사진 116. 파쇄 및 분류된 잡쇠

사진 117. 수습된 잡쇠들

사진 118. 철가루 수습

사진 119.수습된 잡쇠 일괄

사진 120. 잡쇠에서 분리된 불순물 일괄

2. 단야

단야실험은 제련에서 생산된 잡쇠를 반용융상태로 가열해 불순물을 분리하고 단타를 통해 철괴를 생산하는 정련단야, 이 철괴를 다시 가열 · 단타해 불순물을 타출시키고 판상 · 봉상 등의 철 소재를 제작하는 단련단야, 철 소재를 이용해 원하는 모양의 철기를 제작하는 성형단야의 세 단계로 구분해 실험을 진행하였다.

1) 정련단야

정련단야로의 바닥에 철광석가루 약 15.5kg을 3㎝ 두께로 채운 후 장작을 장입하고 점화하였다. 송풍은 손풀무 2개를 사용하였으며, 송풍 시작 약 15분 후 노 내 온도가 900~950℃로 계측되었다. 소재는 실험에 적합한 크기에 따라 한 개 혹은 여러 개를 짚재를 섞은 황톳물에 묻힌 후 노에 투입하였다. 첫 대상은 소재 13번(2.82kg)으로 하였으며 투입 후 목탄(7kg)과 철광석가루(1kg)를 추가로 장입하고, 송풍을 통해 노 내부 온도를 1,200~1,300℃까지 올렸다. 40분 정도 가열 후 소재를 꺼내 단타한 후 물에 담가 냉각시키는 과정을 반복하였다.

사진 121. 철광석가루 깔기
(10:26)

사진 122. 소재에 황톳물 입히기
(11:06)

사진 123. 철광석가루 장입
(12:32)

사진 124. 소재 가열
(14:44)

사진 125. 소재 단타
(16:30)

사진 126. 단타한 소재 냉각
(16:42)

표 13. 정련단야 진행표

시간	조업내용	온도		시간	조업내용	온도	
		1	2			1	2
1차 정련(소재 13)				11:45	송풍 속도 올림	1,250	1,150
10:25	철광석가루 15.5㎏ 3㎝ 두께로 깜			11:47	소재 13 단타 시작, 송풍 정지	941	1,050
10:32	장작 장입 및 점화			2차 정련(소재 6-1)			
10:33	송풍 개시			11:56	목탄 6.4㎏ 투입	630	740
10:48	목탄(중탄) 10㎏ 투입	950	901	11:58	소재 6을 6-1, 6-2 두개로 분리		
10:52	목탄 4.5㎏ 투입	1,140	985	12:02	6-1 투입, 송풍 시작	867	777
11:00	송풍 중지	1,030	1,000	12:03	목탄 3.9㎏ 투입	1,200	930
11:05	소재 13번 투입	967	946	12:18	소재 투입 후 15분 경과	1,400	1,186
11:09	송풍 시작, 목탄 7㎏ 투입	1,057	1,150	12:31	철광석가루 1㎏ 투입	1,336	1,180
11:11	송풍 후 급격한 온도 상승	1,227	1,385	12:35	철광석가루 1㎏ 투입, 송풍 속도 올림	1,287	1,138
11:18	송풍 속도 줄임	1,250	1,250	12:43	소재 6-1 확인, 노 내 슬레그 확인		
11:22	철광석가루 1㎏ 투입	1,254	1,275	12:45	소재 6-1 불출 후 단타 시작		
11:26	목탄 1.4㎏ 투입	1,206	1,330	12:48	단타 종료 후 냉각		
11:40	작업공 개방 후 내부 목탄 제거	1,275	1,248	3차 정련(소재 3 · 7 · 9)			
11:43	철광석가루 1㎏ 투입	1,300	1,200	13:53	철광석가루 5㎏ 투입	476	445

13:56	소재 3 · 7 · 9 투입, 목탄 9.4㎏ 투입	409	367	15:29	목탄 투입, 철광석가루 1㎏ 투입	724	642
14:02	송풍 시작	1,121	848	15:32	소재 1 · 4 · 5 · 10 · 11 투입	691	751
14:28	철광석가루 1㎏ 투입			15:33	송풍 시작		
14:30	철광석가루 1㎏ 투입, 목탄 1㎏ 투입	1,395	1,207	15:37	목탄 11㎏ 투입	1,187	1,248
14:35	송풍 속도 올림	1,400	1,267	15:41	송풍관 연결부분 보수		
14:40	소재 단타 시작			15:54	작업공 개방, 철광석가루 1㎏ 투입		
14:42	소재 3 · 7 · 9 불출 후 냉각			15:55	소재 단타 시작, 송풍 정지		
4차 정련(소재 2 · 8)				15:57	소재 1 · 4 · 5 · 10 · 11 단타 후 냉각		
14:52	목탄 8.2㎏ 투입			6차 정련(소재 6-2 · 12)			
15:00	소재 2 · 8 투입 후 12분 경과	1,342	1,248	16:01	철광석가루 1㎏, 소재 6-2 · 12 투입	972	868
15:10	철광석가루 1㎏ 투입	1,392	1,240	16:04	송풍 시작	931	779
15:11	목탄 0.7㎏ 투입	1,342	1,200	16:08	목탄 11㎏ 장입	1,183	931
15:14	송풍 속도 가속, 작업공 개방	1,393	1,178	16:26	철광석가루 1㎏ 투입	1,370	1,291
15:20	철광석가루 1㎏ 투입	1,320	1,098	16:28	송풍 속도 올림	1,342	1,257
15:21	소재 2 · 8 단타 시작 후 냉각			16:30	소재 단타 시작		
5차 정련(소재 1 · 4 · 5 · 10 · 11)				16:31	소재 2 · 12 단타 후 냉각		
15:25	조업 중 첫 슬래그 제거			비고	* 소재 투입 시 볏짚 재 + 황톳물을 바름		

소재는 적합한 크기 및 무게에 따라 정련되었으며, 2가지 이상의 소재가 한 번에 투입되기도 하였다. 1단계 정련단야가 끝난 철괴는 정련된 순서에 따라 알파벳의 새로운 소재명을 부여하였다. A(원 소재 13)는 정련 전 2.82㎏에서 정련 후 2.08㎏으로 무게가 약 26% 감소하였고, B(원 소재 6-1)는 43%, C(원 소재 3 · 7 · 9)는 53%, D(원 소재 2 · 8)는 72%, E(원 소재 1 · 4 · 5 · 10 · 11)는 51%, F(원 소재 6-2 · 12)는 39%가 감소하였다. 소재에 따라 감소의 편차가 큰 것을 확인할 수 있었으며, 원 소재의 성분과 조직 등이 영향을 미친 것으로 생각된다.

표 14. 정련단야 결과표 (무게 ㎏)

원(元) 소재명		13	6-1	3	7	9	2	8	1	4	5	10	11	6-2	12
무게	정련 전	2.82	5.4	1.46	1.1	1.92	1.6	1.3	0.598	1.04	0.67	0.57	0.6	0.8	1.33
				4.48			2.9		3.478					2.13	
	정련 후	2.08	3.1	2.08			0.8		1.7					1.3	
새 소재명		A	B	C			D		E					F	

사진 127. 정련단야 결과물

2) 단련단야

단련단야는 정련단야에서 만들어진 철괴를 재료로 하여 실제로 유통이 가능한 일정한 형태의 철제품을 생산하는 공정이다. 본 실험에서는 황남대총 남분 부곽에서 출토된 철기를 모델로 하였다. 앞서의 정련단야에서 생산된 철괴를 단련단야로에서 다시 가열하면서 반복 단타를 통해 소재 B와 소재 E의 봉상철정 2점을 제작하였다. 제작과정에서 금속분석 시료 채취 및 5~7회의 단접과 반복적인 단타를 통해 불순물을 제거하여 무게 80% 정도가 감소하였다.

당초 최소 각 2점의 봉상 · 판상 철정을 제작해 성형단야의 소재로 하려고 계획하였으나, 제한된 시간적 조건으로 인해 봉상철정 2점을 제작할 수 있었으며, 이를 다시 분할해 최종적으로 4점의 소형 철정을 제작하게 되었다. 분명한 것은 이러한 시간적 문제만 해결된다면 충분한 양의 철 소재를 제작할 수 있음이 확인되었다는 점이다.

사진 128. 소재 판상으로 만들기
(18:10)

사진 129. 소재(B) 투입 준비
(18:15)

사진 130. 가열된 소재 반으로 절단
(18:23)

사진 131. 단련단야로 및 단타광경
(19:17)

사진 132. 잘라서 합단하기
(19:28)

사진 133. 가열된 소재 접기
(20:30)

사진 134. 합단 후 성형하기
(20:30)

사진 135. 소재에 짚재황톳물 입히기
(20:33)

사진 136. 단타하기
(20:38)

사진 137. 가열된 소재
(21:37)

사진 138. 단타하기
(21:50)

사진 139. 마무리 성형하기
(21:53)

표 15. 정련단야 진행표

시간	조업내용	온도	시간	조업내용	온도
16:58	노 바닥 철광석가루 10㎏ 깜		19:43	재투입	
17:06	소재 E 투입	790	19:46	재를 묻히고 단타, 9겹이 단접, 단면 장방형	
17:10	목탄 2㎏ 장입, 벽돌로 노벽을 높임	1,038	19:47	재투입	
17:21	철광석가루 0.5㎏ 투입	1,281	19:50	단타, 굵은 부분 단타 정면, 아직 층층의 틈	
17:32	소재 E 첫 단타 시작(단접은 않음)		19:51	재투입, 송풍 시작	
17:34	소재 E 재투입, 송풍 시작	1,103	20:20	목탄을 덮음, 송풍 시작	1,055
17:35	목탄 2㎏ 투입	1,316	20:22	새 목탄 10.5㎏ 투입	
17:38	두 번째 단타 시작(단접은 않음)		20:30	단타 시작, 절반 접어 9겹이 18겹으로 됨	
17:41	재 묻힌 후 황톳물에 담금		20:33	재투입	
17:42	재투입, 송풍 시작	1,021	20:38	단타, 짧게 정면	
17:47	세 번째 단타 시작, 일부 깨어지나 성형 가능		20:39	재투입	
17:48	재투입		20:40	단타 시작, 재 묻히고 정면 단타	
17:49	목탄 2㎏ 투입		20:41	재투입, 송풍, 재만 묻히고 재투입	
17:50	네 번째 단타 시작, 재 묻히고 넓적하게 단타		20:44	단타, 간단히 정면	
17:57	다시 투입 (사용하던 목탄으로 위를 덮음)	1,188	20:46	노에 다시 투입	
18:02	다섯 번째 단타 시작, 형태 성형		20:50	단타, 정면 단타	
18:04	재투입, 송풍 시작		20:54	단타, 조금 정면 후 재 묻히고 재투입	
18:06	여섯 번째 단타시작, 형태 성형, 재투입		20:56	단타, 대망치와 작은 망치 교대로 단타 정면	
18:07	7번째 단타 시작 후 냉각		20:58	손망치로 정면 후 물에 담구고 재투입	
18:07	판상철부 완성(1.7㎏→0.7㎏)		21:00	단타, 대망치와 손망치 이용 세밀 조정	
18:15	소재 B 3.1㎏ 중 1.8㎏ 분리 투입		21:03	다시 투입	
18:22	불순물 제거 후 재투입	1,150	21:04	단타, 길이 점점 늘임	
18:27	목탄 2㎏ 장입		21:05	재투입, 송풍, 재만 묻힌 뒤 재투입	
18:35	온도 과다상승, 상부 목탄 2㎏ 제거	1,375	21:06	단타, 간단한 정면	
18:36	첫 단타 시작		21:07	다시 투입	
18:47	재투입		21:08	단타, 간단한 정면, 재투입	
18:55	두 번째 단타(파편 많이 튐)		21:10	단타, 세장방형이 됨	
18:57	세 번째 단타, 재투입	1,226	21:10	2등분(접은 부분→a, 안 접은 부분→b)	
19:10	네 번째 단타, 형태정형	1,320	21:21	a 투입, 송풍	
19:15	끝단 냉각, 넙적한 형태로 정면, 끝단을 잘라냄		21:22	단타	
19:18	3등분(자르지는 않고 홈만 냄) 재투입		21:30	b 투입, 송풍	1,285
19:20	홈을 따라 자른 후 재투입		21:35	b 황톳물 바르고 단타, 재투입	
19:21	두 번째 홈을 따라 절단(총 3등분)		21:50	투입 · 단타 반복	1,170
19:28	소재 E와 소재 B를 포개어 재투입		21:53	단련단야작업 마무리	
19:41	단타 시작		22:02	철 소재 a→0.300㎏, 철 소재 b→0.680㎏	
비 고	* 소재 투입 시 볏짚 재+황톳물을 바름				

가장 큰 소재인 B를 절단하여 E와 함께 봉상철정 2점을 제작하였다. 봉상철정 1은 길이 35㎝, 너비 1㎝, 무게 300g의 단면 방형이며, 단접을 통해 18겹으로 제작되었다. 봉상철정 2는 길이 35㎝, 너비 2㎝, 무게 600g으로 제작되었으며, 단접은 2겹으로 하였다. 단면형태는 세장방형이고 봉상철정 1에 비해 다소 넓은 형태로 제작되었다.

표 16. 단련단야 결과표

새 소재명	B	E
단련 전(㎏)	3.1	1.7
단련 후(㎏)	가열탄타-4회	0.7(가열 단타-6회)
	합단(19:29) / 가열탄타-14회	
	a(21:10)	b(21:10)
		가열탄타-5회
정련단야 종료	0.3(22:02)	0.68(22:02)
새 소재명	봉상철정 1, 300g-18겹	봉상철정 2, 680g-2겹

사진 140. 완성된 봉상철정

3) 성형단야 실험 과정

단련단야실험을 통해 생산된 생산품의 크기를 고려하여 봉상철정 1로는 낫을, 크기가 조금 큰 봉상철정 2로는 2점의 창을 제작하였다.

(1) 낫

단련단야에서 생산된 봉상철정 1을 사용해 날 부분이 휘어진 낫(곡인철겸) 1점을 제작하였다. 봉상철정 1은 무게 약 300g으로, 앞서 기술한 바와 같이 18겹으로 포개어 제작하였으며 단면은 정사각형에 가까운 형태이다. 낫의 제작과정은 다음과 같다.

봉상철정을 약 1,200℃의 단야로(단련단야로 · 성형단야로 겸용)에서 가열한 뒤, 5분간 단타와 냉각을 반복하며 얇게 펴는 작업을 하였다. 철정을 약 3㎝ 너비로 편평해질 때까지 단타한 후 여분의 철정은 펴지 않고 미리 절단하였다. 이후 낫이 될 부분은 황톳물과 재를 묻혀 노에서 재가열해 날을 수직으로 세워 앞뒤로 뒤집어가며 단타작업을 하였다. 이는 처음 철정을 편평하게 만들면서 얇아진 양 끝단을 보강하고, 휘어진 형태의 낫을 성형하기 위한 작업이다. 어느 정도 낫의 형태가 만들어진 후 단면 'ㄱ' 자 형태의 기부(基部) 제작을 위해 끌망치를 이용해 끝단을 자른 후 모루 끝에 낫을 대고 단타해 꺾인 형태를 성형하였다. 이 과정을 통해 최종적으로 길이 21.6㎝, 너비 2.5㎝, 무게 0.13㎏의 낫이 제작되었다.

사진 141. 소재 펴기 ①

사진 142. 소재 펴기 ②

사진 143. 성형하기

사진 144. 성형 마무리

사진 145. 자루 장착하기

사진 146. 자루 장착

사진 147. 완성된 낫

위와 같은 제작과정에서 0.17kg 정도의 소재철 무게 감소가 확인되었는데, 이는 단조박편 · 입상재 등의 불순물 영향도 있겠지만, 대부분은 상기한 바와 같이 철정을 펴는 과정에서 절단한 여분의 무게이다. 이 여분은 철정 역시 곧바로 재사용할 수 있다. 봉상철정에서 낫을 완성하는 데까지 소요된 시간은 15분 정도였으며, 제작과정에서 소재의 손실이 거의 없다는 점과 숙련된 장인의 작업을 통해 짧은 시간에 제작할 수 있음이 확인되었다.

(2) 창

단련단야에서 생산된 봉상철정 2를 사용해 2점의 창을 제작하였다. 봉상철정 2는 무게 680g 정도로, 전술한 바와 같이 2겹으로 포개어 제작되었다. 봉상철정 1의 비해 좀 더 넓게 제작되어 단면형태가 직사각형에 가깝다. 창 제작을 위해 봉상철정 2를 노에 넣어 약 1,200℃에서 가열한 뒤 공부(銎部)가 될 부분을 약 5분간 단타하였으며, 이러한 단타와 가열을 반복해 넓게 펴는 작업을 하였다. 이 작업을 통해 철정 끝의 평면형태를 'Y'자 형태로 넓게 성형하였다. 이후 공부 제작을 위해 말았을 때 제비꼬리모양(燕尾形)이 되도록 하기 위해 끝단을 끌망치로 이용해 'W'자 형태로 잘라내고, 못망치를 사용해 양 끝을 투공한 뒤(자루 결합 시 고정을 위한 못구멍), 넓게 펴진 부분을 세워 단타해 보강 및 정면작업을 하였다. 공부 제작의 마지막은 이 넓게 펴진 끝단 위에 원뿔형태의 쇠말뚝을 올린 뒤 쇠말뚝의 곡면을 이용해 돌려가며 단타해 공부를 원형으로 성형하였다.

창의 날 부분인 뾰족한 첨부(尖部)는 아직 아무런 성형을 거치지 않아 처음 봉상철정의 형태 그대로이다. 철정의 크기에 여유가 있어 필요한 부분만 남긴 후 나머지는 절단하였다(절단한 철정으로는 창 2를 제작함). 첨부가 될 부분은 가열 뒤 단타해 단면 정사각형의 모

양으로 성형한 후, 당초 계획했던 창의 길이까지 길이를 늘이는 단타작업을 가하였다. 첨부의 가장 끝부분은 자르지 않고 삼각형의 형태로 기울여 단타 및 성형해 버드나뭇잎모양(柳葉式)의 첨부를 만들며 마무리하였다. 완성된 창 1은 길이 23.5㎝, 무게 0.29㎏이다. 창 2 역시 같은 방법으로 제작되었으며, 길이는 19.2㎝, 무게는 0.2㎏이다.

한편 제작과정에서 창 1은 기부(基部)를 연미형으로 만들고자 하는 당초 의도와는 다르게 절단 위치를 잘못 선택한 결과, 직기형(直基形)과 연미형의 중간형태가 되어버려 결과적으로 원하는 형태의 창을 완벽하게 성형제작하지 못하고 말았다. 하지만 이를 교훈삼아 창 2는 당초 계획한 모양과 크기로 제작되었다.

사진 148. 공부 펴기

사진 149. 공부 성형하기

사진 150. 공부 성형 완료

사진 151. 신부 성형하기

사진 152. 창 1 제작 완료

사진 153. 창 2 제작 완료

또 제작과정에서 0.2㎏ 정도의 소재철 무게감소가 확인되었는데, 이는 여분의 철로 연미형 형태를 위해 절단한 부분 등으로 금속분석의 시료로 사용되었다. 봉상철정에서 창까지의 제작시간은 노의 가열시간을 제외하고 30~45분이 소요되었다. 이번 실험을 통해 봉상철정은 낫과 창 제작에 매우 효율적인 소재임을 알 수 있었으며, 잘라낸 여분의 철은 다른 소재와 단접해 또 다시 철기를 제작할 수 있으므로 소재의 손실도 크지 않다는 것을 확인하였다.

사진 154 완성된 창 1

사진 156. 완성된 창 2

표 17. 성형단야 진행표

시간	조업내용	온도(℃)	시간	조업내용	온도(℃)
10:00	점화 및 송풍 시작		11:25	재가루를 묻히고 재투입	
10:15	목탄 15㎏ 장입		11:29	재 묻히고 단타 시작, 여러 면 정면	
10:25	첫 단타(시연), 소재 2 공부 제작, 끝단 넓힘	1,250/1,097	11:31	재 묻히지 않고 단타, 재투입	
10:28	소재 재투입, 정련단야로의 목탄 약 1㎏ 이동	1,180/–	11:34	형태 조정 단타	
10:30	공부가 될 단부를 폄		11:36	공부 제작 위해 넓게 펴는 단타	
10:31	양 끝단을 자름(연미형 공부를 위해)	1,219/–	11:37	연미형 공부 제작 위해 끝단 M자 절단	
10:33	투공 후 재투입	1,243/–	11:40	끝단 형태 조정	
10:34	쇠말뚝을 이용 공부 형태 성형	1,260/1,180	11:42	양 끝단 송곳으로 투공(두 군데)	
10:37	공부를 펴서 늘이기 위해 더 길게 핌		11:44	쇠말뚝 이용 공부 형태 성형	
10:40	연미형을 위해 절단(끝단 형태 조절)	1,360/–	11:46	인부 제작 위해 늘이는 단타	
10:45	투공 후 쇠말뚝을 이용해 공부형태 조정		11:48	인부 제작 위해 늘이는 단타 지속	
10:48	투공단 정면을 위해 끝단 2㎜ 정도 자름		11:50	인부 형태 조정	
10:51	소재 2의 중간에 홈을 냄, 다시 투입	1,302/–	11:53	인부 형태 세밀조정	
10:53	홈 부분 절단(2-1, 2-2로 분리)	1,098/1,136	11:55	인부 미세조정, 창 2 완성	
10:55	인부 늘이고 형태 조정		12:03	목탄 1㎏ 정도 장입	
10:58	목탄 약 1㎏ 장입, 소재 2-2 단타		12:05	첫 단타 시작(인부를 넓힘)	
11:02	2-1 인부 제작 위해 늘이는 단타		12:07	두 번째 단타(인부 넓히는 과정 반복)	
11:03	2-2 인부 제작 위해 단타		12:09	절단 후 전면을 편평하게 조정 단타	
11:04	2-1 인부 마름모 형태, 2-2 단타 중 크랙 발생		12:11	담금질, 재 묻히고 조정 단타, 재투입	
11:06	2-1 인부 끝 절단		12:13	인부 곡면으로 조정	
11:08	2-1 인부 끝단 형태 조정		12:15	인부 단면 편평하게 조정	
11:10	2-1 인부 형태 조정, 창 1 완성		12:16	병부 끝단 2㎜ 정도 절단	
11:14	목탄 약 1㎏ 장입		12:17	병부 끝단 말아 나무자루 연결부 제작	
11:15	2-2 재투입	1,277/–	12:20	낫(0.130㎏), 잔편(0.195㎏)	
11:24	2-2 재가루 묻힌 후 단타 시작(1회 접음)				
비 고	* 소재 투입 시 볏짚 재+황톳물을 바름				

표 18. 성형단야 결과표

대상철기	창 1	창 2	창 3
재료(봉상절정)	생산품 2-1	생산품 2-2	생산품 1
작업 시간	10:25~11:10	11:24~11:55	12:05~12:20
최종 생산철기	무게 0.235㎏ 길이: 23.5㎝	무게 0.180㎏ 길이: 18.1㎝	무게 0.130㎏ 길이 21.6㎝

V

고찰

1. 실험내용 정리 ····· 85
2. 실험성과와 몇 가지 문제점 ····· 93

제Ⅴ장

고찰

이번 제철복원실험 중 제련실험에서 생성된 잡쇠의 양은 69.7㎏이고, 금속분석 결과 탄소함량이 낮고 개재물이 적은 양호한 상태의 괴련철이 주를 이루는 것으로 판정되었다. 단야실험에서는 21.208㎏의 잡쇠를 정련단야해 11.6㎏의 철괴를 생산하고, 이 중 4.8㎏을 단련단야 및 성형단야해 3점의 철기와 1점의 봉상철정을 제작하였다. 제련실험에서 별다른 문제점은 발생하지 않았으며, 대체로 설계한 바대로 실험이 진행되었고 결과물의 무게 및 상태도 양호한 것으로 파악되었다. 단야실험에서도 계획대로 실험이 진행되어 철정을 포함해 4점의 철기가 제작되었다. 결과적으로 이번 실험은 상당히 성공적인 것으로 평가할 수 있으며, 본장에서는 실험에서의 몇 가지 중요한 내용을 정리하고 도출된 문제점에 대해서도 검토해보고자 한다.

1. 실험내용 정리

1) 제련

(1) 노 구조복원 및 설계

이번 실험의 제철로 구조복원과 설계는 고고학적 연구결과와 금속공학적 이론을 충실히 반영하였다. 제련로의 모델이 된 밀양 사촌제철유적 1호 제련로는 고대의 표준적 유구라 할 수 있을 뿐만 아니라 진천 석장리, 충주 칠금동 등의 백제지역과 김해 하계리, 창원 봉림동 등 가야지역 제련로의 구조와도 공통점이 많다. 제련로의 입지 · 노의 크기와 구조 · 방습시설 · 풀무의 크기와 구조 등에 대해 발굴자료를 충분히 검토하였으며, 송풍관 역시 태토뿐만 아니라 형태 · 크기 · 장착 각도 등 세심한 부분까지 발굴자료를 근거로 해 설계하였다.

다만 조업 시의 노 바닥이 되는 노상(爐床)에 대해서는 확신을 가지지 못한 부분이 있다. 그것은 원삼국~조선시대 제련로 노상의 양상이 분명하지 않은 데서 비롯된 것인데, 발굴에서 확인된 노의 바닥이 조업 종료 후의 노상이 맞는지, 아니면 생산품의 수거 과정에서 노상이 뜯겨져 나가고 남은 하부시설인지 분명하지 않은 유적이 많다. 또한 일부 유적에서

는 모래로 이루어진 노 바닥이 잔존하는데 비해, 다른 유적에서는 점토와 목탄분이 고온으로 인해 청회색으로 경화된 양상도 확인되어 분명하지 못한 면이 있는 것이다. 이에 대해서는 반복적 실험을 통해 서서히 밝혀 나가야 할 것으로 생각된다.

한편 제련로의 높이는 남아 있는 발굴사례가 없기 때문에 중국 · 일본 등 외국 사례와 지금까지의 제철복원실험을 참고할 수밖에 없었다. 괴련철 생산의 적합성, 노 안지름 80㎝와 구조적 조화, 작업의 효율성 등을 모두 고려해 노상으로부터 200㎝로 하였으며, 원통형으로 직립하다가 상부 1/3 지점에서 안쪽으로 내경하는 구조로 설계한 것은 열효율을 반영한 금속공학적 이론을 빌린 것이다. 이처럼 고대의 원형을 알기 어려운 경우도 민속학 자료와 금속공학이론 등을 최대한 반영하였으며, 무엇보다 유사한 구조를 이용해 한국연구재단 공동연구팀과 국립중원문화재연구소 등에서 꾸준히 제련복원실험을 실시한 점이 크게 작용하였다. 이러한 결과들을 반영하였기 때문에 노 구조의 설계 및 구조복원에는 큰 문제가 없는 것으로 생각되며, 미진한 부분에 대해서는 향후 꾸준한 실험과 연구를 통해 보완해 나가야 할 것이다.

(2) 조업매뉴얼

현재 우리나라에서 고대 혹은 전통 방식의 괴련철 생산 조업매뉴얼은 제시되어 있지 않다. 한국연구재단 공동연구팀에서 2016년도 2차 제련복원실험의 목표를 괴련철로 설정하고 실험을 진행한 것이 괴련철 생산매뉴얼의 첫 수립 및 시도라 할 수 있다.[16] 본 실험 역시 고대 철기 및 제철기술 복원이 목적이므로 괴련철 생산을 목표로 하였으며, 따라서 노 내부를 침탄분위기로 만들지 않기 위해 지금까지의 실험보다 연료인 목탄의 양을 최소한 줄였다. 철광석을 깨끗하게 세척해 맥석을 골라내고 배소를 실시한 점 역시 발굴자료와 지금까지의 실험결과를 반영한 것으로, 큰 문제가 없는 것으로 판단된다.

본 실험 조업매뉴얼의 가장 큰 특징은 역시 원료/연료/첨가제의 비율이라 할 수 있겠다. 이번 실험에서는 철광석/목탄/패각/황토를 1/1.65/0.1/0.15의 비율로 장입하였는데, 패각의 장입은 우리나라 공식적 제련실험사상 거의 최초라 할 수 있다. 이 패각은 조재제의 기능으로 첨가하였는데, 뒤에서 언급하겠지만 이번 실험의 최대 성과로 슬래그의 생성과 유출이 원활했던 점을 들 수 있으며, 여기에는 패각의 첨가가 매우 유효했기 때문으로 평가된다.

목탄의 양을 줄인 점도 상당히 유효했던 매뉴얼의 하나로 평가된다. 지금까지의 실험에서는 목탄의 양을 철광석의 2.27~4.36배가 되도록 하였는데, 괴련철이 목적인 이번 실험에서는 탄소과포화 상태의 노 내 분위기를 방지하기 위해 목탄의 양을 대폭 줄여 실험사상

16) 한국연구재단 공동연구팀의 1차 제련복원실험 목표는 괴련철과 선철이 섞여 있는 혼합철괴 생산이었다. 이 실험 이전의 제련복원실험 목표는 대부분 선철 생산이었고 현재의 실험도 이러한 경향이 매우 강하다. 하지만 고대로부터 중세까지 우리나라 철기는 단조철기가 주를 이루며, 주조철기는 괭이 · 솥 등 기종과 수량이 극히 제한적이다.

가장 적은 목탄을 연료로 사용하였다. 그 결과 생성된 잡쇠가 탄소함량이 적은 괴련철이 주를 이루는 것으로 확인되었다. 더불어 철광석 등 장입물이 하강하는 속도가 빨라져 조업시간을 단축시킬 수 있었던 것도 실험의 큰 성과로 생각된다. 즉 이러한 결과는 제련의 목표가 선철 생산인지 괴련철 생산인지를 분명히 하고 이에 맞도록 목탄의 비율을 정해야 함을 의미한다.

(3) 원료 · 연료 · 첨가제의 장입

조업과정의 원료(철광석) · 연료(목탄)의 장입에 있어서는 철광석 장입은 최초 20kg을 장입하고, 이후 평균 15분 간격으로 7시간 동안 매 10kg씩 모두 28회에 걸쳐 280kg을 장입해 총 300kg이 되도록 하였으며, 상황에 따라 200kg을 추가할 수 있도록 준비하였다. 실제 실험에서는 정오부터 20시 05까지 약 8시간 동안 460kg을 장입하였다. 목탄은 철광석 장입 전 약 320kg을 장입하고, 철광석 장입 후부터 7시간 동안 평균 15분 간격으로 매 10kg씩 총 28회에 걸쳐 280kg을 장입하는 등 모두 600kg을 사용하는 것으로 설계하였으며, 철광석 투입량이 증가하면서 실제로는 약 8시간 동안 760kg을 투입하였다. 소성패각(굴껍질)은 철광석 장입 후 4kg을 장입하고 이후 15분 간격으로 매 2kg씩 28회에 걸쳐 잔량 56kg을 투입하는 등 모두 60kg을 첨가할 계획이었으나 마찬가지로 철광석 투입량이 늘어나면서 실제로는 72kg이 투입되었다. 황토는 철광석 장입 후 30분 간격으로 매 2kg씩 15회에 걸쳐 모두 30kg을 첨가할 계획이었으며, 실제 실험에서는 47kg이 소요되었다.

이상을 정리하면, 철광석은 당초 300kg을 사용할 계획이었으나 첫 투입 후 5시간 38분만에 계획한 300kg이 모두 소요되었는데, 송풍이 양호하고 슬래그가 원활하게 유출되는 등 조업환경이 양호함에 따라 매뉴얼에 따라 160kg을 추가로 장입하였다. 이에 따라 목탄 · 소성패각 · 황토의 장입도 비율대로 증가하였으며, 슬래그 배출은 매우 양호해 노 밖으로 유출된 것만 315kg이 계측되었다. 이처럼 엄청난 양의 슬래그가 배출된 것은 제련복원실험 사상 처음 있는 일로, 그 의미하는 바가 매우 크고 앞으로의 제련복원실험에도 많은 영향을 미칠 것으로 생각된다. 한편 15시 30분 노 내에 슬래그가 너무 많이 생성되어 송풍관으로 역류함에 따라 패각 장입을 잠시 중지하다가 18시 06분경 슬래그의 유동성이 저하되어 패각 장입을 재개하였다. 이처럼 매뉴얼을 유연하게 변경한 점 역시 상당히 유효한 변수로 평가되며, 향후의 실험에서도 유념해야 할 부분으로 생각된다.

(4) 슬래그의 배출

이번 실험에서 가장 두드러진 성과는 조업 중 슬래그의 생성과 유출이 매우 원활했다는 점이다. 철광석 장입 후 약 2시간 만에 슬래그가 생성되고 있음이 확인되었으며, 2시간 30여분 후부터 마지막 철광석 장입 1시간 뒤까지 원활한 자연유출이 이루어졌다. 물론 중간에 배재구 쪽의 슬래그가 냉각되어 배재구를 막으면서 자연유출이 이루어지지 못할 경우

에는 적절한 시점에 쇠창으로 뚫어 자연유출을 유도하였다. 상기한 바와 같이 중간에 슬래그가 너무 많이 생성되어 미처 배출되지 못한 슬래그가 송풍관을 역류함에 따라 잠시 패각 장입을 중단하였다. 이후 유동성이 급격히 저하되어 패각 장입을 재개하자 슬래그 생성 및 배출이 다시 정상화되었다.

즉 패각이 슬래그 생성 및 유출에 중요한 요인으로 작용한다는 사실을 이번 실험에서 확인할 수 있었으며, 원활한 슬래그의 생성과 유출이 조업을 성패를 좌우하는 주요 요인이라는 것이 확인된 점 또한 이번 실험의 중요한 성과로 볼 수 있다. 실험 중 노 외부로 유출된 슬래그의 계측량은 총 315kg으로, 제철복원실험 사상 가장 많은 슬래그로 기록될 전망이다.

한편 생성된 잡쇠(철괴)가 불순물이 적은 괴련철이 다수인 점을 상기한다면 많은 슬래그의 유출이 광석 내 불순물 제거에 매우 유리하다는 점을 알 수 있다. 향후의 실험에서도 슬래그를 많이 생성 · 유출시키는 조업매뉴얼을 설계할 필요가 있는 것으로 생각된다.

표 19. 슬래그 배출 현황

연번	시간	비고	연번	시간	비고
1	13:40	배재구 일부 개방, 화염 유출 확인	23	18:35	배재구 슬래그-8차 제거
2	13:55	쇠창에 슬래그 묻어 나옴	24	18:35	슬래그와 목탄 유출 후 분리
3	14:08	배재구 확장, 물방울 형태의 슬래그 유출	25	18:40	배재구 슬래그-9차 제거
4	14:27	슬래그 물 흐르듯이 자연 유출	26	18:54	추정(괴련철) 유출 후 확인 단타
5	14:39	배재구 확장, 배재구 슬래그-1차 제거	27	18:57	배재구 슬래그-10차 제거
6	14:49	슬래그 유출 원활	28	19:06	배재구 슬래그-11차 제거
7	15:11	배재구 슬래그-2차 제거	29	19:12	슬래그 강제 유출 후 자연유출 양호
8	15:24	배재구 슬래그-3차 제거	30	19:13	배재구 슬래그-12차 제거
9	15:19	강제 유출 후 자연 유출	31	19:19	슬래그 덩어리로 유출
10	15:55	가는 실 형태의 슬래그 유출	32	19:23	슬래그 강제 유출 후 유출 양호
11	15:58	배재구 슬래그-4차 제거	33	19:33	배재구 슬래그-13차 제거
12	15:59	슬래그 유동성 약함, 쇠창으로 송풍구 뚫음	34	19:35	슬래그 강제 유출
13	16:11	가는 줄 형태의 슬래그 다량 유출	35	19:47	배재구 슬래그-14차 제거
14	16:21	배재구 슬래그-5차 제거	36	19:50	슬래그 강제 유출, 유동성 약함
15	16:34	굵은 실형태의 슬래그 유출 양호	37	19:57	슬래그 강제 유출
16	16:44	배재구 슬래그-6차 제거	38	20:05	노 내부 잡쇠덩이 가득 참
17	17:14	송풍구 뚫어 줌, 슬래그 다량 유출	39	20:22	슬래그 유출 원활
18	17:24	송풍구 뚫어 줌, 자연 유출	40	20:24	배재구 슬래그-15차 제거
19	17:32	배재구 슬래그-7차 제거	41	20:38	배재구 슬래그-16차 제거
20	18:11	슬래그 덩어리로 유출	42	20:56	배재구 슬래그-17차 제거
21	18:14	슬래그 유동성 약함	43	21:04	배재구 완전 개방, 슬래그와 목탄 동시 유출
22	18:29	슬래그 유동성 약함	44	21:55	배재구 목탄 일부 유물
슬래그 배출량		노 외 유출 계측량-315kg			

(5) 송풍

송풍은 2016년 5월 14일(토) 10시 40분부터 21시까지 10시간 10분 동안 지속되었으며, 평균 1,197℃의 온도가 유지되었기 때문에 상당히 무난했던 것으로 판단된다. 실험 종료까지 송풍관의 원형이 대체로 잘 유지되었는데, 이 점은 지금까지의 제련실험에서 보기 드물었던 현상이라 할 수 있어 시사하는 바가 크다. 송풍관은 한국연구재단 공동연구팀의 지원을 받아 사용하였는데, 태토 · 크기 · 경도 등이 상당히 양호함에 따라 성공적인 실험의 견인 역할을 한 것으로 판단된다. 학술적 검토에 의해 설계되고 전문 장인에 의해 제작된 송풍관이라는 점이 이 같은 결과를 낸 것으로 보인다.

한편 이번 실험에서도 조업 중 송풍관을 열어 송풍관의 침식상태, 슬래그 용착상태, 노 내부 상황 등을 체크하였는데, 이러한 과정이 실험에 도움이 되었던 것으로 판단된다. 즉 조업 중 송풍관 개구(開口)는 고대에도 일반적인 양상이었던 것으로 추정된다.

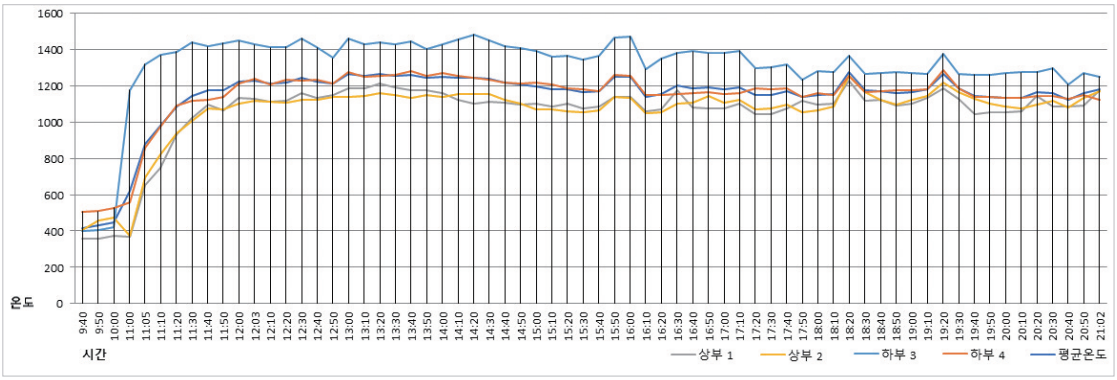
표 20. 송풍구 개방 현황

연번	시간	비고	연번	시간	비고
1	14:13	첫 개방, 송풍구 관입부 끝부분 일부 침식	8	17:54	역류한 슬래그 확인, 쇠창으로 냉각 슬래그 제거
2	14:59	송풍구 내부 크랙 발생, 관입부 일부 잠식	9	18:06	역류한 슬래그 확인, 쇠창으로 냉각 슬래그 제거
3	15:24	송풍구 슬래그 역류, 쇠창으로 제거, 일부 침식	10	18:08	역류한 슬래그 확인, 쇠창으로 냉각 슬래그 제거
4	15:59	슬래그 유동성 약함, 쇠창으로 냉각 슬래그 제거	11	20:11	슬래그 송풍관 1/2 역류, 쇠창으로 냉각 슬래그 제거
5	16:57	슬래그 역류, 쇠창으로 냉각 슬래그 제거	12	20:41	슬래그 송풍관 2/3 정도까지 역류, 쇠창으로 냉각 슬래그 제거. 풀무 중지, 송풍구 폐쇄
6	17:14	슬래그 역류, 쇠창으로 냉각 슬래그 제거			
7	17:40	개방 후 막혔는지 관찰	13	21:00	송풍구 제거

풀무는 전술한 바와 같이 이번 실험을 위해 제작된 발풀무를 사용하였는데, 크기 및 구조에서는 큰 문제가 없는 것으로 판단되지만 풀무질에 다소 많은 노동력이 소요된 것으로 평가된다. 판재의 건조 상태, 중심축의 윤활성, 마찰면의 가죽 등에 대해 검토해 보수가 필요할 것으로 판단된다.

(6) 온도

이번 실험에서는 고정식온도계 4개를 설치해 노 내 온도를 측정하였고, 이동식온도계로는 노 상부, 배재구 등의 온도를 수시로 체크하였다. 본 보고서에서는 점화 및 송풍 개시 후 철광석을 장입할 수 있는 안정적인 온도가 확보된 정오(12:00)부터 송풍이 종료된 직후(21:00)까지를 유효온도로 설정하고 그 값을 제시하였다.



도 15. 제련실험 온도 그래프

이에 의하면 계측 최저온도는 1,042℃, 최대온도는 1,474℃이고, 4개 센서의 평균 최저 온도는 1,126℃, 평균 최고온도는 1,227℃, 전체 평균온도는 1,197℃이다. 평균온도를 1,200℃로 설계한 조업매뉴얼과 거의 일치한다고 할 수 있으며, 노 내부 용적에 대한 풀무 및 송풍관의 크기가 적절했던 것으로 판단된다.

(7) 결과물

실험 다음날 배재구 부분을 확장 · 절개해 개방해 놓았다가 40일 경과 후 노 내부의 잡쇠 덩이를 수습하였다. 생성된 형성물만 꺼내고 노는 재사용한다는 계획으로 노를 완전 파쇄하지 않았으나, 다음 실험에서 재사용할 수 있는지는 동절기 등의 계절적 변화를 고려해 그 때 가서 노의 상태를 검토한 후 결정할 수 있을 것이다. 상기한 바와 같이 노 내부의 잡쇠 덩이를 배출시켜 상층의 목탄과 슬래그 등의 불순물을 제거하고, 드릴을 이용해 작은 덩어리로 파쇄하고 잡쇠를 수습하였다. 그 결과 69.7kg의 잡쇠를 수습할 수 있었는데, 장입한 철광석의 무게와 대비하면 회수율은 15.2%이고 이는 고대 제철의 일반적인 회수율에 포함된다고 볼 수 있다.

실험과정의 파생품과 및 실험 후의 결과물 중 철괴 14점 · 노벽 3점 · 노 바닥 형성물 3점 · 철편 1점 · 송풍관편 3점 · 유출재 2점 · 황토 및 패각 등 모두 27점의 시료를 채취해 금속학적 분석연구를 실시하였다. 상세한 내용은 본 보고서에 부록으로 수록하였으며, 몇 가지 특징을 언급하자면 다음과 같다. 첫째, 패각의 사용으로 인해 슬래그의 염기도가 개선되고 슬래그의 융점을 낮추어 철 성분으로부터 슬래그의 분리가 비약적으로 개선되었다. 둘째, 14점의 철괴 시료 중 12점의 탄소 함량이 0.4% 미만으로 분석되는 등 대부분의 결과물에서 환원이 잘 진행되었고 불순물의 분리가 원활하였으며, 탄소 함량이 괴련철에 부합된다는 것이 판명되었다. 셋째, 형성물에서 대부분의 슬래그가 분리되어 다음 공정인 정련단야에서 철정을 생산하기에 용이한 잡쇠(철괴)가 생성되었다. 넷째, 하부에 형성된 2점의 중탄소 혹은 고탄소 철괴 2점은 상부나 중부에서 생성된 고탄소 철괴가 상대적으로 융점이 낮아져서 하부로 침하되어 형성된 것으로 판정되었다. 다섯째, 노 바닥에 형성된 복

합산화물(SiO2.Al2O3.SiC)은 노상의 목탄분과 황토가 고열을 받아 소결되고 이것이 다시 방습시설의 철광석과 노상에서 침하된 슬래그의 산화칼슘과 모래다짐층과 반응해 생성된 것으로 판단되었다. 여섯째, 노 내부로 관입되어 슬래그가 용착된 송풍관은 반환원 철광석의 소착된 부분과 단순한 피열에 의해 색상만 변하고 성분조성은 그대로여서 조업과정의 송풍관 용융손실은 주로 반환원 철광석의 용착에 의해 일어난 것으로 파악되었다. 이것은 슬래그에 의한 송풍관 침식이 일어나지 않았음을 의미하는 것이어서 향후 추가적인 분석과 검토가 필요한 것으로 제기되었다.

이처럼 14점 중 2점을 제외한 12점의 철괴 시료가 탄소 함량이 0.4% 미만으로 나타나 당초 목표했던 대로 대부분의 결과물이 괴련철로 파악되었다. 이 점은 이번 실험은 가장 중요한 성과라 할 수 있으며, 지금까지의 제련복원실험에서 가장 많은 양의 괴련철이 생산된 사례로 기록될 전망이다.

표 21. 제련복원실험 비교

실험명	2011년 중문원	2014년 국중연	2015년 국중연	학진 2015년 1차	학진 2016년 2차	2016년 울산쇠부리	비 고
노 내경(㎝)	60	70	80	85	85	**80**	
노 외경(㎝)	140	150	120	150	150	**130**	노상(爐床) 기준
노 높이(㎝)	260	140	240	190	200	**200**	
광석 투입량(㎏)	220	220	480	241	410	**460**	
목탄 투입량(㎏)	872	959	1,845 (945+900)	605	929.3	**760**	
황토 투입량(㎏)	–	–	풍화토96	117	82	**46**	
패각 투입량(㎏)	–	–	–	–	–	**70**	
투입 비율	1/3.96	1/4.36	1/3.84 /0.2	1/2.51 /0.49	1/2.27 /0.2	**1/1.65/ 0.1/0.15**	광석/목탄/황토/패각
송풍 시간(분)	822	976	764	963	625	**730**	
광석 투입시간(분)	613	754	500	897	510	**485**	평균 1,150℃ 이상에서 장입 개시
평균 최저온도(℃)	–	900	–	1,059	1,183	**1,126**	
평균 최고온도(℃)	1,341	1,500	–	1,400	1,248	**1,277**	
평균 온도(℃)	1,270~ 1,350	약 1,200	약 1,150	1,200	1,198	**1,197**	광석 장입 후 안정온도 상승부터의 평균
조업 개시	10-22 22:10	10-07 10:13	05-27 10:00	03-06 10:30	03-19 09:00	**10:15**	점화 기준
송풍 개시	21:58	7일 10:24	10:07	10:37	09:45	**10:38**	점화 후 송풍
광석 투입 개시	10-23 01:31	7일 13:53	14:00	11:41	11:10	**12:00**	최초 20㎏ 장입, 이후 10㎏ 단위

목탄 투입 개시	10-21 21:58	7일 13:56	14:00	10:52	11:12	12:06	최초 만장 320㎏ 장입, 이후 10㎏ 단위
황토 투입 개시	-	-	풍화토 14:00	14:01	11:30	12:17	패각과 혼합해서 투입
패각 투입 개시	-	-	-	-	-	12:07	최초 4㎏ 장입, 이후 1㎏ 단위
철재 배출 시작	-	17:24	-	17:07	14:00	14:27	
광석 투입 종료	11:44	8일 02:27	05-28 00:20	02:38	19:40	20:05	
목탄 투입 종료	11:44	8일 02:27	01:10	03-07 02:38	19:48	20:08	17:15까지 135㎏ 장입 후 18:00까지 50㎏ 장입
황토 투입 종료	-	-	풍화토 00:20	02:48	19:41	20:05	패각과 혼합하여 같이 투입, 패각/황토 비율 1/0.5
패각 투입 종료	-	-	-	-	-	20:05	철광석 마지막 장입 1시간 후
송풍 종료	11:44	8일 02:40	00:51	02:40	20:28	21:00	철광석 마지막 장입 2시간 후까지 송풍 지속
철재 배출량(㎏)	-	-	-	75.12	-	315	노 외 유출량
철 생산량(㎏)	19.58	-	120	31.565	88.6	69.7	환원된 괴련철 목표
철 회수율(%)	21.3(8.9)	-	25	13.1	21.61	15.2	
기타	중문원-중원문화재연구원, 국중연-국립중원문화재연구소, 학진-한국연구재단 공동연구팀						

2) 단야

이번 단야실험에서는 단야의 공정을 정련단야→단련단야→성형단야의 세 가지 단계로 구분설정하고 실험을 진행하였다. 학술적 설계에 따라 단야로를 제작하였으며, 다만 단련단야와 성형단야는 노를 겸용할 수 있다는 연구단의 의견을 반영해 구분 제작하지 않고 겸용하였다. 정련단야에서는 한국연구재단 공동연구팀의 제2차 제련복원실험에서 생산된 잡쇠를 이용해 철괴를 생산하였으며, 단련단야에서는 이 철괴를 이용해 봉상철정 2점을 제작하였다. 봉상철정으로는 창 2점과 낫 1점을 제작하였으며, 1점의 철정을 보관할 수 있게 되었다.

실험과정에서 원료 · 연료 · 첨가제 · 온도 · 단타 · 단접 등 별다른 문제는 발생하지 않았으나, 단련단야 시 노 상단에 소성벽돌을 추가로 올려 노의 높이를 높이게 되었다. 이는 장인의 숙련된 경험에 의한 것으로 판단되며, 결국 단련단야에서는 노의 높이가 더 높아야 되는 게 아닌가 하는 의문을 가지게 되었다. 이 점은 단련단야와 성형단야에서 별도의 노를 사용하는 것이 더 유리할수도 있다는 것을 의미하는 것이기 때문에 향후 추가적인 검토가 필요할 것으로 생각된다.

당초 4~8점의 판상철정과 봉상철정을 제작하려 하였으나 정련단야와 단련단야에서 시간과 노력이 많이 소요되어 축제기간 중의 실험이라는 제한된 여건에 따라 2점을 생산하는데 그쳤다. 이로 인해 철기 역시 당초 최대 6점을 제작하려 하였으나 3점에 그치고 말았다. 다만 시간이 충분히 주어진다면 별 어려움 없이 많은 수의 철기 제작이 가능하다는 점은 장인을 비롯한 모두가 인정할 수 있었다.

단야실험의 각 공정에서 채취한 시료들에 대해서도 금속분석이 실시되었는데, 여러 가지 여건으로 인해 본 보고서에는 수록하지 않았다. 하지만 한국연구재단 공동연구팀의 연구에 발표될 예정이므로 향후 정보이용 및 비교검토가 가능할 전망이다. 이처럼 본 연구의 단야실험은 정련→단련→성형의 세 가지 단야공정이 연속적으로 실시된 학술적 실험이라는 점과 별 어려움 없이 계획한 철기를 제작할 수 있었다는 점의 두 가지 측면에서 큰 의미를 가지는 것으로 생각된다.

2. 실험성과와 몇 가지 문제점

앞서 언급한 바와 같이 이번 울산쇠부리 고대 원형로 복원실험은 매우 성공적인 실험으로 평가할 수 있으며, 아울러 몇 가지 문제점도 발견할 수 있었다. 본절에서는 이러한 실험의 성과와 몇 가지 문제점에 대해 살펴보았다.

1) 실험성과

(1) 이번 실험은 성공적인 제철복원실험으로 평가할 수 있다. 그 이유는 우선 제련로와 단야로(정련단야로, 단련단야로)를 포함한 실험장의 구축과 각 공정별 실험 진행이 설계대로 진행되었다. 3기의 노는 고고학적 연구를 통해 설계한 구조대로 축조되었으며, 특히 제련로의 경우 상부의 좁아지는 곡률이 축조에 까다로움에도 불구하고 설계에 맞게 축조되었다. 다른 하나는 제련과 단야의 실험진행과정이 역시 조업매뉴얼에 따라 진행되어 큰 무리없이 실험이 진행될 수 있었다. 학술연구로서의 제철복원실험은 설사 설계가 잘못 되었다고 할지라도 설계대로 노가 축조되고, 조업매뉴얼에 따라 실험이 진행되어야 가설을 검증할 수 있기 때문이다. 이번 실험은 이러한 과정이 순조롭게 진행되었다는 점에서 결과물의 양상과 상관없이 성공적이었다고 평가할 수 있다.

(2) 철광석의 배소에서부터 제련과 단야 공정에 걸친 일관 공정이 체계적으로 진행된 점은 매우 유효한 실험이라 할 수 있다. 단야 실험은 한국연구재단 지원 공동연구팀에서 제공한 소재를 사용하기는 했지만 이는 이번 실험이 울산쇠부리 복원실험 첫 실험인 관계로 단야실험의 소재는 보유하고 있지 않았기 때문이다. 제련실험에서 70㎏에 가까운 잡쇠가 생성됨에 따라 2차 단야실험 때는 충분한 철 소재가 확보되었다. 또한 양측 실험단 구성원이 거의 동일하고 특히 노의 설계와 조업매뉴얼의 수립, 실제 조업담당자가 동일인이기 때문에 실제로는 연속성 있는 실험으로 볼 수 있다. 단야 실험의 경우 학술적 설계에 따라 제작된 단야로에서 잡쇠를 정련단야해 철괴를 생산하고 이 철괴를 단련단야해 봉상철정이라는 철 소재를 제작하였으며, 이를 성형단야해 실제로 계획한 철기를 제작하였다. 이러한 체계적이고 학술

적인 단야실험은 최초라 할 수 있으며, 향후 단야실험의 좋은 본보기가 될 수 있을 것으로 기대된다.

(3) 성형단야는 당진대장간 이영구 장인이 수행하였는데, 이번 실험을 통해 제철공정에서의 새로운 모습을 하나 발견하였다. 그것은 제련과 정련단야 · 단련단야를 거친 철 소재는 장인의 손에서 매우 쉽게 단조철기로 제작된다는 것이다. 물론 평생을 업으로 살아온 장인의 경험과 기술 덕분이겠지만 창 1은 45분, 창 2는 30분, 낫은 15분의 제작시간이 소요되었다. 상당한 노력과 비용이 소요되는 앞 공정과 달리 성형단야는 매우 원활하게 진행되었으며, 장인의 손놀림 하나로 어떻게 보면 너무나도 쉽게 철기가 제작되었다. 이를 통해 우리 연구진은 단조철기의 제작공정이 제련→정련단야 · 단련단야→성형단야의 세 단계로 진행되면 효율적이라는 것을 알 수 있었으며, 고대~중세의 제철공정이 이와 같은 과정을 거쳤을 가능성이 많다는데 동의하였다.

(4) 제련조업과 불매소리가 하나의 과정 속에서 완벽하게 융합되었다는 점은 이번 실험의 가장 큰 성과로 평가되어도 좋을 것이다. 그간 제철복원실험에서의 풀무질은 실험팀의 고된 노동에 불과하였으며, 불매소리는 울산쇠부리소리보존회의 전통문화 복원과 보존을 위한 가상적 노동요에 지나지 않았다. 하지만 이번 실험에서 두 가지 요소가 완벽한 조화를 이룸에 따라 진정한 '쇠부리'의 얼을 가슴 벅차게 느낄 수 있었다. 이제 '제철실험'과 '불매소리'는 서로 뗄 수 없는 하나의 공동체가 되었다고 할 수 있으며, 이러한 성과는 울산쇠부리축제장의 시민들에게서 더 큰 시너지효과를 발휘하였다. 학술연구와 민속전승이 만나 하나의 전통문화로 재탄생한 점은 이번 실험의 아주 중요한 성과로 기록될 것이 분명하다.

(5) 더불어 한국연구재단 공동연구팀과 국립중원문화재연구소 연구진, 각 대학의 학생과 대학원생, 자문위원단 등의 전폭적인 협력과 지원도 성공적인 실험의 커다란 힘이 되었다. 특히 실험에 대한 기록 및 정리에서 이러한 지원이 없었더라면 보고서 작성이 매우 어려웠을 것으로 생각된다.

(6) 이번 실험은 울산쇠부리축제 속에서 진행되었으며, 관람객을 위해 홍보 패널과 실험 생성물 · 결과물 등을 전시하였다. 또한 유수한 대학의 교수와 전공연구자가 시민들에게 직접 제철의 개념과 실험과정에 대해 설명하였으며, 이 점은 높은 호응을 얻은 것으로 생각된다. 이로써 쇠부리복원실험이 울산쇠부리축제의 핵심프로그램으로 발돋움하게 될 것으로 기대되며, 축제의 성격을 너무나 잘 보여주는 중요한 역할을 한 것으로 생각된다.

(7) 본 실험에서는 설계에 따라 실제 4점의 철기를 제작하였다. 지금까지의 제철복원실험에서는 제련에서 생산된 잡쇠에 불순물이 많고 탄소 함량이 상당히 높았으며, 이에 따른 적절한 실험매뉴얼이 마련되지 않아 최종 철기의 제작까지에는 이르지 못한 경우가 대부분이었다. 제철장인의 노하우에 의해 철기가 제작되기도 하였으나 현대적 철 소재가 이용되기도 하고 그 과정과 결과가 기록되지 않는 등 학술연구 측면에서의 철기 제작은 아니라고 평가되고 있다. 이번 실험을 통해 제련에서부터 생산된 잡쇠를 이용해 철 소재를 제작하고, 또 이 소재를 이용해 철기가 제작되어 하나의 생산체계가 완성되었다. 물론 앞으로 반복된 실험과 검증과정을 거쳐야 하겠지만 고대 원통형 철 제련로의 기본적 조업매뉴얼이 작성된 것으로 평가된다.

2) 몇 가지 문제점

(1) 실험장의 환경과 관련해 제련장의 경우 성토를 통해 주변보다 높게 설치함으로서 시각적 효용이 있었던 것으로 생각된다. 하지만 루프가 다소 낮고 평면적이 좁은 것으로 판단되며, 단야장은 아예 루프가 설치되지 않았다. 실험 당일 다행히 비가 내리지 않아 조업이 순조로웠으나 만약 비나 눈이 오는 날은 실험이 어려울 것으로 생각된다. 향후 중장기적 실험을 계획한다면 이에 대한 대비책이 있어야 할 것으로 생각된다.

(2) 이번 실험을 위해 풀무는 새로 제작되었으며, 송풍관은 한국연구재단 공동연구팀에서 제작한 것을 제공받았다. 풀무의 경우 그 크기와 구조는 고고유적과 민속자료를 참고로 하였는데, 이번 실험에서 큰 문제는 없었던 것으로 생각된다. 하지만 발판의 중간축이 상당히 경직되고 틈새로 누풍(漏風)이 발생함에 따라 풀무꾼의 피로도가 상당하였다. 향후 전문가의 문제검토를 통해 풀무의 보수 혹은 재제작이 필요할 것으로 생각된다. 송풍관은 향후 추가적인 지원을 받기는 어려울 것으로 생각되므로, 지속적인 송풍관 공급을 위해서는 추가 연구와 제작처 확보가 필요하다.

(3) 철광석 역시 한국연구재단 공동연구팀에서 구매해 놓은 강원도 양양산 자철광석을 제공받았다. 현재 우리나라에서 채광이 이루어지는 곳은 양양광산밖에 없으며, 이 또한 폐광 직전인 것으로 알려져 있다. 당장 내년 2017년도 제철복원실험에서 사용할 철광석이 부재한 실정이다. 중장기적 실험연구와 쇠부리축제를 위해서는 수 톤의 철광석 확보가 필요할 것으로 생각되며, 이를 보관할 장소도 필요하다. 연료로 사용된 숯(목탄)은 강원도 태기산 참숯을 사용하였는데, 이번 실험을 통해 상당히 양질의 목탄인 것으로 판명되었으나 거리가 너무 멀다는 단점이 있다. 울산 관내에서 이러한 양질의 목탄을 구입할 수 있는 공급처를 확보해야 할 것이다. 노재(爐材) 및 첨가제로 사용되는 황토 역시 안정적인 공급처 확보가 필요하다.

(4) 이번 실험은 큰 틀에서는 매뉴얼에 따라 별 무리없이 진행되었으나 세부적인 면에서는 개선되어야 할 사항이 적지 않다. 우선 실험기록과 관련해서 각 담당자들이 실험과정을 꼼꼼하게 기록하였으나 각자의 휴대폰으로 시간의 경과를 기재함에 따라 이를 취합하였을 때 수분의 시간차가 발생해 보고서작성에 있어 문제가 되었다. 원료 · 연료 · 첨가제 등을 계측할 수 있는 저울도 당초 하나밖에 준비되지 않아 약간의 혼선이 있었다. 야간에도 관측할 수 있는 디지털시계 2~3개와 충분한 수량의 저울이 실험장에 배치되는 것이 바람직하다. 한편 풀무대장 · 목탄대장 등 부문별 업무책임자가 지정되기는 하였으나 사전에 충분한 진행논의가 이루어지지 않았고, 이로 인해 각 담당자들에게 맡은 업무에 대한 사전설명이 부족했다. 즉 담당자는 있었지만 언제 · 무엇을 · 어떻게 준비하고 진행해야 할지 우왕좌왕하는 모습이 여기저기서 나타났다. 이러한 점은 개선되어야 할 것이다.

(5) 이번 축제에서는 당초 제련실험을 목표로 하였으나 축제의 특성상 철 소재를 직접 가열하고 두드려 철기를 제작하는 공정을 관람시키는 게 좋겠다는 판단으로 단야실험도 추가로 실시하게 되었다. 제련실험만을 할 경우 제련에서부터 철기제작까지의 일관적 제철공정을 보여줄 수 없다는 점에서 그 효과는 상당히 긍정적인 것으로 평가된다.

하지만 이로 인해 예상보다 많은 예산과 인력이 필요하게 되었으며, 실험 준비와 보고서 작성에도 더 많은 노력이 필요하게 되었다. 정련단야–단련단야–성형단야로 이어지는 단야실험의 경우, 정련단야와 단련단야는 제련조업을 담당한 연구단의 이은철 장인이 담당하고, 성형단야는 당진대장간 이영구 장인이 담당하였다. 두 장인 모두 역할을 훌륭히 소화했지만 짧은 제작시간으로 인해 피로도가 가중되고 충분한 양의 철 소재와 철기를 제작하기 힘들었다. 향후 축제 및 실험에서 이처럼 일관 제철공정을 동시에 진행할 것인지 아니면 제련실험과 단야실험 일정을 따로 잡아 진행할 것인지 논의가 필요하며, 만약 동시에 실시한다면 이러한 점은 반드시 개선되어야 할 과제로 생각된다.

(6) 제철유물에 대한 금속학적 분석은 고고유적의 연구뿐만 아니라 이를 기반으로 하는 제철복원실험에서도 그 효용성이 널리 인정되고 있다. 이번 실험에서는 당초 제련과정에서의 시료를 금속분석 대상으로 하였으나 단야공정이 추가됨에 따라 이에 대한 분석이 불가피하게 되었다. 다행히 한국연구재단 공동연구팀과의 연계실험으로 진행되어 단야공정 금속분석 결과에 대한 정보는 공유할 수 있었으나 향후 실험계획에서는 이에 대한 대비가 이루어져야 할 것이다.

(7) 본 실험은 울산쇠부리기술을 복원해 우리 소중한 겨레기술문화를 되살리고 이를 전승하자는 게 목적이다. 이를 위해서 매년 쇠부리복원실험이 실시될 전망인데, 예산과 장소 · 행정지원 · 전문인력 등이 턱없이 부족한 점을 지적하지 않을 수 없다. 상기한 바와 같이 이번처

럼 축제 때마다 실험을 진행할 것인지 아니면 보다 심도 깊은 연구를 위해 별도의 일정으로 실험을 진행할지 검토가 필요하며, 울산쇠부리문화 연구 · 복원 · 전승을 위해 중장기적이고 거시적인 안목으로 기술복원을 이루어나가야 할 필요가 있다. 무엇보다 전문인력의 육성이 당면과제로 생각되는데, 지역에서의 전공 연구자와 전문 장인(匠人) 발굴과 육성이 필요하며, 관심있는 인재에 대한 전폭적인 지원책도 울산 북구청 뿐 아니라 울산광역시청 차원에서 마련되어야 할 것이다.

이 외에도 세부적이고 미시적인 문제점이 다양하게 노출되었으나 반복적인 실험과 검토를 통해 점차 개선될 수 있을 것으로 생각된다. 무엇보다도 울산쇠부리 기술복원은 울산시민과 지자체 · 지역기업 · 관련단체 · 연구자 등이 함께 하는 문화 거버넌스를 통해 기반구축이 가능하며, 이를 통해 울산의 대표적 문화컨텐츠로 자리잡을 수 있을 것이다.

VI

맺음말

제Ⅵ장

맺음말

이번 실험에서는 고대 울산의 쇠부리를 복원하기 위해 원삼국~삼국시대 제련로 · 정련단야로 · 단련단야로의 3가지 제철로의 구조를 복원하고 조업매뉴얼을 작성해 실험을 진행하였다. 제련에서는 460㎏의 철광석을 이용해 불순물이 적고 탄소 함량이 낮은 양질의 괴련철 69.7㎏을 생산하였으며, 정련단야 · 단련단야 실험에서는 길이 35 · 35㎝, 너비 1.0 · 2.0㎝, 무게 300 · 600g의 철 소재(봉상철정) 2점을 제작하였다. 이를 소재로 한 성형단야에서는 신라 황남대총 북분 출토품을 모델로 하여 창 2점과 낫 1점을 제작하였다.

실험은 대체로 매뉴얼대로 진행되었으며, 조업의 성패를 가를 만한 문제점은 노출되지 않았다. 울산쇠부리축제의 한 프로그램으로 진행된 탓에 많은 관람객들이 실험장으로 모여 관심을 보였고, 바쁜 와중에도 연구진들은 이번 쇠부리복원실험 및 쇠부리에 대해 성심으로 설명해 주었다. 특히 제련실험 내내 울산쇠부리소리보존회의 불매소리는 축제장에 뜨겁게 울려 퍼졌는데, 이 점에서 학술연구와 전통문화 전승의 염원이 하나로 어우러져 실험결과와 관계없이 그 어떤 실험보다 성공적이었다고 생각된다.

이번 실험은 울산쇠부리기술 복원을 위한 첫 발을 내디딘 것으로, 앞으로 준비해야 할 과제도 산적해 있다. 무엇보다 울산쇠부리문화 중에서도 가장 특징적인 조선후기 석축형제철로의 토철제련법에 대한 연구를 통해 제철로의 구조와 조업방식을 밝혀야 하며, 수 년 내 실제 기술복원실험이 이루어질 수 있도록 철저히 준비해야 할 것이다.

이를 위한 최우선의 과제는 이러한 업무를 전적으로 수행할 전문인력들의 양성과 배치이다. 그들이 직접 울산광역시 일원 쇠부리유적들에 대한 종합적 지표 및 발굴조사를 실시하여 유적의 성격을 구체적으로 밝히고, 이를 통해 당시의 제철기술을 복원하기 위한 연구에 매진하여야 한다. 아울러 고고학 · 금속공학 연구자들과 제철장인, 울산쇠부리소리보존회 등이 유기적으로 구성된 융합적 연구팀을 상설기구화하여 전통제철복원작업을 지속적으로 실시해 나가야 할 것이다. 그러한 노력이 계속된다면 멀지 않은 시점에 쇠부리 조업 표준매뉴얼 작성이 가능해 질 것이며, 이를 기반으로 하여 전통쇠부리가 시민사회에 문화컨텐츠로서 좀 더 다양하게 활용될 수 있을 것이다.

이를 위해 관계당국의 적극적인 지원노력이 필요함은 두말할 나위가 없는데, 울산쇠부리기술 복원사업은 이제 울산광역시 전체의 중요 학술문화적 성격과 의미를 갖는 만큼, 기초지방자치단체의 단계를 넘어 울산광역시 차원에서 관심과 책임감을 갖고 향후의 발전 방향을 적극 모색해야 할 것이다.

아무쪼록 이번 실험이 울산쇠부리문화의 복원에 중요한 시금석이 되기를 기대하며, 실험에 관심 가져주신 관계자들과 많은 울산시민들께 진심으로 감사의 말씀을 드린다.

참고문헌

1. 국립경주문화재연구소, 2002, 『경주 인왕동고분군 발굴조사 보고서』.
2. 국립김해박물관, 2001, 『밀양사촌제철유적』.
3. 권병탁, 1969, 「이조말기 청도군 솥계 용선수공업 연구, 上 · 下」, 『산업경제』 제 5집, 영남대학교.
4. 권병탁, 1971, 「울산군 달천 철산업에 대한 사적 연구」 1~3, 『신라가야문화』2, 영남대학교.
5. 권병탁, 1972, 「쇠부리터 발견경위」, 『동양문화』1, 영남대학교.
6. 권병탁, 1991, 「전통용광로 복원과 제련술 연구」, 『민족문화논총』 제 12집, 영남대학교.
7. 권병탁, 2004, 『한국 산업사』, 영남대학교출판부.
8. 김권일, 2009a, 「영남지역 조선시대 제철문화의 기초적 연구 – 석축형제철로의 설정–」, 『영남고고학』 제 50호, 영남고고학회.
9. 김권일, 2009b, 「경주 황성동유적 제철문화에 대한 연구」, 『영남문화재연구』22, 영남문화재연구원.
10. 김권일, 2010, 「제철로의 유형분석 시론–신라 제철문화의 특징과 관련하여」, 『경주사학』 제 31집, 경주사학회.
11. 김기룡 · 장인경 · 배기동, 2011, 「연천 삼곶리유적의 철기생산 관련 유구와 유물」, 『제7회 한국철문화연구회 학술세미나』, 한국철문화연구회.
12. 두류문화연구원, 2012, 「밀양역~삼랑 국도건설공사 구간 내 문화유적 발굴조사 결과 약보고서」.
13. 문화재관리국 문화재연구소, 1993, 『황남대총(남분)』.
14. 문화재관리국 문화재연구소, 1994, 『황남대총 II (남분) 발굴조사보고서』.
15. 삼강문화재연구원, 2014, 『밀양 임천리 금곡제철유적 – 밀양역~삼랑간 국도건설구간 내 유적 발굴조사(C · D구역)–』.
16. 신경환 · 김권일 · 최영민, 2015, 「석축형제철로(石築型製鐵爐)의 조업방식 연구」, 『야외고고학』 제 22호, 한국매장문화재협회.
17. 신경환 · 이남규 · 최영민, 2013, 『한국고대 제련기술』, 금속기술연구소.
18. 신경환 · 이남규 · 최영민, 2014, 「밀양 금곡제철유적 출토 제철관련 자료의 금속학적 분석 및 고찰」, 『밀양 임천리 금곡제철유적 – 밀양역~삼랑간 국도건설구간 내 유적 발굴조사(C · D구역)– 』, 삼강문화재연구원.
19. 우리문화재연구원, 2009, 『김해 진영지구 국민임대주택 건설 사업지구 내 김해 여래리유적』.
20. 이남규, 2015, 「한국 전통제철기술문화의 복원과 활용을 위한 재현실험적 연구의 기본계획 –고고학과 금속공학의 융합적 방법론을 기반으로–」, 『고고학과 현대사회』, 제39회 한국고고학전국대회, 한국고고학회.
21. 한국문물연구원, 2011, 『창원 봉림 국민임대주택단지 사업부지내 창원 봉림동유적(I)』.
22. 한국문화재보호재단, 2001, 『경주시 황성동 537-2 임대아파트 신축부지 발굴조사 보고서』.
23. 한국문화재보호재단, 2008, 『울산 대밀 · 양수정 · 상삼정 · 삼정리유적 – 울산권 광역상수도(대곡댐)사업 편입부지내 5차 발굴조사–』.
24. 한국선사문화연구원, 2015, 「충주 완오리 산144-2, 산144-20번지 단독신축부지 내 유적 발굴조사 현장설명회 자료」.
25. 角田德幸, 2014, 『たたら吹製鉄の成立と展開』, 清文堂.
26. 國立歷史民俗博物館, 1994, 『日本 · 韓國の鐵生産技術〈調查編2〉』.
27. 大澤正己, 2001, 「密陽 沙村製鐵遺蹟 出土 關聯遺物의 金屬學的 調查」, 『密陽沙村製鐵遺蹟』, 國立金海博物館.
28. 小野正敏 · 佐藤信 · 舘野和己 · 田辺征夫, 2007, 『歷史考古學大辭典』, 吉川弘文館.

울산 쇠부리기술 복원사업

울산쇠부리축제 제철복원실험의 금속학적 분석 및 고찰

(신경환, 이재용)

실험일자

2016. 5. 14

금속기술연구소

울산쇠부리축제 제철복원실험의 금속학적 분석 및 고찰

신 경 환, 이 재 용 (금속기술 연구소)

1. 머리말

본고는 2016년 5월 14일 울산시 북구청의 울산쇠부리축제 추진위원회에서 주관하는 축제행사의 일환으로 울산시 북구청 내에서 한국철문화 연구회의 기술지도로 추진한 제철복원실험에 대한 결과를 금속학적으로 분석한 것이다.

제련로의 모델은 최근 발굴된 밀양 사촌리 1호 제련로를 복원하고자 하였으며 노의 형식은 고대 3국시대부터 사용되어 왔던 원통형 제련로이며 축조방식은 바닥에 방습시설을 만든 다음 할석을 3단으로 쌓은 후 하부에 지대를 고정하고 점토를 붙여 원통형으로 쌓아서 축조하였다.

본 실험은 지난 2015년 3월부터 한국연구재단 연구팀이 추진해온 밀양 금곡리 C-24호 제련로(제1차) 와 밀양 임천리 27호 제련로(제2차) 의 복원실험의 연장선에서 추진되었기 때문에 이들의 자료를 상호 비교하여 보아야 이해가 쉬워질 것으로 판단되어 분석에 앞서 3회의 복원실험에 대한 노의 구조와 조업특성을 상호 비교하였다.

분석 대상 시료는 대부분 조업이 완료된 후 노를 해체하여 형성물에서 채취하였고 시험전에 조재제를 사용되었던 황토와 패각을 추가하였으며 아울러 형성물과 접촉되어 있는 노바닥, 노벽, 송풍구의 시료도 확보하였다.

따라서 본 분석의 목적은 앞서 실험한 2번의 실험과 그 성과를 금속학적인 분석을 통하여 고찰해 보고자 하는데 있다.

2. 노의 구조와 조업특성비교

2.1 노의 구조

본 실험에서 노의 구조는 한국연구재단의 1,2차와 대동소이 하지만 다른 점이 있다면 노바닥의 방습에서 10cm 정도의 철광석분이 사용된 점과 10cm의 모래층 위에 (목탄분+황토)노 노상을 축조하였다는 것이 차이점이 있다고 할 수 있다.

<표 1> 제련로 복원실험별 노의 구조 (단위;Cm)

구 분	한국연구재단(제1차) 금곡리 C-24호 복원	한국연구재단 (제2차) 임천리 27호 복원	울산쇠부리 축제 사촌리 1호 복원
실험 일자	2015-03-06/07	2016-03-19	2016-05-14
노높이(상부/하부)	220 (60/160)	220(60/160)	200(60/140)
노외경(상부/하부)	(90/150)	(90/150)	(90/130)

노내경(상부/하부)	(60/85)	(60/100)	(60/80)
노벽두께(상부/하부)	(15/25)	(15/25)	(15/32.5)
방습시설두께	10/점토+10/목탄 +10/모래	-	10/모래+10/철광석 +10/목탄
노상 높이	10/(모래+목탄분) 10/(점토+목탄분)	10/(모래+목탄분) 10/(점토+목탄분)	10/(목탄분+황토)
곡관형 송풍관 길이(전부/후부) 구경(전부/후부) 두께	 (55/54) (15/15) 1	 (45/40) (15/20) 1	 (40/45) (16/16) 1

2.2 원료, 첨가제, 연료 및 송풍비교

본 실험과 앞의 2실험 간의 비교는 다음의 <표 2>의 원료, 첨가제, 연료 및 송풍비교에서 나타난 바와 같으며 주요 차이점은 철광석을 배소한 후 입자의 크기를 2-5mm 크기로 관리하였고 철재형성을 위한 첨가제로 50kg의 황토에다 92kg 의 패각을 투입하여 염기도를 높여서 작업하였다는데 차이점이 있다고 할 수 있다.

<표 2> 제련로의 복원실험별 원료, 첨가제, 연료 및 송풍비교

구 분	한국연구재단 (제1차) 금곡리 C-24호 복원	한국연구재단 (제2차) 임천리 27호 복원	울산쇠부리 축제 사촌리 1호 복원
원 료 (광산) (배소) (파쇄)	양양산 자철광석 (배소 실시)	양양산 자철광석 (배소 실시)	양양산 자철광석 (배소 실시) (2-5mm)
첨가제	30kg의 소성황토	마사토	50kg/황토 92kg/소성패각
연 료	경기도 여주의 참나무 백탄 (대,중,소)	경기도 여주의 참나무 백탄	태기산 참숯 (600kg)
송 풍	4인용 발풀무	4인용 발풀무	4인용 발풀무

2.3 제련복원실험 조업내용 비교

본 실험의 조업내용상의 차이점은 원료철광석 투입량에 대비한 목탄사용 비율이 앞의 실험과 크게 달랐다. 즉, 앞의 실험에 제1차(2.51배)와 제2차(2.27배)였으나 본 실험에서는 괴련괴를 주로 생산한다는 취지로 목탄사용 비율을 (1.65배) 낮추었고 결과적으로 총 조업시간이 제1차(17시간50분)->제2차(14시간)->본실험(10시간53분)으로 단축할 수 있었다.

<표 3> 제련복원실험 조업내용 비교

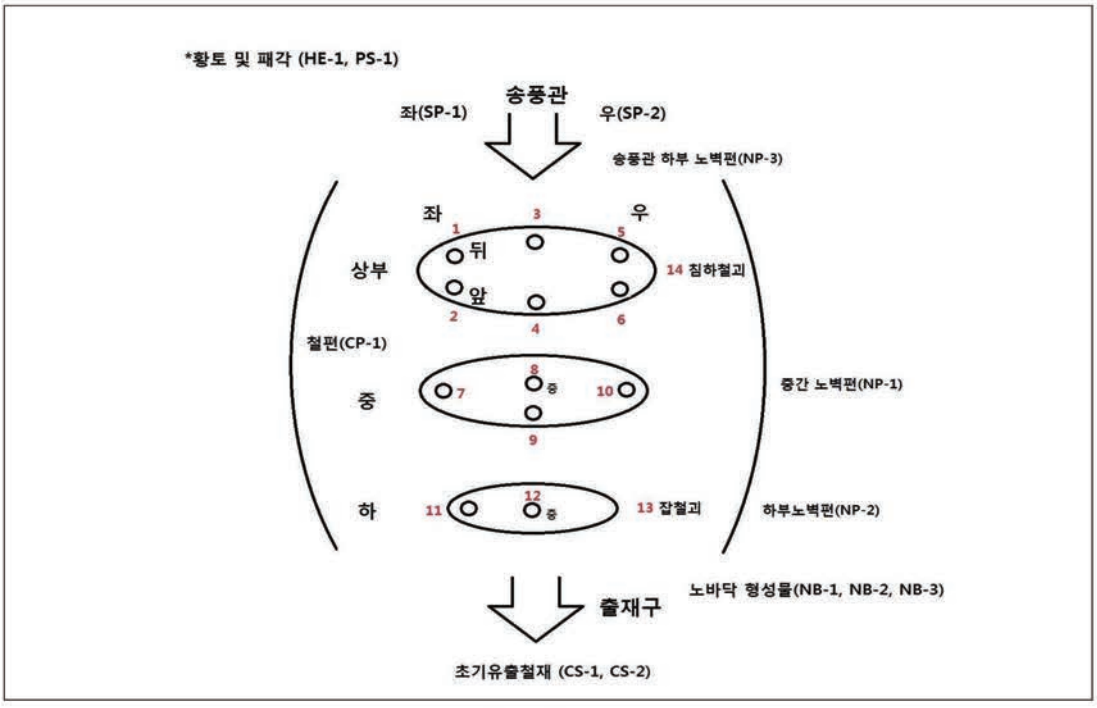
구 분	한국연구재단 (제1차) 금곡리 C-24호 복원	한국연구재단 (제2차) 임천리 27호 복원	울산쇠부리 축제 사촌리 1호 복원
원료 투입량	241kg	410kg	460kg
연료 투입량	605kg	929kg	760kg
첨가제 투입량	117kg/황토	82kg/황토	47kg/황토 72kg/패각
총조업 시간	17시간 50분	14시간	10시간 53분
형성물	상부(저탄소 괴련괴) 하부(고탄소 선철괴)	대부분의 괴련괴 (철재분리 미흡)	대부분의 괴련괴 (철재 분리 용이)

3. 분석대상 시료의 채취

철괴 형성물의 분석시료는 상부, 중부, 하부로 구분하고 이를 다시 좌우측과 앞뒤로 구분하여 12개의 철괴시편(UNJ-1~12)과 상부침하철괴(UNJ-14), 좌측상부철편(UCP-1), 잡철괴(UNJ-13)를 <그림1>과 같이 채취하였다.

노벽편은 중간 노벽편(UNP-1), 우측 하부 노벽편(UNP-2), 송풍관하부 노벽편(UNP-3)을 채취하였고 노바닥형성물 3점(NB-1, NB-2, NB-3)을 채취하였다. 송풍관편은 좌측(USP-1)과 우측(USP-2)를 채취하였다.

철재의 시료는 초기 유출 철재 2점(UNS-1, UNS-2)을 채취하였고 조재제로 사용된 황토(UHE-1) 및 패각(UPS-1)을 각각분석시료로 채취하였다.

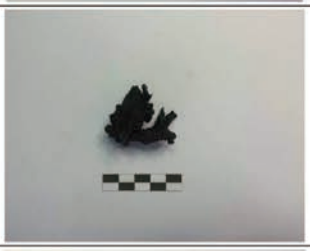


<그림 1> 노해체 작업 시료 채취 위치

<표 4> 분석대상 시료

시료 번호	명칭	채취위치	크기 (cm)			사진
			길이	너비	높이	
UHE-1	황토흙	시험전(가루)				
UPS-1	패각	시험전(파편)				
UCS-1	슬래그	초기슬래그1	3.5	2.4	1.8	
UCS-2	슬래그	초기슬래그 2	5.0	3.0	2.5	
UNJ-1	철괴	상좌뒤	3.5	2.5	1.8	
UNJ-2	철괴	상좌앞	3.0	2.0	1.4	

UNJ-3	철괴	상중뒤	3.8	2.5	1.6	
UNJ-4	철괴	상중앞	4.0	4.0	1.5	
UNJ-5	철괴	상우뒤	3.5	2.8	1.5	
UNJ-6	철괴	상우앞	4.7	3.5	2.0	
UNJ-7	철괴	중좌중	6.0	3.0	2.5	
UNJ-8	철괴	중중중	4.5	2.5	1.0	
UNJ-9	철괴	중중앞	3.5	3.0	1.5	

UNJ-10	철괴	중우중	2.0	1.8	1.0	
UNJ-11	철괴	하좌중	2.0	1.7	1.0	
UNJ-12	철괴	하중중	3.0	2.0	1.5	
UNJ-13	잡철괴	하잡철	7.0	4.5	3.5	
UNJ-14	철괴	상부침하 철괴	4.0	3.0	2.0	
UNB-1	노바닥	노바닥 SiC형성물	11.0	7.0	5.0	
UNB-2	노바닥	노바닥 침하 SiC	8.5	5.0	4.0	

UNB-3	노바닥	좌측벽면 (하부)	19.0	12.0	5.0	
UCP-1	철편	철괴좌측상부 철편	4.5	2.5	2.3	
USP-1	송풍관	송풍관 좌	9.5	6.5	4.0	
USP-2	송풍관	송풍관 우	8.0	8.0	5.5	
UNP-1	노벽편	중간 노벽편	13.0	7.5	8.5	
UNP-2	노벽편	우측하부 노벽	17.0	9.0	5.0	
UNP-3	노벽편	송풍관 하부 노벽편	7.5	6.5	5.0	

4. 분석결과

4.1. 황토(UHE-1)

1) XRF 분석 결과

<표 5> 황토의 XRF 분석결과(조성의 단위는 wt%)

성분	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	MgO	TiO_2	Na_2O	CaO	P_2O_5	MnO
조성	67.85	19.92	5.56	3.93	0.88	0.86	0.32	0.23	0.13	0.09

2) 해석

황토의 주성분은 <표 5>에 나타난 바와 같이 63.85%의 SiO_2이며 (SiO_2·Al_2O_3·Fe_2O_3)의 복합산화물을 형성하고 있었으며 조재제로 사용 시 철광석중의 불순물과 화합하며 철재를 형성하여 분리가 일어나지만 과도한 산성철재를 형성하여 끈적한 상태로 되어 분리가 어렵게 될 수 있다.

4.2. 패각(UPS-1)

1) XRF 분석 결과

<표 6> 패각의 XRF분석결과(조성의 단위는 wt%)

성분	CaO	Na_2O	SO_3	SiO_2	Cl	SrO	Al_2O_3	P_2O_5	Fe_2O_3	Cr_2O_3	K_2O
조성	95.49	1.44	0.75	0.72	0.50	0.29	0.26	0.20	0.15	0.14	0.06

2)해석

패각의 주성분은 <표 6>에 나타난 바와 같이 95.49%의 CaO이며 나머지는 Na_2O나 NaCl로 형성되어 있어서 조재제로 사용 시에 철광석, 황토 및 노벽으로 부터 녹아나오는 SiO_2 성분과 화합하여 저융점(CaO·SiO_2)의 강력한 염기성 산화물을 형성하여 철재의 분리를 용이하게 이루는 역할을 할 수 있다.

4.3. 철재 (UCS-1, UCS-2)

1) XRF 성분검사

<표 7> 철재(UCS-1, UCS-2)의 XRF 분석결과(조성의 단위는 wt%)

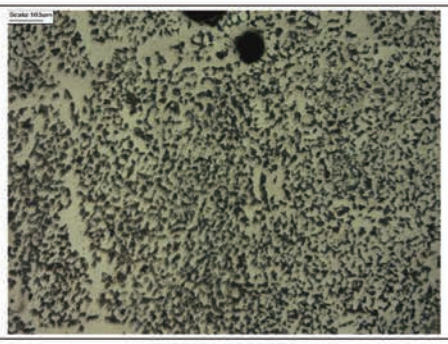
성분	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	CaO	Na_2O	MgO	TiO_2	P_2O_5	MnO
UCS-1	17.04	42.54	7.62	2.70	20.00	1.10	5.11	1.93	0.36	0.33
UCS-2	36.40	31.06	5.66	2.44	17.58	0.95	3.35	1.44	0.26	0.24

2) 해석

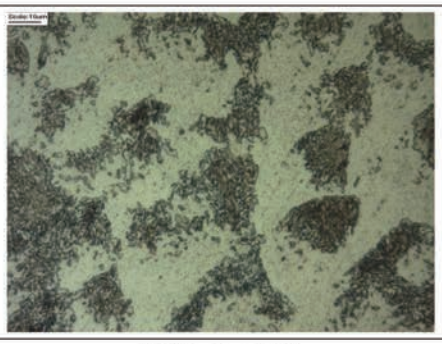
초기유출철재(UCS-1, UCS-2)에 대한 XRF 분석결과 SiO_2의 조성이 높기는 하지만 CaO함량이 20.0%, 17.58%로서 상당히 높은 염기성 반응을 수반하고 있는 것은 초기 철재 반응에서부터 CaO의 영향을 크게 받고 있음을 알 수 있다.

4.4. 철괴(UNJ-1)

1) 철괴(UNJ-1)의 현미경조직



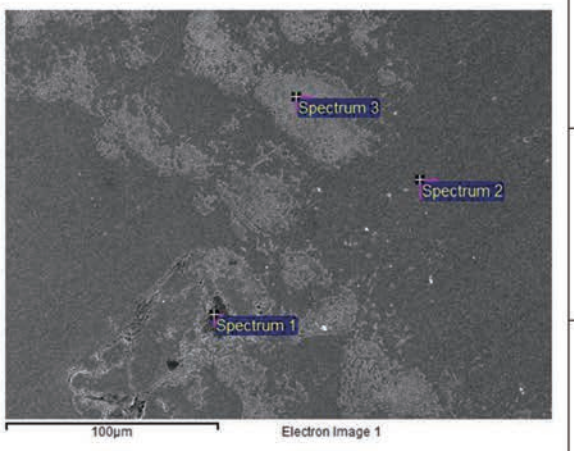
UNJ-1 x50



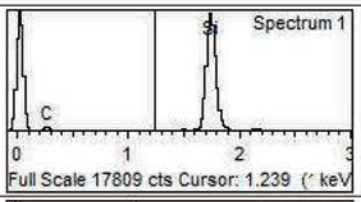
UNJ-1 x500

<사진 1> 철괴(UNJ-1) 미세조직

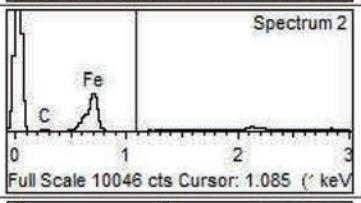
2) SEM-EDX분석



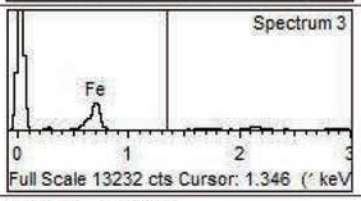
①



②



③



<사진 2> 철괴(UNJ-1)의 EDX분석 위치와 그래프

<표 8> 철괴(UNJ-1)의 EDX분석 결과(단위는 wt%)

성분	Fe	O	C	S
①	1.97	-	33.99	64.04
②	95.40	-	4.60	-
③	100.00	-	-	-

3) 경도 시험

<표 9> 철괴(UNJ-1)의 경도시험 결과(단위는 Hv)

횟수	1	2	3	평균
Ferrite	80.8	86.8	93.7	87.1

4) C/S 성분검사

<표 10> 철괴(UNJ-1)의 C/S 분석결과(조성의 단위는 wt%)

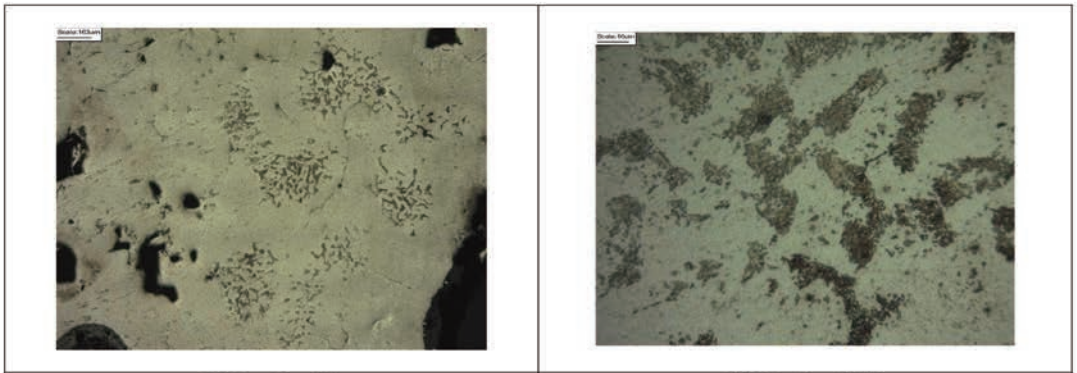
성분	C	S
조성	0.64	0.024

5) 해석

상좌뒤(UNJ-1) 철괴의 기지조직이 Ferrite이고 평균경도가 Hv87.1이 이를 증명하고 있다. EDX분석결과에 기지조직은 순철에 가깝고 입계에 탄화물이 잔존하는 것은 계속적으로 환원반응이 일어나서 남아 있는 산소가 거의 없어 잔존 산소가 나타나지 않고 있다. 다만 C/S분석상으로 탄소가 0.64%로 나온 것은 철괴 조직의 입계에 잔존하는 목탄성분일 가능성이 크다고 하겠다. 결국 철재의 분리가 잘 이루어져서 철재성분의 개재물에 남아 있지 않는다고 볼 수 있다.

4.5. 철괴(UNJ-2)

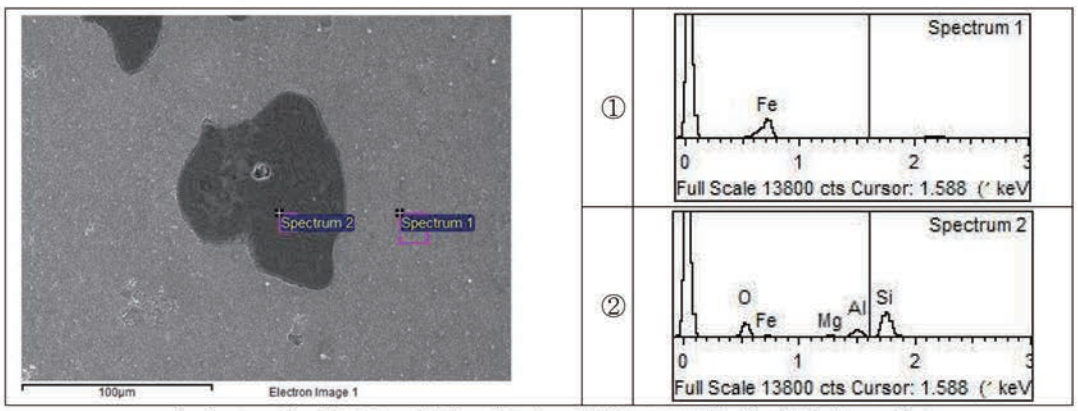
1) 금속현미경 분석



UNJ-2 x50 | UNJ-2 x500

<사진 3> 철괴(UNJ-2)의 현미경조직

2) SEM-EDX분석



<사진 4> 철괴(UNJ-2)의 비금속 개재물 EDX분석 위치와 그래프

<표 11> 철괴(UNJ-2)의 비금속 개재물 EDX분석 결과(단위는 wt%)

성분	Fe	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti
①	100.00	-							
②	12.24	41.47	1.14	1.04	5.79	21.65	2.90	11.77	2.00

3) 경도 시험

<표 12> 철괴(UNJ-2)의 경도시험 결과(단위는 Hv)

횟수	1	2	3	평균
Ferrite	114.4	118.6	117.3	116.8

4) C/S 성분검사

<표 13> 철괴(UNJ-2)의 C/S 분석결과(조성의 단위는 wt%)

성분	C	S
조성	0.075	0.020

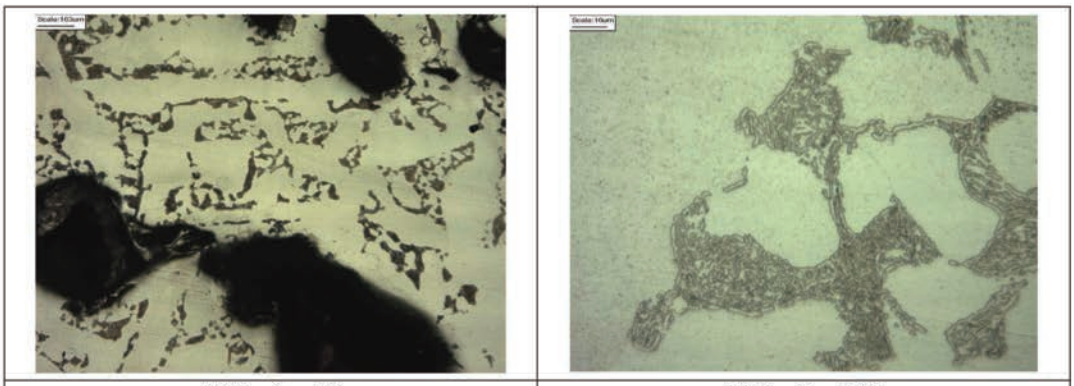
5) 해석

상좌앞(UNJ-2)철괴의 현미경조직은 완전한 Ferrite기지의 조직이며 입계에 일부의 철재의 잔존으로 이루어진 복합산화물($CaO·SiO_2·FeO$)이 남아 있다고 판단된다.

평균경도가 Hv116.8은 Ferrite기지조직을 한층 더 확실하게 증명해주고, C/S분석에서 0.075%C는 순철에 가까운 탄소성분이다. 이 철괴도 대부분의 철재가 분리되어 조직 내에 남아 있지 않고 남아있는 철재형의 개재물에는 CaO 함량이 높게 나타남으로서 $CaO·SiO_2$의 저융점과 염기성 반응에 의하여 철재의 분리가 촉진된 것을 입증해 주고 있다.

4.6. 철괴(UNJ-3)

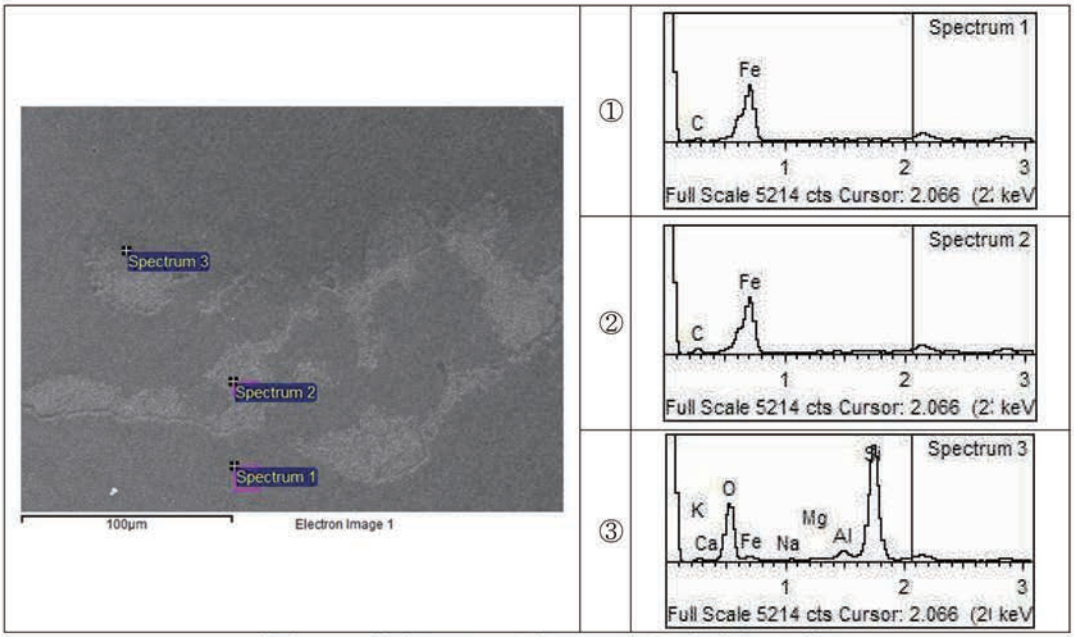
1) 금속현미경 분석



UNJ-3 x50 | UNJ-3 x500

<사진 5> 철괴(UNJ-3)의 현미경 조직

2) SEM-EDX분석



<사진 6> 철괴(UNJ-3)의 EDX분석 위치와 그래프

<표 14> 철괴(UNJ-3)의 비금속 개재물 EDX분석 결과(단위는 wt%)

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca
①	93.86	6.14	-	-	-	-	-	-	-
②	90.55	9.45	-	-	-	-	-	-	-
③	16.89	-	41.92	0.53	0.46	1.84	34.76	1.15	2.46

3) 경도 시험

<표 15> 철괴(UNJ-3)의 경도시험 결과(단위는 Hv)

횟수	1	2	3	평균
Ferrite	74.4	67.9	78.6	73.6

4) C/S 성분검사

<표 16> 철괴(UNJ-3)의 C/S 분석결과(조성의 단위는 wt%)

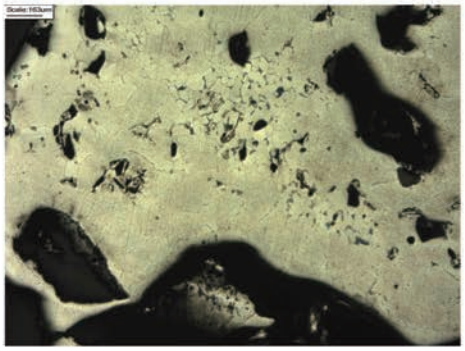
성분	C	S
조성	0.082	0.007

5) 해석

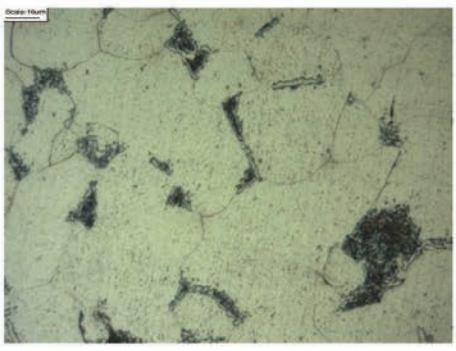
상중뒤(UNJ-3)철괴의 현미경 조직은 기지조직이 Ferrite이고 이는 평균경도(Hv73.6)에서도 증명된다. EDX분석에서도 환원반응에서 목탄성분이 남아 있어서 탄소가 높게 나타나지만 C/S분석에서 0.082%C로 낮은 탄소함량은 환원된 괴련 철괴의 성분임을 알 수 있다. 철광석 중의 맥석산화물은 대부분 분리되어 있는 상태이다.

4.7. 철괴(UNJ-4)

1) 금속현미경 분석



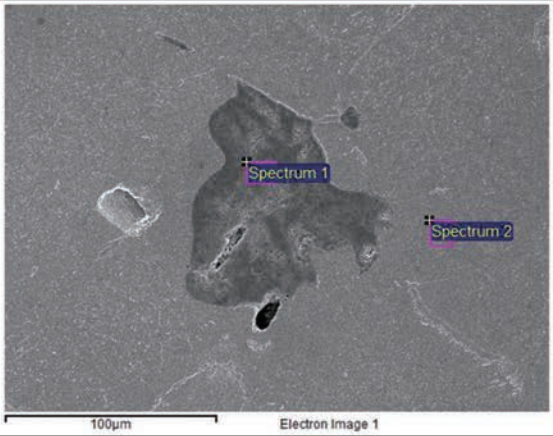
UNJ-4 x50



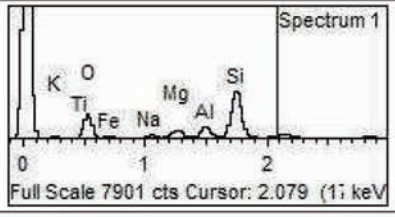
UNJ-4 x500

<사진 7> 철괴(UNJ-4)의 현미경 조직

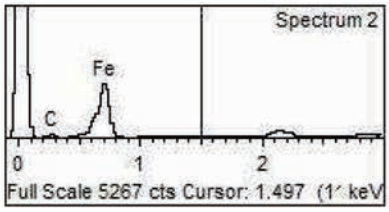
2) SEM-EDX분석



①



②



<사진 8> 철괴(UNJ-4)의 비금속 개재물 EDX분석 위치와 그래프

<표 17> 철괴(UNJ-4)의 비금속 개재물 EDX분석 결과(단위는 wt%)

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti
①	10.37	-	39.26	1.93	3.33	4.60	21.64	4.26	13.05	1.56
②	94.30	5.70	-	-	-	-	-	-	-	-

3) 경도 시험

<표 18> 철괴(UNJ-4)의 경도시험 결과(단위는 Hv)

횟수	1	2	3	평균
Ferrite	89.3	79.7	79.5	82.8

4) C/S 성분검사

<표 19> 철괴(UNJ-4)의 C/S 분석결과(조성의 단위는 wt%)

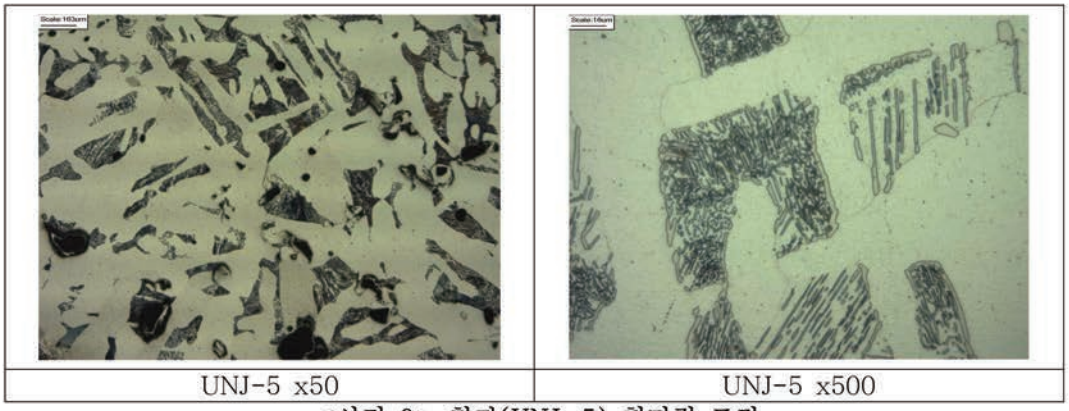
성분	C	S
조성	0.052	0.041

5) 해석

상중앞(UNJ-4)철괴의 현미경조직은 Ferrite기지에 입계로부터 미량으로 성장되는 Pearlite 조직으로 구성되어있다. SEM-EDX에서 일부의 개재물이 (SiO_2·CaO·FeO)의 복합산화물을 형성하지만 상대적으로 CaO함량이 13.05%로서 높게 나타나서 대부분의 철재가 분리되어 빠져나간 상태이다. C/S분석에서 0.052%C로 순철에 가깝고 평균 경도도 Hv82.8로서 순철의 경도이므로 이 철괴는 전형적인 저탄소의 괴련괴임을 알 수 있다.

4.8. 철괴(UNJ-5)

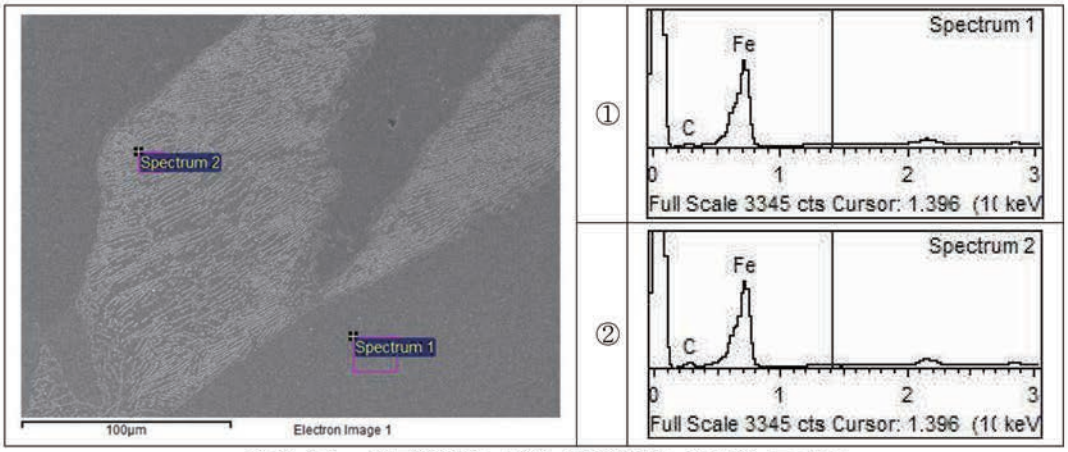
1) 금속현미경 분석



UNJ-5 x50	UNJ-5 x500

<사진 9> 철괴(UNJ-5) 현미경 조직

2) SEM-EDX분석



<사진 10> 철괴(UNJ-5)의 EDX분석 위치와 그래프

<표 20> 철괴(UNJ-5)의 EDX분석 결과(단위는 wt%)

성분	Fe	C
①	94.77	5.23
②	93.88	6.12

3) 경도 시험

<표 21> 철괴(UNJ-5)의 경도시험 결과(단위는 Hv)

횟수	1	2	3	평균
Ferrite	110.2	116.5	112.6	113.1
Pearlite	204.9	200.3	177.8	194.3

4) C/S 성분검사

<표 22> 철괴(UNJ-5)의 C/S 분석결과(조성의 단위는 wt%)

성분	C	S
조성	0.316	0.044

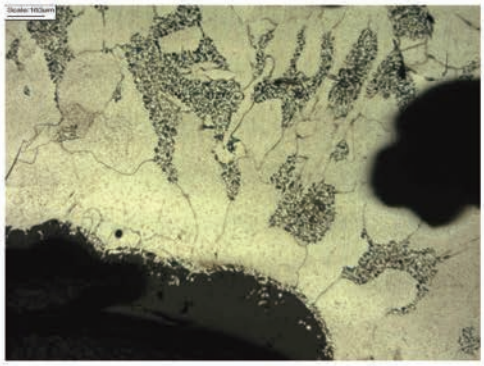
5) 해석

상우뒤(UNJ-5) 철괴의 현미경조직은 Ferrite와 Pearlite가 공존하는 조직으로서 경도 확인 결과 Ferrite는 평균 경도가 Hv113.1이고 Pearlite의 평균 경도는 Hv194.3으로서 이를 뒷받침하고 있다.

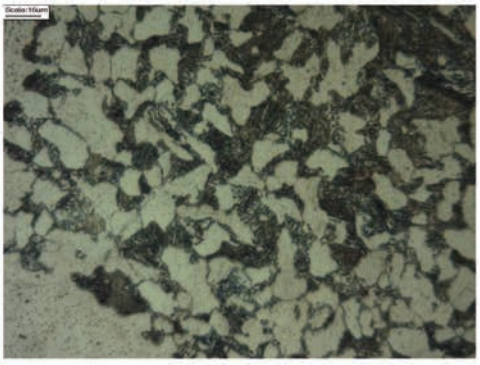
C/S 분석에서 0.316%C로서 중탄소강의 조성을 갖고 있으며 SEM-EDX에서 개재물이 거의 나타나지 않는 것은 철재가 완전히 분리되었다는 것을 증명하고 있다.

4.9. 철괴(UNJ-6)

1) 금속현미경 분석



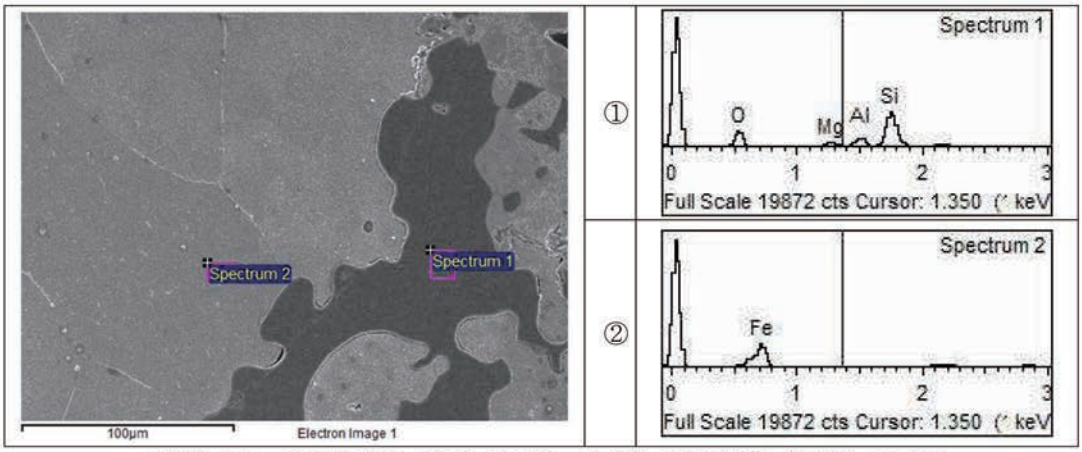
UNJ-6 x50



UNJ-6 x500

<사진 11>철괴(UNJ-6)의 현미경 조직

2) SEM-EDX분석



<사진 12> 철괴(UNJ-6)의 비금속 개재물 EDX분석 위치와 그래프

<표 23> 철괴(UNJ-6)의 비금속 개재물 EDX분석 결과(단위는 wt%)

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti
①	3.05	-	42.54	0.81	3.29	5.94	26.03	3.14	14.01	1.20
②	94.69	5.31	-	-	-	-	-	-	-	-

3) 경도 시험

<표 24> 철괴(UNJ-6)의 경도시험 결과(단위는 Hv)

횟수	1	2	3	평균
Ferrite	116.3	113.4	103.6	111.1

4) C/S 성분검사

<표 25> 철괴(UNJ-6)의 C/S 분석결과(조성의 단위는 wt%)

성분	C	S
조성	0.135	0.027

5) 해석

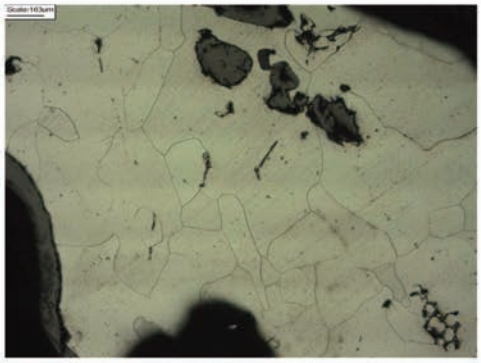
상우앞(UNJ-6) 철괴의 현미경조직은 저탄소계 철의 기지조직인 Ferrite기지에 입계에 Pearlite가 생성되는 조직이다.

Ferrite의 평균경도는 Hv111.1이며 C/S분석결과 탄소가 0.135%C로서 저탄소 철괴임을 나타내고 있다.

SEM-EDX 분석에서 기지조직은 Fe-C화합물이고 비금속개재물은 (SiO_2·CaO·Al_2O_3)의 복합산화물로서 14.1%Ca가 비교적 높게 나타나며 잔존하는 개재물이 많이 낮아 진 것은 철재의 분리가 CaO에 의하여 잘 이루어 진 것으로 판단된다.

4.10. 철괴(UNJ-7)

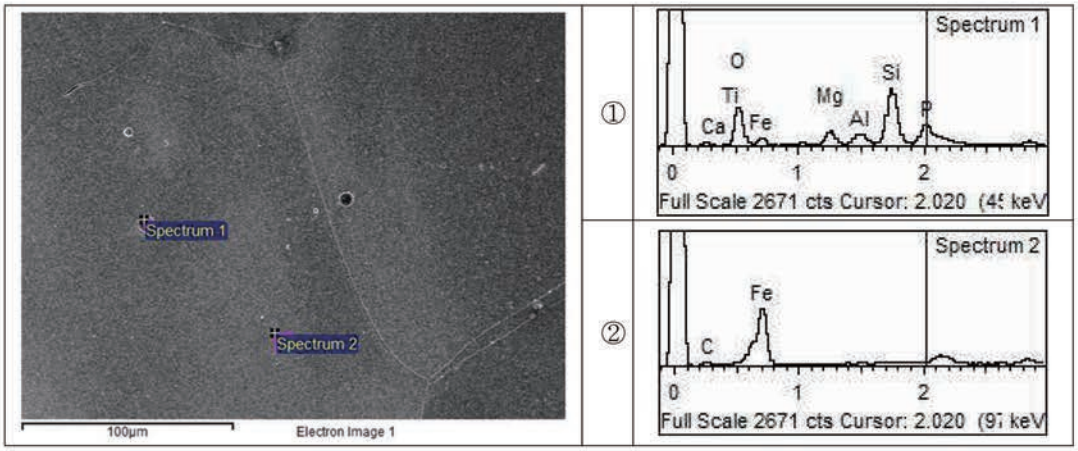
1) 금속현미경 분석



UNJ-7 x50	UNJ-7 x500

<사진 13> 철괴(UNJ-7)의 현미경 조직

2) SEM-EDX분석



<사진 14> 철괴(UNJ-7)의 비금속 개재물 EDX분석 위치와 그래프

<표 26> 철괴(UNJ-7)의 비금속 개재물 EDX분석 결과(단위는 wt%)

성분	Fe	C	O	Mg	Al	Si	P	Ca	Ti
①	18.85	-	36.27	3.96	2.66	15.66	6.05	15.15	1.41
②	93.62	6.38	-	-	-	-	-	-	-

3) 경도 시험

<표 27> 철괴(UNJ-7)의 경도시험 결과(단위는 Hv)

횟수	1	2	3	평균
Ferrite	81.6	83.2	78.0	80.9

4) C/S 성분검사

<표 28> 철괴(UNJ-7)의 C/S 분석결과(조성의 단위는 wt%)

성분	C	S
조성	0.012	0.015

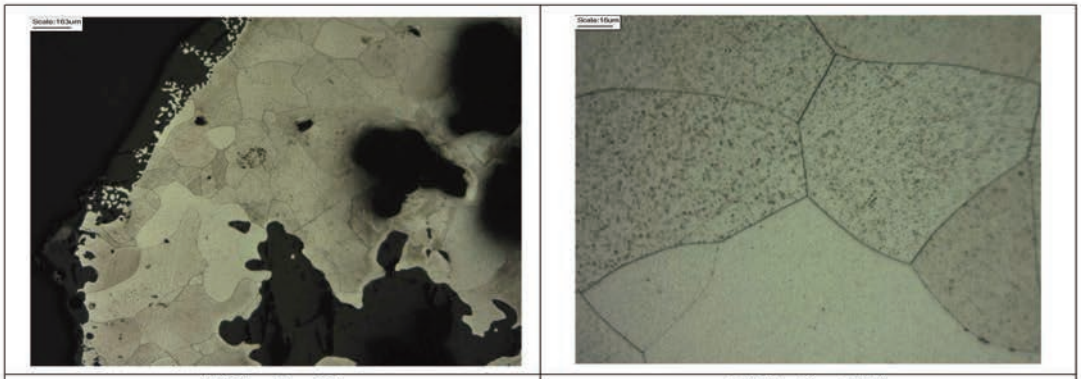
5) 해석

중좌중(UNJ-7) 철괴의 현미경조직은 완전한 Ferrite조직으로 C/S분석에서도 0.012%C의 저탄소 함량으로 나타나고 평균경도가 Hv80.9로서 이를 뒷받침하고 있다.

SEM-EDX에서도 기지조직은 Fe-C화합물이고 개재물에서도 ($FeO \cdot SiO_2 \cdot CaO$)의 복합산화물이지만 CaO가 15.15%Ca로서 높게 나타나고 잔존하는 철재의 량이 매우 낮게 나타나서 조업중에 철재가 대부분 분리된 것으로 판단된다.

4.11. 철괴(UNJ-8)

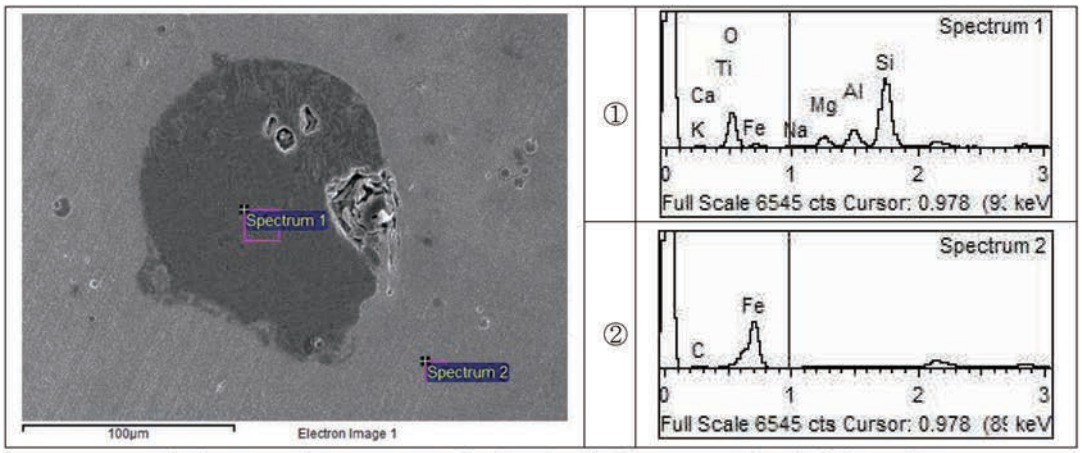
1) 금속현미경 분석



UNJ-8 x50	UNJ-8 x500

<사진 15> 철괴(UNJ-8)의 현미경 조직

2) SEM-EDX분석



<사진 16> 철괴(UNJ-8)의 비금속 개재물 EDX분석 위치와 그래프

<표 29> 철괴(UNJ-8)의 비금속 개재물 EDX분석 결과(단위는 wt%)

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti
①	10.80	-	39.82	0.71	3.27	5.24	22.96	2.56	13.44	1.20
②	94.67	5.33	-	-	-	-	-	-	-	-

3) 경도 시험

<표 30> 철괴(UNJ-8)의 경도시험 결과(단위는 Hv)

횟수	1	2	3	평균
Ferrite	86.0	83.0	81.8	83.4

4) C/S 성분검사

<표 31> 철괴(UNJ-8)의 C/S 분석결과(조성의 단위는 wt%)

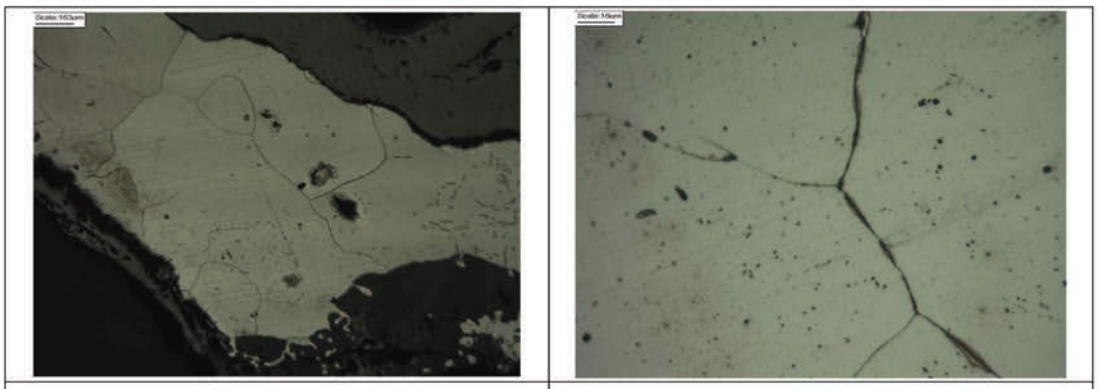
성분	C	S
조성	0.012	0.020

5) 해석

중중중(UNJ-8) 철괴의 현미경조직은 완전한 Ferrite 조직이며 비금속 개재물에 대한 EDX 분석 결과 기지는 Fe-C의 조직이고 잔존하는 개재물의 조성은 (SiO_2·CaO·FeO)의 복합산화물이나 CaO의 조성이 13.44%Ca로 나타나서 패각에 의한 염기성 철재의 반응으로 철재의 분리가 잘 이루어 진 것으로 판단된다. C/S분석에서도 탄소가 0.012%C로서 매우 낮으며 Ferrite의 평균 경도는 Hv83.4로서 전형적인 괴련철 조직을 입증하고 있다.

4.12. 철괴(UNJ-9)

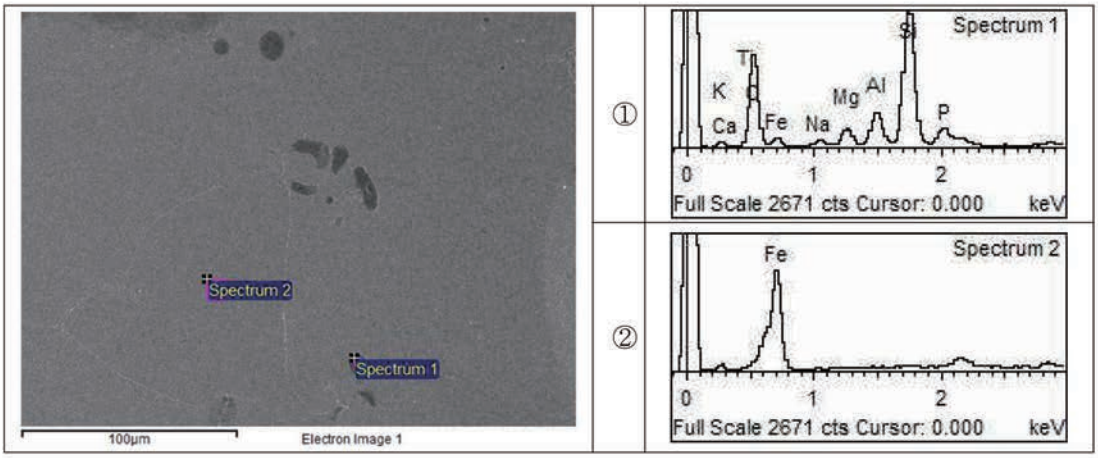
1) 금속현미경 분석



UNJ-9 x50	UNJ-9 x500

<사진 17>철괴(UNJ-9)의 현미경 조직

2) SEM-EDX분석



<사진 18> 철괴(UNJ-9)의 비금속 개재물 EDX분석 위치와 그래프

<표 32> 철괴(UNJ-9)의 비금속 개재물 EDX분석 결과(단위는 wt%)

성분	Fe	O	Na	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti
①	11.27	43.25	0.98	2.73	4.66	22.10	2.98	2.27	8.78	0.98
②	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-

3) 경도 시험

<표 33> 철괴(UNJ-9)의 경도시험 결과(단위는 Hv)

횟수	1	2	3	평균
Ferrite	98.8	91.1	96.5	95.5

4) C/S 성분검사

<표 34> 철괴(UNJ-9)의 C/S 분석결과(조성의 단위는 wt%)

성분	C	S
조성	0.011	0.077

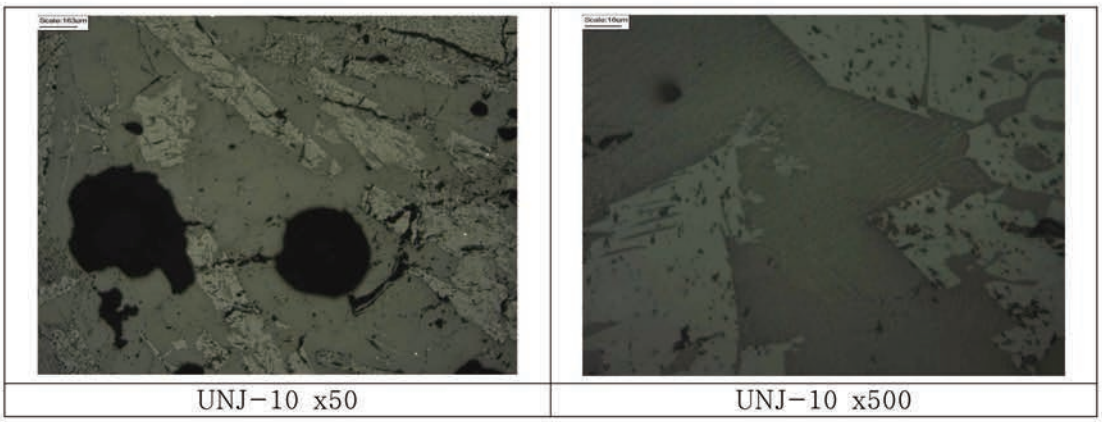
5) 해석

중중앞(UNJ-9) 철괴의 현미경조직은 완전한 Ferrite조직이며 SEM-EDX분석에서도 기지조직은 100%Fe이고 잔존 개재물의 조성은 (SiO_2·FeO·CaO)의 복합 산화물이나 대부분의 철재는 분리되고 있었다.

C/S분석에서 탄소가 0.011%C로서 극히 낮게 나타나고 Ferrite의 평균경도도 Hv95.5로서 매우 낮아서 철괴가 괴련괴임을 입증해 주고 있다.

4.13. 철괴(UNJ-10)

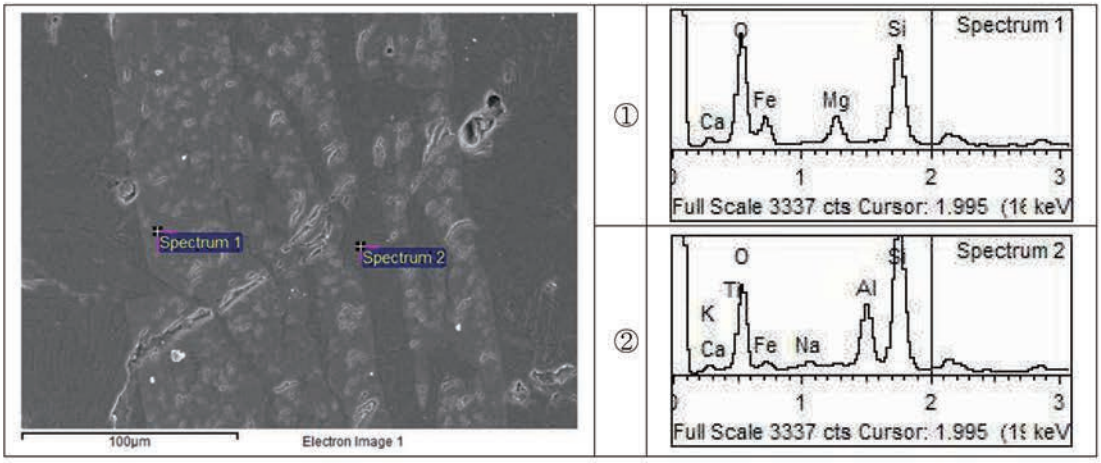
1) 금속현미경 분석



UNJ-10 x50	UNJ-10 x500

<사진 19> 철괴(UNJ-10)의 현미경 조직

2) SEM-EDX분석



<사진 20> 철괴(UNJ-10)의 비금속 개재물 EDX분석 위치와 그래프

<표 35> 철괴(UNJ-10)의 비금속 개재물 EDX분석 결과(단위는 wt%)

성분	Fe	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti
①	45.80	31.21	–	5.01	–	16.46	–	1.52	–
②	13.20	40.49	1.20	–	8.10	22.55	3.03	10.86	0.57

3) C/S 성분검사

<표 36> 철괴(UNJ-10)의 C/S 분석결과(조성의 단위는 wt%)

성분	C	S
조성	0.018	0.050

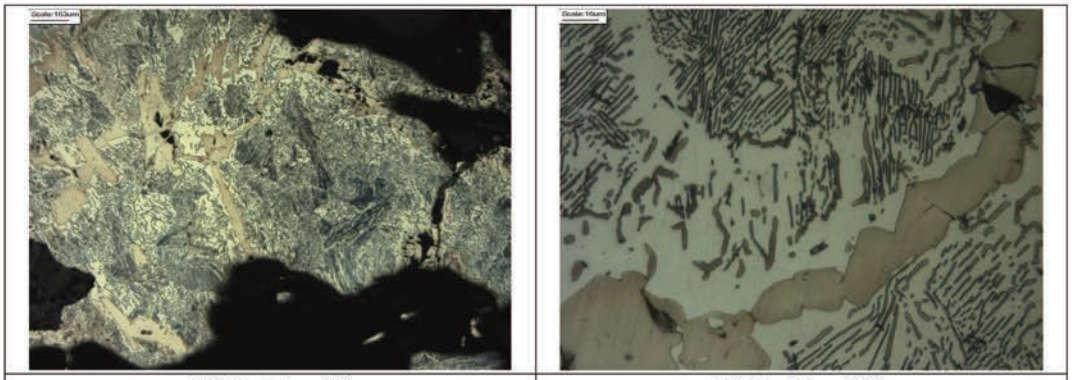
4) 해석

중우중 철괴(UNJ-10)의 현미경조직은 괴련괴 성향의 잡철괴의 조직이며 SEM-EDX 분석에서도 많은 철재성의 개재물이 분리되지 않고 많이 있어서 조직내부에 산해하고 있으며 주요조성은 (SiO_2·FeO·CaO) 혹은 (FeO·SiO_2·MgO)의 복합산화물로 잔존하고 있다.

C/S분석에서 탄소가 0.018%C로 나타나고 있어서 저탄소계의 잡철괴임을 알 수 있다.

4.14. 철괴(UNJ-11)

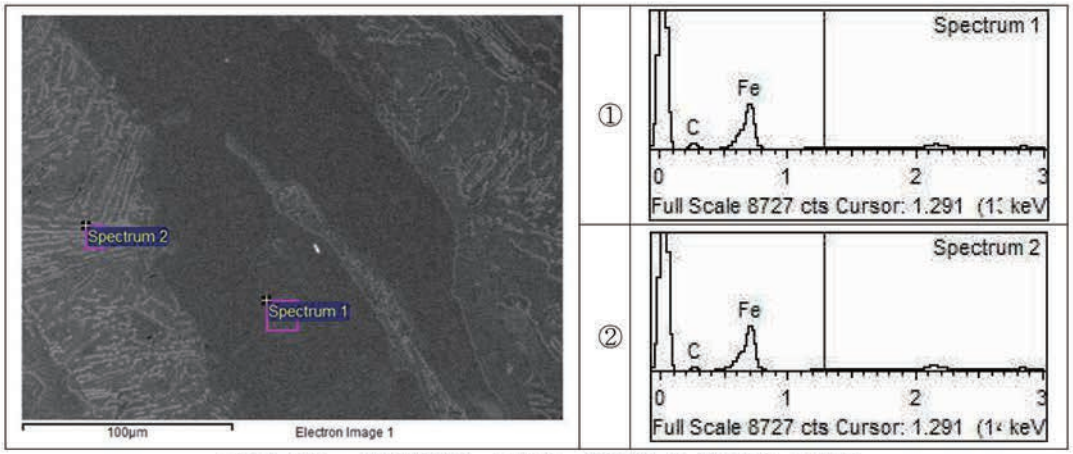
1) 금속현미경 분석



UNJ-11 x50	UNJ-11 x500

<사진 21> 철괴(UNJ-11)의 현미경 조직

2) SEM-EDX분석



<사진 22> 철괴(UNJ-11)의 EDX분석 위치와 그래프

<표 37> 철괴(UNJ-11)의 EDX분석 결과(단위는 wt%)

성분	Fe	C
①	88.94	11.06
②	93.08	6.92

3) 경도 시험

<표 38> 철괴(UNJ-11)의 경도시험 결과(단위는 Hv)

횟수	1	2	3	평균
Pearlite	185.7	183.4	183.3	184.1

4) C/S 성분검사

<표 39> 철괴(UNJ-11)의 C/S 분석결과(조성의 단위는 wt%)

성분	C	S
조성	1.638	0.171

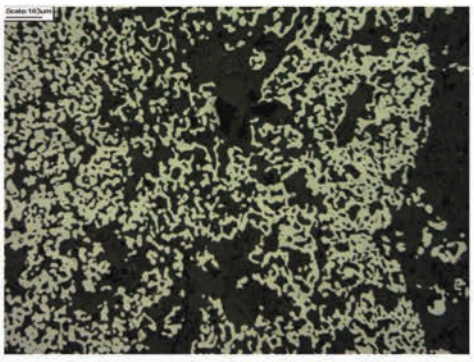
5) 해석

하좌중 철괴(UNJ-11)의 현미경조직은 고탄소계 잡철조직이며 입내와 입계조직에 대한 SEM-EDX분석 결과 Fe-C의 고탄소 성분으로 나타났다.

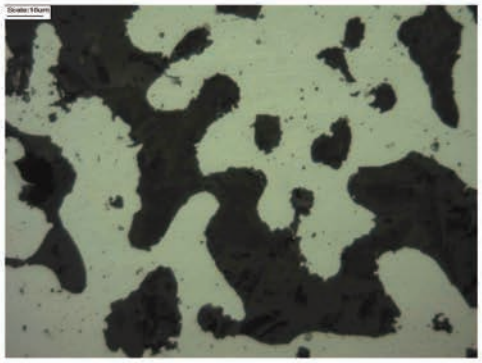
C/S분석 결과 탄소가 1.638%C로서 고탄소 성분이며 Pearlite기지조직에 대한 평균경도는 Hv184.1로서 고탄소계의 잡철괴로 판단된다.

4.15. 철괴(UNJ-12)

1) 금속현미경 분석



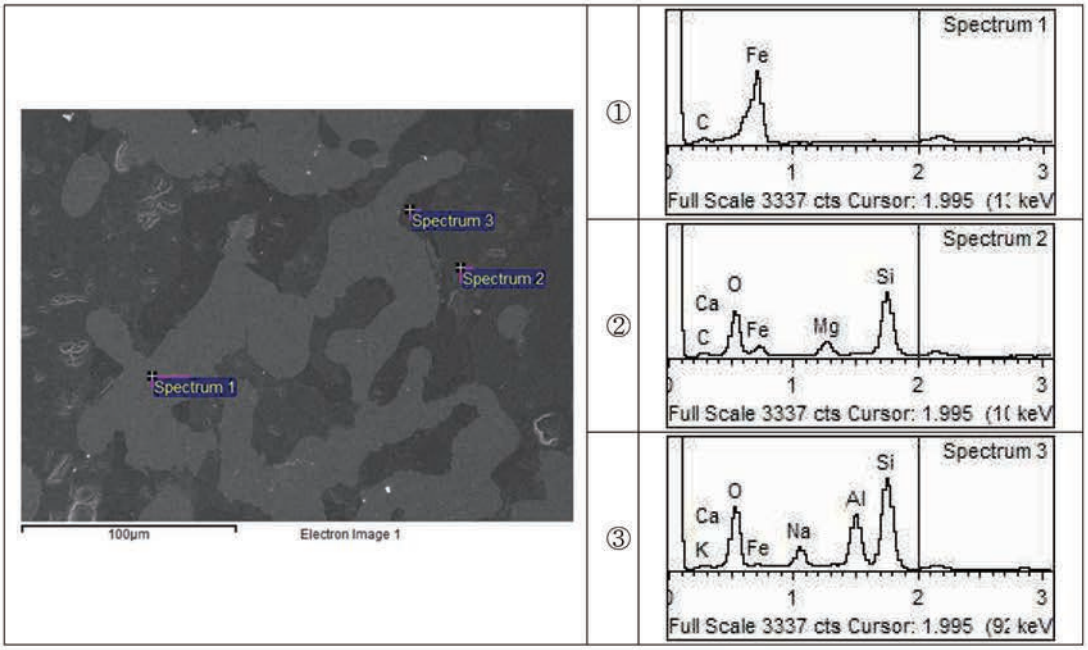
UNJ-12 x50



UNJ-12 x500

<사진 23>철괴(UNJ-12)의 현미경 조직

2) SEM-EDX분석



<사진 24> 철괴(UNJ-12)의 EDX분석 위치와 그래프

<표 40> 철괴(UNJ-12)의 EDX분석 결과(단위는 wt%)

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca
①	93.20	6.80	-	-	-	-	-	-	-
②	25.60	6.45	33.46	-	3.77	-	15.19	-	15.53
③	6.55	-	42.10	6.07	-	11.70	24.36	3.20	6.02

4) C/S 성분검사

<표 41> 철괴(UNJ-12)의 C/S 분석결과(조성의 단위는 wt%)

성분	C	S
조성	0.016	0.061

5) 해석

하중중 철괴(UNJ-12)의 현미경 조직은 FeO_X(Wüstite)와 철재가 융합되어 잇는 조직이며 SEM-EDX의 개재물 분석결과는 (SiO_2·CaO)와 (CaO·SiO_2)계가 혼재하고 있고 산소함량이 높은 것은 철재의 분리가 이루어지기 전인 반환원 상태로 판단된다.

C/S분석 결과 탄소가 0.016%C로서 매우 낮은 것도 FeO_X(Wüstite)에서 아직 미 환원의 산소가 남아 있기 때문이다.

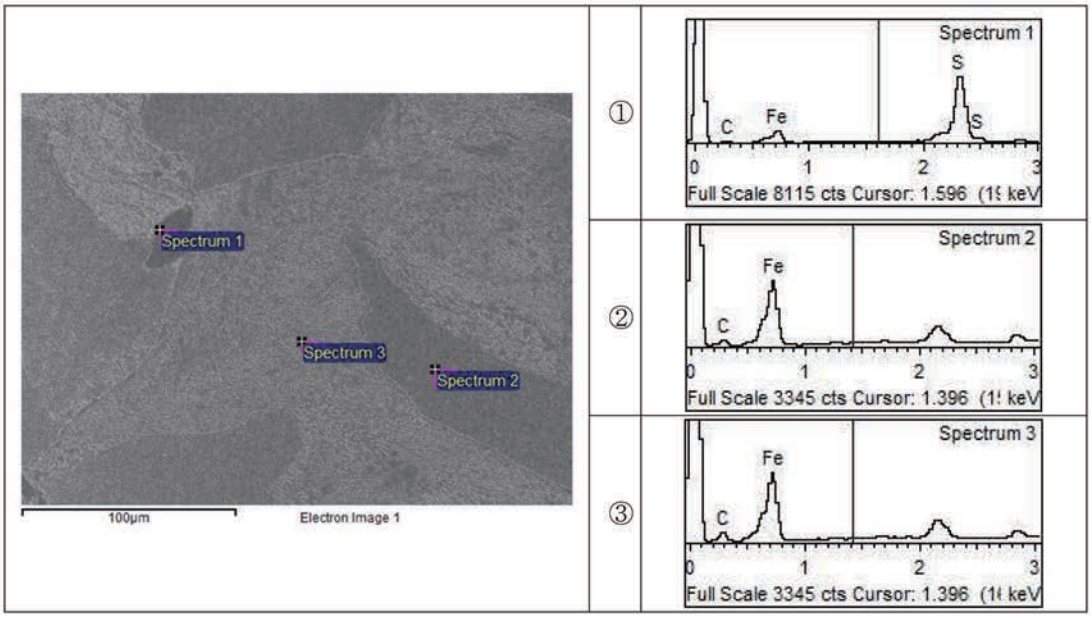
4.16. 잡철괴(UNJ-13)

1) 금속현미경 분석

UNJ-13 x50	UNJ-13 x500

<사진 25> 잡철괴(UNJ-13)의 현미경 조직

2) SEM-EDX분석



<사진 26> 잡철괴(UNJ-13)의 EDX분석 위치와 그래프

<표 42> 잡철괴(UNJ-13)의 EDX분석 결과(단위는 wt%)

성분	Fe	C	S
①	54.41	14.05	31.54
②	92.75	7.25	-
③	90.48	9.52	-

3) 경도 시험

<표 43> 잡철괴(UNJ-13)의 경도시험 결과(단위는 Hv)

횟수	1	2	3	평균
Ferrite	94.8	84.3	104.2	94.4
Pearlite	143.2	197.3	171.0	170.5

4) C/S 성분검사

<표 44> 잡철괴(UNJ-13)의 C/S 분석결과(조성의 단위는 wt%)

성분	C	S
조성	0.174	0.058

5) 해석

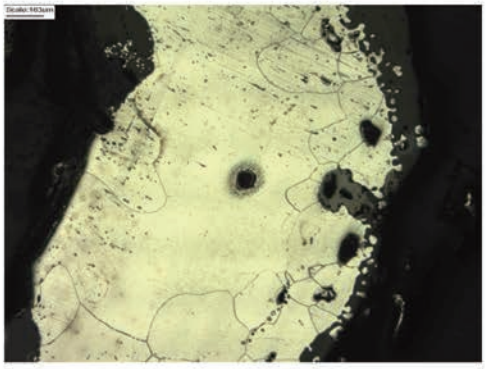
잡철괴(UNJ-13)의 현미경 조직은 Pearlite기지에 입계에 Ferrite가 석출하는 조직이다. 조직의 경도를 확인한 결과 Pearlite의 평균경도는 Hv170.5이고 Ferrite의 평균경도는 Hv94.4로서 전형적인 경도를 나타내고 있다.

C/S분석에서 탄소가 0.174%C로서 다소 낮게 나타나는 것은 편석현상으로 볼 수 있다.

기지조직과 입계조직의 SEM-EDX분석에서도 Fe-C가 주성분을 이루고 있으며 대부분의 철재는 분리되어 개재물로 남아 있지 않고 있다.

4.17. 철괴(UNJ-14)

1) 금속현미경 분석

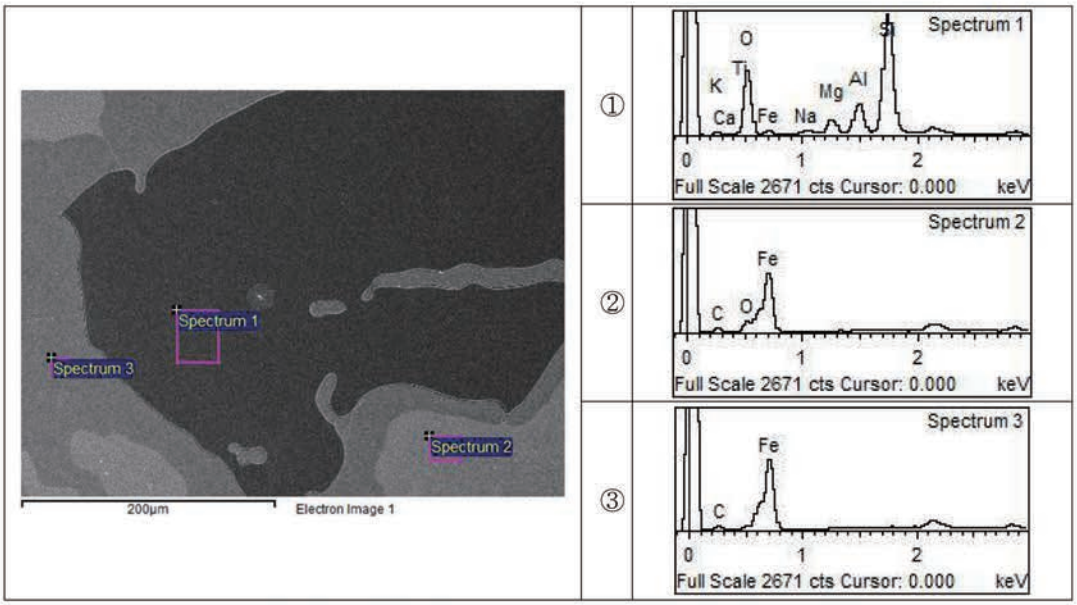


UNJ-14 x50

UNJ-14 x500

<사진 27> 철괴(UNJ-14)의 현미경 조직

2) SEM-EDX분석



<사진 28> 철괴(UNJ-14)의 EDX분석 위치와 그래프

<표 45> 철괴(UNJ-14)의 EDX분석 결과(단위는 wt%)

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti
①	8.56	-	42.79	0.93	3.04	5.46	25.13	2.88	10.00	1.21
②	89.42	6.89	3.69	-	-	-	-	-	-	-
③	94.30	5.70	-	-	-	-	-	-	-	-

3) 경도 시험

<표 46> 철괴(UNJ-14)의 경도시험 결과(단위는 Hv)

횟수	1	2	3	평균
Ferrite	68.3	82.0	89.6	80.0

4) C/S 성분검사

<표 47> 철괴(UNJ-14)의 C/S 분석결과(조성의 단위는 wt%)

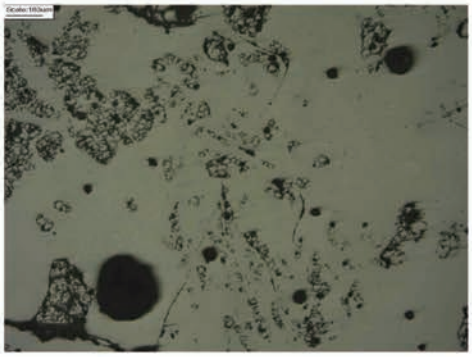
성분	C	S
조성	0.056	0.020

5) 해석

상부 침하 철괴(UNJ-14)는 현미경 조직으로는 완전한 Ferrite조직이며 비금속 개재물의 EDX 분석결과는 대부분 Fe-C조직이며 잔존 개재물은 (SiO_2·CaO·FeO)의 복합 산화물이다. C/S 성분 분석 결과는 탄소가 0.056%C로서 극저탄소에 속하며 Ferrite기지 조직의 평균경도는 Hv80.0으로서 완전한 순철에 가까운 조직이다.

4.18. 노바닥 (UNB-1)

1) 금속현미경 분석

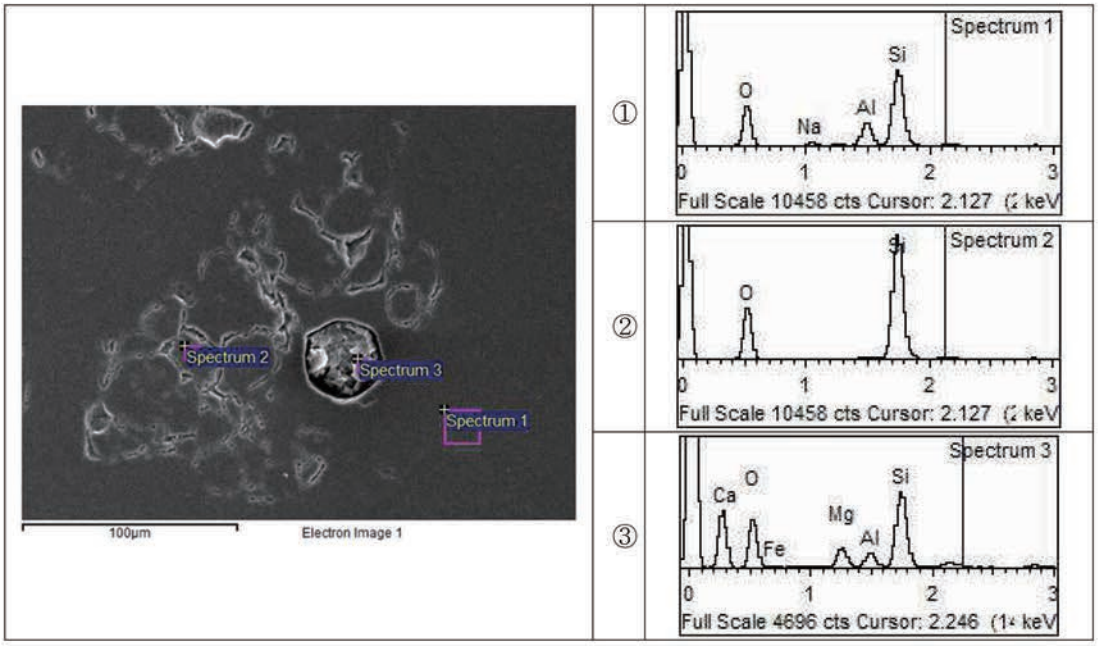


UNB-1 x50

UNB-1 x500

<사진 29> 노바닥(UNB-1)의 현미경 조직

2) SEM-EDX분석



<사진 30> 노바닥(UNB-1)의 EDX분석 위치와 그래프

<표 48> 노바닥(UNB-1)의 EDX분석 결과(단위는 wt%)

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca
①	2.52	–	46.79	1.67	–	8.93	34.82	4.56	0.71
②	–	5.80	49.36	–	–	–	44.84	–	–
③	2.23	–	48.22	–	7.86	5.65	34.97	–	1.07

3) XRF 성분검사

<표 49> 노바닥(UNB-1)의 XRF 분석결과(조성의 단위는 wt%)

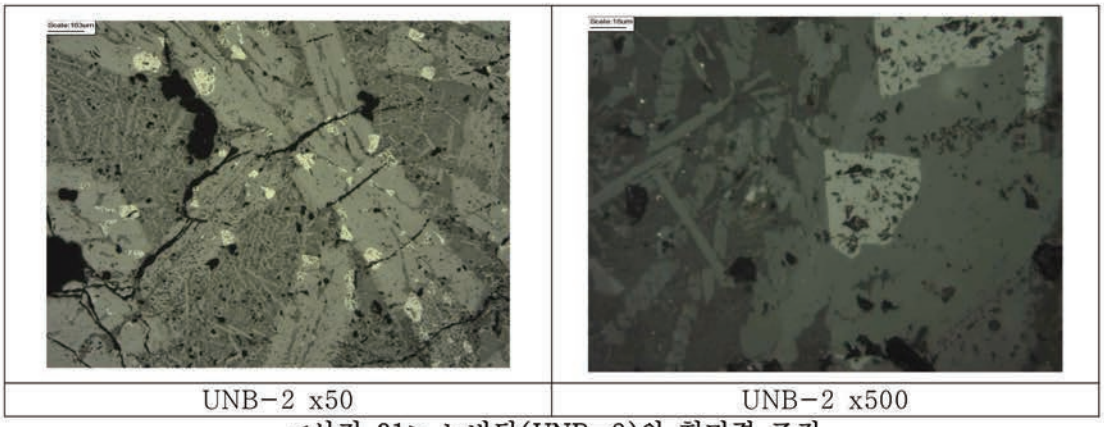
성분	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	CaO	Na_2O	MgO	TiO_2	P_2O_5	MnO
조성	25.00	52.42	8.85	3.29	6.31	1.28	1.39	0.93	0.13	0.15

4) 해석

노바닥(UNB-1)의 현미경조직은 유리질의 조직이며 SEM-EDX분석 결과(SiO_2·Al_2O_3·SiC)의 복합산화물로 판단된다. XRF분석결과(SiO_2·FeO·Al_2O_3·CaO)의 복합산화물이다.

4.19. 노바닥 (UNB-2)

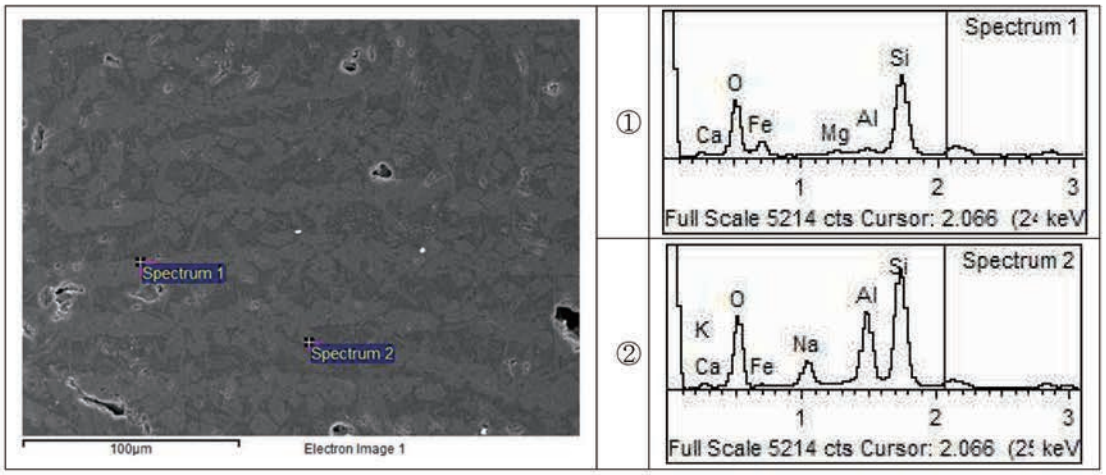
1) 금속현미경 분석



UNB-2 x50 | UNB-2 x500

<사진 31> 노바닥(UNB-2)의 현미경 조직

2) SEM-EDX분석



<사진 32> 노바닥(UNB-2)의 EDX분석 위치와 그래프

<표 50> 노바닥(UNB-2)의 EDX분석 결과(단위는 wt%)

성분	Fe	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca
①	35.32	32.21	–	0.61	0.77	16.39	–	14.70
②	4.52	40.99	5.78	–	12.98	25.78	5.82	4.12

3) XRF 성분검사

<표 51> 노바닥(UNB-2)의 XRF 분석결과(조성의 단위는 wt%)

성분	FeO	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	CaO	Na_2O	MgO	TiO_2	P_2O_5	MnO
조성	40.22	36.07	7.05	2.24	8.74	1.16	2.61	1.22	0.20	0.21

4) 해석

노바닥(UNB-2)의 현미경조직은 유리질 조직이며 SEM-EDX분석결과 ($FeO·SiO_2·CaO$) 혹은 ($SiO_2·Al_2O_3·K_2O$)의 복합 산화물이다. XRF분석 결과 화학조성은($FeO·SiO_2·CaO·Al_2O_3$)계의 복합 산화물로 판단된다.

4.20. 노바닥 (UNB-3)

1) XRF 성분검사

<표 52> 노바닥(UNB-3)의 XRF 분석결과(조성의 단위는 wt%)

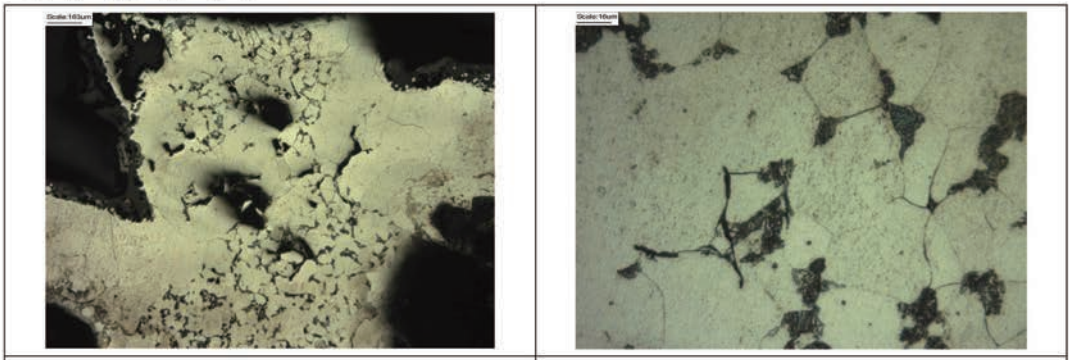
성분	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	FeO	CaO	Na_2O	MgO	TiO_2	P_2O_5	MnO
노바닥	74.80	12.64	4.74	4.38	0.58	1.51	0.45	0.53	0.06	0.06
유착물	49.13	10.67	4.42	17.50	11.30	1.43	3.04	1.43	0.27	0.26

2) 해석

좌측벽면하부의 바닥재(UNB-3)의 XRF 분석결과는 노바닥은 74.8% SiO_2계의 ($SiO_2·Al_2O_3·K_2O$)의 복합산화물이고 이에 부착되어 있는 유착물의 성분은 ($SiO_2·FeO·CaO·Al_2O_3$)의 복합산화물이다.

4.21. 철편 (UCP-1)

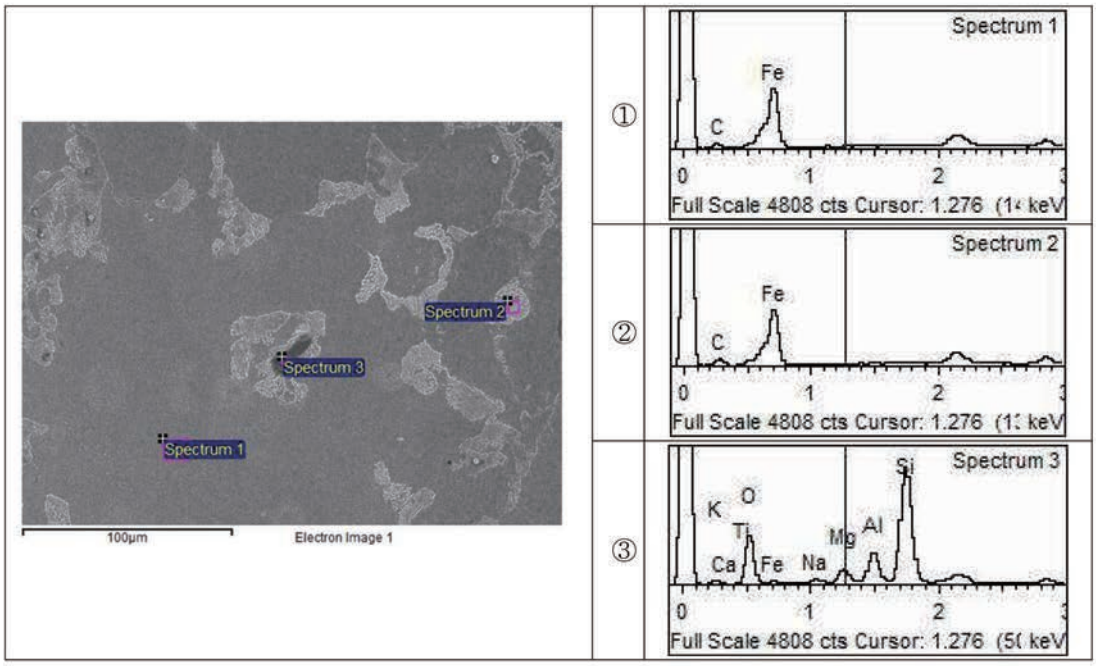
1) 금속현미경 분석



UCP-1 x50	UCP-2 x500

<사진 33> 철편(UCP-1)의 현미경 조직

2) SEM-EDX분석



<사진 34> 철편 (UCP-1)의 비금속 개재물 EDX분석 위치와 그래프

<표 53> 철편 (UCP-1)의 비금속 개재물 EDX분석 결과(단위는 wt%)

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti
①	94.47	5.53	-	-	-	-	-	-	-	-
②	92.00	8.00	-	-	-	-	-	-	-	-
③	7.29	-	39.75	0.92	3.21	6.31	28.58	2.70	9.97	1.27

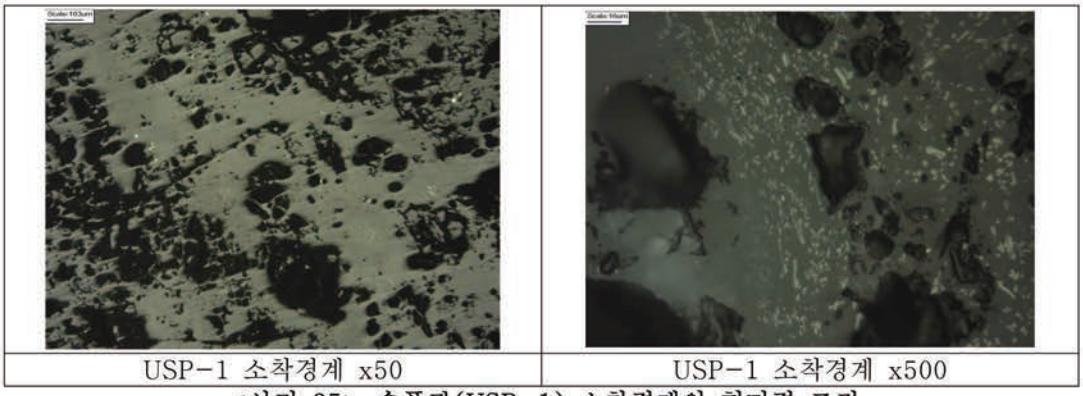
3) 해석

좌측상부철괴(UCP-1)의 현미경조직은 완전한 Ferrite기지조직이며 입계에 철재가 잔존하는 상태이다.

SEM-EDX분석에 의한 결과는 기지조직은 Fe-C이고 입계에 잔존하는 철재의 조성은 (SiO_2·CaO·FeO·Al_2O_3)의 복합 산화물을 형성하고 있으며 9.97%Ca를 함유한 CaO의 역할에 의하여 철괴와 철재의 분리가 시작되는 조직으로 판단된다.

4.22. 송풍관 (USP-1)

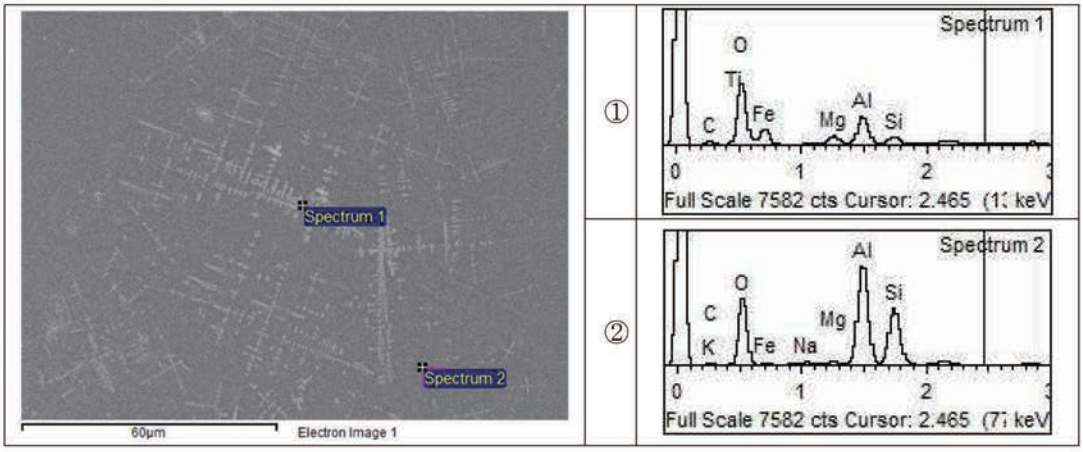
1) 금속현미경 분석



USP-1 소착경계 x50	USP-1 소착경계 x500

<사진 35> 송풍관(USP-1) 소착경계의 현미경 조직

2) SEM-EDX분석



<사진 36> 송풍관(USP-1) 소착경계의 EDX분석 위치와 그래프

<표 54> 송풍관(USP-1) 소착경계부의 EDX분석 결과(단위는 wt%)

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ti
석출조직	47.45	6.12	32.13	-	2.92	8.50	2.20	-	0.68
기지조직	6.22	1.92	44.28	0.55	0.46	25.81	19.67	1.08	-

3) XRF 성분검사

<표 55> 송풍관(USP-1)의 XRF 분석결과(조성의 단위는 wt%)

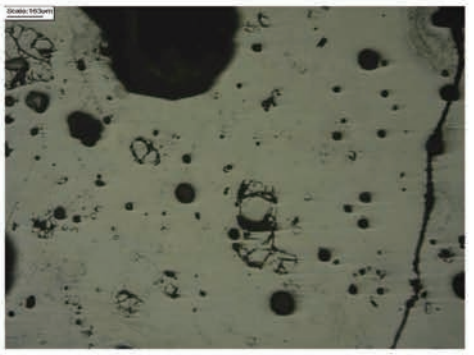
성분	FeO	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	CaO	Na_2O	MgO	TiO_2	P_2O_5	MnO
조성	39.79	36.88	6.78	2.08	8.82	0.89	2.82	1.21	0.19	0.21

4) 해석

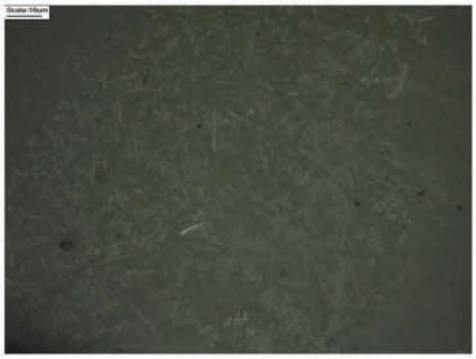
송풍관 좌측의 철재 소착부(USP-1)에 대한 현미경 조직사진은 철재가 소착되어 용손이 일어나는 현상을 보여주고 있다. SEM-EDX사진에서도 비소착부와 소착부에서는 ($FeO \cdot Al_2O_3 \cdot FeC$)의 복합산화물 형태로 나타난다. 따라서 경계부의 XRF 검사에서도 송풍관과 철재 및 환원괴의 혼합된 조성을 보여주고 있다.

4.23. 송풍관 (USP-2)

1) 금속현미경 분석



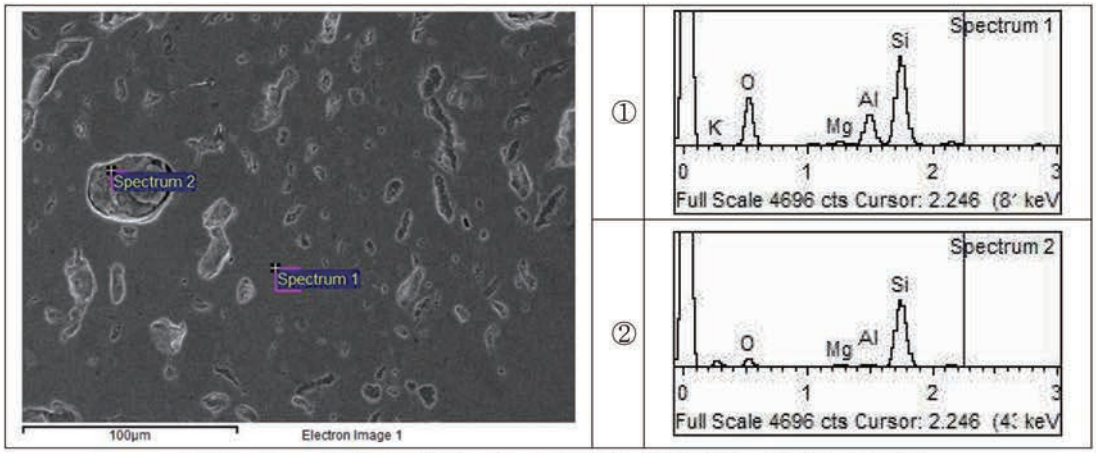
USP-2 피열부 x50



USP-2 피열부 x500

<사진 37> 송풍관(USP-2)의 현미경 조직

2) SEM-EDX분석



<사진 38> 송풍관(USP-2) 피열부의 EDX분석 위치와 그래프

<표 56> 송풍관(USP-2) 피열부의 EDX분석 결과(단위는 wt%)

성분	Fe	O	Mg	Al	Si	K	Ca
①	2.54	46.48	1.05	10.13	34.70	4.12	0.98
②	2.34	28.44	2.50	2.31	64.41	–	–

3) XRF 성분검사

<표 57> 송풍관(USP-2)의 XRF 분석결과(조성의 단위는 wt%)

성분	FeO	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	CaO	Na_2O	MgO	TiO_2	P_2O_5	MnO
피열부	4.58	74.82	14.20	3.28	0.55	0.53	0.78	0.81	0.09	0.04
소착부	12.34	65.20	11.98	3.50	3.62	0.81	1.25	0.86	0.11	0.11

4) 해석

송풍관 우측의 피열부(USP-2)에 대한 현미경 조직은 원래의 내화물 그대로 유지되고 있으며 SEM-EDX 분석에서도 위치별로 차이가 없이 유사한 조성을 갖고 있었다. 그러나 XRF 분석에서는 피열부는 원래의 조성을 갖고 있으나 소착부에 접근하여 있는 부분은 철재의 조성에 영향을 받아서 (FeO·CaO)함량이 증가하고 있다. 따라서 송풍관의 용손은 철광석과 철재의 반응 과정에서 발생하는 것으로 판단된다.

4.24. 노벽편 (UNP-1, UNP-2, UNP-3)

1) XRF 성분검사

<표 58> 노벽편(UNP-1, UNP-2, UNP-3)의 XRF 분석결과(조성의 단위는 wt%)

성분	FeO	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	CaO	Na_2O	MgO	TiO_2	P_2O_5	MnO
UNP-1 피열부	3.74	74.26	14.31	4.65	0.26	1.42	0.50	0.56	0.07	0.05
UNP-1 환원부	8.92	67.64	12.74	4.14	3.06	0.67	1.12	0.87	0.11	0.10
UNP-2 피열부	12.94	52.29	11.37	4.26	12.87	1.26	2.83	1.35	0.23	0.22
UNP-2 환원부	24.04	40.18	7.77	3.05	16.67	1.32	4.56	1.43	0.31	0.27
UNP-3 피열부	3.34	76.07	11.64	4.76	0.82	2.10	0.39	0.41	0.05	0.05

2) 해석

노벽편은 중간 노벽편(UNP-1), 우측하부 노벽편(UNP-2), 송풍관하부 노벽편(UNP-3)으로 구분하여 분석하였고 중간과 우측하부 노벽편은 피열부와 철재반응에 의한 환원부로 구분하여 분석하였다. 중간 노벽편의 피열부와 송풍관 하부의 피열부는 성분조성의 변화가 없었고 중간 노벽편의 환원부와 우측하부 노벽편의 환원부는 철재반응의 영향을 받아서 용손이 일어나고 있는 것을 알 수 있다.

5. 분석결과에 대한 고찰

5.1 첨가제(조재제) 및 철재 분석결과의 고찰

제련로의 첨가제로 지난 1,2차 실험에서는 황토흙가루를 사용하였는데 금번 실험에서는 황토흙(47kg)에다 패각(72kg)을 섞어서 투입하였다. 제련로에서 첨가제의 사용은 철광석 중의 불순화합물인 맥석을 철광석으로부터 분리시키기 위하여 투입하는 조재제이다.

조재제는 일반적으로 SiO_2를 주성분으로 하는 산성 조재제와 CaO를 주성분으로 하는 염기성 조재제가 있으며 여기에 사용되는 황토는 산성 조재제이고 패각은 염기성 조재제이다.

본 실험에서 1,2차 실험에서 산성 조재제인 황토(SiO_2)만 사용하여 철재가 끈적하게 엉키어 철괴로부터 분리가 어렵다는 문제를 개선하기 위하여 염기성 조재제인 패각(CaO)을 혼용하였던 것이다.

조재제로 황토와 더불어 패각의 사용효과를 확인하기 위하여 초기유출철재 2점을 분석한 결과 패각을 추가로 사용한 철재의 분석에서 17.58% CaO, 20.00% CaO 로서 일반적인 철재의 함량인 5% 이하인 CaO 함량에 비하여 훨씬 염기성이 개선되었고 또, 철괴의 위치별 분석에서도 잔존하는 비금속 개재물의 15% CaO 정도의 높은 함량을 유지하고 있었다.

이는 패각의 사용으로 철재의 염기도를 개선하고 철재의 융점을 낮추어서 철괴로 부터 철재의 분리가 비약적으로 개선된 결과를 알 수 있었다.

5.2 철괴형성물 분석결과의 고찰

본 실험의 철괴형성물은 송풍관위치 아래에서 노상위치 사이에 한 덩어리로 형성되어 있어서 이를 추출하여 위치별로 구분하여 종방향으로 상, 중, 하 그리고 횡방향으로 좌, 중, 우 및 앞, 뒤로 구분하여 분석시료를 채취하여 분석한 결과를 요약한 것이 다음 <표 59>에 나타나 있다.

철괴시료의 대부분은 당초 목표한 바와 같이 Ferrite기지조직을 갖는 저탄소의 환원괴 (2점의 시료를 제외하고 12점의 시료의 탄소함량이 0.4% 미만)의 조직을 형성하고 있었다. 또, 황토에다 패각을 첨가한 조재제의 역할에 힘입어서 형성물에서 대부분의 철재가 분리되어 다음 공정인 정련단야에서 철정을 생산하기에 용이한 조건으로 철괴가 형성되었다.

아울러 철괴 형성물에 잔존하는 비금속개재물의 분석에서도 패각의 주성분인 CaO가 8.78-15.53% 로 높게 나타나서 철재의 용이한 분리에는 조재제로 패각의 투입에 영향을 받았다고 판단된다.

철괴를 종방향으로 상부, 중부, 하부로 고찰해 볼 때 상부와 중부는 전부 저탄소의 Ferrite 기지조직이며 조직의 평균경도가 Hv73.6-113.1로서 Ferrite 경도임이 확인되고 있다.

그러나 하부의 경우에 Wüstite기지조직, Pearlite기지조직 혹은 잡철조직으로 중탄소 내지 고탄소의 철괴를 형성하고 있다.

이렇게 하부에 고탄소가 형성되는 것은 상부나 중부에서 형성된 고탄소철괴는 상대적으로 융점이 낮아져서 하부로 침하되어 제1차 실험과 같이 하부의 고탄소철괴 (혹은 선철괴)를 형성하고 있다고 판단된다.

<표 59> 철괴 형성물의 분석결과에 대한 요약

시편No.	채취 위치	기지조직	입계조직	평균 경도 (Hv)	탄소 (%)	개재물 (EDX)	비 고
UNJ-1	상좌뒤	Ferrite	Fe-C	87.1	0.64	철재제거,S% 잔존	C%(입계)
UNJ-2	상좌앞	Ferrite	철재소량	116.8	0.075	$CaO.SiO_2.FeO$	11.77%Ca
UNJ-3	상중뒤	Ferrite	Pearlite	73.6	0.082	$SiO_2.FeO$	
UNJ-4	상중앞	Ferrite	Pearlite	82.8	0.052	$SiO_2.CaO.FeO$	13.05%Ca
UNJ-5	상우뒤	Ferrite + Pearlite	-	113.1 194.3	0.316	철재제거, Fe-C	
UNJ-6	상우앞	Ferrite	Pearlite	111.1	0.135	$SiO_2.CaO.Al_2O_3$	14.1%Ca
UCP-1	상부편	Ferrite	철재소량	-	-	$SiO_2.CaO.FeO$	9.97%Ca
UNJ-14	침하괴	Ferrite	기공잔존	80.0	0.056	$SiO_2.CaO.FeO$	10.0%Ca
UNJ-7	중좌중	Ferrite	-	80.9	0.012	$FeO.SiO_2.CaO$	15.15%Ca
UNJ-8	중중중	Ferrite	기공잔존	83.4	0.012	$SiO_2.CaO.FeO$	13.44%Ca
UNJ-9	중중앞	Ferrite	철재소량	95.5	0.011	$SiO_2.FeO.CaO$	8.78%Ca
UNJ-10	중우중	잡철괴조직	기공잔존	-	0.018	$SiO_2.FeO.CaO$	10.86%Ca
UNJ-11	하좌중	잡철괴조직	Pearlite	184.1	1.638	철재제거, Fe-C	
UNJ-12	하중중	Wüstite	철재잔존	-	0.016	$CaO.SiO_2/SiO_2.CaO$	15.53%Ca
UNJ-13	하잡철	Pearlite	Ferrite	170.5 94.4	0.174	철재제거, Fe-C	

5.3 노바닥의 분석결과의 고찰

본 실험에서 노바닥의 축조는 먼저 방습시설로써 (10/㎝목탄+10㎝/철광석+10㎝/모래)를 축조하고 그 위에 10㎝/(목탄분+황토)으로 노상을 만들었다. 분석시료는 노바닥 형성물, 노바닥침하 형성물 및 하부벽면 형성물에서 전부 3점을 채취하여 분석한 결과 다음과 같다.

제련작업 완료 후 노바닥의 형성물은 고경도의 소결체로서 SiO_2가 36.07%, 52.42%, 74.80%이고 Al_2O_3가 7.05%, 8.85%, 12.64% 로 구성되어 있다. 그러나 이 복합산화물이 고열의 조업과정에서 반응을 하여 고경도의 ($SiO_2.Al_2O_3.SiC$) 혹은 ($FeO.SiO_2.CaO.Al_2O_3$)의 복합산화물을 형성하고 있다.

여기에서 복합산화물($SiO_2.Al_2O_3.SiC$)은 노상의 10㎝/(목탄분+황토) 가 고열을 받아 소결된 것이고 복합산화물($FeO{\cdot}SiO_2{\cdot}CaO{\cdot}Al_2O_3$)은 방습시설의 철광석과 노상에서 침하된 철재의 CaO가 모래다짐층과 화합된 것으로 판단된다.

5.4 송풍관 분석결과의 고찰

제련로의 송풍관은 구경이 15cm로 크고 두께가 1㎝로 얇아서 쉽게 파손되는 경우가 많아서 조업과정에서 주의가 필요하며 조업과정에서 파손되는 원인을 파악하기 위하여 송풍관의 좌측 및 우측의 소착 경계부의 파편을 분석해 본 결과 다음과 같다.

좌, 우측의 소착 경계부는 반환원 철광석의 소착된 부분과 단순한 피열에 의하여 색상만 변하고 성분조성은 그대로 있는 피열부분이 구분되고 있다. 따라서 이 분석에 따르면 송풍

관의 용손은 주로 반환원 철광석의 용착에 의하여 일어난다고 할 수 있다.
여기서 특이한 사항은 철재에 의한 침식이 나타나지 않고 있어서 향후 추가적인 확인 분석이 필요하다고 생각된다.

5.5 노벽편 분석결과의 고찰

제련로의 노벽은 점토로 축조되었으며 제련에서 노벽의 역할은 제련과정에서 열손실을 방지하고 철광석의 환원반응과 철재의 형성과정에서 노벽의 용손을 제어하는 역할을 한다고 할 수 있다.
금번 실험에서 3점의 분석시료가 중간 노벽편, 우측하부 노벽편 및 송풍관하부 노벽편에서 채취 되었는데 이 분석을 통하여 노벽의 침식원인을 파악해 보고자 하였다.
제련과정에서 노내 반응물인 환원괴와 철재가 접촉되어 환원이 일어나는 노벽 환원부와 환원은 되지 않고 고열을 받은 피열부를 구분하여 분석한 결과 피열부는 화학성분의 변화가 없고 환원부는 반환원 산화물(FeO)와 철재반응현상(CaO함량증가)이 동시에 나타나고 있었다.
이는 노벽의 손상이 노내 철광석의 환원반응과 철재반응에 의하여 일어나고 있는 것을 알 수 있었다.

6. 맺음말

본 제련로의 복원실험은 기술적인 측면에서 철문화 연구회(한국연구재단연구팀)가 추진하고 있는 고대제철로 복원실험 융합연구의 연장선상에서 지난 2016년 05월 14일 울산시 북구청산하 울산쇠부리 축제 현장에서 실시한 제철로 복원실험의 금속학적인 분석결과에 대한 고찰을 요약정리하면 다음과 같다.

6.1 제1, 2차 실험에 비하여 조업결과가 다음과 같이 개선되었다.

1) 총 조업시간이 17시간 50분->14시간->10시간 53분으로 개선되었다
2) 목표한대로 대부분의 환원된 괴련괴를 생산하였다.
3) 패각을 첨가한 조재제로 철재의 분리를 성공적으로 달성하였다.

6.2 노바닥재에서 고경도화합물인 (SiO_2.Al_2O_3.SiC)를 확인하였다.

6.3 송풍관의 침식이 철재뿐 만아니라 반환원 철광석의 영향도 확인되었다.

6.4 노벽의 침식원인은 반환원 철광석과 철재반응현상의 공동원인으로 볼 수 있다.

상기 실험결과는 후속하는 고대제철 복원실험에 크게 기여 할 수 있다고 판단된다.
아울러 추가적인 복원실험 즉 토철제련법, 근대제철법, 선철제련법등을 체계적으로 복원실험을 실시할 필요가 있다고 본다.

울산쇠부리 복원사업

2016 울산쇠부리 고대 원형로 복원실험 연구보고서

편　　집　이남규, 김권일, 강성귀

발 행 일　2016년 12월 26일

발 행 처　울산쇠부리축제 추진위원회
44248 울산광역시 북구 산업로 1016(연암동 1083)
TEL 052)241-8758　FAX 052)241-8765