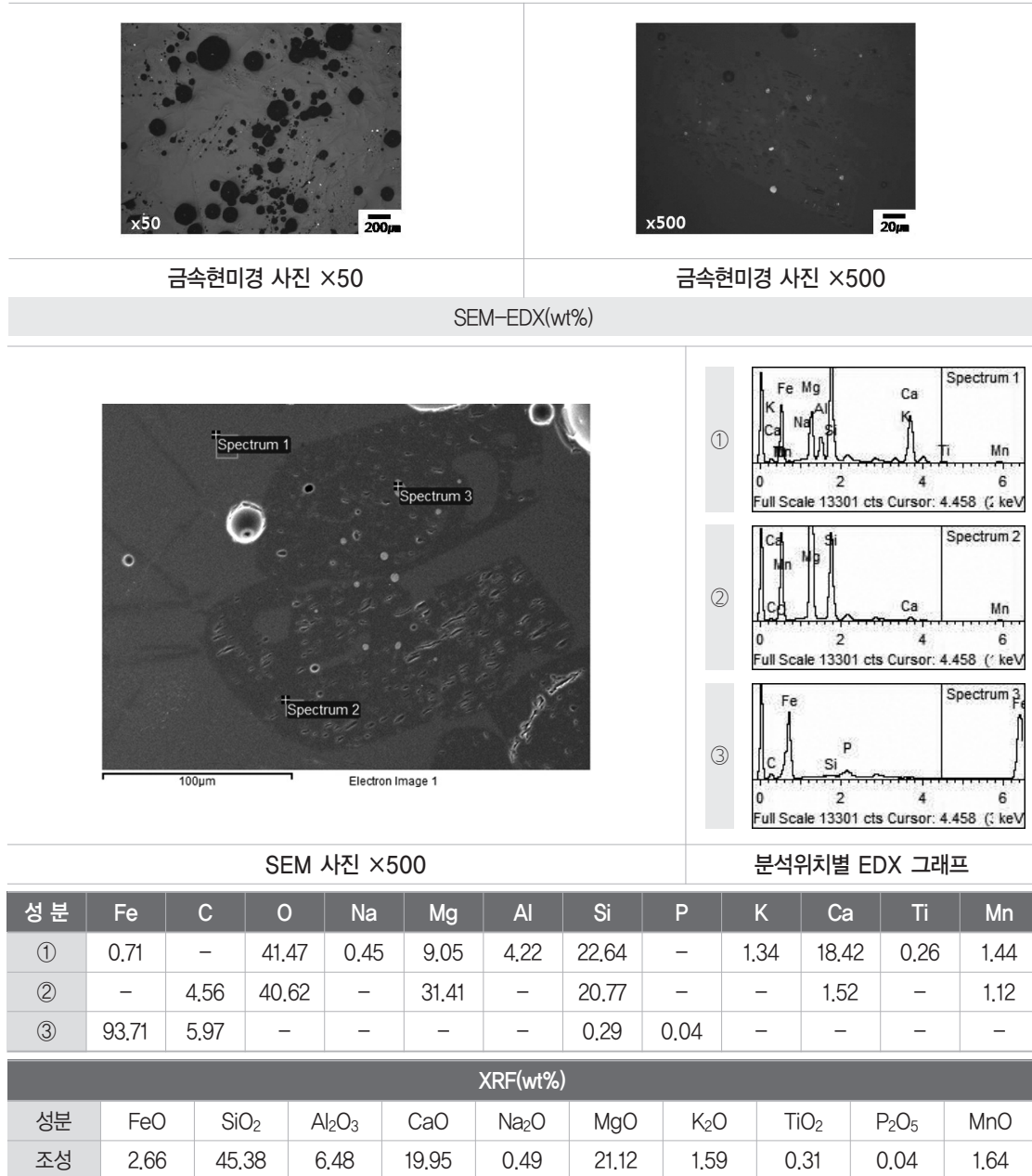
(1) 시료의 채취



〈사진 9〉 4차유출 철재(19U-11S)의 절단면 위치와 절단면

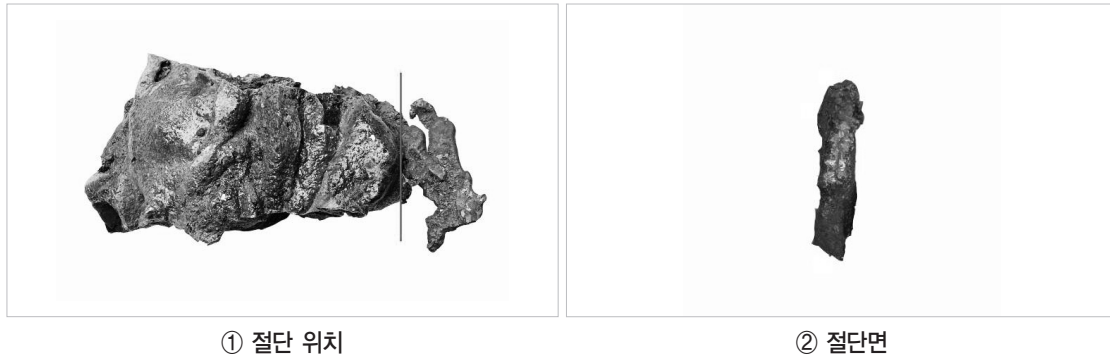
(2) 분석결과

〈표 13〉 4차유출 철재(19U-11S)의 분석결과



6) 4차유출 선철(19U-11M)

(1) 시료의 채취



〈사진 10〉 4차유출 선철(19U-11M)의 절단면 위치와 절단면

(2) 분석결과

〈표 14〉 4차유출 선철(19U-11M)의 분석결과

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

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	100.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
②	100.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
③	1.62	98.38	-	-	-	-	-	-	-	-	-

C/S(wt%)											
성분				C				S			
조성				4.50				0.05			

경도(HMV)				
횡수	1	2	3	평균
Pearlite	259.9	274.2	270.5	268.2

7) 5차유출 철재(19U-12S)

(1) 시료의 채취



① 절단 위치

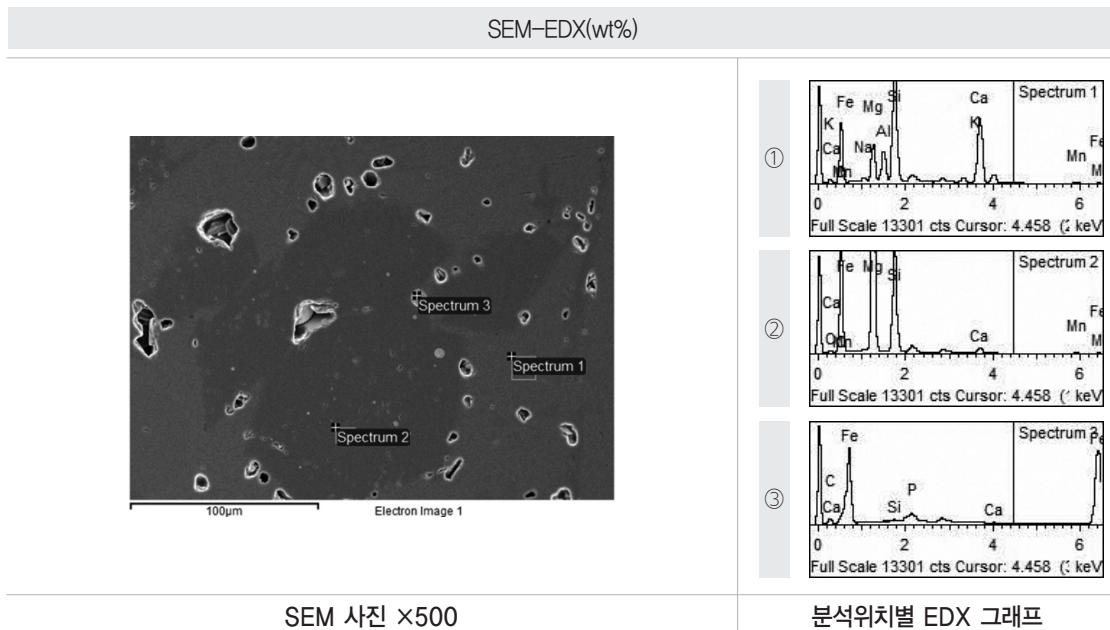
② 절단면

〈사진 11〉 5차유출 철재(19U-12S)의 절단면 위치와 절단면

(2) 분석결과

〈표 15〉 5차유출 철재(19U-12S)의 분석결과

금속현미경 사진 ×50	금속현미경 사진 ×500

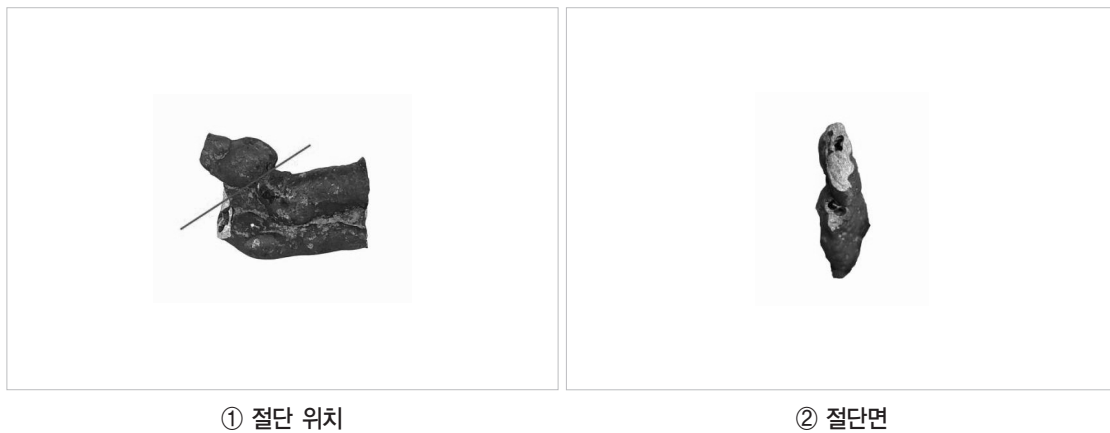


성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Mn
①	0.73	—	39.82	0.65	5.98	4.55	23.11	—	1.24	22.93	—	0.99
②	1.08	4.18	40.37	—	30.74	—	20.51	—	—	2.03	—	1.10
③	92.89	6.17	—	—	—	—	0.37	0.15	—	0.43	—	—

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	1.95	44.40	5.94	21.52	0.47	22.00	1.46	0.26	0.03	1.65

8) 5차유출 선철(19U-12M)

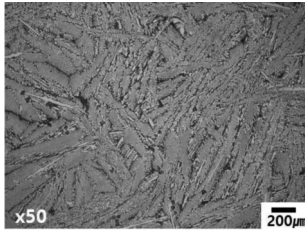
(1) 시료의 채취



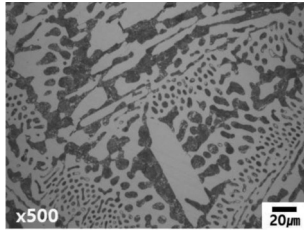
〈사진 12〉 5차유출 선철(19U-12M)의 절단면 위치와 절단면

(2) 분석결과

〈표 16〉 5차유출 선철(19U-12M)의 분석결과

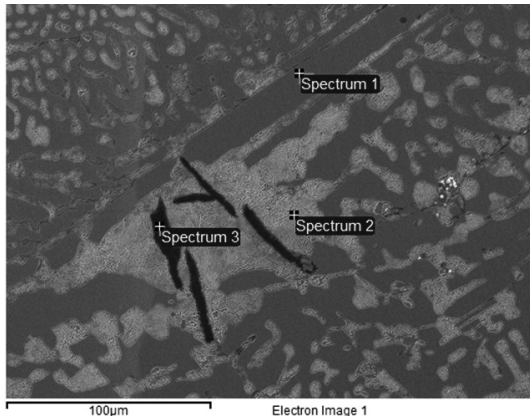


금속현미경 사진 ×50

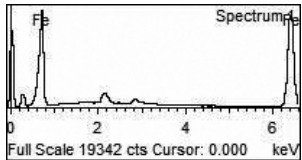


금속현미경 사진 ×500

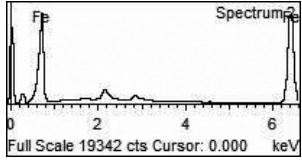
SEM-EDX(wt%)



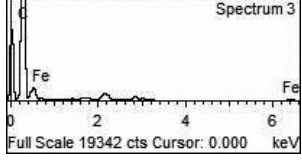
①



②



③



SEM 사진 ×500

분석위치별 EDX 그래프

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
②	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
③	3.88	96.12	—	—	—	—	—	—	—	—	—

C/S(wt%)

성분	C	S
조성	3.85	0.05

경도(HMV)

횡수	1	2	3	평균
Cementite+Pearlite	710.7	698.2	640.5	683.1
Pearlite	274.6	288.3	279.9	280.9

〈전기 유출철재와 선철의 고찰〉

전기 유출선철의 탄소함량은 최소 3.85%C 및 최대 4.50%C로서 공정선철에 해당하며 이는 선철중에 가장 낮은 온도에서 용선을 얻을수 있는 선철 조성이다. SEM-EDX상의 조직경도를 확인해본 결과 HMV616.0-882.7로서 Cementite(Fe_3C) 입계조직을 형성하고 일부에는 흑연(Graphite)을 형성하고 기지조직은 전부 Pearlite조직으로 형성되어 있었다.

전기 유출철재의 경우 잔류된 FeO 의 함량이 1.39-2.66% F_2O 로서 매우 낮은 것은 염기도의 개선에 따라서 철재중의 철이 환원이 일어나서 철 회수율이 개선되는 효과를 가져왔다고 본다. 그 증거로서 염기성 철재성분이 19.95-22.31% CaO , 21.12-23.99% MgO 로서 비교적 높고 산성철재 성분인 SiO_2 의 비율은 상대적으로 43.00-45.39%로 떨어졌다고 볼 수 있겠다.

5. 후기 유출철재와 선철

1) 6차유출 철재(19U-13S)

(1) 시료의 채취



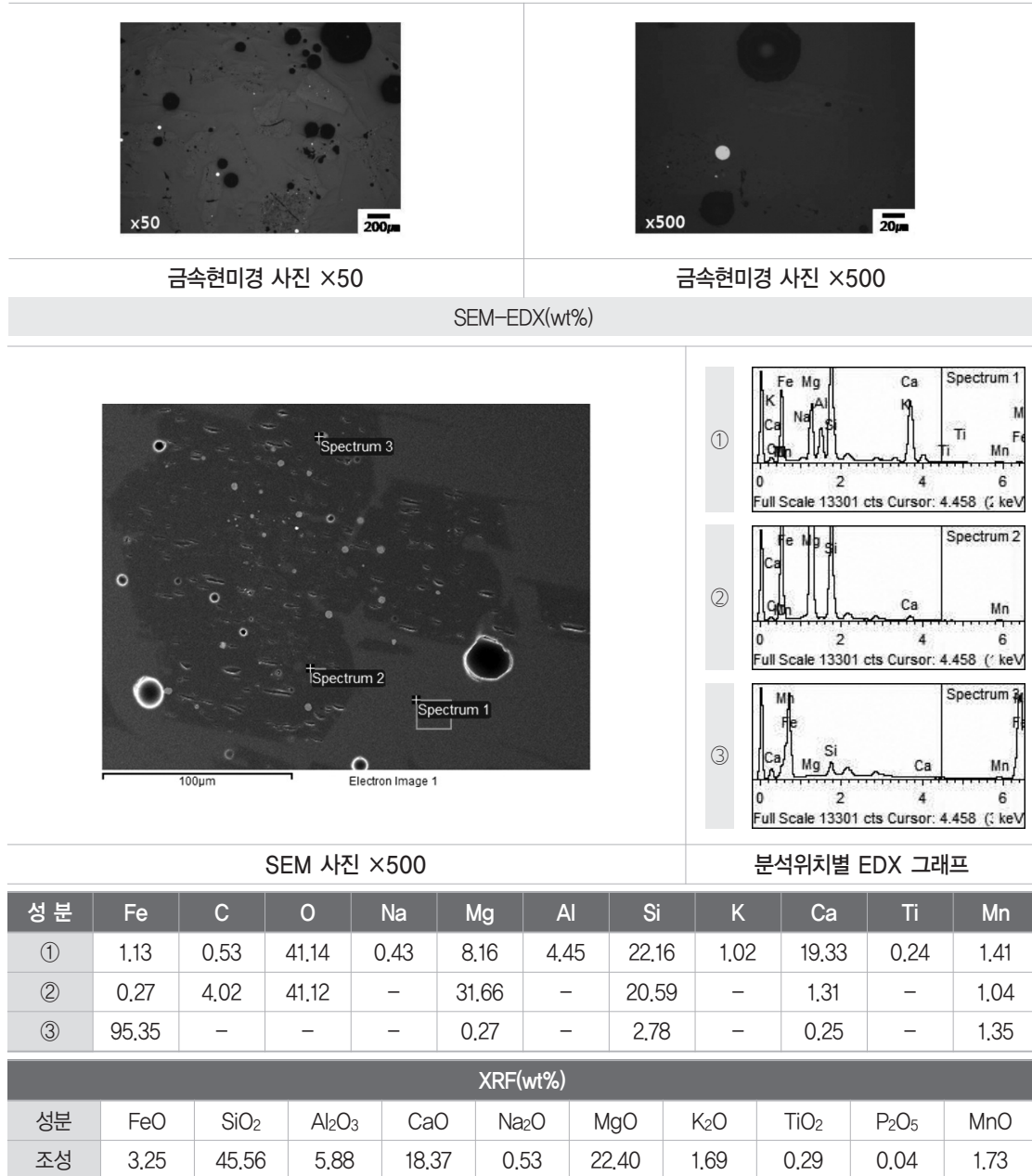
① 절단 위치

② 절단면

〈사진 13〉 6차유출 철재(19U-13S)의 절단면 위치와 절단면

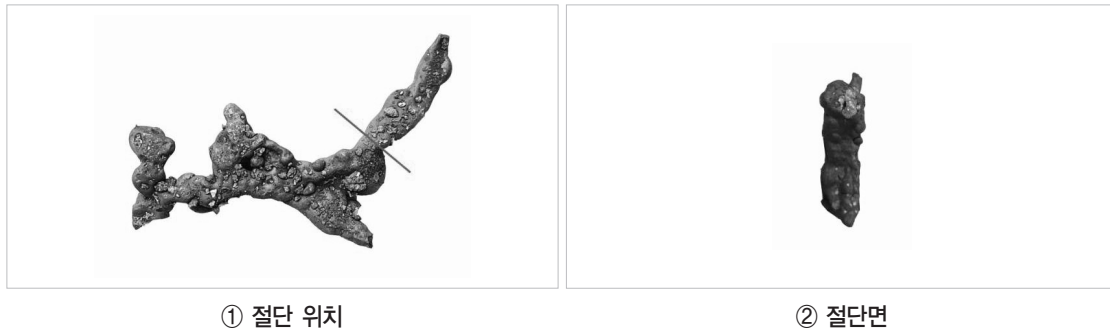
(2) 분석결과

〈표 17〉 6차유출 철재(19U-13S)의 분석결과



2) 6차유출 선철(19U-13M)

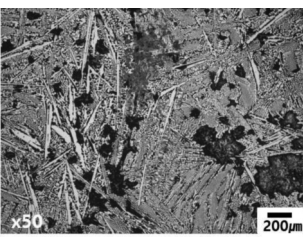
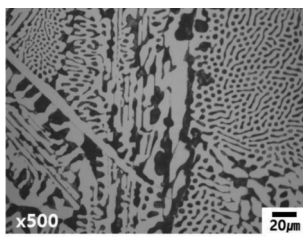
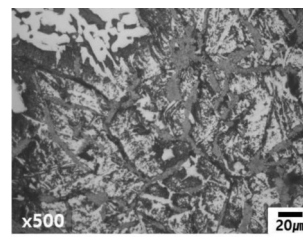
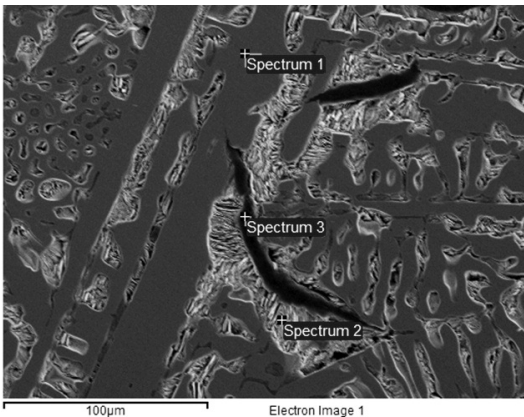
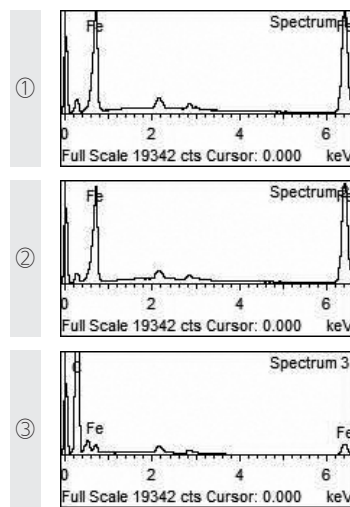
(1) 시료의 채취



〈사진 14〉 6차유출 선철(19U-13M)의 절단면 위치와 절단면

(2) 분석결과

〈표 18〉 6차유출 선철(19U-13M)의 분석결과

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

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	100.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
②	100.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
③	14.64	85.36	-	-	-	-	-	-	-	-	-

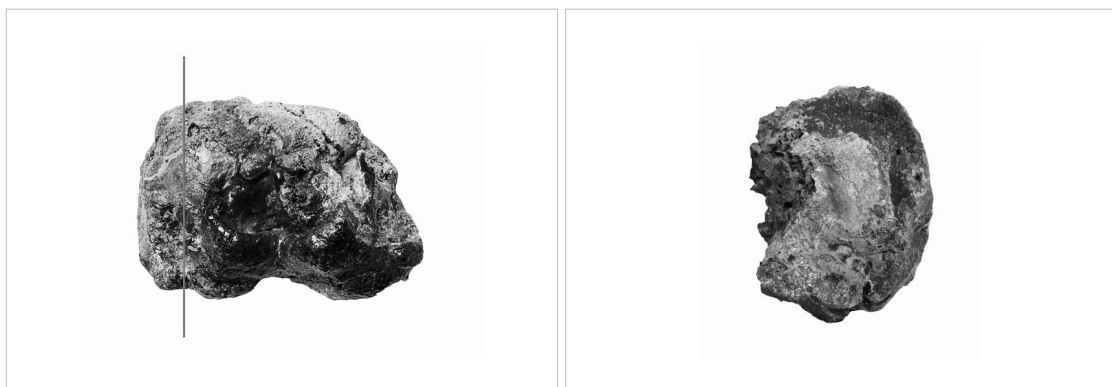
C/S(wt%)	
성분	C
조성	4.48

S	
조성	0.05

경도(HMV)				
횡수	1	2	3	평균
Cementite	854.6	834.6	875.5	854.9

3) 7차유출 철재(19U-14S)

(1) 시료의 채취



① 절단 위치

② 절단면

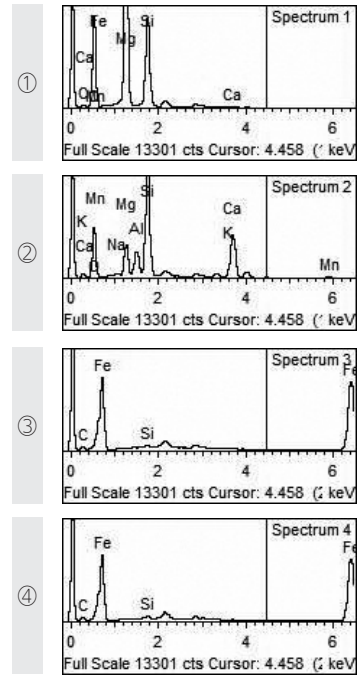
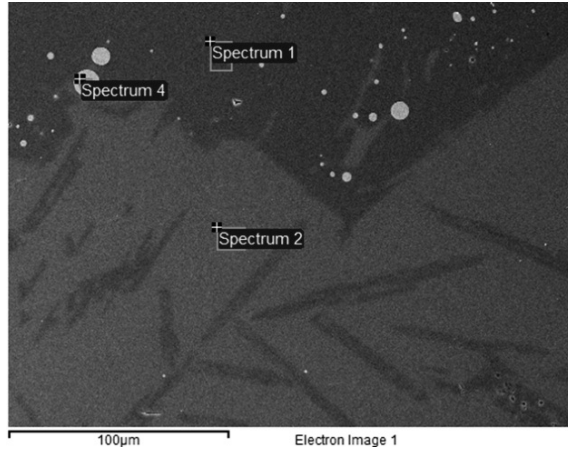
〈사진 15〉 7차유출 철재(19U-14S)의 절단면 위치와 절단면

(2) 분석결과

〈표 19〉 7차유출 철재(19U-14S)의 분석결과

금속현미경 사진 ×50	금속현미경 사진 ×500

SEM-EDX(wt%)



SEM 사진 ×500

분석위치별 EDX 그래프

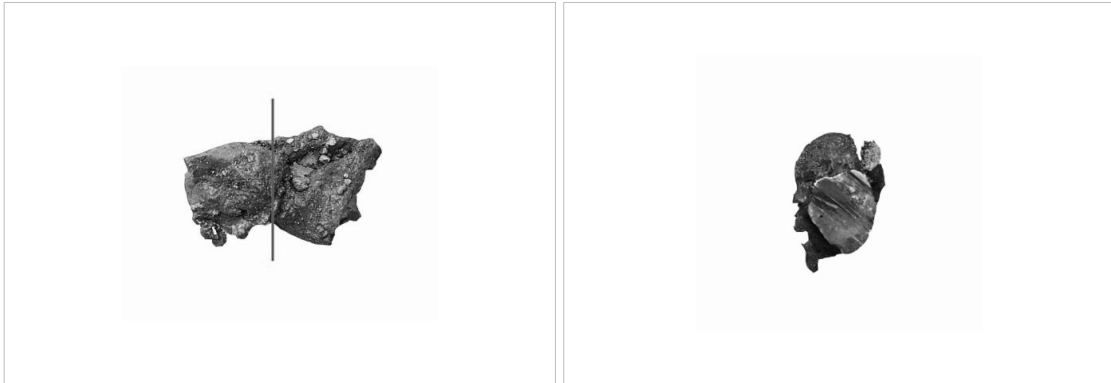
성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Mn
①	0.77	4.58	40.57	—	31.89	—	20.70	—	0.62	0.86
②	—	—	40.59	0.59	6.44	4.78	24.86	1.45	19.71	1.56
③	93.97	5.44	—	—	—	—	0.59	—	—	—
④	93.87	5.52	—	—	—	—	0.62	—	—	—

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	1.28	46.33	6.14	17.53	0.54	24.08	1.84	0.29	—	1.69

4) 7차유출 선철(19U-14M)

(1) 시료의 채취



① 절단 위치

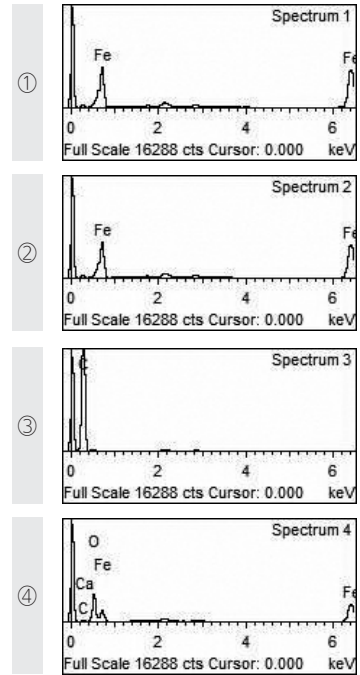
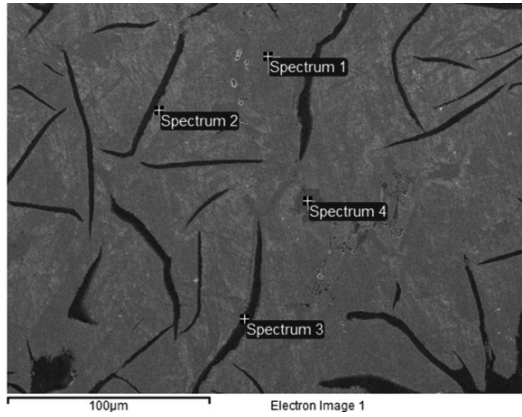
② 절단면

〈사진 16〉 7차유출 선철(19U-14M)의 절단면 위치와 절단면

(2) 분석결과

〈표 20〉 7차유출 선철(19U-14M)의 분석결과

금속현미경 사진 ×50	금속현미경 사진 ×500	금속현미경 사진 ×500



SEM 사진 ×500

분석위치별 EDX 그래프

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
②	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
③	4.85	95.15	—	—	—	—	—	—	—	—	—
④	69.52	4.76	25.44	—	—	—	—	—	—	—	—

C/S(wt%)

성분	C	S
조성	4.36	0.06

경도(HMV)

횟수	1	2	3	평균
Cementite+Pearlite	635.1	609.2	614.2	619.5
Pearlite	239.9	236.2	262.4	246.2

5) 7차유출 괴련철(19U-14G)

(1) 시료의 채취



① 절단 위치

② 절단면

〈사진 17〉 7차유출 괴련철(19U-14G)의 절단면 위치와 절단면

(2) 분석결과

〈표 21〉 7차유출 괴련철(19U-14G)의 분석결과

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

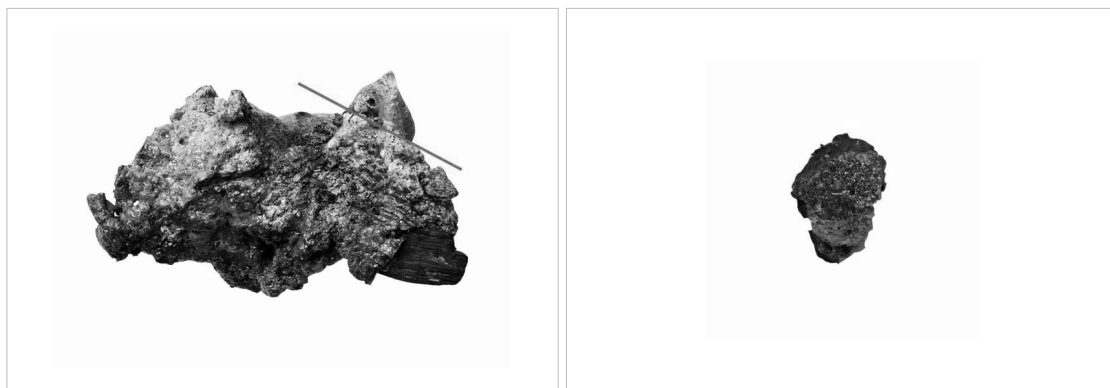
성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	100.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
②	100.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
③	6.21	93.79	-	-	-	-	-	-	-	-	-

C/S(wt%)		
성분	C	S
조성	4.15	0.06

경도(HMV)				
횡수	1	2	3	평균
Cementite	778.4	815.2	796.5	796.7
Pearlite	234.5	228.8	231.6	231.6

6) 8차유출 철재(19U-15S)

(1) 시료의 채취



① 절단 위치

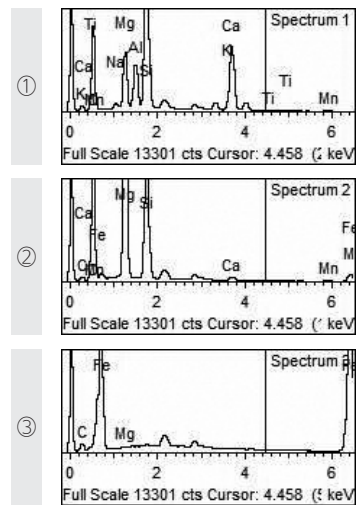
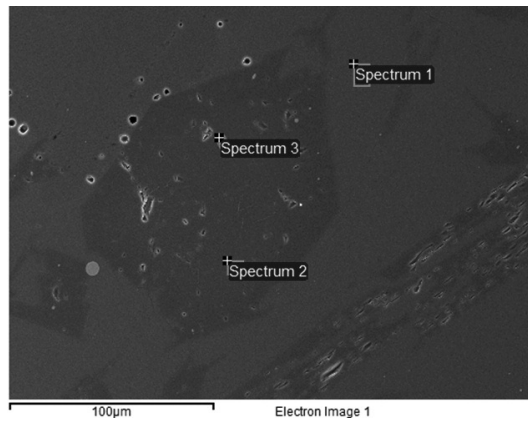
② 절단면

〈사진 18〉 8차유출 철재(19U-15S)의 절단면 위치와 절단면

(2) 분석결과

〈표 22〉 8차유출 철재(19U-15S)의 분석결과

금속현미경 사진 ×50	금속현미경 사진 ×500



SEM 사진 ×500

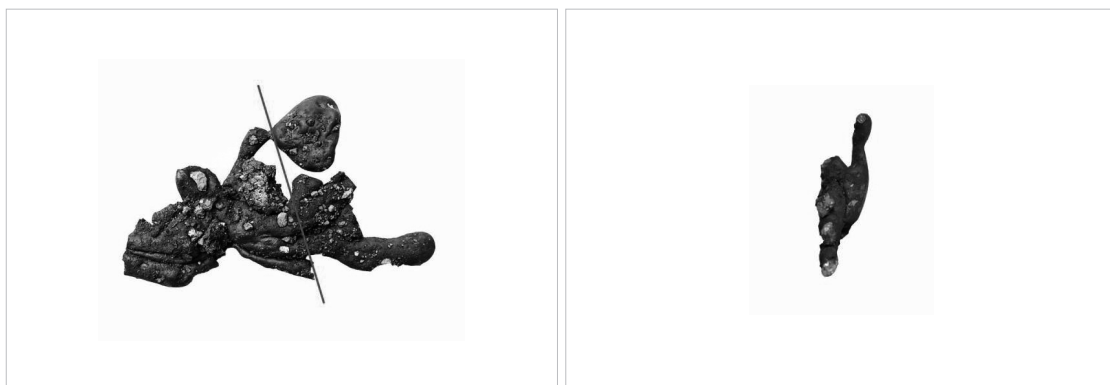
분석위치별 EDX 그래프

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	—	—	41.76	0.65	6.98	5.26	24.95	1.76	17.27	0.21	1.16
②	6.12	4.04	38.93	—	28.77	—	20.22	—	0.89	—	1.03
③	95.07	4.73	—	—	0.21	—	—	—	—	—	—

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	1.20	46.49	6.61	18.38	0.51	23.20	1.79	0.30	—	1.41

7) 8차유출 선철(19U-15M)

(1) 시료의 채취



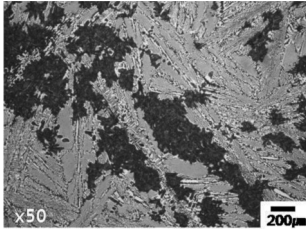
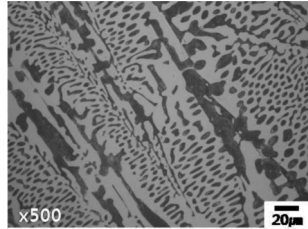
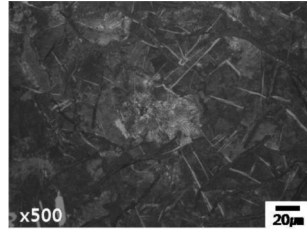
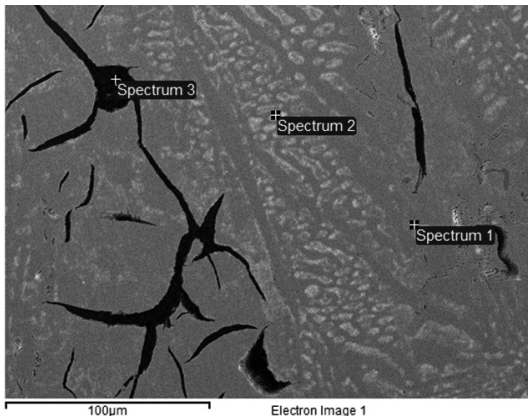
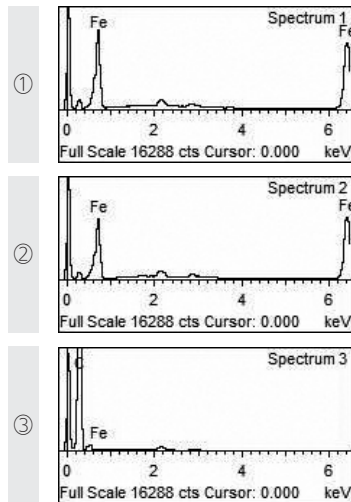
① 절단 위치

② 절단면

〈사진 19〉 8차유출 선철(19U-15M)의 절단면 위치와 절단면

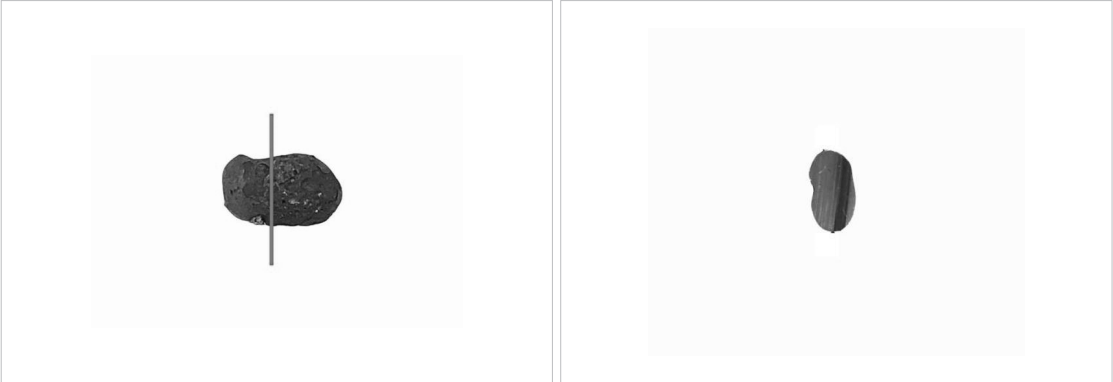
(2) 분석결과

〈표 23〉 8차유출 선철(19U-15M)의 분석결과

											
금속현미경 사진 ×50	금속현미경 사진 ×500	금속현미경 사진 ×500									
SEM-EDX(wt%)											
											
SEM 사진 ×500		분석위치별 EDX 그래프									
성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
②	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
③	2.47	97.53	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C/S(wt%)											
성분				C				S			
조성				4.38				0.06			
경도(HMV)											
횟수	1			2			3			평균	
Cementite	681.8			696.6			696.6			691.7	
Pearlite	253.2			237.5			256.5			249.1	

8) 8차유출 구형선철(19U-15R)

(1) 시료의 채취



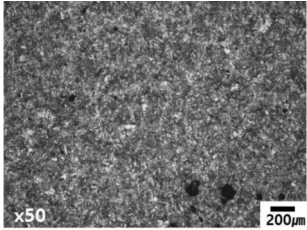
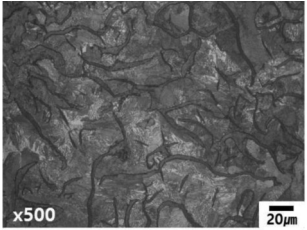
① 절단 위치

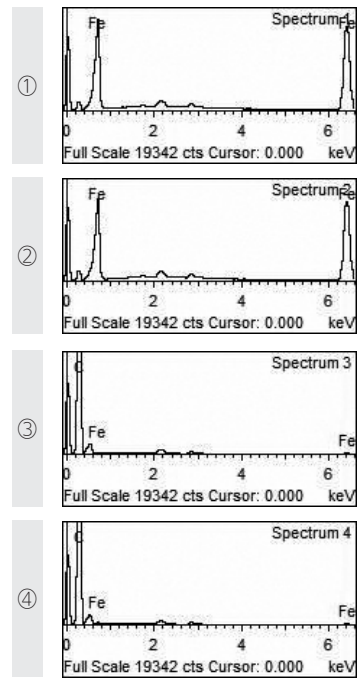
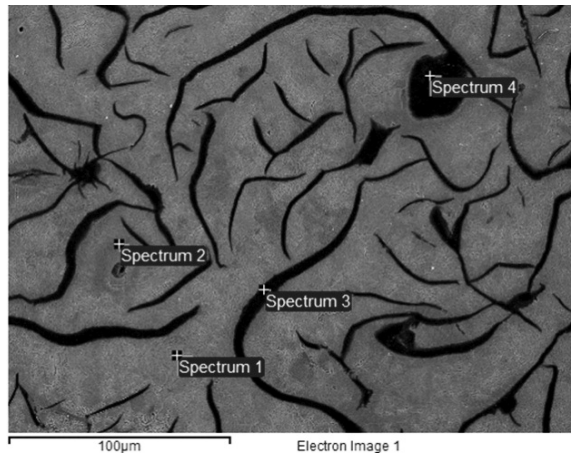
② 절단면

〈사진 20〉 8차유출 구형선철(19U-15R)의 절단면 위치와 절단면

(2) 분석결과

〈표 24〉 8차유출 구형선철(19U-15R)의 분석결과

	
금속현미경 사진 ×50	금속현미경 사진 ×500



SEM 사진 ×500

분석위치별 EDX 그래프

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
②	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
③	3.06	96.94	—	—	—	—	—	—	—	—	—
④	3.64	96.36	—	—	—	—	—	—	—	—	—

C/S(wt%)

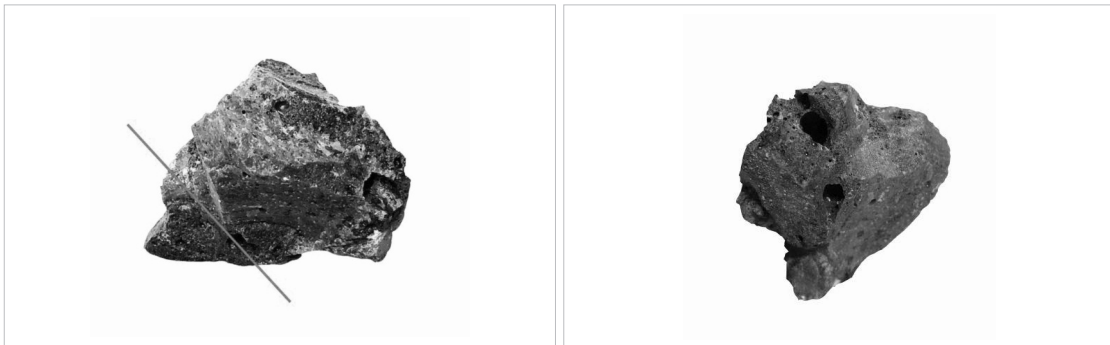
성분	C	S
조성	4.35	0.06

경도(HMV)

횟수	1	2	3	평균
Pearlite	228.7	269.4	266.9	255.0

9) 9차유출 철재(19U-16S)

(1) 시료의 채취



① 절단 위치

② 절단면

〈사진 21〉 9차유출 철재(19U-16S)의 절단면 위치와 절단면

(2) 분석결과

〈표 25〉 8차유출 철재(19U-15S)의 분석결과

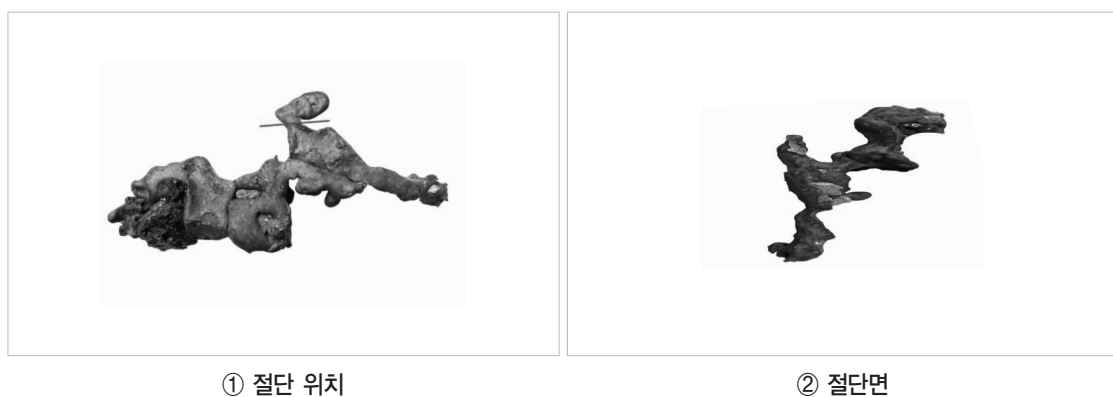
금속현미경 사진 ×50	금속현미경 사진 ×500
SEM-EDX(wt%)	
SEM 사진 ×500	분석위치별 EDX 그래프

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	2.35	—	41.89	0.57	7.32	5.06	22.95	1.75	16.28	0.28	1.54
②	3.58	4.90	40.27	—	29.10	—	19.71	—	1.44	—	0.99
③	89.58	6.54	—	—	2.41	—	1.02	—	0.45	—	—

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	3.74	45.64	6.34	18.49	0.50	21.25	1.70	0.30	0.05	1.70

10) 9차유출 선철(19U-16M)

(1) 시료의 채취



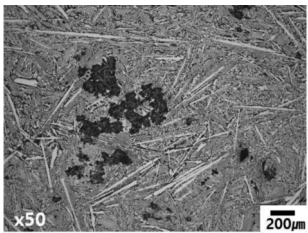
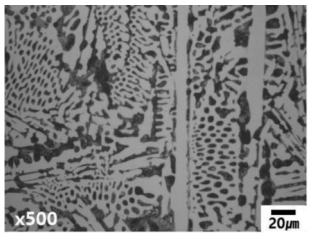
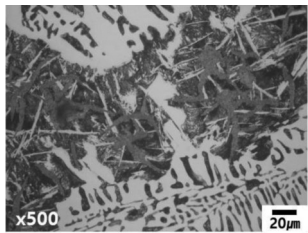
① 절단 위치

② 절단면

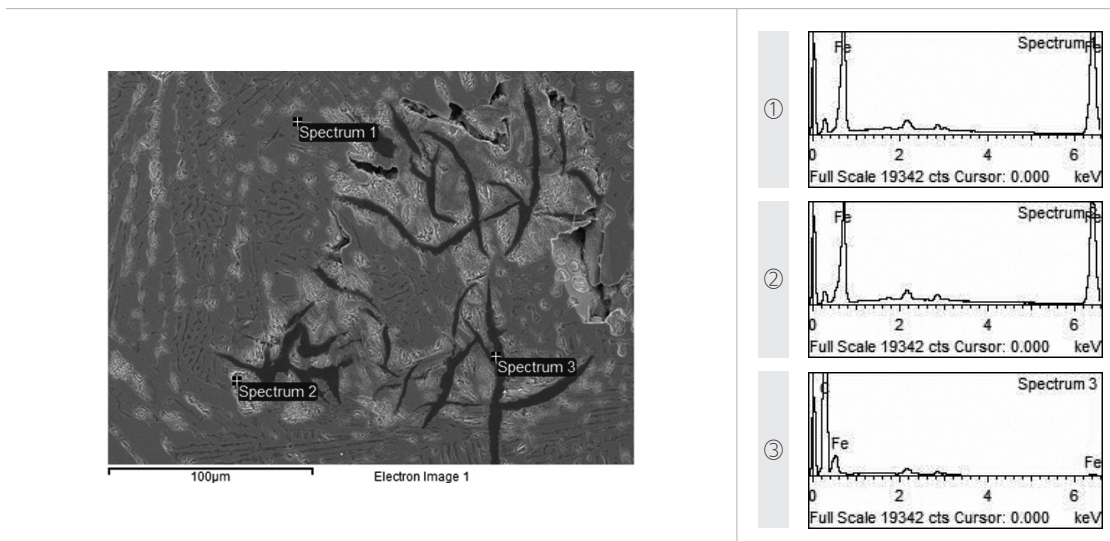
〈사진 22〉 9차유출 선철(19U-16M)의 절단면 위치와 절단면

(2) 분석결과

〈표 26〉 9차유출 선철(19U-16M)의 분석결과

		
금속현미경 사진 ×50	금속현미경 사진 ×500	금속현미경 사진 ×500

SEM-EDX(wt%)



SEM 사진 ×500								분석위치별 EDX 그래프			
성 분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
②	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
③	3.18	96.82	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C/S(wt%)											
성분				C				S			
조성				4.46				0.04			
경도(HMV)											
횟수		1		2		3		평균			
Cementite+Pearlite		604.2		594.4		584.8		594.5			

〈후기 유출철재와 선철의 고찰〉

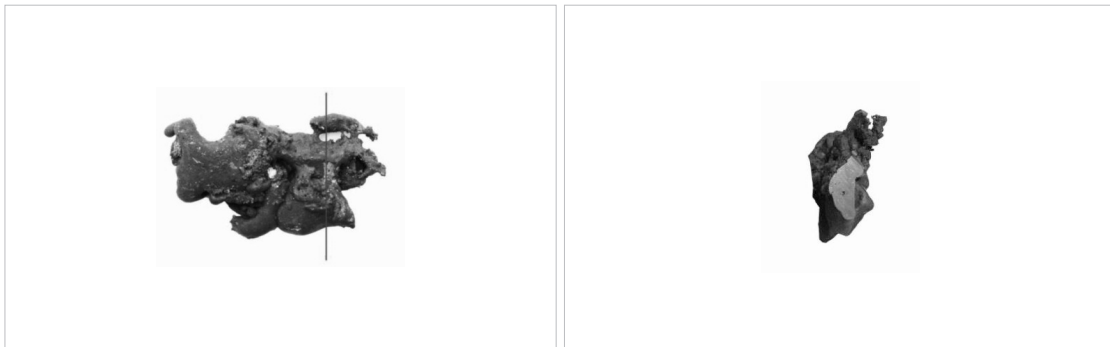
후기 유출 선철의 탄소함량은 최소 4.15%C에서 최대 4.48%C로서 공정선철에 해당하며 이결과는 전기 유출 선철과 비슷하며 가장낮은 용점을 나타내고 있다. SEM-EDX상의 조직 경도는 기지조직이 Pearlite(HMV231.6-255.1)이고 입계조직은 대부분 Cementite (HMV619.5-854.0)가 입계를 중심으로 형성되어 있으며 그중 일부는 입계에 흑연(Graphite)을 형성하고 있었다.

후기 유출 철재의 경우는 잔류 철산화물량이 1.20-3.25%FeO로서 대부분의 철이 환원되어 선철을 형성 했음을 알수 있으며 이는 철재중에 염기성 산화물인 CaO(17.53-18.38%), MgO(22.40-24.08%)로 함량이 증가하고 산성 산화물이 상대적으로 낮아진 SiO₂(45.56-46.49%)로 형성된 것으로 판단된다.

6. 형성물의 분석

1) 형성물 하부 선철(19U-17MB)

(1) 시료의 채취



① 절단 위치

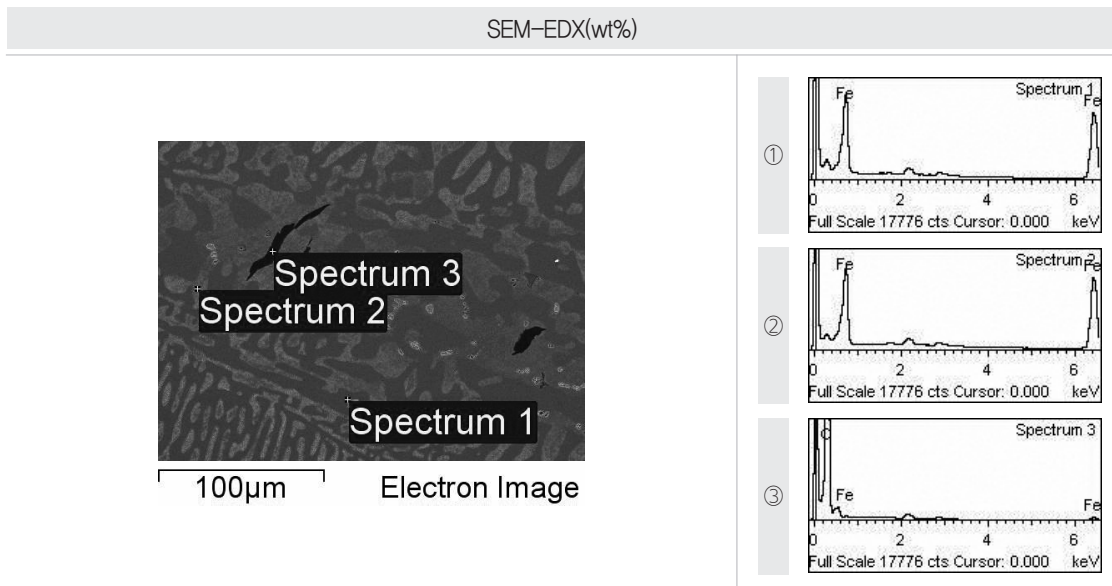
② 절단면

〈사진 23〉 형성물 하부 선철(19U-17MB)의 절단면 위치와 절단면

(2) 분석결과

〈표 27〉 형성물 하부 선철(19U-17MB)의 분석결과

금속현미경 사진 ×50	금속현미경 사진 ×500	금속현미경 사진 ×500



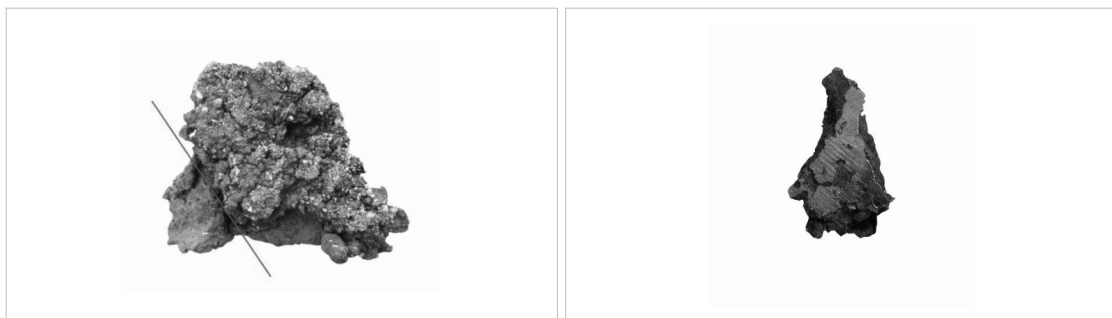
SEM 사진 ×500								분석위치별 EDX 그래프			
성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
②	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
③	5.20	94.80	—	—	—	—	—	—	—	—	—

C/S(wt%)		
성분	C	
조성	4.24	
	S	
	0.06	

경도(HMV)				
횟수	1	2	3	평균
Cementite+Pearlite	698.2	680.1	674.2	684.2
Pearlite	274.2	289.7	256.5	273.5

2) 형성물 상부 선철(19U-17MU)

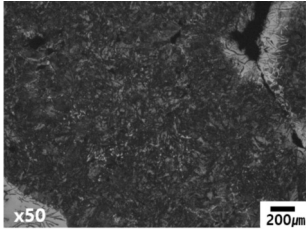
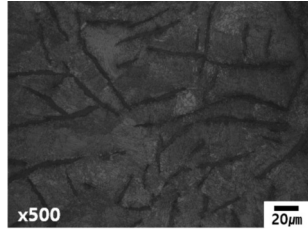
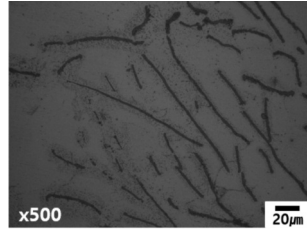
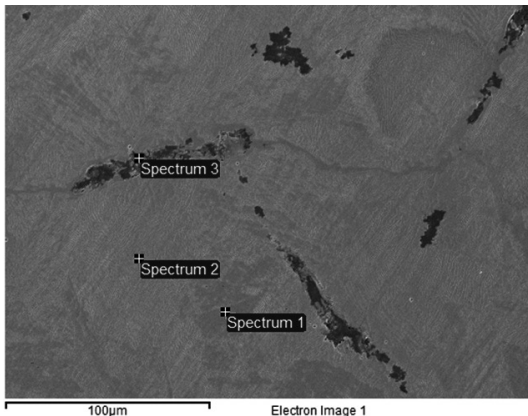
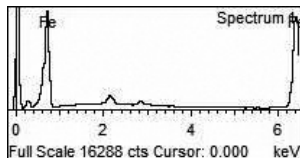
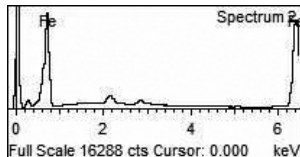
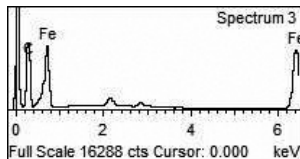
(1) 시료의 채취



〈사진 24〉 형성물 상부 선철(19U-17MU)의 절단면 위치와 절단면

(2) 분석결과

〈표 28〉 형성물 상부 선철(19U-17MU)의 분석결과

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

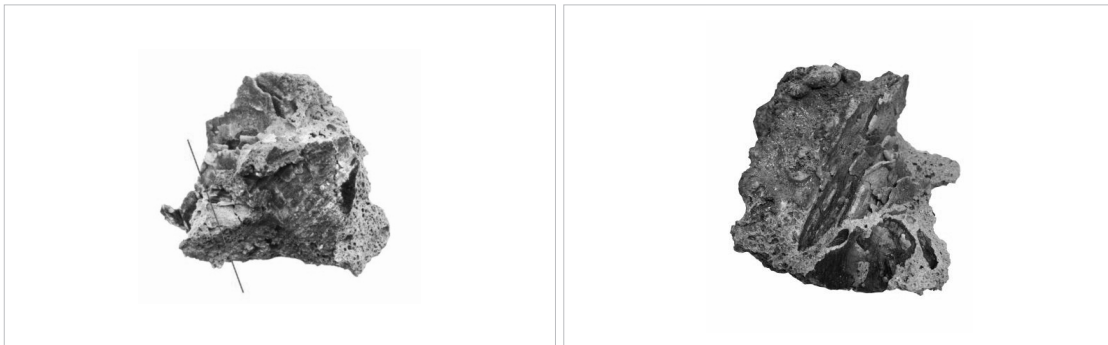
성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
②	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
③	61.10	38.90	—	—	—	—	—	—	—	—	—

C/S(wt%)		
성분	C	S
조성	1.72	0.03

경도(HMV)				
횟수	1	2	3	평균
Pearlite	256.5	249.9	240.5	249.0

3) 노해체 입구 철재(19U-18S)

(1) 시료의 채취



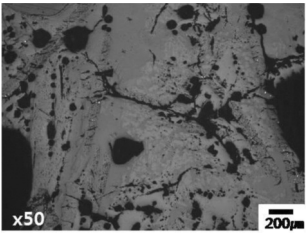
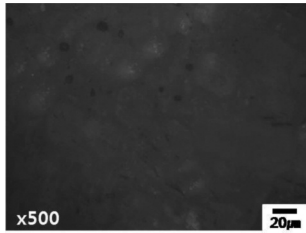
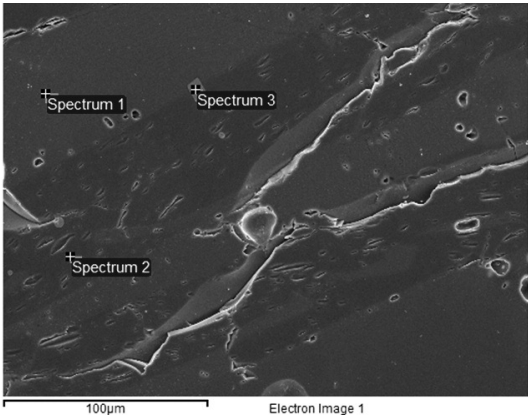
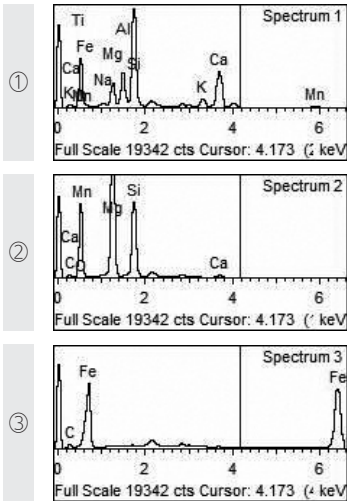
① 절단 위치

② 절단면

〈사진 25〉 노해체 입구 철재(19U-18S)의 절단면 위치와 절단면

(2) 분석결과

〈표 29〉 노해체 입구 철재(19U-18S)의 분석결과

 x50 200μm	 x500 20μm
금속현미경 사진 ×50	금속현미경 사진 ×500
SEM-EDX(wt%)	
 100μm Electron Image 1	 ① Spectrum 1 Full Scale 19342 cts Cursor: 4.173 (keV) ② Spectrum 2 Full Scale 19342 cts Cursor: 4.173 (keV) ③ Spectrum 3 Full Scale 19342 cts Cursor: 4.173 (keV)
SEM 사진 ×500	분석위치별 EDX 그래프

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	0.49	-	41.50	0.74	4.76	6.73	22.59	3.46	17.05	0.23	2.45
②	-	5.70	40.47	-	31.38	-	20.48	-	1.11	-	0.86
③	94.79	5.21	-	-	-	-	-	-	-	-	-

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	1.21	45.05	5.67	21.52	0.49	22.43	1.53	0.26	0.07	1.50

〈형성물의 분석 고찰〉

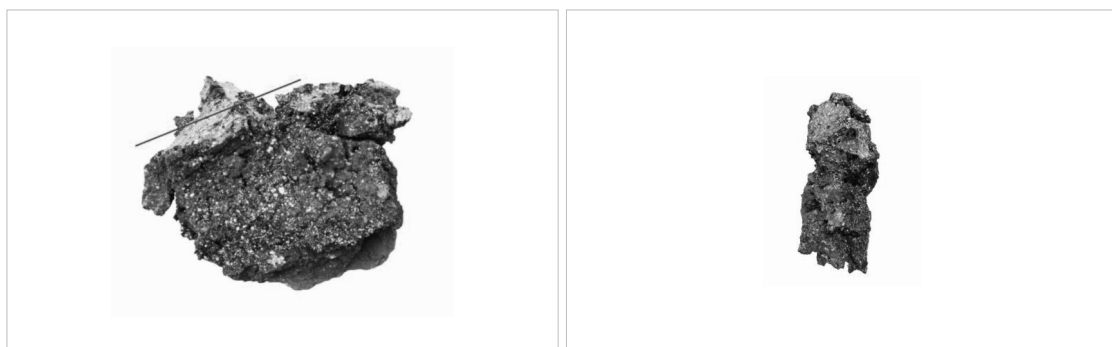
형성물 중에 상부에 형성된 선철의 탄소함량은 1.72%C로 낮게 형성되어 있으나 하부에 형성된 선철의 경우는 탄소함량이 4.24%C로서 차이가 있으며 이는 상부에서 하부로 장입물이 하강하면서 침탄이 일어나고 있음을 알 수 있겠다.

형성물중에 노체 입구에 형성된 철재의 XRF분석에서도 철함량이 낮은(4.21%FeO) 철재가 나타나는 것은 철재의 환원이 일어난 것으로 보이며 이는 철재 성분중에 CaO가 21.52% 및 MgO가 22.43%로서 상대적으로 높고 산성산화물(SiO₂)은 45.05%로서 상대적으로 낮아서 염기도의 상승에 따라 철회수율이 개선된 것으로 보인다.

7. 노벽 부착물

1) 노해체 입구 노벽(19U-18W)

(1) 시료의 채취



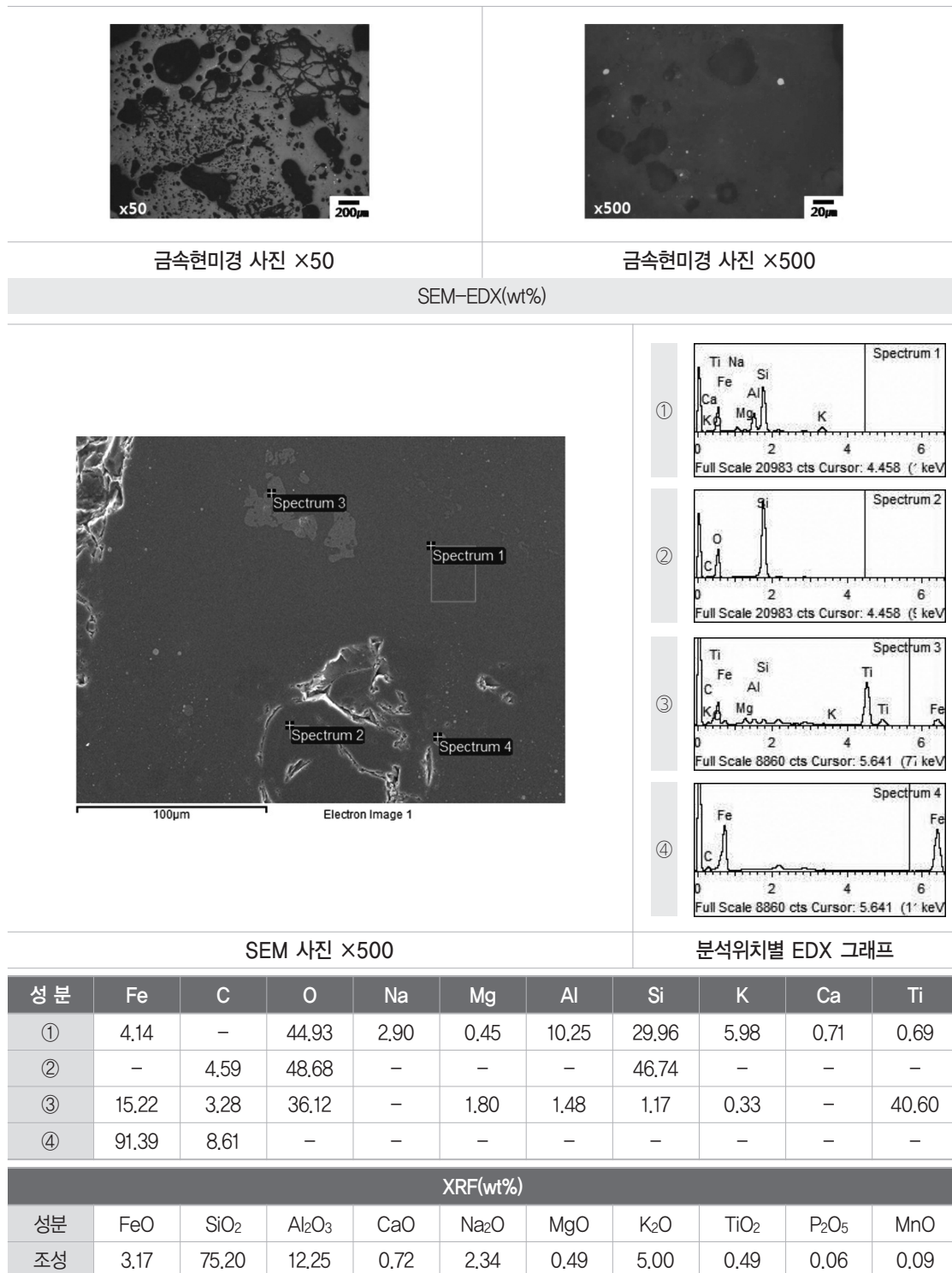
① 절단 위치

② 절단면

〈사진 26〉 노해체 입구 노벽(19U-18W)의 절단면 위치와 절단면

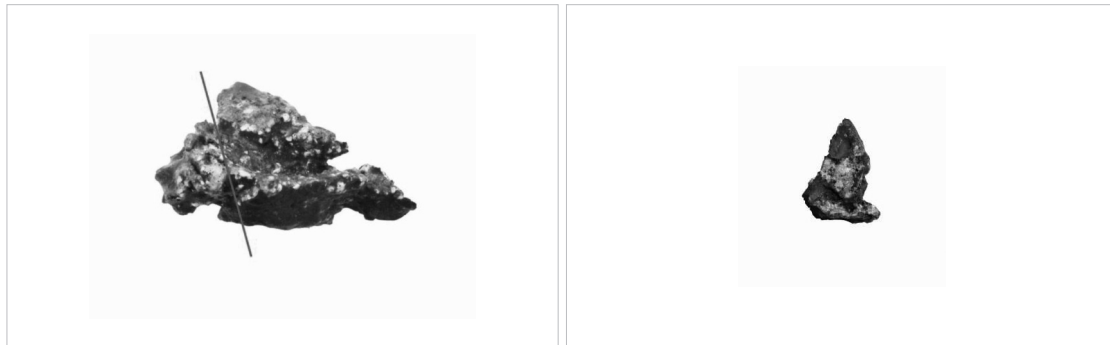
(2) 분석결과

〈표 30〉 노해체 입구 노벽(19U-18W)의 분석결과



2) 1위치 노벽(19U-19)

(1) 시료의 채취



① 절단 위치

② 절단면

〈사진 27〉 1위치 노벽(19U-19)의 절단면 위치와 절단면

(2) 분석결과

〈표 31〉 1위치 노벽(19U-19)의 분석결과

금속현미경 사진 ×50	금속현미경 사진 ×200
SEM-EDX(wt%)	
SEM 사진 ×500	분석위치별 EDX 그래프

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti
①	3.12	—	45.35	1.37	0.55	9.66	31.32	7.25	0.97	0.41
②	2.49	4.46	43.55	1.42	0.45	8.78	30.53	7.64	0.68	—
③	—	4.72	48.85	—	—	—	46.43	—	—	—

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	8.79	64.62	10.05	3.43	1.91	2.28	7.88	0.39	0.14	0.30

3) 2위치 노벽(19U-20)

(1) 시료의 채취

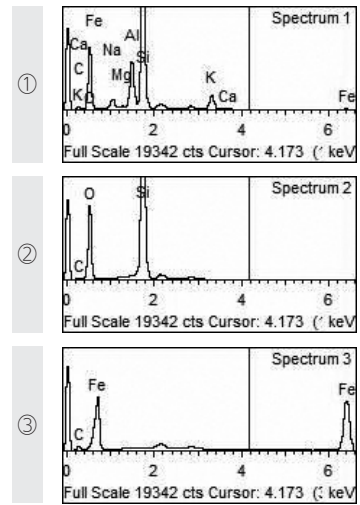
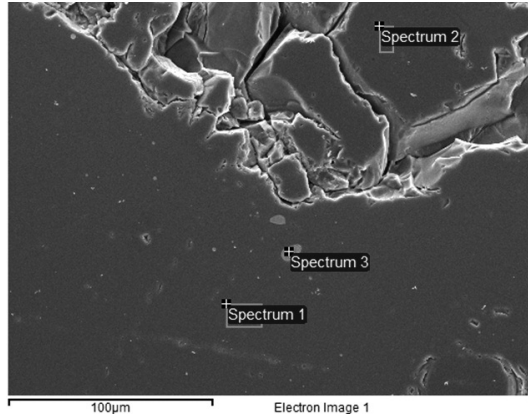


〈사진 28〉 2위치 노벽(19U-20)의 절단면 위치와 절단면

(2) 분석결과

〈표 32〉 2위치 노벽(19U-20)의 분석결과

x50 200μm	x200 50μm
금속현미경 사진 ×50	금속현미경 사진 ×200



SEM 사진 ×500

분석위치별 EDX 그래프

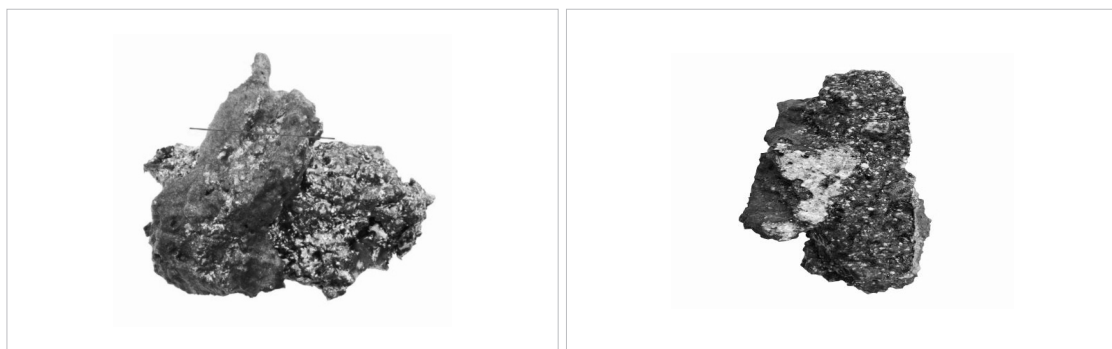
성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti
①	1.63	5.69	43.33	2.42	0.20	9.58	30.64	6.11	0.39	—
②	—	4.96	48.30	—	—	—	46.74	—	—	—
③	93.80	6.20	—	—	—	—	—	—	—	—

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	3.71	74.76	11.77	0.97	2.24	0.60	5.28	0.42	0.05	0.10

4) 3위치 노벽 부착 철재(19U-21)

(1) 시료의 채취



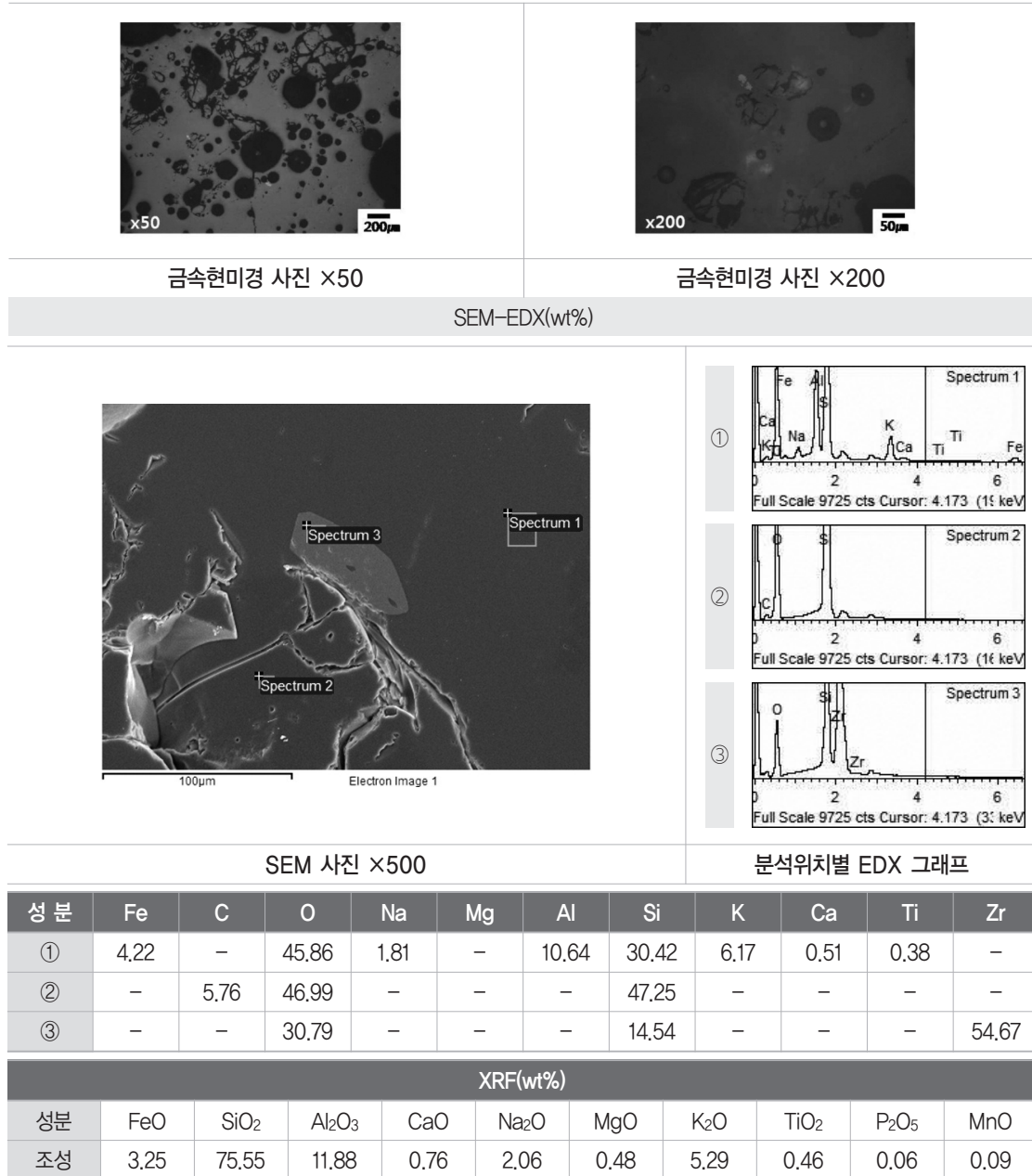
① 절단 위치

② 절단면

〈사진 29〉 3위치 노벽 부착 철재(19U-21)의 절단면 위치와 절단면

(2) 분석결과

〈표 33〉 3위치 노벽 부착 철재(19U-21)의 분석결과



5) 4위치 노벽 부착 철재(19U-22)

(1) 시료의 채취



① 절단 위치

② 절단면

〈사진 30〉 4위치 노벽 부착 철재(19U-22)의 절단면 위치와 절단면

(2) 분석결과

〈표 34〉 4위치 노벽 부착 철재(19U-22)의 분석결과

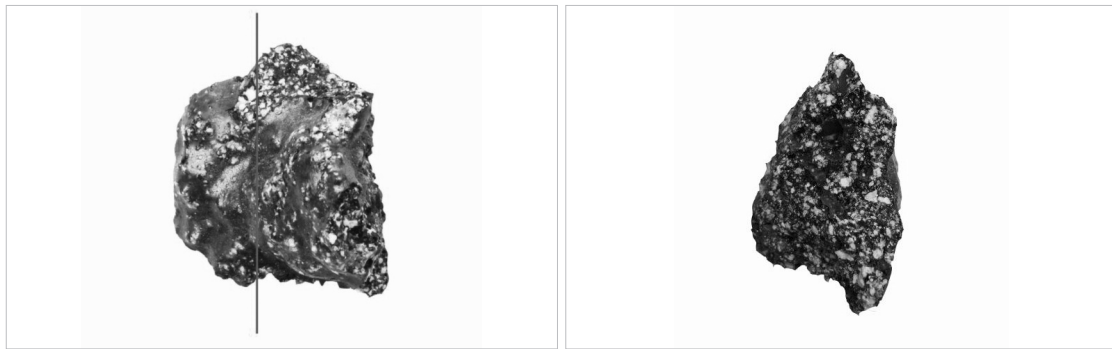
금속현미경 사진 ×50	금속현미경 사진 ×200
SEM-EDX(wt%)	
SEM 사진 ×500	분석위치별 EDX 그래프

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	5.34	—	42.54	3.82	0.91	8.99	27.03	8.80	1.24	1.33	—
②	60.30	3.89	26.93	—	6.79	0.49	—	—	—	—	1.61
③	49.49	—	29.91	1.35	5.20	2.69	7.75	1.87	—	0.80	0.93

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	4.47	73.40	11.36	1.37	2.30	0.72	5.59	0.44	0.06	0.15

6) 5위치 노벽 부착 철재(19U-23)

(1) 시료의 채취



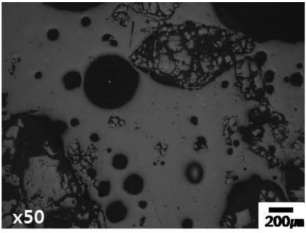
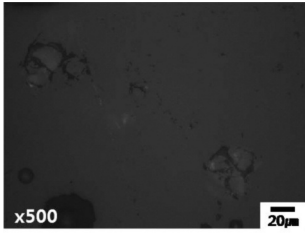
① 절단 위치

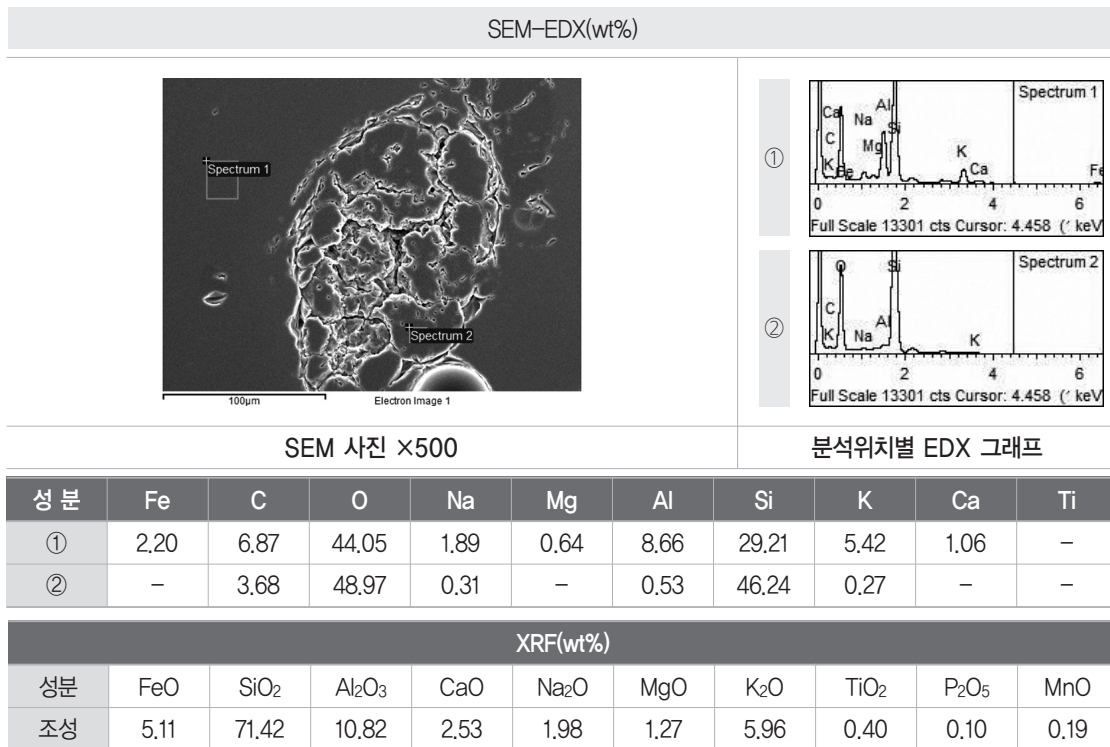
② 절단면

〈사진 31〉 5위치 노벽 부착 철재(19U-23)의 절단면 위치와 절단면

(2) 분석결과

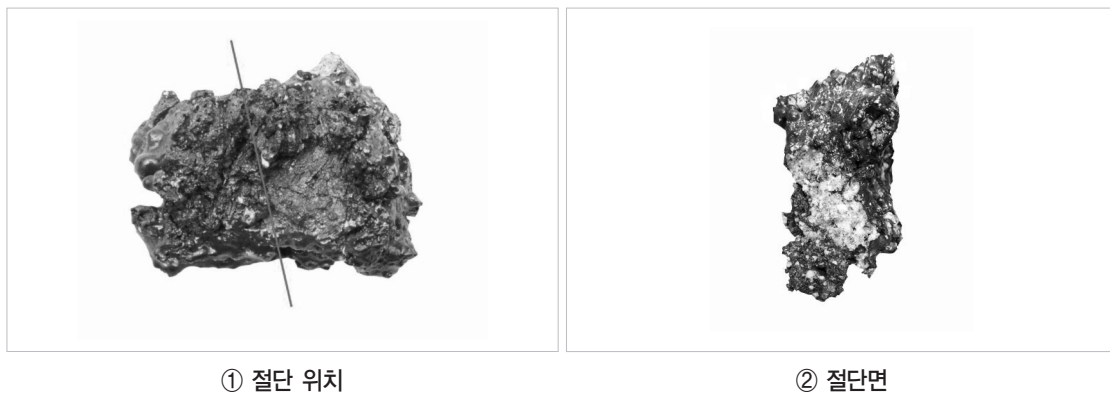
〈표 35〉 5위치 노벽 부착 철재(19U-23)의 분석결과

	
금속현미경 사진 ×50	금속현미경 사진 ×500



7) 6위치 노벽 부착 철재(19U-24)

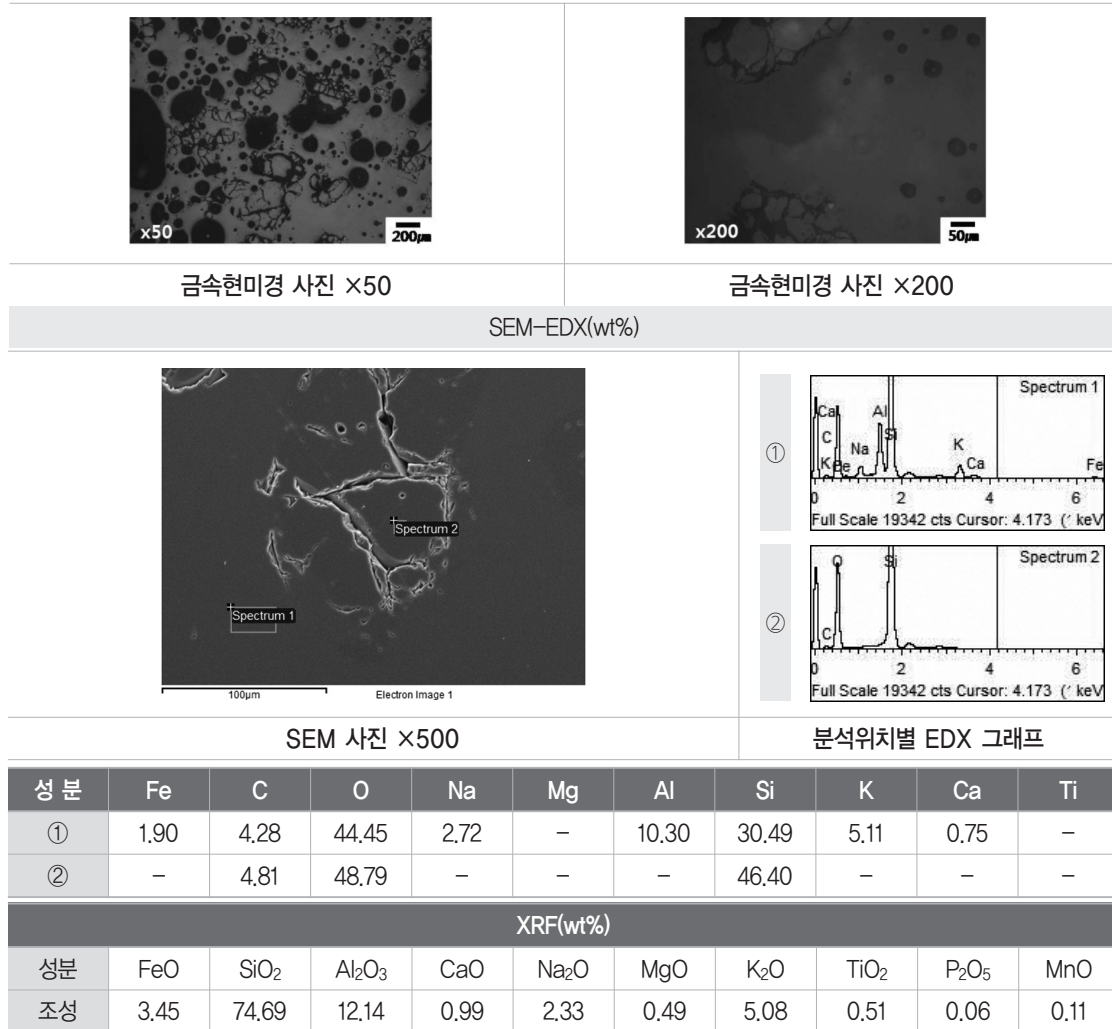
(1) 시료의 채취



〈사진 32〉 6위치 노벽 부착 철재(19U-24)의 절단면 위치와 절단면

(2) 분석결과

〈표 36〉 6위치 노벽 부착 철재(19U-24)의 분석결과



8) 7위치 노벽 부착 철재(19U-25)

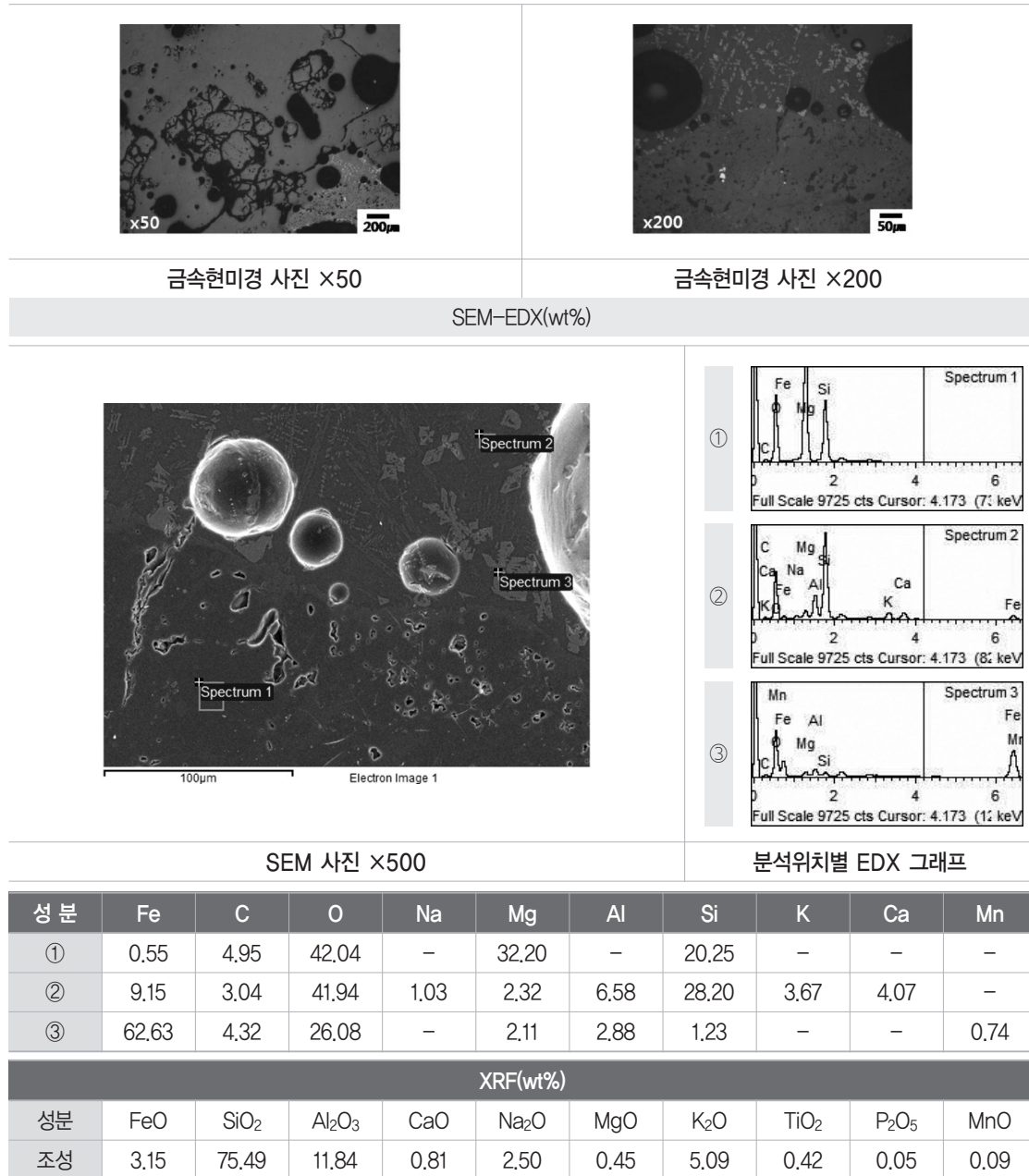
(1) 시료의 채취



〈사진 33〉 7위치 노벽 부착 철재(19U-25)의 절단면 위치와 절단면

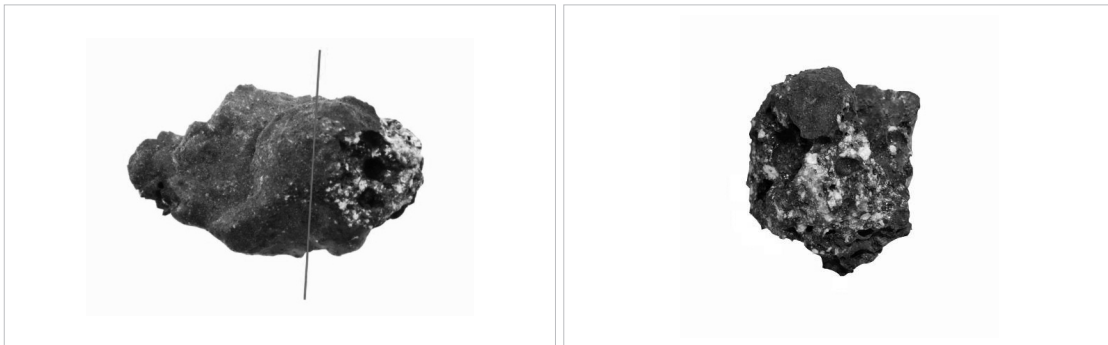
(2) 분석결과

〈표 37〉 7위치 노벽 부착 철재(19U-25)의 분석결과



9) 8위치 노벽 부착 철재(19U-26)

(1) 시료의 채취



① 절단 위치

② 절단면

〈사진 34〉 8위치 노벽 부착 철재(19U-26)의 절단면 위치와 절단면

(2) 분석결과

〈표 38〉 8위치 노벽 부착 철재(19U-26)의 분석결과

금속현미경 사진 ×50	금속현미경 사진 ×200	금속현미경 사진 ×500
SEM-EDX(wt%)		
SEM 사진 ×500	분석위치별 EDX 그래프	

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Mn
①	10.23	3.34	38.88	1.15	4.75	4.98	25.80	3.80	6.37	0.69
②	13.22	4.59	37.38	0.95	4.53	4.93	23.40	3.37	6.75	0.87
③	67.96	—	25.30	—	3.40	1.71	1.07	—	—	0.55

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	4.50	72.32	11.69	1.39	1.69	1.15	6.38	0.46	0.07	0.19

10) 9위치 노벽 부착 철재(19U-27)

(1) 시료의 채취



① 절단 위치

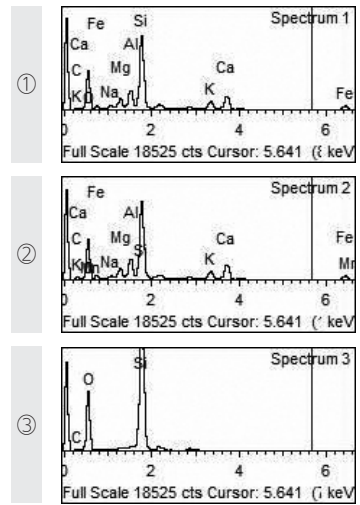
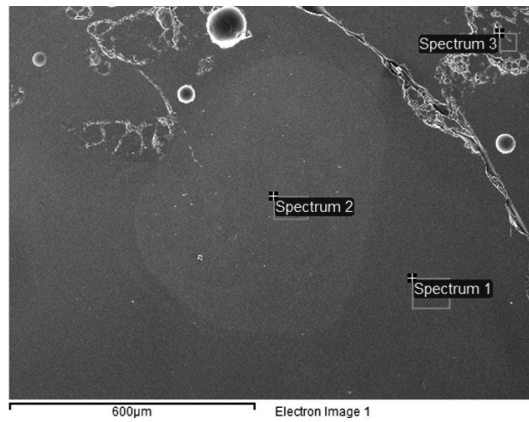
② 절단면

〈사진 35〉 9위치 노벽 부착 철재(19U-27)의 절단면 위치와 절단면

(2) 분석결과

〈표 39〉 9위치 노벽 부착 철재(19U-27)의 분석결과

금속현미경 사진 ×50	금속현미경 사진 ×200



SEM 사진 ×500

분석위치별 EDX 그래프

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Mn
①	9.61	3.71	39.84	1.18	2.98	5.18	24.26	4.60	8.65	—
②	9.23	4.48	38.86	0.80	2.94	5.17	24.32	4.44	9.40	0.36
③	—	5.27	48.47	—	—	—	46.26	—	—	—

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
부착철재	5.94	71.74	8.62	4.17	0.77	2.30	5.63	0.36	0.12	0.23
황색노벽	2.45	76.56	14.05	0.11	0.40	0.41	5.32	0.51	0.05	0.04

11) 10위치 노벽 부착 철재(19U-28)

(1) 시료의 채취



① 절단 위치

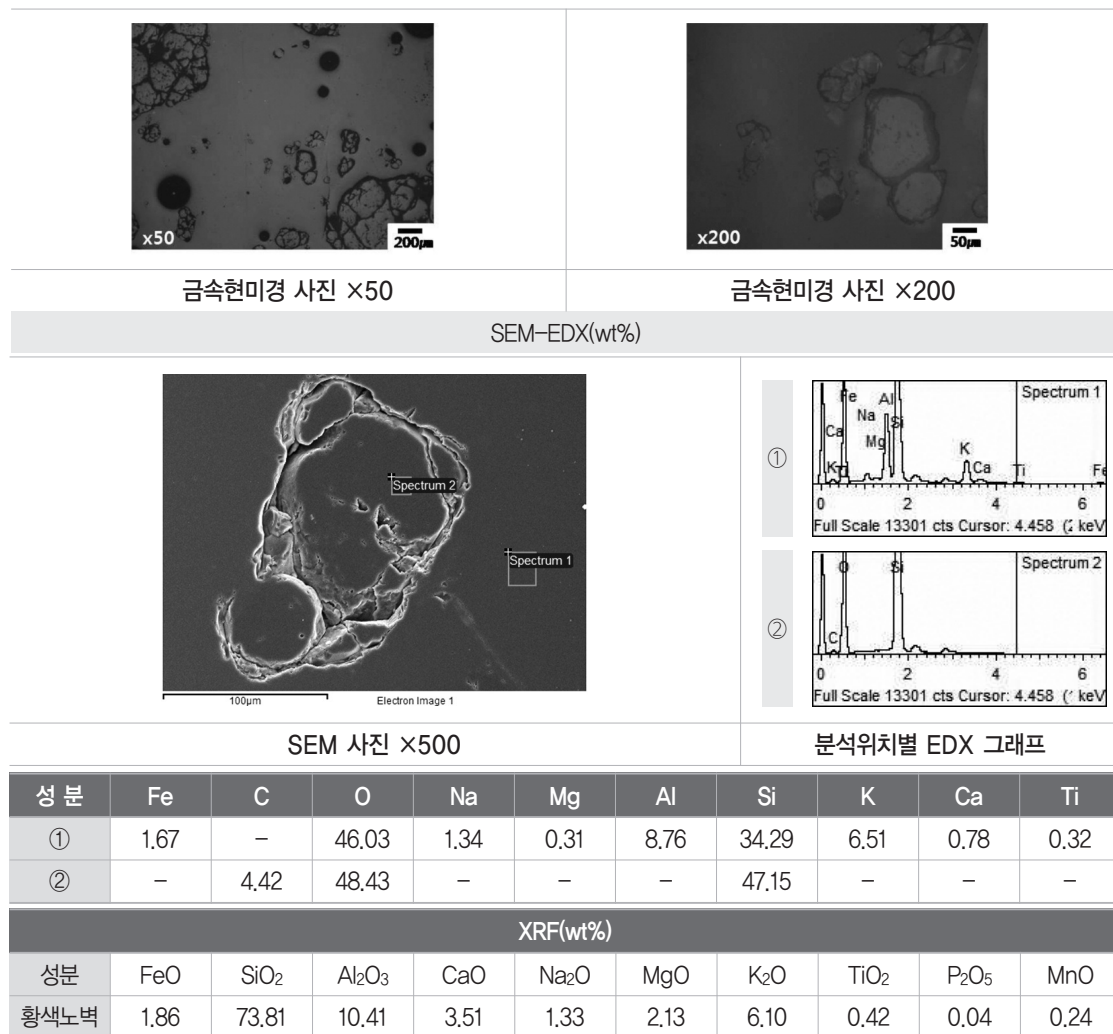


② 절단면

〈사진 36〉 10위치 노벽 부착 철재(19U-28)의 절단면 위치와 절단면

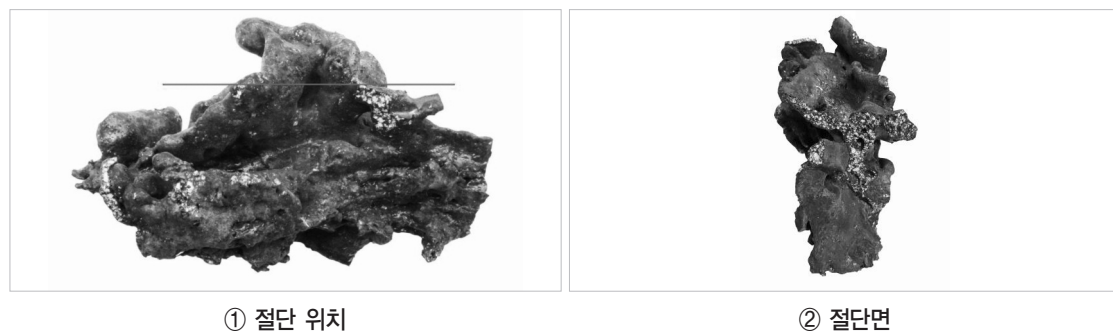
(2) 분석결과

〈표 40〉 10위치 노벽 부착 철재(19U-28)의 분석결과



12) 12위치 노벽 부착 철재(19U-29)

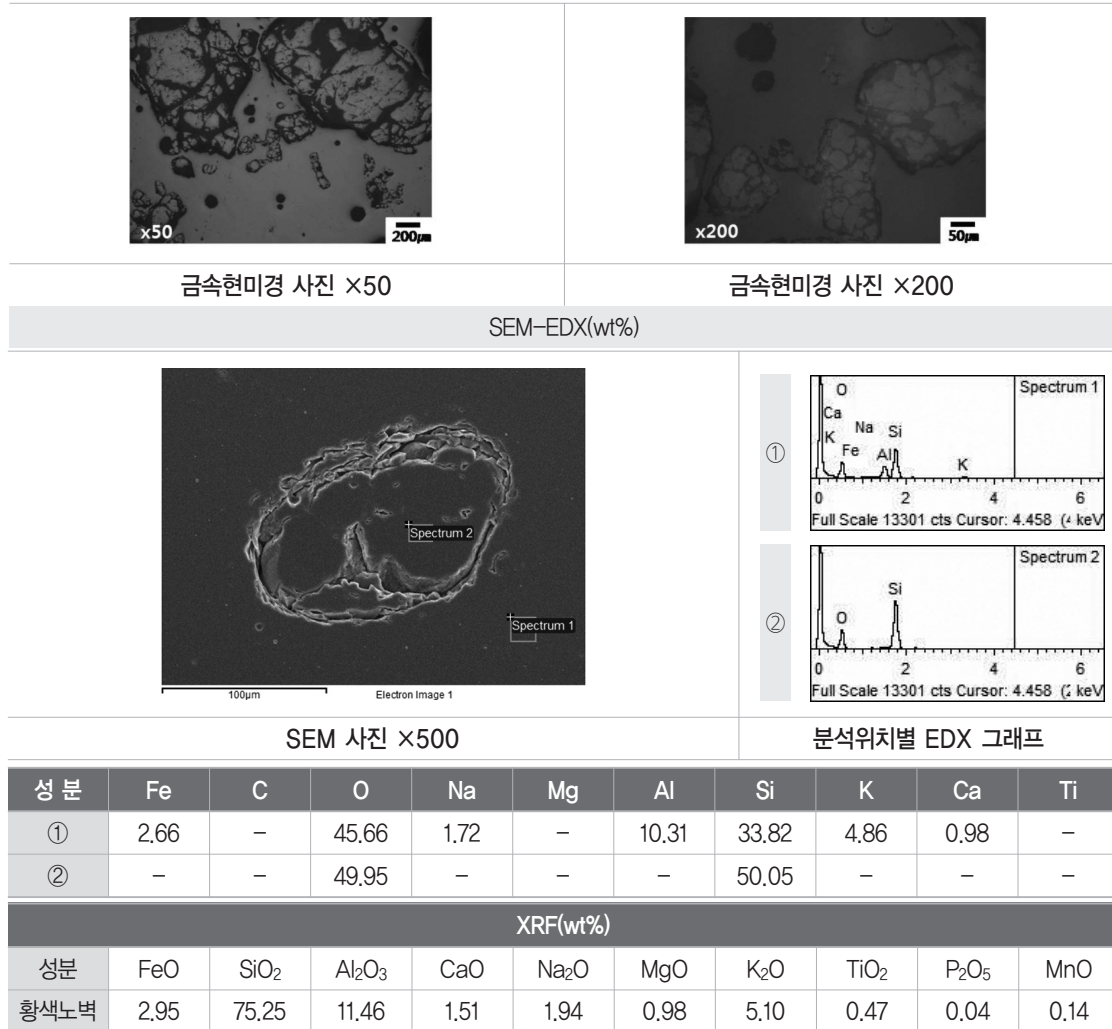
(1) 시료의 채취



〈사진 37〉 12위치 노벽 부착 철재(19U-29)의 절단면 위치와 절단면

(2) 분석결과

〈표 41〉 12위치 노벽 부착 철재(19U-29)의 분석결과



〈노벽 부착물의 고찰〉

노벽 부착물에 대한 XRF분석결과 FeO(1.86~8.79%), SiO₂(64.62~75.49%), Al₂O₃(10.05~11.88%) 및 K₂O(5.00~7.88%)로 구성되어 있다. 이는 점토로 구성된 노벽성분에 환원형성물의 용착에 의하여 만들어진 복합 산화물임을 알 수 있다.

또한 SEM-EDX분석에서도 산화물의 구성은 SiO₂, Al₂O₃, K₂O산화물과 FeC 및 SiC의 탄화물로 구성되어 있다. 괴련철을 환원하는 과정에서는 탄화물이 나타나지 않고 있으며 이들의 용손은 Fayalite(FeO · SiO₂)가 용손의 주요인으로 알려져 있으나 본 실험과 같은 선철의 제련에서는 환원반응과 침탄반응을 동반하여 진행된 것을 알 수 있겠다.

IV. 맺음말

본 보고서는 2019년도 제5차 울산 쇠부리 제철기술 복원실험 결과이며 이를 요약하면 다음과 같다. 이는 당초 실험목표로 설정된 바 있는 울산지역을 중심으로 한 전통제련로인 석축형 쇠부리가마를 복원하여 선철을 생산하는 실험을 실시한 것이다.

이 실험을 통하여 밝혀진 내용은 다음과 같다.

본 복원실험을 통하여 석축형 쇠부리가마에서 공정선철(4.3%C 부근)을 생산할 수 있다는 가능성을 확인할 수 있었다. 그러나 용선을 제조한 후 판장쇠 소재를 주입하는 과정에서 온도가 급격히 떨어져서 완전한 주입이 불가능 하였다.

따라서 향후 온도상승을 개선하거나 상승된 온도가 쉽게 떨어지지 않도록 기술적인 개선이 필요하다.

본 실험에서 염기도를 개선하고자 패각을 쓰고 있으나 이와 더불어 철광석 중의 염기성 산화물인 CaO, MgO, Na₂O, K₂O등이 함께 검토되어야 하고 아울러 가마벽 재료의 산화물도 염기도에 기여하고 있다고 확인할 수 있었다.

향후 선철제련 온도를 상승시킨다면 하부에 용융선철이 생기고 그 상부에 용융슬래그층으로 비중분리와 슬래그에 의한 정련이 일어나서 철 회수율이 개선될 수 있으며 용선의 온도하강도 개선될 수 있다고 판단된다.

그리고 쇠부리가마의 지속적인 사용이나 재사용을 위하여 송풍관, 출재구 및 출탕구를 합리적으로 재설계할 필요가 있다고 판단된다.

따라서 지속적인 복원연구를 통하여 고대에서 근대에 이르는 전통제철 기술이 체계적으로 복원될 수 있기를 기대하고 있다.

2. 자문의견서

자문위원의견서		
사 업 명	2019 년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험	
개최일시	2019 년 5 월 11 일(토)	
자문내용	▶ 2019 년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험에 대한 학술적 의견 ▶ 2019 년도울산쇠부리 제철기술 복원실험 준비·진행·결과 및 향후 계획에대한 의견	
자 문 의 견		
제철복원실험에 대한 의견	・石築型製鉄炉を遺構に忠実に縮小して復原した結果、炉前面の出銑孔と排滓孔の幅が狭くなり、出銑及び排滓作業が効率的に行えなかった。遺構全体を忠実に復原することは無理であるにしても出銑孔と排滓孔については遺構に近い大きさにして作業する必要があるのではないかと。 ・原料とした江原道の鉄鉱石は磁鉄鉱とのことであった。達川鉱山の鉄石は、磁鉄鉱に加え還元性の良い赤鉄鉱・褐鉄鉱を含んでおり、これらの風化が進んだものが土鉄である。銑鉄の抽出が十分にできなかったのは、還元性があまり良くない磁鉄鉱を用いたことがあるのではないかと。 ・銑鉄抽出用の型の形状が、權丙卓先生の概念図のように復原されている。同様な型は近代の出銑作業では使われているが、朝鮮時代にこのような形状のものがあるのか。遺構などから検討する必要があるのではないかと。	
향후 추진방향	・製鉄炉前面の出銑孔と排滓孔を大きくして、作業しやすくするよう改善する。 ・使用する鉄鉱石を磁鉄鉱から、還元性の良い赤鉄鉱・褐鉄鉱に代えるか、それらを混ぜたものに変更する。	
기타 의견	・日本のたたら製鉄でも、製鉄炉の端部に銑鉄を抽出した湯溜まりと呼ばれる土孔がある。遺跡で湯だまりが検出された例があり、また、型に流し取られた銑鉄塊も残っている。これらを類例として調査し、実験の参考にしてはどうか。	
자 문 위 원		
소 속	진 공	성 명
島根県埋蔵文化財調査センター	考古学	角田徳幸
2019 년 5 월 31 일		
울산쇠부리 복원사업단귀하		

자문위원 의견서		
사 업 명	2019년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험	
개최일시	2019년 5월 11일(토)	
자문내용	▶ 2019년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험에 대한 학술적 의견 ▶ 2019년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험 준비·진행·결과 및 향후 계획에 대한 의견	
자 문 의 견		
제철복원실험에 대한 의견	* 石築型製鉄炉를 遺構에 맞게 縮小하여 復原한 結果、炉前面의 出銑孔과 排滓孔의 幅이 좁아지고、出銑 및 排滓作業이 効率的으로 行해질 수 없었다. 遺構全体를 忠実に 復原하는 것은 無理라고 하여도 出銑孔과 排滓孔에 있어서는 遺構에 맞는 크기로 하여 作業할 必要가 있지는 않을까? * 原料로 쓴 江原道の 鉄鉱石은 磁鉄鉱이었다. 達川鉱山の 鉱石은、磁鉄鉱에 더해서 還元性이 좋은 赤鉄鉱·褐鉄鉱을 포함하고 있고、이것이 風化된 것이 土鉄이다、銑鉄의 抽出이 충분히 되지 못한 것은 還元性이 그다지 좋지 않은 磁鉄鉱을 사용한 때문은 아닐까? * 銑鉄抽出用の 판장쇠 바탕이 權丙卓先生의 概念圖에서 보는 바와 같이 復原되었다. 같은 모양의 것이 近代의 出銑作業에서 사용되고는 있으나、朝鮮時代に 이러한 形狀의 것이 있었을까? 遺構등을 檢討할 必要가 있는 것은 아닐까?	
향후 추진방향	* 製鉄炉前面의 出銑孔과 排滓孔을 크게 해서、作業하기 쉽도록 개선한다. * 使用하는 鉄鉱石을 磁鉄鉱으로부터、還元性이 좋은 赤鉄鉱·褐鉄鉱으로 바꾸거나、그것들을 섞은 것으로 변경한다.	
기타 의견	* 日本의 다다라製鉄에서도 製鉄炉의 端部に 銑鉄을 抽出하는 유다마리(湯溜まり)로 불리는 土孔이 있다. 遺跡에서 이것이 検出된 例가 있고、또한 형틀에 흘려서 만든 銑鉄塊가 남아 있다. 이것들을 類例로 하여 調査하고、実験에 参考하면 어떨까?	
자 문 위 원		
소 속	전 공	성 명
島根県埋蔵文化財調査センタ	考古学	角田徳幸
2019년 5월 31일		
울산쇠부리 복원사업단 귀하		

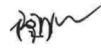
자문위원 의견서		
사 업 명	2019년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험	
개최일시	2019년 5월 11일(토)	
자문내용	▶ 2019년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험에 대한 학술적 의견 ▶ 2019년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험 준비·진행·결과 및 향후 계획에 대한 의견	
자 문 의 견		
제철복원실험에 대한 의견	-구충당 이의립의 조선시대 제철복원실험은 구충당 선생의 제철에 대한 충분한 조사, 연구와 고증을 바탕으로 비교적 사실에 가깝게 실시되어 당초 계획했던 소기의 성과를 얻을 수 있었으며, 많은 축제 참여자들의 관심을 유도하여 지역 문화 축제로서 가장 중요한 볼거리로 자리 잡은 것으로 사료됨. 다만 다음과 같은 몇 가지 소소한 문제가 보완될 필요가 있을 것임. -최초 선철의 생산량이 당초 목표에 미치지 못한 원인이 무엇인지를 파악하고 향후 복원 실험에서는 충분한 목표 생산량을 달성할 수 있도록 해야 할 것임. -당초 계획한 구충당 이의립의 토철 제련법에 맞게 실제 복원 실험에도 분광한 철광석을 사용할 것이 아니라 달천 광산의 토철을 사용하는 것이 바람직할 것임. -일반인 축제의 일환으로 이루어지는 제철 복원 실험인 만큼, 음성 멘트에 의한 설명은 한계가 있으므로 노의 축조에서부터 선철이 생산될 때까지의 방법과 절차, 그리고 그 사용처 등에 대하여 패널 전시에 의한 설명을 더하여 유동적인 일반 축제 참여자들의 이해를 높일 필요가 있을 것으로 사료됨. -연료로 사용된 목탄은 실제 구충당 이의립이 목탄 원료를 어디에서 수집했는지, 아니면 목탄도 직접 생산하여 사용하였는지를 조사하여 그 연료 산지의 목탄을 구하여 사용해야 원래 제철 복원 취지에 부합할 것임. -실제 사용하는 목탄 역시 일정한 크기로 톱으로 썰어서 사용했는지 생산된 목탄 연료를 다른 방법으로 분쇄하여 사용했는지, 아니면 생산된 목탄 그대로 사용하였는지 파악하여 사실에 맞게 사용할 필요가 있음.	
향후 추진방향	-구충당 이의립의 토철 제련법에 맞게 실제 구충당 선생이 제철 작업을 했던 곳에서 철저한 고증을 거쳐서 제철 복원 실험을 함으로써 그 역사성을 더욱 부각할 수 있을 것임. -달천 광산의 토철 제련법에 대한 복원 실험인 만큼, 달천 광산에서 직접 복원 실험할 수 있다면 그 역사성을 더욱 부각시킬 수 있을 것임. 이 경우 축제 참여자들을 어떻게 현지까지 유도하여 확보할 것인지에 대한 방안을 강구하여 원래 축제 취지와 목표를 달성할 수 있도록 해야 할 것임. -송풍구와 노의 연결부에 자주 슬래그가 차서 송풍이 중단되어 제련 작업의 효율이 떨어지는 한 원인으로 사료되는 바, 이를 어떻게 개선할 것인지에 대한 방안을 강구할 필요가 있음.	
기타 의견	-최초 선철의 출탕 시점을 놓고 실험 참가자들의 의견이 분분하여 혼란이 야기되고, 그 결과 충분한 온도에 도달하지 못한 채 출탕이 이루어져 선철의 생산량이 적어지게 된 원인의 하나로 사료되는 바, 향후에는 당초 계획했던 대로 일사불란한 작업 절차와 공정이 진행될 필요가 있을 것임. -제철 복원 실험 이외에 제철 및 철기문화와 관련된 다양한 학술대회를 계획하여 지속적으로 추진함으로써 지역을 넘어서 전국적 축제로 승화시킬 필요가 있을 것임.	
자 문 위 원		
소 속	전 공	성 명
용인대학교	한국역사고고학	김길식 (서명)
2019년 5월 30 일		
울산쇠부리 복원사업단 귀하		

자문위원 의견서		
사 업 명	2019년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험	
개최일시	2019년 5월 11일(토)	
자문내용	▶ 2019년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험에 대한 학술적 의견 ▶ 2019년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험 준비·진행·결과 및 향후 계획에 대한 의견	
자 문 의 견		
제철복원실험에 대한 의견	금번 실험은 울산 쇠부리기술을 복원하기 위한 것의 일환으로서, 울산의 전통적 제철 기법으로 알려진 석축형 제철로를 1/2 크기로 복원 구축하여 선철 생산을 목표로 하였다. 약 12시간에 걸친 조업 결과 당초 계획한대로 선철이 생산됨으로써, 일단 실험은 성공적이었으며 석축형 제철로에서 선철을 다량 생산할 수 있었음을 입증하였다고 평가할 수 있다. 앞으로 실험 진행과정에 대한 보다 면밀한 검토가 이루어져야하겠으나, 제철로 축조에 돌을 사용함으로써 보온성이 떨어지고 송풍이 중간 중간 충분치 못하여 노 내부 온도가 당초 예상보다 대체로 낮게 유지되었음에도 불구하고(대체로 1,200℃ 내외?) 선철이 생산될 수 있었다는 것은 고대 제철을 이해하는데 상당히 중요한 실마리를 제공할 것으로 생각된다. 선철은 일반적으로 1250~1300℃ 이상의 고온으로 환원분위기를 장시간 유지해야 생산될 수 있을 것으로 여겨져 왔는데, 금번에 좀 더 낮은 온도에서 조업에 일정부분 성공하였다는 점에서 목탄 등의 투입량을 최소화 하면서 더 많은 철을 생산할 수 있는 고대 제철조업방식을 복원하는데 한걸음 더 다가선 것으로 평가하고 싶다. 비교적 낮은 온도에서 선철이 생산될 수 있는 메커니즘을 정확히 찾을 수 있도록 향후 각종 금속학적 분석이 더욱 자세히 이루어져야할 것으로 생각된다.	
향후 추진방향	비록 소규모이지만 석축형 제철로에서 비교적 성공적인 선철조업을 할 수 있었던 바, 향후에는 동일한 제련로를 통해 연속조업이 가능한지 한번, 조업에서 생산할 수 있는 최대량은 어느 정도일지 확인할 수 있는 작업도 필요할 것으로 생각한다. 나아가 다음 실험에서 동일한 제철로에서 원하는 괴련철을 그대로 생산할 수 있는지 여부도 실험이 이루어진다면, 고대의 다양한 조업방식을 이해하는데 또 다른 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.	
기타 의견		
자 문 위 원		
소 속	전 공	성 명
충북대학교	역사고고학	성정용 
2019년 5월 일		
울산쇠부리 복원사업단 귀하		

자문위원 의견서		
사 업 명	2019년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험	
개최일시	2019년 5월 11일(토)	
자문내용	▶ 2019년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험에 대한 학술적 의견 ▶ 2019년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험 준비·진행·결과 및 향후 계획에 대한 의견	
자 문 의 건		
제철복원실험에 대한 의견	그동안 진행되던 복원 실험에서 울산지역을 중심으로 진행되던 석축형제철로를 축소복원 실험을 시도하였다는 점에서 의의가 있다고 판단된다. 실험 과정에서 확인된 것처럼 만약 선철 생산을 목표로 진행된 조업에서 판장쇠 제작은 생각과는 달리 어렵다는 점을 확인하였다. 향후, 판장쇠 제작을 목표로 실험을 진행한다면 판장쇠 바탕의 설치와 쇳물을 받는 과정에서 규격과 온도 등을 종합적으로 고려하여야 한다고 판단된다.	
향후 추진방향	최근 울산발전연구원에서 발굴 조사한 유구를 중심으로 세밀한 금속공학적인 검토 결과를 바탕으로 당시 쇠부리에서의 조업 목표가 선철 생산의 단일한 목표였는지 규명할 필요가 있다고 판단된다. 또한, 지속적인 복원실험을 통하여 울산 쇠부리 원형 규명을 위한 시도를 하여야 한다고 판단된다.	
기타 의견		
자 문 위 원		
소 속	전 공	성 명
한림대학교 한림고고학연구소	고고학	심 재 연 
2019년 5월 일		
울산쇠부리 복원사업단 귀하		

자문위원 의견서		
사 업 명	2019년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험	
개최일시	2019년 5월 11일(토)	
자문내용	▶ 2019년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험에 대한 학술적 의견 ▶ 2019년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험 준비·진행·결과 및 향후 계획에 대한 의견	
자 문 의 견		
제철복원실험에 대한 의견	제철은 본 자문위원의 전공 영역이 아니므로 복원 실험에 대해서는 특별한 의견이 없습니다. 다만, 이와 관련된 부수적인 의견을 아래의 향후 추진 방향으로 제시합니다.	
향후 추진방향	1. 제련 공정의 진척 상황을 일정 시간마다 공지하여 공정의 진척도와 쇳물 추출 시각을 알 수 있게 하면 시민의 관심과 참여도가 높아질 듯합니다. 2. (가능하다면) 추출한 쇳물로 주조나 단조 등의 과정을 거쳐 완성품을 만드는 공정으로 이어지면 시민의 관심과 참여가 높아질 듯합니다. 3. 풀무질을 담당하는 인력(불매군)을 단순 아르바이트생으로 충당하지 말고, 역사와 문화에 관심이 있는 인력으로 충당하여 노동 시간을 계산하지 않고 축제에 참여하고 봉사하는 마음으로 작업에 임할 수 있게 하는 것이 좋겠습니다.	
기타 의견		
자 문 위 원		
소 속	전 공	성 명
울산대학교	역사문화학	이 종 서 (서명)
2019년 5월 31일		
울산쇠부리 복원사업단 귀하		

자문위원 의견서		
사 업 명	2019년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험	
개최일시	2019년 5월 11일(토)	
자문내용	▶ 2019년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험에 대한 학술적 의견 ▶ 2019년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험 준비·진행·결과 및 향후 계획에 대한 의견	
자 문 의 건		
제철복원실험에 대한 의견	이번 제련실험은 쇠부리가마 구조를 축소복원한 후 분광을 원료로 하여 선철을 생산하고자 시도했는데, 무엇보다도 실제 선철이 상당량 산출되었다는 점에서 성공적이라고 판단된다. 또한 조업매뉴얼이 큰 틀에서는 준수되었고, 작업팀 내의 의사소통도 적절히 잘 이루어져 성공적인 실험으로 마무리되었다고 평가한다. 다만 실험일정이 예정대로 정확히 준수되지 않았다는 측면은 다소 아쉽지만, 이는 철 제련실험에서 일어나는 어쩔 수 없는 상황이므로 이에 대한 시간적인 고려가 추후 실험에서 마련되는 것이 바람직하다고 판단된다.	
향후 추진방향	구충당 이의립 선생의 토철제련법을 원형대로 복원하기 위해서는 철광석 분광을 소재로 하여 철을 생산한 부분이 엄밀하게 평가되어야 한다. 이번실험에 사용된 분광 원료가 조업과정, 그리고 철 생산량에 미치는 영향이 굉장히 엄밀하게 평가되어야 하며, 이를 토대로 향후 실험의 근거가 마련되어야 할 것으로 판단된다. 아울러 연료 및 조재제에 대한 평가도 엄밀하게 이루어져 조선시대 철 생산 복원의 중요 연구성과로 남을 수 있도록 노력하기 바란다.	
기타 의견		
자 문 위 원		
소 속	전 공	성 명
전북대학교	고고학	조대연 (서명)
2019년 5월 27 일		
울산쇠부리 복원사업단 귀하		

자문회의 의견서		
회의명	2019 울산쇠부리 제철기술 복원실험	
개최일시	2019년 5월 11일(토)	
추진 계획	▶ 2019년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험에 대한 학술적 의견 ▶ 2019년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험 준비·진행·결과 및 향후 계획에 대한 의견	
자 문 의 견		
복원실험 추진계획에 대한 의견	이번 실험은 조선시대 석축로를 국내에서 최초로 재현한 실험으로 유적에서 밝혀진 제련로 구조에 대한 고증과 지금까지 축적한 조업 과정상의 노하우를 바탕으로 실험이 실시되었다. 그러나 노 내 온도가 1,250℃ 전후에 머물러 선철생산에 필요한 온도를 형성하지 못해 조업 마지막까지 그 결과가 우려되었으나, 내경 대비 3배 정도의 高爐를 통해 환원 구간에서 충분한 열을 확보하고, 패각 등의 철물 및 슬래그의 유동성을 높일 수 있는 조건 등으로 인해 선철 및 슬래그의 생산이 원활히 이루어진 것으로 판단된다. 이는 전적으로 실험단의 그간의 노하우가 착실히 축적되어 노 내 상황을 적절하게 대응한 결과이다.	
향후 추진방향	다만 슬래그가 유출될 것으로 추정된 잡쇠구멍과 선철이 유출될 것으로 추정한 초롱구멍이 각각의 역할을 하지 못하고 초롱구멍에서 슬래그와 선철이 함께 유출된 점, 배재구 쪽의 철물이 굳어 해머드릴을 사용할 수밖에 없었던 점 등을 유출 방식 및 유출 시점에 대한 보다 면밀한 검토가 필요하다는 점을 보여주었다. 또한 노 내 온도를 좀 더 끌어 올릴 수 있도록 석축구조에 점토의 양을 증가시켜 열손실을 막고, 송풍량을 증가시키는 등의 후속조치가 필요할 것으로 보인다.	
기타 의견	조선시대 석축로를 축조하여 실험한 첫 사례로 의의가 크다. 따라서 향후 지속적인 실험과 분석을 통해 조업내용을 밝혀나간다면, 명실상부 울산의 토철을 이용한 이의립 선생님의 제련법을 복원할 수 있을 것으로 기대된다.	
자 문 위 원		
소 속	전 공	성 명
국립중원문화재연구소	고고학	한 지 선 
2019년 5월 일		
울산쇠부리 복원사업단 귀하		

3. 실험 과정 진행표

시간	조업내용	목탄		분광		패각		비고
		장입량	총량	장입량	총량	장입량	총량	
08:30	조업시작							
08:33	목탄 中 장입	10	10					목탄 1차 장입
08:34	목탄 大 장입	50	60					
08:35	목탄 大 장입	80	140					
08:36	목탄 小 장입	80	220					
08:41	목탄 大 장입, 초롱길, 잡쇠길 점토간벽 설치	30	250					
08:42	목탄 小 장입	30	280					
08:43	목탄 大 장입	30	310					
08:46	목탄 小 장입	30	340					
08:47	목탄 大 장입	30	370					
08:49	목탄 小 장입	30	400					
08:50	목탄 大 장입	30	430					
08:51	목탄 小 장입	30	460					목탄 만장입
09:04	송풍구 연결							
09:08	초롱구멍과 잡쇠구멍 황토마개로 막음, 장입구 불꽃 양호함							이의립선생 후손 고유제 후 실험장 방문
09:13	판장쇠바탕 오른쪽 잡쇠구멍에서 잡쇠를 배출시키기 위한 도랑 만들							
09:29	목탄 大 장입, 온도계 삽입 후 갈라진 틈 황토로 보강	30	490					온도계 길이에 비해 가마벽 두꺼움
09:47	장입구 불꽃 붉은색으로 좋지 못함							예상되는 목탄 부족하여 추가 주문함
09:54	목탄 小 장입	30	520					
10:11	목탄 大 장입	30	550					
10:23	목탄 小 장입	30	580					
10:36	목탄 大 장입	20	600					앞창 상단부터 가마벽 두께가 얇아져 열손실 심함, 가마벽이 더 두꺼워야함, 온도가 균일하지 않음. 골구멍은 가마벽의 피복이 두껍게 형성되어 열손실이 적음
10:56	목탄 小 장입, 장입구 불꽃 양호하지 못함	30	630					
11:06	초롱구멍과 잡쇠구멍 상단에 약간의 구멍을 남겨두었으나 온도 상승효과를 위해 모두 막음, 분광 장입			10	10			

시간	조업내용	목탄		분광		패각		비고
		장입량	총량	장입량	총량	장입량	총량	
11:07	패각 장입, 출탕구에 백토+송탄+황토를 섞은 코팅제 바름					2	2	
11:10	목탄 中 장입	20	650					
11:26	목탄 小, 中 장입	20	670					
11:27	분광 장입			10	20			
11:28	패각 장입					1	3	
11:37	목탄 小, 패각 장입	10	680			1	4	
11:46	패각 장입시 비산이 심하여 분광 장입 후 목탄-패각-목탄 순으로 장입 순서를 변경함							
11:48	분광 장입			10	30			
11:49	목탄 中 장입	10	690					
11:56	분광 장입			10	40			
11:57	패각, 목탄 小 장입, 가마벽 갈라진 틈 황토로 보강	10	700			2	6	
12:06	분광 장입			10	50			
12:07	목탄 中 장입	10	710					
12:14	패각 장입, 목탄 小 장입	10	720			2	8	
12:20	패각, 목탄 中 장입, 방열로 풀무를 밝기가 힘들어 불막이 발 여러 겹 설치함	10	730			2	10	
12:28~12:33	불막이 발 설치 위해 잠시 송풍 중지							
12:35	분광 장입			10	60			
12:36	목탄 小 장입	10	740					
12:43	패각 장입					2	12	
12:46	목탄 中 장입	10	750					
12:56	분광 장입			10	70			
12:57	목탄 小 장입	10	760					
12:58	패각 장입					2	14	
13:03	가마벽이 슬래그 형성 후 박리 ($\text{SiO}_2+\text{F}_2\text{C}$)된 채 골구멍 막음							
13:05	목탄 中 장입	10	770					
13:15	분광, 목탄 中 장입	10	780	10	80			
13:19	패각, 목탄 小 장입	10	790			2	16	온도 1250℃이상 상승하지 않지만 상하 구분 없이 고르게 온도 상승, 온도 안정적임
13:32	분광 장입			10	90			
13:33	목탄 中 장입	10	800					
13:34	패각, 목탄 小 장입	10	810			2	18	

시간	조업내용	목탄		분광		폐각		비고
		장입량	총량	장입량	총량	장입량	총량	
13:48	분광 장입			10	100			
13:49	목탄 中 장입	10	820					
13:50	폐각, 목탄 小 장입	10	830			2	20	
14:00	골구멍 확인 양호함							
14:04	분광 장입			10	110			
14:06	목탄 中 장입	10	840					
14:07	폐각, 목탄 小 장입	10	850			2	22	
14:21	분광, 목탄 中 장입	10	860	10	120			
14:23	폐각, 목탄 小 장입	10	870			2	24	
14:30	불막이 발 발화로 인해 철판 으로 가림, 가마벽 갈라진 틈 황토로 메움							풀무중지
14:36	분광, 목탄 中 장입	10	880	10	130			
14:37	폐각 장입					2	26	
14:38	목탄 小 장입	10	890					
14:40	골구멍에서 슬래그 배출							
14:58	분광, 목탄 中 장입	10	900	10	140			
15:00	폐각, 목탄 小 장입	10	910			2	28	긴급회의
15:10	분광, 목탄 中 장입	10	920	10	150			
15:12	폐각, 목탄 小 장입	10	930			2	30	
15:25	기계송풍 시작, 잡쇠구멍 불 꽃이 일정하게 나오고 있음, 풀무 밝을 때 불꽃 없이 흑~ 흑~, 짧은 불꽃으로 쭉~~ 확인됨							
15:29	분광, 목탄 中 장입	10	940	10	160			
15:30	폐각, 목탄 小 장입	10	950			2	32	
15:38	판장쇠바탕 설치, 바닥을 수 평으로 고른 후(황토벽돌을 고임), 초롱길과 높이 2cm 정 도 차이 둬, 출탕구와 판장쇠 바탕 사이에 마른 흙과 모래 를 채운 후 황토물로 바름							
15:45	분광 장입			10	170			
15:47	목탄 中 장입, 기계송풍 중지, 발풀무 재개	10	960					온도가 약간 상승하는 것을 확인하고 발풀무 재개함
15:48	폐각, 목탄 小 장입	10	970			2	34	
16:00	분광, 목탄 中 장입	10	980	10	180			
16:02	폐각, 목탄 小 장입	10	990			2	36	

시간	조업내용	목탄		분광		패각		비고
		장입량	총량	장입량	총량	장입량	총량	
16:21	분광, 목탄 中 장입	10	1000	10	190			
16:23	패각 장입					2	38	
16:24	목탄 中 장입	10	1010					
16:36	분광, 목탄 中 장입	10	1020	10	200			
16:37	패각 장입					2	40	
16:38	목탄 中 장입	10	1030					
16:48	분광, 목탄 中 장입	10	1040	10	210			
16:50	패각, 목탄 中 장입	10	1050			2	42	
17:02	18:00 정도에 선철 출탕 예정. 풀무 중지, 정을 집게로 잡고 망치로 두들겨 잡쇠구멍 선철 생성 확인함							1차 선철 배출
17:05	분광 장입			10	220			
17:06	목탄 中 장입, 잡쇠구멍으로 선철 배출됨, 잡쇠구멍 점토로 막음	10	1060					
17:07	패각, 목탄 中 장입	10	1070			2	44	
17:11	출탕준비, 정과 집게, 망치로 초롱구멍 뚫음. 선철이 초롱구멍을 막고 있어 뚫기 어려움							
17:18	선철 출탕, 판장쇠 바탕 앞쪽부터 굳기 시작, 선철 역류, 일부 불꽃이 튀기도 함							2차 선철 출탕
17:19	분광, 목탄 中 장입	10	1080	10	230			
17:20	패각 장입					2	46	
17:21	목탄 中 장입	10	1090					
17:26	선철은 출탕과 동시에 굳어버리기 때문에 초롱구멍을 막은 후 온도를 올려 다시 출탕하기로 함							
17:34	분광 장입			10	240			
17:35	목탄 中 장입	10	1100					
17:36	패각 장입, 초롱구멍 황토로 막음					2	48	
17:37	목탄 中 장입	10	1110					
17:49	분광 장입			10	250			
17:50	목탄 中 장입	10	1120					
17:51	패각, 목탄 中 장입	10	1130			2	50	
18:00	기계송풍							
18:02	가마벽 상단(굴구멍 좌측 상단)의 장입구(황토벽돌)에 갈라진 틈으로 불꽃이 확인됨							

시간	조업내용	목탄		분광		패각		비고
		장입량	총량	장입량	총량	장입량	총량	
18:07	분광, 목탄 中 장입	10	1140	10	260			
18:08	패각 장입					2	52	
18:09	목탄 中 장입, 불꽃 튼	10	1150					
18:21	분광 장입			10	270			
18:22	목탄 中 장입	10	1160					
18:23	패각, 목탄 中 장입	10	1170			2	54	
18:36	분광, 목탄 中 장입	10	1180	10	280			
18:38	패각, 목탄 中 장입	10	1190			2	56	
18:51	분광 장입, 장입구 갈라진 틈 황토로 메움			10	290			
18:52	목탄 中 장입	10	1200					
18:53	패각, 목탄 中 장입	10	1210			2	58	
18:58	송풍 약함, 발풀무와 병행							
19:01	분광, 목탄 中 장입	10	1220	10	300			
19:03	패각, 목탄 中 장입	10	1230			2	60	패각 소진
19:06	골구멍으로 막힌 슬래그 배 출, 송풍 상태 양호함.							
19:12	분광 장입, 추가장입 분광 100kg은 패각 없이 진행함.			10	310			
19:13	목탄 中 장입	20	1250					
19:17	분광 장입			10	320			
19:18	목탄 中 장입	20	1270					
19:26	분광 장입			10	330			
19:27	목탄 中 장입, 불꽃이 많이 튼	20	1290					목탄에 습기가 많을 경우 불 꽃이 튼
19:31	4번, 6번 온도계 평균 1334℃, 전체 평균 1262℃로 노의 온 도가 상승하고 있음							
19:34	분광 장입			10	340			
19:35	목탄 中 장입	20	1310					
19:41	골구멍 막힘, 쇠창으로 뚫음, 장입구의 불꽃이 약함. 골구 멍으로 슬래그 배출, 쇠창에 슬래그 묻어 나옴, 슬래그 역 류함							
19:47	골구멍으로 슬래그 역류, 잡 쇠구멍으로 슬래그 배출하기 위해 잡쇠구멍 뚫음, 쇠창+집 게+망치 사용, 슬래그가 많이 형성되지 않았음.							슬래그 골구멍과 잡쇠구멍 사 이 엉켜있는 것으로 추정됨
19:49	분광 장입			10	350			

시간	조업내용	목탄		분광		패각		비고
		장입량	총량	장입량	총량	장입량	총량	
19:50	목탄 中 장입	20	1330					
19:51	분광 장입			10	360			
19:52	목탄 中 장입	20	1350					
19:56	초롱구멍 뚫어 선철 출탕준비, 정+집게+망치 사용, 가마벽 편 등 제거, 선철이 초롱구멍을 막고 있어 잘 뚫리지 않음							
20:01	분광, 목탄 中 장입, 잡쇠구멍 뚫음, 선철이 초롱구멍 아래쪽에 형성되어 있어 출탕이 어려움, 초롱구멍은 쇠창굴기 정도만 뚫린 상태임, 경사지게 구멍을 뚫어 아래에 형성된 선철을 출탕 시킬 예정임	20	1370	10	370			
20:03	분광, 목탄 中 장입	10	1380	10	380			목탄 및 분광 장입 종료
20:11	초롱구멍 뚫음, 쇠창으로 뚫리지 않아 전기 드릴 사용, 1차 출탕 시 생성되었던 선철이 냉각되어 입구를 막고 있는 상태, 출탕되지 않음							
20:18	판장쇠바탕을 제거한 후 초롱구멍을 확장하여 뚫음							
20:20	가마벽의 일부가 뜯겨져 나옴							
20:24	선철 출탕됨, 약간의 불꽃 튼, 처음에는 선철과 슬래그가 섞인 상태로 출탕되다가 약 3분 뒤 불꽃을 튀기며 선철만 출탕됨, 슬래그는 흑색을 띰							3차 출탕
20:25~ 21:30	초롱구멍을 막지 않고 계속 열어둔채 2회 더 선철과 슬래그 배출함							4·5차 출탕
21:30	앞창 전기드릴로 제거							
21:39~ 22:02	쇠창에 선철 찌꺼기 두껍게 묻어나옴, 끈적거리는 선철이 초롱구멍을 통해 일부 출탕됨, 이후 선철 일부가 가는 줄 모양으로 출탕됨							6차 출탕
22:09	초롱구멍 넓게 뚫음, 슬래그+목탄+선철이 느리게 흘러내림							7차 출탕, 슬래그 용융 온도 1200℃, 분광 용융온도 1300℃, 온도 차이 정도에 따라 분리되는데 온도차가 없을 경우 슬래그와 선철이 엉킨 상태로 배출됨
22:13	생성물 제거							

시간	조업내용	목탄		분광		패각		비고
		장입량	총량	장입량	총량	장입량	총량	
22:35	앞창 15cm 정도 크기로 확장함, 장입구 불꽃 활발함							
22:38	6차 출탕 선철 이동							8차 출탕
22:44	온도계 제거							
23:15	풀무와 기계송풍 병행하여 목탄을 빨리 연소시킴. 전기드릴로 앞창 개방 시작							내부에 남아있는 선철을 출탕시켜야 함, 냉각되면 배출 어려움
23:20~ 23:28	앞창 하부 30cm 정도 개방, 가마벽과 목탄이 흘러내림, 상부 20cm는 열기 때문에 제거하기 어려움, 하부 개방부에 황토 벽돌을 쌓아 열기를 막은 후 상부를 제거함, 앞창 개방 후 흘러내린 목탄과 가마벽을 배출함							
23:31	기계송풍 중지, 목탄 약 40cm 정도 높이까지 쌓여 있음, 목탄과 잔존하는 선철 및 슬래그 노 밖으로 배출							9차 출탕
23:43	목탄 및 슬래그 마지막으로 제거, 골구멍 드러남, 슬래그가 녹아내려 엉켜있음							

4. 온도 변화표

시간	온도(°C)						전체 평균	상부 평균 (2.4. 6번)	하부 평균 (1.3. 5번)	비고
	1	2	3	4	5	6				
8:50	808	682	933	535	1057	716	788	644	932	
8:52	798	690	919	566	1056	725	792	660	924	목탄 만장입 완료
9:00	782	745	905	641	1016	738	804	708	901	
9:03	780	752	903	656	975	741	801	716	886	
9:05	887	795	977	729	1046	768	867	764	970	
9:10	938	870	1060	861	1120	882	955	871	1039	
9:15	981	949	1151	1006	1163	985	1039	980	1098	
9:20	1026	1002	1174	1092	1175	1074	1090	1056	1125	
9:25	1046	1050	1185	1141	1200	1099	1120	1096	1143	
9:29	1018	1075	1177	1146	1213	1108	1122	1109	1136	1번 온도계 조정(불이 밖으로 새어 나와 위치 조정하고 점토바름)
9:30	813	1074	1157	1134	1210	1094	1080	1100	1060	
9:35	789	1088	1143	1135	1120	992	1044	1071	1017	
9:37	805	1097	1149	1152	1156	1100	1079	1116	1036	1번 온도계 조정(온도 낮아 위치 조정), 5, 6번 온도계 조정(불이 밖으로 새어 나 와 위치 조정하고 점토 바름)
9:40	840	1110	1165	1171	1170	1115	1095	1132	1058	
9:45	866	1136	1190	1190	1190	1148	1120	1158	1082	
9:50	888	1152	1204	1225	1204	1167	1140	1181	1098	
9:55	816	1160	1176	1211	1168	1150	1113	1173	1053	
10:00	918	1165	1193	1250	1207	1101	1139	1172	1106	
10:05	937	1179	1206	1264	1221	1210	1169	1217	1121	
10:10	944	1184	1219	1313	1235	1225	1186	1240	1132	
10:15	957	1193	1226	1284	1242	1235	1189	1237	1141	
10:17	963	1200	1232	1294	1249	1240	1196	1244	1148	1번 온도계 조정(온도 낮아 위치 조정)
10:20	1036	1207	1240	1293	1257	1241	1212	1247	1177	
10:21	1113	1208	1236	1278	1257	1242	1222	1242	1202	1번 온도계 조정(온도 낮아 위치 조정)
10:25	1026	1196	1212	1233	1218	1216	1183	1215	1152	
10:30	1094	1210	1225	1257	1243	1234	1210	1233	1187	
10:35	1091	1215	1231	1251	1240	1227	1209	1231	1187	
10:40	1098	1219	1233	1255	1245	1233	1213	1235	1192	
10:45	1095	1219	1234	1249	1246	1230	1212	1232	1191	
10:50	1107	1223	1245	1264	1258	1241	1223	1242	1203	
10:55	1100	1223	1244	1262	1260	1239	1221	1241	1201	

시간	온도(°C)						전체 평균	상부 평균 (2.4. 6번)	하부 평균 (1.3. 5번)	비고
	1	2	3	4	5	6				
11:00	1101	1222	1229	1255	1257	1238	1217	1238	1195	
11:05	1109	1226	1220	1270	1258	1241	1220	1245	1195	
11:06	1104	1225	1227	1251	1255	1239	1216	1238	1195	분광 장입
11:10	1104	1228	1216	1267	1253	1237	1217	1244	1191	
11:15	1101	1220	1212	1277	1252	1235	1216	1244	1188	
11:20	1095	1228	1214	1284	1249	1221	1215	1244	1186	
11:25	1094	1230	1222	1300	1255	1225	1221	1251	1190	
11:30	1081	1225	1217	1290	1252	1215	1213	1243	1183	
11:35	1086	1230	1224	1286	1259	1223	1218	1246	1189	
11:40	1080	1230	1222	1270	1260	1224	1215	1241	1187	
11:45	1082	1230	1224	1287	1254	1226	1217	1247	1186	
11:50	1084	1231	1220	1291	1257	1233	1219	1251	1187	
11:55	1069	1227	1206	1286	1251	1227	1211	1246	1175	
12:00	1068	1228	1202	1288	1245	1226	1209	1247	1171	
12:05	1074	1230	1201	1290	1255	1230	1213	1250	1176	
12:10	1070	1227	1197	1272	1258	1228	1208	1242	1175	
12:15	1068	1227	1199	1274	1262	1234	1210	1245	1176	
12:20	1071	1228	1206	1266	1259	1234	1210	1242	1178	
12:25	1063	1226	1209	1260	1256	1237	1208	1241	1176	
12:30	1063	1220	1210	1262	1249	1234	1206	1238	1174	송풍 중지(물무 앞 철판수리)
12:35	1044	1214	1206	1240	1233	1221	1193	1225	1161	
12:40	1054	1217	1211	1242	1234	1220	1196	1226	1166	
12:45	1048	1212	1210	1243	1236	1221	1195	1225	1164	
12:50	1044	1208	1209	1247	1232	1221	1193	1225	1161	
12:55	1043	1207	1211	1254	1228	1224	1194	1228	1160	
13:00	1044	1206	1209	1200	1220	1229	1184	1211	1157	
13:03	1035	1203	1200	1240	1215	1223	1186	1222	1150	송풍관 점검(분리)
13:05	1028	1201	1195	1231	1212	1221	1181	1217	1145	
13:08	1019	1195	1182	1224	1198	1215	1172	1211	1133	송풍관 연결(송풍 시작)
13:10	1058	1201	1188	1232	1203	1224	1184	1219	1149	
13:15	1076	1208	1198	1232	1215	1244	1195	1228	1163	
13:17	1075		1215	1245	1224	1248	1201	1246	1171	2번 온도계 고장
13:20	1065		1211	1243	1220	1236	1195	1239	1165	
13:25	1077		1229	1259	1236	1243	1208	1251	1180	
13:30	1077		1235	1269	1246	1247	1214	1258	1186	
13:35	1077		1254	1276	1258	1255	1224	1265	1196	
13:40	1076		1252	1279	1259	1266	1226	1272	1195	

시간	온도(°C)						전체 평균	상부 평균 (2.4. 6번)	하부 평균 (1.3. 5번)	비고
	1	2	3	4	5	6				
13:45	1083		1268	1294	1264	1285	1238	1289	1205	
13:50	1061		1228	1266	1252	1263	1214	1264	1180	
13:55	1072		1227	1280	1257	1263	1219	1271	1185	
14:00	1062		1213	1274	1254	1203	1201	1238	1176	
14:05	1065		1204	1276	1259	1248	1210	1262	1176	
14:10	1070		1209	1278	1263	1252	1214	1265	1180	
14:15	1065		1197	1276	1266	1253	1211	1264	1176	
14:20	1070		1206	1275	1271	1259	1216	1267	1182	
14:25	1065		1200	1264	1273	1246	1209	1255	1179	
14:30	1070		1200	1264	1273	1246	1210	1255	1181	송풍 중지(폴무 앞 철판 수리)
14:35	1043		1170	1232	1255	1226	1185	1229	1156	송풍 시작
14:40	1047		1170	1231	1256	1221	1185	1226	1157	송풍관 분리(송풍관 뚫음)
14:45	1018		1150	1212	1239	1207	1165	1209	1135	
14:47	1032		1151	1218	1233	1207	1168	1212	1138	송풍관 연결
14:50	1055		1163	1244	1242	1215	1183	1229	1153	
14:55	1063		1184	1260	1255	1222	1196	1241	1167	
15:00	1068		1189	1289	1265	1235	1209	1262	1174	
15:05	1068		1192	1276	1274	1230	1208	1253	1178	
15:10	1061		1183	1267	1272	1224	1201	1245	1172	
15:15	1065		1192	1268	1274	1224	1204	1246	1177	
15:20	1059		1183	1256	1267	1217	1196	1236	1169	
15:25	1068		1190	1259	1266	1216	1199	1237	1174	기계 송풍 시작
15:30	1069		1194	1254	1274	1211	1200	1232	1179	
15:35	1070		1199	1256	1270	1206	1200	1231	1179	
15:40	1078		1193	1255	1282	1213	1204	1234	1184	
15:45	1080		1206	1252	1276	1217	1206	1234	1187	
15:50	1082		1203	1261	1279	1226	1210	1243	1188	기계 송풍 30분 계획하였으나 발품무로 변경
15:55	1081		1183	1270	1278	1228	1208	1249	1180	
16:00	1074		1182	1263	1264	1222	1201	1242	1173	
16:05	1070		1185	1263	1273	1217	1201	1240	1176	
16:10	1081		1219	1273	1285	1226	1216	1249	1195	
16:15	1081		1214	1275	1284	1228	1216	1251	1193	
16:20	1086		1206	1286	1278	1232	1217	1259	1190	
16:25	1087		1203	1301	1280	1228	1219	1264	1190	
16:30	1092		1223	1305	1290	1220	1226	1262	1201	
16:35	1093		1224	1294	1285	1232	1225	1263	1200	

시간	온도(°C)						전체 평균	상부 평균 (2.4. 6번)	하부 평균 (1.3. 5번)	비고
	1	2	3	4	5	6				
16:40	1090		1225	1284	1266	1228	1218	1256	1193	
16:45	1085		1208	1272	1266	1215	1209	1243	1186	
16:50	1093		1210	1267	1268	1220	1211	1243	1190	
16:55	1099		1219	1286	1275	1227	1221	1256	1197	
17:00	1094		1220	1282	1272	1230	1219	1256	1195	
17:02	1094		1213	1277	1266	1232	1216	1254	1191	씻물 확인(송풍 중지)
17:05	1076		1194	1258	1250	1221	1199	1239	1173	
17:10	1075		1187	1255	1248	1215	1196	1235	1170	
17:15	1091		1204	1272	1258	1223	1209	1247	1184	씻물 출탕 시작
17:20	1091		1204	1276	1256	1228	1211	1252	1183	
17:25	1093		1207	1285	1261	1230	1215	1257	1187	
17:30	1092		1213	1302	1261	1232	1220	1267	1188	
17:35	1086		1192	1298	1256	1236	1213	1267	1178	
17:40	1097		1212	1315	1267	1244	1227	1279	1192	
17:45	1098		1201	1310	1264	1252	1225	1281	1187	
17:50	1092		1175	1301	1258	1253	1215	1277	1175	
17:55	1091		1191	1298	1264	1250	1218	1274	1182	
18:00	1092		1204	1300	1266	1259	1224	1279	1187	기계송풍 시작
18:05	1094		1205	1309	1270	1269	1229	1289	1189	
18:10	1095		1206	1314	1269	1278	1232	1296	1190	
18:15	1097		1207	1316	1270	1273	1232	1294	1191	
18:20	1100		1205	1328	1264	1281	1235	1304	1189	
18:25	1102		1203	1327	1259	1284	1235	1305	1188	
18:30	1104		1204	1320	1253	1286	1233	1303	1187	
18:35	1096		1189	1309	1248	1276	1223	1292	1177	
18:40	1106		1183	1318	1255	1283	1229	1300	1181	
18:45	1108		1181	1323	1248	1272	1226	1297	1179	
18:50	1107		1184	1318	1253	1274	1227	1296	1181	
18:55	1108		1186	1318	1254	1280	1229	1299	1182	
19:00	1110		1188	1311	1256	1286	1230	1298	1184	기계송풍+발 풀무
19:05	1095		1192	1276	1248	1269	1216	1272	1178	송풍관 뚫음
19:10	1124		1195	1296	1291	1315	1244	1305	1203	기계송풍만 실시
19:15	1125		1199	1318	1303	1337	1256	1327	1209	
19:20	1124		1201	1318	1312	1343	1259	1330	1212	
19:25	1122		1208	1336	1313	1324	1260	1330	1214	
19:30	1121		1213	1343	1308	1326	1262	1334	1214	
19:35	1119		1220	1334	1270	1330	1254	1332	1203	

시간	온도(°C)						전체 평균	상부 평균 (2.4. 6번)	하부 평균 (1.3. 5번)	비고
	1	2	3	4	5	6				
19:38	1120		1223	1326	1258	1323	1250	1324	1200	송풍관 뚫음
19:40	1114		1225	1315	1254	1310	1243	1312	1197	
19:45	1096		1229	1284	1243	1273	1225	1278	1189	
19:47	1101		1227	1277	1236	1276	1223	1276	1188	슬래그 확인
19:50	1106		1227	1281	1233	1283	1226	1282	1188	
19:54	1120		1225	1311	1227	1310	1238	1310	1190	기계송풍+발물무
19:55	1121		1225	1321	1227	1313	1241	1317	1191	
20:00	1129		1229	1357	1225	1353	1258	1355	1194	
20:05	1134		1233	1364	1225	1377	1266	1370	1197	발물무 중지
20:10	1129		1237	1350	1224	1377	1263	1363	1196	
20:14	1127		1241	1341	1223	1374	1261	1357	1197	기계송풍+발물무
20:15	1128		1242	1342	1223	1377	1262	1359	1197	
20:18	1129		1243	1347	1219	1371	1261	1359	1197	판장쇠바탕 이동
20:20	1130		1243	1348	1219	1372	1262	1360	1197	
20:25	1129		1246	1343	1215	1352	1257	1347	1196	씻물 확인
20:30	1121		1251	1336	1211	1340	1251	1338	1194	
20:35	1126		1253	1331	1209	1336	1251	1333	1196	
20:40	1124		1256	1341	1206	1346	1254	1343	1195	송풍 중지
20:45	1130		1260	1332	1205	1342	1253	1337	1198	
20:48	1117		1260	1334	1205	1335	1250	1334	1194	조업 종료
20:50	1116		1260	1333	1205	1335	1249	1334	1193	
20:55	1112		1258	1331	1205	1335	1248	1333	1191	
21:00	1110		1257	1327	1205	1319	1243	1323	1190	
21:10	1105		1252	1313	1203	1293	1233	1303	1186	
21:20	1100		1248	1314	1205	1295	1232	1304	1184	
21:30	1093		1241	1312	1207	1288	1228	1300	1180	
21:40	1092		1233	1318	1211	1296	1230	1307	1178	
21:44	1083		1214	1253	1223	1200	1194	1226	1173	온도계 제거
평균	1065	1160	1201	1260	1242	1282	1208	1259	1169	

