

1 실험 기록

제7차 울산쇠부리 복원실험 기록지(2021년 10월 23~24일)

시간	실험 내용	목탄				분광		첨가제 (슬래그)		비고
		대	중	소	합계	장입	합계	장입	합계	
8:00	온도계 설치, 갈라진 가마 벽틈 황토물 보수									
8:55~ 09:07	목탄 장입개시~ 만장입	310			310					
9:07	송풍시작									
9:13	송풍 여닫이 사용									
9:30	송풍중지 / 출탕구 정리									
9:32	송풍시작									
9:34~ 09:36	송풍중지									
9:37	초롱구멍, 잡쇠구멍 황토 점토 폐쇄									
10:07	소탄 장입			20	330					
10:09	온도계 모드 변경(이전 측정값 사용 불가능)									
10:43	대탄 장입	10		10	350					
10:45	평균 온도 1,100 ℃ 이상 상승하지 않음, 송풍기 세기 높임-온도 조금씩 상승									
10:58 ~11:20	목탄장입	60			410					대탄 20kg씩 3회 장입
11:15	앞쪽창 온도 1,300℃ 정도, 골구멍쪽 온도 1,200℃ 이하 - 온도 조금 더 상승시킨 후 광석 장입 예정									
11:30	소탄 20kg 장입 후 광석 장입 예정									분광 장입 전 상부에 소탄 깎아 목탄틈새로 분광의 빠른 하강 방지
11:42	소탄 장입			20	430					
11:46	분광장입					10	10			
11:49	첨가제 장입							2	2	분광장입 2분 후 첨가제 장입으로 매뉴얼 설정
11:58	대탄 장입	20			450					
11:59	분광 장입					10	20			
12:02	판장쇠바탕 탕도 앞 설치, 수평 맞추기									판장쇠바탕 바닥에 돌출된 목재 너비 만큼 탕도 사이 에 생긴 공간 점토로 막음

시간	실험 내용	목탄				분광		첨가제 (슬래그)		비고
		대	중	소	합계	장입	합계	장입	합계	
12:02	첨가제 장입							2	4	
12:13	목탄 장입		10	10	470					
12:15	분광 장입					10	30			
12:17	첨가제 장입							2	6	
12:21	목탄 장입	20			490					
12:22	분광 장입					10	40			
12:24	첨가제 장입							2	8	
12:30	목탄 장입		10	10	510					
12:38	분광 장입					10	50			
12:40	첨가제 장입							2	10	
12:43	앞창쪽 온도 상승을 위해 대탄 장입									출탕시 앞창쪽 온도가 높아야함
12:43	목탄 장입	20			530					
13:01	목탄 장입		10	10	550					
13:06	분광 장입					10	60			
13:08	첨가제 장입							2	12	
13:12 ~32	판장쇠바탕 3개 목탄으로 건조									
13:14	목탄 장입	20			570					
13:15	분광 장입					10	70			
13:18	첨가제 장입							2	14	
13:27	목탄 장입		10	10	590					
13:30	분광 장입					10	80			
13:32	첨가제 장입							1	16	
13:39	골구멍 개방 - 골구멍 석재 용융 확인									
13:47	목탄 장입	20			610					
13:52	분광 장입					10	90			
13:54	첨가제 장입							2	18	
14:01	목탄 장입		10	10	630					
14:03	분광 장입					10	100			
14:05	첨가제 장입							2	20	
14:12	목탄 장입	20			650					
14:14	골구멍 개방 - 골구멍 상부 석재 용융 으로 골구멍 막듯이 흘러내림 / 송풍 중지									
14:20	잡쇠구멍 개방 - 슬래그 배출시도 골구멍쪽 슬래그 일부 역류 현상 확인									슬래그 끈적임, 유동성 낮음, 점성 높음 - 온도가 낮은 원인으로 추정

시간	실험 내용	목탄				분광		첨가제 (슬래그)		비고
		대	중	소	합계	장입	합계	장입	합계	
14:27	분광 장입					10	110			
14:29	첨가제 장입							2	22	
14:30	온도 상승 위해 대탄 3회 정도 장입 결정, 골구멍 개방 - 용융된 석제 제거									
14:45	목탄 장입	20			670					
14:49	분광 장입					10	120			
14:52	첨가제 장입							2	24	
14:49	골구멍 막힘 - 장입구 불꽃 낮음, 골구멍 개방 - 골구멍 석제 제거									골구멍 개방 시 송풍중지 및 원료, 연료 장입 중지 - 원료와 연료의 장입 지연 을 초래함
14:52	잡쇠구멍 개방 - 잡쇠구멍 입구 슬래그로 막힘, 철창과 망치로 뚫음, 쇠창에 슬래그 작은 덩어리 상태로 묻어 나옴 - 자연배출 어려움 - 중지된 송풍 시작									슬래그의 유동성 떨어지는 이유 - 하부 온도 낮아 불 순물 분리 덜 된 상태 또는 슬래그 덜 형성된 상태로 추정
15:06	목탄 장입	20			690					
15:07 ~10	잡쇠구멍 열어둔 상태로 초롱구멍 뚫기 - 판장쇠바탕에 선철 출탕 / 물 흐르듯 유동성 좋음 / 선철 불꽃처럼 뿜(판장쇠 건조 덜 됨) / 선철 유출속도 빠름 / 판장쇠의 탕도 말단 넘쳐 흐름 / 판장쇠 6개의 1.5cm 정도 높이 채움 / 탕도씻물 너비 1.0cm 정도									1차 선철 출탕
15:15	골구멍 상태 좋음 / 초롱구멍과 잡쇠구멍 개방된 상태 / 판장쇠 바탕에서 판장쇠 빼냄									
15:17	분광 장입					10	130			
15:19	첨가제 장입							2	24	
15:20	목탄 장입	20			710					
15:28	초롱구멍 입구 소탄으로 막음 - 입구의 온도 유지									
15:30	분광 장입					10	140			
15:32	첨가제 장입							2	28	
15:33	잡쇠구멍 뚫음									
15:36	첨가제 장입 중지 - 노벽재 황토 녹아 조재제 역할하는 것으로 추정									
15:39	잡쇠구멍 개방 - 슬래그 배출 시도 / 슬래그로 막힘 - 쇠창과 망치로 뚫기									
15:44	목탄 장입	20			730					
15:45	분광 장입					10	150			
15:53	분광 200kg 장입 후 선철 출탕 예정 목탄 매뉴얼대로 장입 변경									온도 상승 위해 대탄만 80kg 장입 후

시간	실험 내용	목탄				분광		첨가제 (슬래그)		비고
		대	중	소	합계	장입	합계	장입	합계	
15:56	목탄 장입		10	10	750					
15:59	분광 장입					10	160			
16:10	목탄 장입	20			770					
16:11	분광 장입					10	170			
16:13	슬래그 다량 유출 - 유동성 떨어짐 / 끊이지 않고 유출									
16:20 ~45	전체 온도계 오작동/ 3번 온도계 고장									
16:24	목탄 장입		10	10	790					
16:29	분광 장입					10	180			
16:03	골구멍 개방 - 슬래그 제거									
16:40	목탄 장입	20			810					
16:42	분광 장입					10	190			
16:53	목탄 장입		10	10	830					
16:54	분광 장입					10	200			
4:56~ 17:00	슬래그 계속 유출 - 슬래그속 선철 불꽃 확인 슬래그 제거-잡쇠구멍 송풍 양호									
17:00 ~02	2차 선철 출탕 / 분광 200kg 장입 초롱구멍 -쇠창과 망치로 뚫음 / 판장쇠바탕 채우고 넘쳐 흐름 / 출탕 속도 너무 빠름									2차 선철 출탕
17:03	출탕 후 목탄으로 출탕구 막음									
17:08	목탄 장입	20			850					
17:10	분광 장입					10	210			
17:24	골구멍 막힘									
17:28	목탄 장입		10	10	870					
17:30	분광 장입					10	220			
17:44	목탄 장입	20			890					
17:44	잡쇠구멍 뚫어 슬래그 배출 시도 - 쇠창에 묻어나는 정도									
17:46	분광 장입					10	230			
17:54	유동성 적은 슬래그 배출시작									
17:59	목탄 장입		10	10	910					
18:03	분광 장입					10	240			
18:16	막혔던 잡쇠구멍 뚫음- 슬래그 배출									18:30까지 슬래그 배출
18:25	골구멍 개방 / 슬래그 역류 - 슬래그 제거 후 장입구 불꽃 양호									

시간	실험 내용	목탄				분광		첨가제 (슬래그)		비고
		대	중	소	합계	장입	합계	장입	합계	
18:27	목탄 장입	20			930					
18:30	분광 장입					10	250			
18:33 ~35	선철 출탕 시도 - 쇠창+망치로 초롱구멍 뚫기 - 선철 출탕 양호/판장쇠바탕 2/3 정도 출탕 - 선철 판장쇠바탕 밖으로 넘치지 않음 - 선철 상부로 슬래그 배출/슬래그층 형성 - 판장쇠바탕 제거									3차 선철 출탕
18:35	슬래그 제거 - 슬래그 상부 선철 1가닥 출탕									슬래그와 슬래그 사이에 선철 출탕
18:42	목탄 장입		10	10	950					
18:45	분광 장입					10	260			
19:05	목탄 장입	20			970					
19:08	분광 장입					10	270			
19:08	골구멍 막힘 - 뚫음									
19:20	잡쇠구멍 개방 시도 골구멍 개방 - 내부에 슬래그+반환원괴 배출									
19:25										분광 300kg 장입 이후, 대탄 50kg 장입, 1시간 30분 경과 후 선철 출탕으로 결정
7:27 ~30	잡쇠구멍 - 슬래그 배출									
19:30	목탄 장입		10	10	990					
19:32	분광 장입					10	280			
19:52	목탄 장입	20			1,010					
19:53	분광 장입					10	290			
20:00	초롱구멍 앞의 목탄 토치로 예열, 잡쇠구멍 냉각 슬래그 토치로 녹이기									
20:10	골구멍 개방 - 슬래그+반환원괴 역류- 제거 - 장입구 불꽃 양호									
20:16	목탄 장입		10	10	1,030					마지막 분광 장입
20:20	분광 장입					10	300			
20:27	목탄 장입	10			1,040					
20:39	목탄 장입	10			1,050					
20:43	골구멍 슬래그 강제 제거									
20:46	골구멍 막힘-슬래그 역류									목탄 더 장입하지 않음, 30분 정도 목탄 연소시킨 후 출탕 결정
20:51	잡쇠구멍 개방 시작									
20:58 ~21:04	초롱구멍 개방 - 쇠창+망치 뚫기 - 초롱구멍 냉각된 선철 뚫기 어려움									목탄양 적으면 온도 하강함, 앞창쪽 온도 낮아 지고 있음

시간	실험 내용	목탄				분광		첨가제 (슬래그)		비고
		대	중	소	합계	장입	합계	장입	합계	
21:04	선철 출탕 – 판장쇠바탕 앞쪽 2매 정도 채울때 까지 빠른 속도로 유출 / 이후 속도 느려짐 / 탕도와 판장쇠 4매 정도 채우고 멈춤 –출탕 과정에서 선철 쇠창으로 판장쇠쪽으로 끌어 들어 무질서한 선철 잔존									4차 선철 출탕
21:08 ~15	선철 출탕 후 노 내부 선철 잔존 여부 확인 – 출탕 없음 / 노 하부 냉각으로 출탕 불가능 / 자연연소로 결정 – 아궁이와 골구멍 제거 – 목탄 연소하는 것으로 결정									
21:30	일부벽 제거된 상태 / 잡쇠구멍 상부 또 다른 구멍 1개 뚫린 상태 / 목탄 자연 연소시킴									급냉된 선철은 경도가 높음, 벽을 뜯어내면 급냉 될 가능성 있음, 지금상태에서 자연 연소시킴
21:36	온도계 제거 시작									
21:49	송풍중지 / 자연연소 시작									조업종료
24일 09:00	장입구에서 110cm 정도 아래까지 목탄 잔존, 계속 목탄 연소 중									
장입량 합계		740	130	180	1,050	300	300	28	28	

제7차 울산쇠부리 복원실험 온도기록지(2021.10.23)

시간	온도(℃)						평균 온도	비고
	1번 (앞창좌)	2번 (앞창우)	3번 (앞창상)	4번 (골구멍좌)	5번 (골구멍우)	6번 (골구멍상)		
9:05	86.4	80.3	69.2	87.7	77.6	68.8		K모드로 기록됨 10시10분부터R모드로 전환해서기록함
9:07	101.8	96.7	69.5	85.5	78.5	66.9		
9:20	268.7	278	94.2	203.6	191.8	99.8		
9:30	324.5	320.1	153.9	253.9	254.7	162.7		
9:40	329.3	332.4	161.9	257.9	257.9	175.3		
9:50	336.3	326	196.6	272	277.2	201.8		
10:00	325.5	324.9	203.2	266.6	274.5	212.4		
10:10	1,139	1,167	730	957	1,006	856	975.8	
10:20	1,128	1,161	750	950	998	863	975.0	↓ 5분단위로 기록함 ↓
10:25	1,133	1,153	752	954	995	868	975.8	
10:30	1,146	1,174	766	947	998	879	985.0	
10:35	1,139	1,167	781	928	1,006	889	985.0	
10:40	1,146	1,180	781	936	1,009	892	990.7	
10:45	1,147	1,204	759	965	1,017	899	998.5	
10:50	1,216	1,233	791	1,065	1,050	918	1,045.5	
10:55	1,248	1,254	828	1,097	1,066	922	1,069.2	
11:00	1,236	1,284	846	1,079	1,085	937	1,077.8	
11:05	1,236	1,294	867	1,082	1,107	961	1,091.2	
11:10	1,249	1,294	876	1,099	1,126	972	1,102.7	
11:15	1,252	1,299	882	1,113	1,148	979	1,112.2	
11:20	1,267	1,302	895	1,114	1,148	1,002	1,121.3	
11:25	1,310	1,313	915	1,133	1,157	1,034	1,143.7	
11:30	1,324	1,317	938	1,156	1,178	1,054	1,161.2	
11:35	1,313	1,316	942	1,165	1,194	1,063	1,165.5	
11:40	1,298	1,312	924	1,160	1,195	1,070	1,159.8	
11:45	1,295	1,315	938	1,175	1,200	1,016	1,156.5	분광 장입(11:46)
11:50	1,294	1,321	946	1,175	1,207	1,081	1,170.7	
11:55	1,296	1,326	950	1,183	1,207	1,097	1,176.5	분광 장입(11:59)
12:00	1,301	1,334	955	1,197	1,210	1,111	1,184.7	
12:05	1,305	1,330	954	1,196	1,214	1,102	1,183.5	
12:10	1,305	1,337	954	1,210	1,217	1,112	1,189.2	
12:15	1,316	1,348	962	1,218	1,223	1,111	1,196.3	
12:20	1,324	1,354	964	1,219	1,296	1,108	1,210.8	
12:25	1,323	1,358	975	1,212	1,236	1,104	1,201.3	
12:30	1,320	1,359	981	1,222	1,242	1,103	1,204.5	
12:35	1,322	1,359	988	1,228	1,243	1,105	1,207.5	
12:40	1,331	1,371	1003	1,241	1,256	1,115	1,219.5	
12:45	1,321	1,366	981	1,227	1,250	1,107	1,208.7	

시간	온도(℃)						평균 온도	비고
	1번 (앞창좌)	2번 (앞창우)	3번 (앞창상)	4번 (골구멍좌)	5번 (골구멍우)	6번 (골구멍상)		
12:50	1,313	1,357	978	1,220	1,248	1,106	1,203.7	
12:55	1,307	1,353	974	1,213	1,245	1,107	1,199.8	
13:00	1,309	1,353	979	1,203	1,243	1,114	1,200.2	
13:05	1,308	1,361	989	1,202	1,246	1,105	1,201.8	
13:10	1,304	1,346	982	1,196	1,252	1,110	1,198.3	
13:15	1,315	1,364	981	1,197	1,251	1,119	1,204.5	분광 장입
13:20	1,324	1,357	985	1,202	1,248	1,118	1,205.7	
13:25	1,328	1,361	1,004	1,212	1,259	1,123	1,214.5	
13:30	1,331	1,364	1,008	1,204	1,264	1,093	1,210.7	
13:35	1,322	1,368	1,009	1,212	1,273	1,102	1,214.3	
13:40	1,339	1,371	1,004	1,185	1,254	1,092	1,207.5	
13:45	1,318	1,370	1,008	1,204	1,251	1,077	1,204.7	
13:50	1,314	1,410	1,021	1,202	1,254	1,079	1,213.3	
13:55	1,321	1,401	1,027	1,198	1,246	1,076	1,211.5	
14:00	1,325	1,417	1,026	1,198	1,243	1,077	1,214.3	
14:05	1,330	1,410	1,021	1,171	1,234	1,063	1,204.8	
14:10	1,328	1,391	1,023	1,172	1,236	1,061	1,201.8	
14:15	1,324	1,365	1,027	1,169	1,231	1,057	1,195.5	
14:20	1,312	1,354	1,007	1,167	1,216	1,048	1,184.0	
14:25	1,311	1,349	1,004	1,176	1,224	1,041	1,184.2	
14:30	1,312	1,348	994	1,191	1,220	1,040	1,184.2	
14:35	1,304	1,336	1,011	1,177	1,212	1,071	1,185.2	
14:40	1,296	1,328	984	1,165	1,196	1,051	1,170.0	
14:45	1,291	1,323	981	1,163	1,204	1,031	1,165.5	
14:50	1,295	1,318	972	1,175	1,211	1,027	1,166.3	
14:55	1,302	1,315	984	1,167	1,201	1,050	1,169.8	
15:00	1,286	1,304	974	1,155	1,209	1,025	1,158.8	
15:05	1,293	1,302	984	1,158	1,221	1,030	1,164.7	
15:10	1,291	1,301	983	1,171	1,237	1,033	1,169.3	1차 출탕
15:15	1,296	1,304	1,000	1,172	1,248	1,037	1,176.2	
15:20	1,295	1,305	997	1,164	1,237	1,024	1,170.3	
15:25	1,295	1,316	998	1,184	1,258	1,029	1,180.0	
15:30	1,291	1,315	987	1,184	1,258	1,025	1,176.7	
15:35	1,286	1,313	987	1,182	1,251	1,024	1,173.8	
15:40	1,290	1,332	1,002	1,186	1,268	1,040	1,186.3	
15:45	1,294	1,347	993	1,190	1,274	1,044	1,190.3	
15:50	1,293	1,352	982	1,196	1,280	1,041	1,190.7	
15:55	1,291	1,354	983	1,204	1,286	1,043	1,193.5	
16:00	1,289	1,366	990	1,211	1,301	1,024	1,196.8	

시간	온도(℃)						평균 온도	비고
	1번 (앞창좌)	2번 (앞창우)	3번 (앞창상)	4번 (골구멍좌)	5번 (골구멍우)	6번 (골구멍상)		
16:05	1,284	1,345	977	1,206	1,300	1,028	1,190.0	
16:10	1,285	1,346	996	1,218	1,288	1,062	1,199.2	
16:15	1,295	1,362	1,028	1,238	1,290	1,084	1,216.2	
16:20	1,305	1,368	1,019	1,238	1,275	1,069	1,212.3	
16:50	1,295	1,346		1,234	1,333	1,055	1,252.6	↓ 3번온도계 고장 (측정불가) ↓
16:55	1,291	1,341		1,227	1,319	1,052	1,246.0	
17:00	1,284	1,334		1,225	1,289	1,049	1,236.2	
17:05	1,278	1,325		1,222	1,289	1,049	1,232.6	17:02 2차 출탕
17:10	1,279	1,327		1,221	1,308	1,074	1,241.8	
17:15	1,277	1,325		1,211	1,292	1,077	1,236.4	
17:20	1,274	1,324		1,211	1,279	1,075	1,232.6	
17:25	1,271	1,318		1,218	1,301	1,069	1,235.4	
17:30	1,270	1,328		1,226	1,290	1,087	1,240.2	
17:35	1,274	1,326		1,231	1,264	1,080	1,235.0	
17:40	1,277	1,321		1,240	1,262	1,062	1,232.4	
17:45	1,272	1,306		1,234	1,263	1,063	1,227.6	
17:50	1,268	1,308		1,224	1,243	1,028	1,214.2	
17:55	1,260	1,301		1,221	1,242	1,043	1,213.4	
18:00	1,260	1,304		1,240	1,263	1,040	1,221.4	
18:05	1,260	1,305		1,243	1,255	1,027	1,218.0	
18:10	1,257	1,304		1,267	1,259	1,025	1,222.4	
18:15	1,254	1,294		1,254	1,266	1,034	1,220.4	
18:20	1,252	1,297		1,262	1,279	1,041	1,226.2	
18:25	1,249	1,298		1,281	1,279	1,043	1,230.0	
18:30	1,245	1,296		1,300	1,296	1,064	1,240.2	
18:35	1,245	1,301		1,294	1,333	1,057	1,246.0	3차 출탕
18:40	1,245	1,301		1,293	1,347	1,052	1,247.6	
18:45	1,242	1,299		1,280	1,368	1,065	1,250.8	
18:50	1,242	1,298		1,281	1,339	1,060	1,244.0	
18:55	1,238	1,296		1,272	1,327	1,065	1,239.6	
19:00	1,239	1,294		1,273	1,320	1,071	1,239.4	
19:05	1,236	1,288		1,279	1,329	1,074	1,241.2	
19:10	1,232	1,274		1,248	1,287	1,084	1,225.0	
19:15	1,230	1,277		1,234	1,288	1,073	1,220.4	
19:20	1,229	1,278		1,242	1,316	1,074	1,227.8	
19:25	1,227	1,278		1,231	1,324	1,079	1,227.8	
19:30	1,230	1,281		1,239	1,325	1,086	1,232.2	
19:35	1,230	1,281		1,247	1,314	1,065	1,227.4	
19:40	1,229	1,271		1,234	1,305	1,070	1,221.8	

시간	온도(°C)						평균 온도	비고
	1번 (앞창좌)	2번 (앞창우)	3번 (앞창상)	4번 (골구멍좌)	5번 (골구멍우)	6번 (골구멍상)		
19:45	1,227	1,278		1,249	1,304	1,055	1,222.6	
19:50	1,226	1,276		1,244	1,318	1,053	1,223.4	
19:55	1,222	1,269		1,232	1,306	1,024	1,210.6	
20:00	1,222	1,269		1,241	1,312	1,032	1,215.2	
20:05	1,222	1,268		1,234	1,320	1,040	1,216.8	
20:10	1,223	1,261		1,228	1,317	1,038	1,213.4	
20:15	1,222	1,261		1,211	1,300	1,052	1,209.2	
20:20	1,225	1,264		1,222	1,318	1,064	1,218.6	
20:25	1,226	1,267		1,231	1,309	1,058	1,218.2	
20:30	1,226	1,261		1,239	1,311	1,052	1,217.8	
20:35	1,225	1,262		1,232	1,315	1,056	1,218.0	
20:40	1,224	1,258		1,231	1,311	1,047	1,214.2	
20:45	1,220	1,249		1,224	1,290	1,050	1,206.6	
20:50	1,220	1,256		1,243	1,353	1,052	1,224.8	
20:55	1,222	1,256		1,259	1,330	1,059	1,225.2	
21:00	1,224	1,256		1,265	1,340	1,062	1,229.4	
21:05	1,224	1,254		1,260	1,327	1,061	1,225.2	21:04 4차 출탕
21:10	1,223	1,250		1,260	1,318	1,072	1,224.6	
21:15	1,221	1,250		1,257	1,321	1,073	1,224.4	
21:20	1,220	1,252		1,260	1,331	1,075	1,227.6	
21:25	1,220	1,254		1,260	1,346	1,076	1,231.2	
21:30	1,220	1,254		1,259	1,354	1,084	1,234.2	
전체 평균	1,266.9	1,307.6	951.9	1,196.8	1,248.6	1,048.7	1,170.1	
안정 온도 평균	1,274.7	1,317.4	989.5	1,220.2	1,275.1	1,064.8	1,190.3	

2 실험에 대한 금속학적 분석 결과

신경환¹⁾ · 이재용²⁾

I. 분석대상 시료의 성격

1. 분석대상 시료의 성격

제7차 복원실험 결과에 대한 금속학적인 분석에 사용된 시료의 성격은 <표 1>과 같이 총 22종류이며 위치와 성격별로 구분하여 분석위치를 설정하였다. 원료철광석 시료는 2점으로 그 중 1점은 배소 전의 철광석(21U-1)이고 나머지 1점은 배소 후의 철광석(21U-2)이며, 첨가제로 사용된 재사용 조재제는 2점(21U-3-1, 21U-3-2)이 분석되었다.

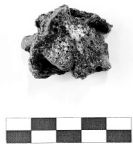
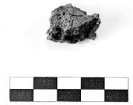
제련작업 중에 송풍관이 막힌 슬래그 1점(21U-4)과 유출 전 확인 슬래그 1점(21U-5)이 분석되고 1차유출 슬래그 1점(21U-6)이 분석되었다. 용융상태로 출탕되는 제1차 출탕선철(21U-7), 제1차 출탕 후 유리질 슬래그(21U-8), 제2차 출탕선철(21U-9), 제3차 출탕선철(21U-10) 및 제4차 출탕선철(21U-11) 시료들이 각각 1점씩 분석되었다.

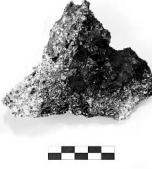
가마 바닥 형성물 시료는 가마 바닥 경계부(선철+모래(21U-12)), 가마 바닥 경계상부(21U-13-B, 21U-13-S), 가마 바닥 중간부(21U-14-M, 21U-14-S) 및 가마 바닥 형성물(21U-15-B, 21U-15-G) 시료들이 각각 1점씩 분석되었다. 그리고 송풍관의 용손원인을 확인하고자 가마 벽 보수 황토(21U-16), 송풍관 보강토(21U-17), 송풍관 용손부(21U-18) 및 송풍관 융착부(21U-19) 시료들이 각각 1점씩 분석되고, 가마 내벽 용손을 확인하고자 가마 내벽 좌측(21U-20-R, 21U-20-B), 가마 내벽 우측(21U-21-R, 21U-21-B) 및 출선구 상부 가마 벽(21U-22) 시료들이 각각 1점씩 분석되었다.

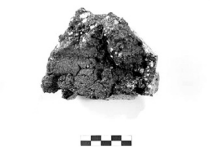
1) 금속기술연구소장

2) 금속기술연구소 선임연구원

〈표 1〉 분석대상 시료의 성격

시료번호	명칭	채취위치	크기(cm)			무게(g)	사진
			길이	너비	높이		
21U-1	배소전 철광석	복원 실험장	—	—	—	—	
21U-2	배소 철광석	복원 실험장	—	—	—	—	
21U-3-1	투입슬래그 (조재제)	투입직전	3.7	2.5	2.0	18	
21U-3-2	투입슬래그 (조재제) 철재	투입직전	2.2	1.5	1.2	3	
21U-4	송풍관 막힘 슬래그	송풍과정	10.0	7.5	7.0	252	
21U-5	유출전 확인 슬래그	배재구	6.7	4.5	3.5	40	
21U-6	1차유출 유리질 철재	배재구	6.0	4.0	2.0	28	
21U-7	1차 선철 출탕	출탕구	6.3	2.7	0.5	36	

시료번호	명칭	채취위치	크기(cm)			무게(g)	사진
			길이	너비	높이		
21U-8	1차 선철 출탕 후 유리질 슬래그	출탕구	9.0	7.0	6.0	164	
21U-9	2차 출탕 선철	출탕구	5.0	2.5	1.0	22	
21U-10	3차 출탕 선철	출탕구	8.0	2.5	1.0	66	
21U-11	4차 출탕 선철	출탕구	5.7	5.5	1.7	100	
21U-12	가마 바닥 경계부	가마 해체	11.0	8.5	1.5	116	
21U-13-B	가마 바닥 경계 (바닥)	가마 해체	10.0	10.0	5.5	525	
21U-13-S	가마 바닥 경계 (철재)	가마 해체					
21U-14-M	가마 바닥 중간 형성물 (선철)	가마 해체	5.0	3.3	3.0	108	
21U-14-S	가마 바닥 중간 형성물 (철재)	가마 해체					

시료번호	명칭	채취위치	크기(cm)			무게(g)	사진
			길이	너비	높이		
21U-15-B	가마 바닥 형성물B	가마 해체	8.5	8.0	4.0	271	
21U-15-G	가마 바닥 형성물G	가마 해체					
21U-16	원료 황토	사용전	-	-	-	-	
21U-17	송풍관 보강토	숙성후	-	-	-	-	
21U-18	송풍관 용손	가마 해체	8.0	5.5	3.0	97	
21U-19	송풍관 용착	가마 해체	11.5	8.5	6.5	588	
21U-20-R	가마 벽 좌 (가마 벽부)	가마 해체	10.5	8.5	7.3	431	
21U-20-B	가마 벽 좌 (용융부)	가마 해체					

시료번호	명칭	채취위치	크기(cm)			무게(g)	사진
			길이	너비	높이		
21U-21-R	가마 벽 우 (가마 벽부)	가마 해체	9.0	7.0	6.0	282	
21U-21-B	가마 벽 우 (용융부)	가마 해체					
21U-22	4차 출탕 후 출선구 상부 용융 가마 벽	가마 해체	7.0	4.5	3.0	66	

II. 분석 방법

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

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

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

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

SEM촬영을 위해서 코팅기(HITACHI E1010)를 이용해 시편의 표면을 코팅하였다. SEM에서 관찰된 각 조직에 대해서 EDX분석기를 사용하여 조직 내 성분을 파악하였다.

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

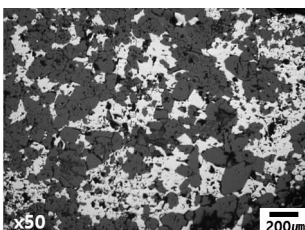
III. 분석결과

1. 원료 철광석

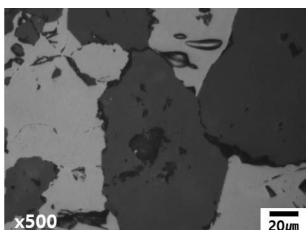
실험에 투입된 원료 철광석은 실험 전 미리 배소과정을 거쳐 준비되었다. 원료 철광석의 배소 전과 배소 후 상태를 비교하기 위하여 각각 시료를 채취하여 철광석 조직을 확인하기 위해 금속현미경분석과 SEM-EDX분석을 실시하고 XRF분석을 통해 성분분석을 실시하였다.

1.1 배소 전 철광석(21U-1)의 분석결과

〈표 2〉 배소철광석(21U-1)의 분석결과

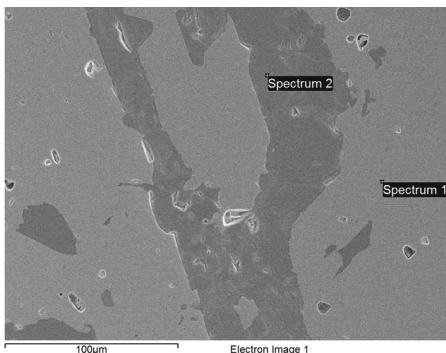


금속현미경 사진 ×50



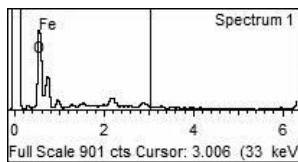
금속현미경 사진 ×500

SEM-EDX(wt%)

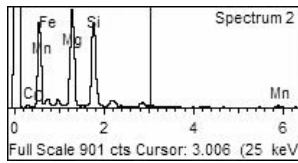


SEM 사진 ×500

분석위치 ①



분석위치 ②



분석위치별 EDX 그래프

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	78.19	—	21.81	—	—	—	—	—	—	—	—
②	15.43	6.50	35.75	—	21.04	—	18.51	—	—	—	2.77

XRF(wt%)분석

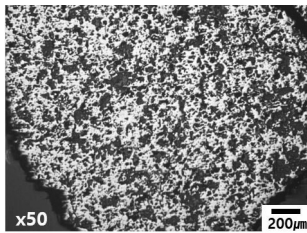
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
함량	39.51	28.73	2.62	4.94	—	21.77	0.67	0.11	0.06	1.20	0.10
성분	BaO	Co ₂ O ₃	NbO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	As ₂ O ₃	Cl
함량	—	—	0.00	0.00	0.01	—	0.24	—	—	—	0.03

배소 전 철광석(21U-1)의 현미경조직은 기지조직이 철산화물과 맥석 산화물로 구성되어 있고, 전자현미경 사진과 SEM-EDX분석에서도 기지조직이 철산화물(FeO)이고 입계조직은 MgO·SiO₂·FeO로 형성된 맥석산화물로 구성되어 있음이 확인되었다.

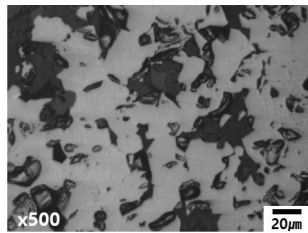
이에 대한 XRF분석에서는 철광석 성분인 FeO가 36.51%로 가장 높고 SiO₂가 28.73wt% 그리고 MgO가 21.77wt%로 높게 나타난다.

1.2 배소 철광석(21U-2)의 분석결과

〈표 3〉 배소 철광석(21U-2)의 분석결과

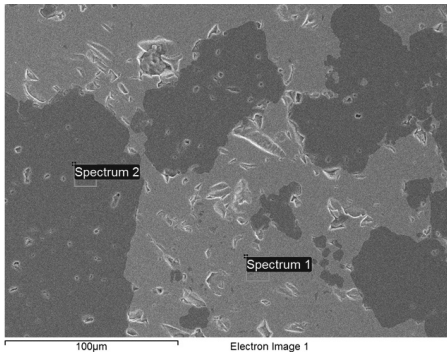


금속현미경 사진 ×50



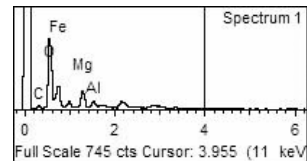
금속현미경 사진 ×500

SEM-EDX(wt%)

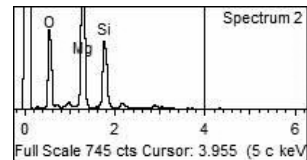


SEM 사진 ×500

분석위치 ①



분석위치 ②



분석위치별 EDX 그래프

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	60.29	7.36	26.01	—	4.86	1.49	—	—	—	—	—
②	—	—	43.66	—	34.95	—	21.38	—	—	—	—

XRF(wt%)분석

성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
함량	45.20	25.31	2.35	3.18	0.19	21.29	0.67	0.11	0.07	1.24	0.10
성분	BaO	Co ₂ O ₃	NbO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	PbO	Cl
함량	—	—	0.01	0.00	0.01	—	0.20	—	—	0.02	0.05

배소 철광석(21U-2)의 현미경조직은 배소 전에 비하여 기지조직에 비스타니트(Wüstite)가 많이 석출되고 조직이 미세화되어 있으며 입계에 맥석산화물이 편석되어 있다.

SEM-EDX 분석에서는 (FeOx)가 주성분이고 다음으로 SiO₂와 MgO가 산화물을 형성하고 입계에는 MgO가 편석되어 있다.

이에 대한 XRF분석에서는 철산화물(FeOx)이 배소 전보다 배소 후의 함량이 높게 개선 (39.51wt%→45.20wt%)된 것으로 나타난다.

2. 조재제

실험에 사용된 조재제는 지난 실험에서 사용되었던 재사용 슬래그이다. 투입슬래그는 투입 전에 유출상(21U-3G)과 철재(21U-3S)를 각각 별도로 분석한 것이다.

2.1 투입 슬래그- 유출상 철재(21U-3G)

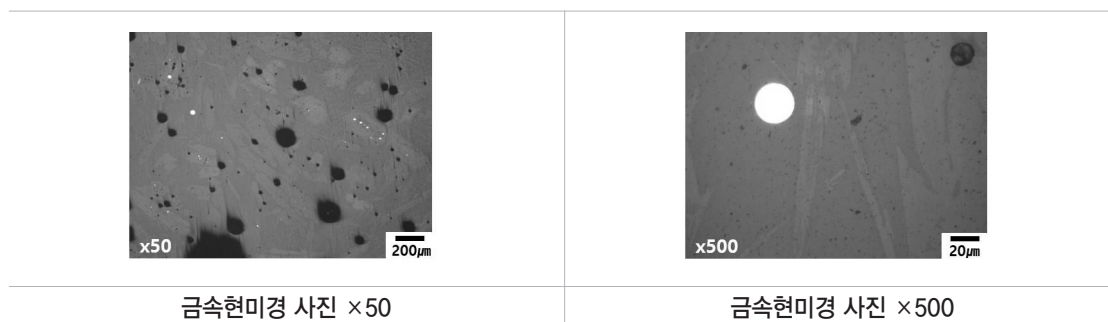
1) 시료의 채취

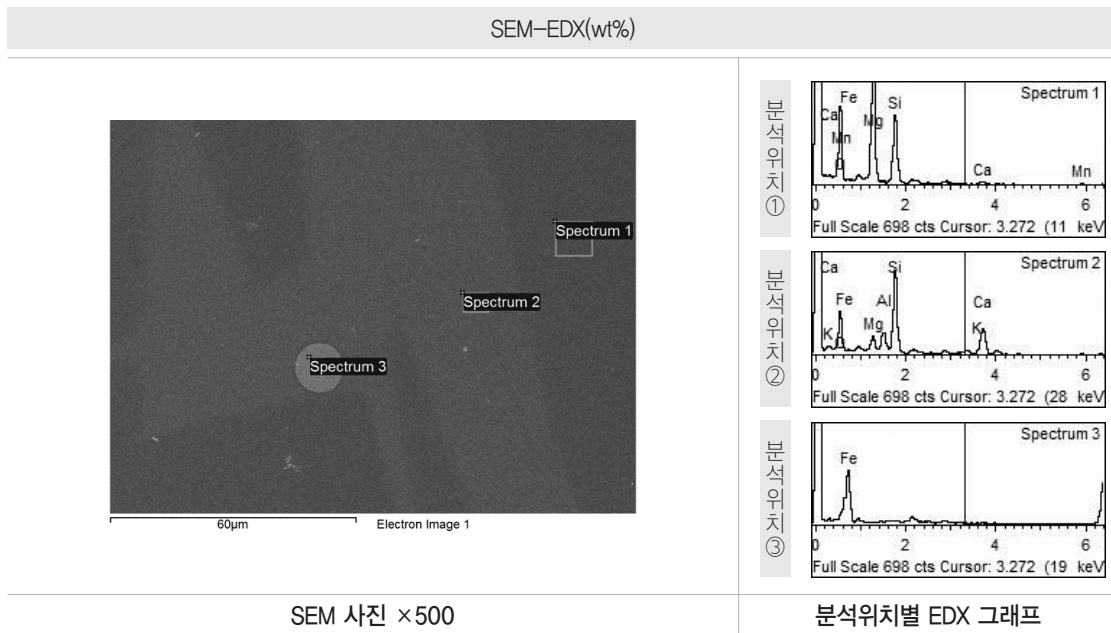


〈사진 1〉 투입 슬래그 - 유출상 철재 (21U-3G)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 4〉 투입 슬래그 - 철재 (21U-3G)의 분석결과





성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	4.10	—	40.06	—	32.71	—	20.08	—	1.31	—	1.73
②	3.61	—	42.33	—	4.33	4.76	25.88	1.95	17.13	—	—
③	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

XRF(wt%)분석											
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
함량	6.89	44.01	6.40	16.35	0.72	20.88	2.14	0.29	0.05	2.00	—
성분	BaO	Co ₂ O ₃	NbO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	PbO	Cl
함량	—	0.03	0.05	—	0.01	0.01	0.15	—	—	—	—

유출상철재(21U-3G)의 현미경조직은 유출재의 조직을 갖고 있으며 SEM-EDX분석에서도 MgO·SiO₂, CaO·SiO₂의 슬래그와 간헐적으로 FeO가 나타난다. 이에 XRF분석에서는 주성분이 MgO·SiO₂, CaO·SiO₂의 슬래그를 나타낸다.

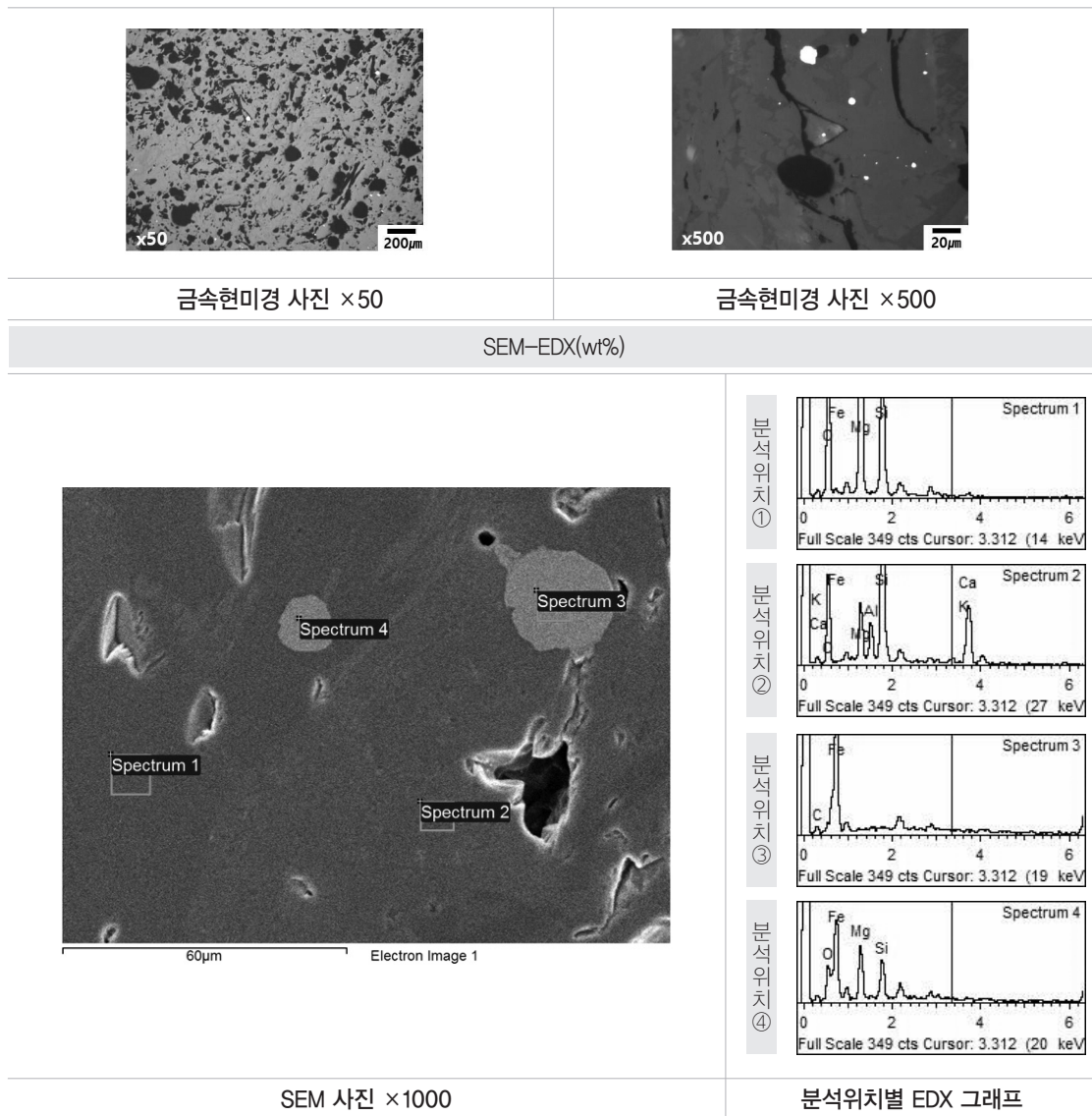
2.2 투입 슬래그 - 철재 (21U-3S)

1) 시료의 채취



〈사진 2〉 투입 슬래그 - 철재 (21U-3S)의 절단면 위치와 절단면

〈표 5〉 투입 슬래그 - 철재 (21U-3S)의 분석결과



분석위치	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	7.52	—	39.89	—	30.59	—	22.00	—	—	—	—
②	3.54	—	41.61	—	7.34	4.70	24.10	1.24	17.47	—	—
③	90.44	9.56	—	—	—	—	—	—	—	—	—
④	74.96	—	8.20	—	10.73	—	6.11	—	—	—	—

XRF(wt%)분석											
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
함량	6.89	44.01	6.40	16.35	0.72	20.88	2.14	0.29	0.05	2.00	—
성분	BaO	Co ₂ O ₃	NbO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	PbO	Cl
함량	—	0.03	0.05	—	0.01	0.01	0.15	—	—	—	—

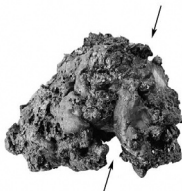
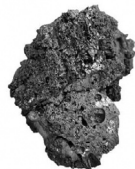
투입 슬래그(21U-3S)의 현미경조직은 전형적인 제련슬래그 조직이며 SEM-EDX분석에서는 $MgO \cdot SiO_2$ 슬래그가 주성분을 나타낸다. XRF분석에서도 $MgO \cdot SiO_2$ 및 $CaO \cdot SiO_2$ 가 주성분을 형성하고 있다.

3. 실험 중 가마 내 슬래그

실험 중 가마 내 슬래그는 본 실험 중 송풍관이 막혀서 뚫는 과정에서 채취된 슬래그와 출탕 전 가마 내 상황을 확인하는 과정에서 채취된 슬래그를 분석한 것이다.

3.1 송풍관 막힘 슬래그 (21U-4)

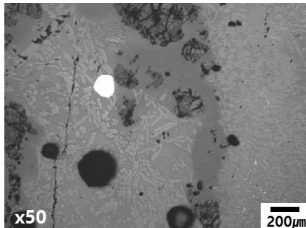
1) 시료의 채취

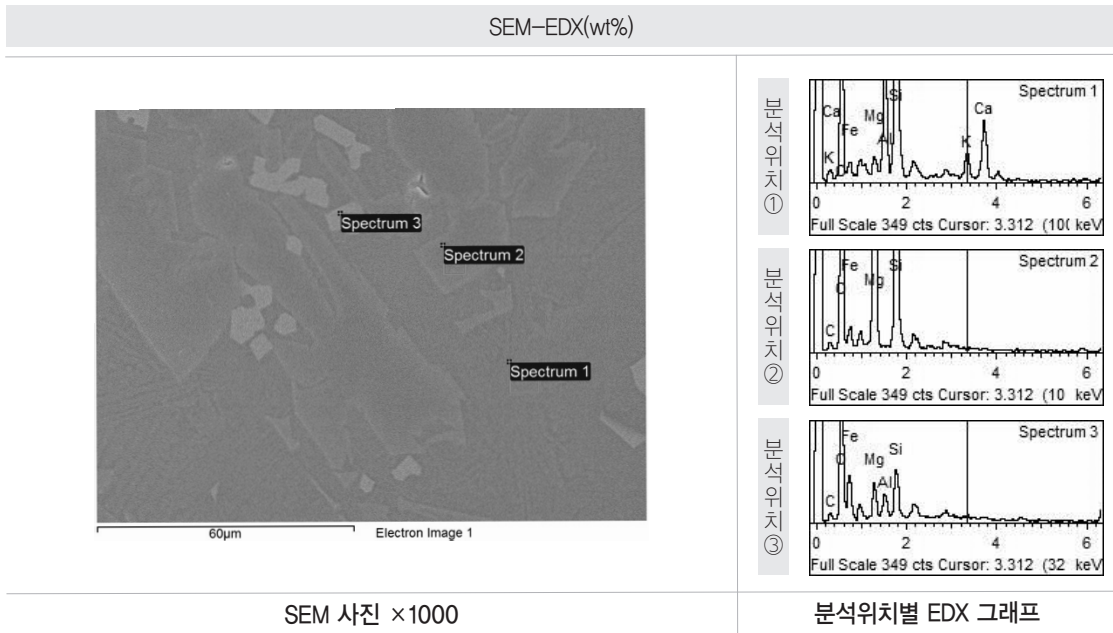
	
① 절단 위치	② 절단면

〈사진 3〉 송풍관 막힘 슬래그 (21U-4)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 6〉 송풍관 막힘 슬래그(21U-4)의 분석결과

	
금속현미경 사진 ×50	금속현미경 사진 ×500



성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	11.82	—	39.91	—	1.49	7.61	26.56	3.41	9.19	—	—
②	17.12	5.86	37.21	—	21.87	—	17.94	—	—	—	—
③	50.84	8.04	28.09	—	4.82	2.59	5.62	—	—	—	—

XRF(wt%)분석											
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
함량	25.24	43.85	7.37	5.82	0.98	12.17	2.38	0.50	0.11	1.45	0.01
성분	BaO	Co ₂ O ₃	NbO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	PbO	Cl
함량	—	—	0.02	0.02	0.02	0.01	0.04	—	—	—	0.00

송풍관 막힘 슬래그(21U-4)는 송풍 중 송풍관이 가마 내 슬래그의 흡입으로 막힌 것을 송풍구를 통하여 채취한 시료로서 현미경조직은 온전한 슬래그 조직이며, SEM-EDX분석에서도 SiO₂계 슬래그, MgO계 슬래그 및 FeO계 슬래그가 혼합된 것으로 나타난다.

XRF분석에서는 FeO·SiO₂, MgO·SiO₂가 주성분을 형성하고 있다.

3.2 유출 전 확인 슬래그(21U-5)

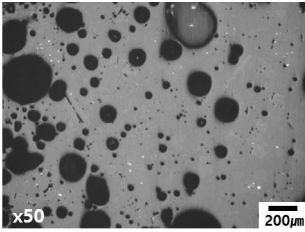
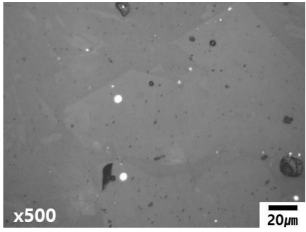
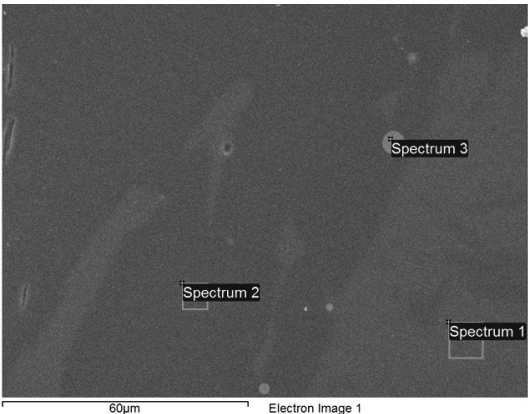
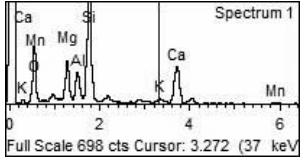
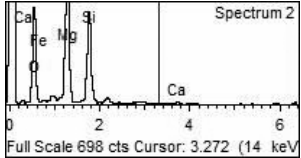
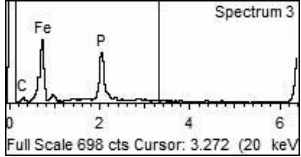
1) 시료의 채취



〈사진 4〉 유출 전 확인 슬래그(21U-5)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 7〉 유출 전 확인 슬래그(21U-5)의 분석결과

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

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	P	Mn
①	—	—	41.31	—	8.04	5.28	24.45	1.22	17.45	—	2.26
②	3.32	—	43.32	—	30.40	—	21.88	—	1.09	—	—
③	77.98	8.89	—	—	—	—	—	—	—	13.13	—

XRF(wt%)분석											
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
함량	7.50	45.29	6.64	13.00	0.62	21.68	2.31	0.38	0.09	2.24	—
성분	BaO	Co ₂ O ₃	NbO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	PbO	Cl
함량	—	0.02	0.04	0.02	0.01	0.01	0.15	—	—	—	—

유출상태를 확인하기 위하여 출재구를 개구하여 시료를 채취한 확인 슬래그(21U-5)의 현미경조직은 기지조직에서 유출상이 확인되고 많은 기공이 나타난다. SEM-EDX분석에서도 SiO₂·MgO 슬래그가 주성분을 형성하고 일부에는 탄소가 포함되어 있다.

XRF분석에서도 MgO·SiO₂, CaO·SiO₂계의 슬래그 조성을 보여주고 있다.

4 출탕

출탕은 1~4차에 걸쳐 선철을 출탕하여 각각의 차수별로 시료를 채취하여 분석하였다. 1차 출탕 시 함께 유출된 유리질 철재와 1차 출탕 후 유출된 유리질 철재를 함께 분석하였다.

4.1 1차 유출 유리질 철재(21U-6)

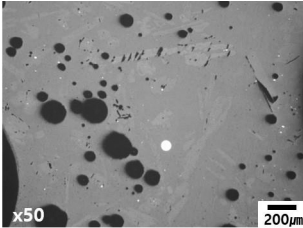
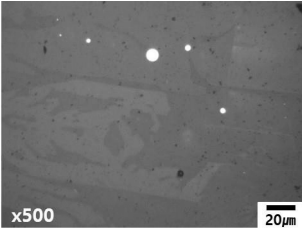
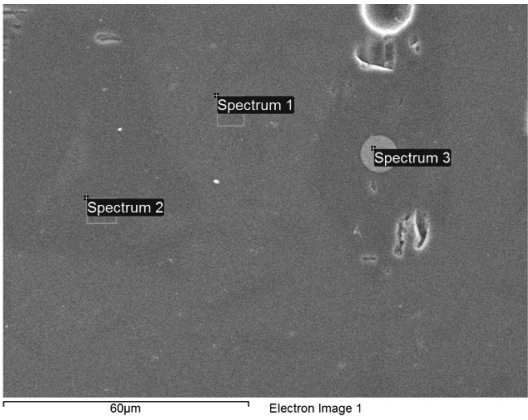
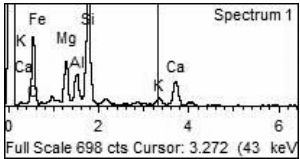
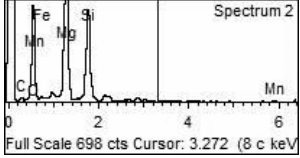
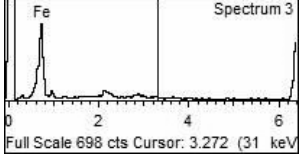
1) 시료의 채취



〈사진 5〉 1차 유출 유리질 철재(21U-6)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 8〉 1차 유출 유리질 철재(21U-6)의 분석결과

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

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	3.63	—	43.26	—	8.96	5.50	25.41	2.31	10.93	—	—
②	3.45	6.95	39.84	—	28.25	—	19.65	—	—	—	1.87
③	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

XRF(wt%)분석											
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
함량	6.49	47.19	6.75	11.64	0.62	21.59	2.47	0.47	0.04	2.54	—
성분	BaO	Co ₂ O ₃	NbO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	PbO	Cl
함량	—	0.02	0.04	0.02	0.02	0.01	0.08	—	—	—	0.00

1차 유출 유리질 철재(21U-6)의 현미경조직은 유리질바탕에 간헐적으로 기공이 산재하며 SEM-EDX 분석에서 MgO·SiO₂계의 슬래그 조성에서 일부의 환원철 흔적이 보인다.

XRF분석에서도 MgO·SiO₂, CaO·SiO₂ 주성분을 형성하는 슬래그의 조성을 나타낸다.

4.2 1차 선철 출탕(21U-7)

1) 시료의 채취

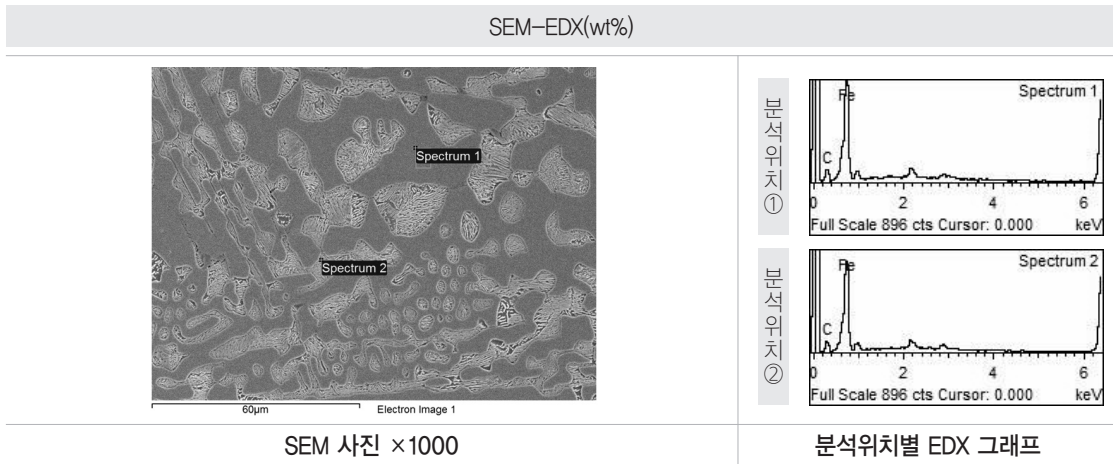


〈사진 6〉 1차 선철 출탕(21U-7)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 9〉 1차 선철 출탕(21U-7)의 분석결과

금속현미경 사진 ×50	금속현미경 사진 ×500



성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Mn
①	90.21	9.79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
②	89.92	10.08	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

C/S(wt%)		
성분	C	S
조성	4.4	0.056

경도(HMV)				
회수	1	2	3	평균
Pearlite	387	381	374	381
Cementite	665	648	620	644

제 1차 유출 선철(21U-7)의 현미경조직은 백주철 조직이며 SEM-EDX 분석에서도 (Fe-Fe₃C)로 형성된 Cementite조직을 형성하고 있었다. C/S분석에서 탄소함량은 공정조성에 가까운 4.4wt%C를 나타내고 있다.

이에 대한 현미경경도(HMV)는 Pearlite부분이 HMV381이고 Cementite부분이 HMV644로 나타난다. 이는 일반적인 백주철의 현미경 경도를 나타내고 있다.

4.3 1차 선철 출탕 후 유리질 슬래그(21U-8)

1) 시료의 채취



〈사진 7〉 1차 선철 출탕 후 유리질 슬래그(21U-8)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 10〉 1차 선철 출탕 후 유리질 슬래그(21U-8)의 분석결과

금속현미경 사진 ×50

금속현미경 사진 ×500

SEM-EDX(wt%)

SEM 사진 ×1000

분석위치 ①

분석위치 ②

분석위치 ③

분석위치별 EDX 그래프

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	—	—	43.20	—	32.94	—	23.86	—	—	—	—
②	—	—	44.92	—	25.86	—	25.21	—	4.02	—	—
③	71.17	—	10.98	—	1.76	2.60	9.63	—	3.86	—	—

XRF(wt%)분석											
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
함량	6.34	46.29	6.79	12.11	0.68	21.99	2.45	0.45	0.03	2.67	—
성분	BaO	Co ₂ O ₃	NbO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	PbO	Cl
함량	—	—	0.04	0.02	0.01	0.01	0.08	—	—	0.03	0.01

제1차 선철 출탕 후 흘러나온 유리질 슬래그(21U-8)의 현미경 조직은 기지조직이 유리질이고 기공이 무수히 나타나고 있다. SEM-EDX에서 슬래그의 주성분은 MgO·SiO₂이고 간헐적으로 철산화물(FeO)이 산재한다.

XRF분석에서는 MgO·SiO₂, CaO·SiO₂가 주성분으로 나타나고 있다.

4.4 2차 출탕 선철(21U-9)

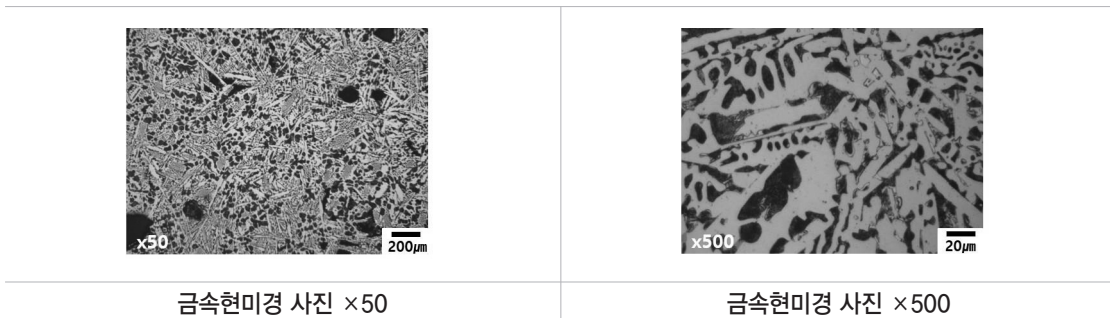
1) 시료의 채취



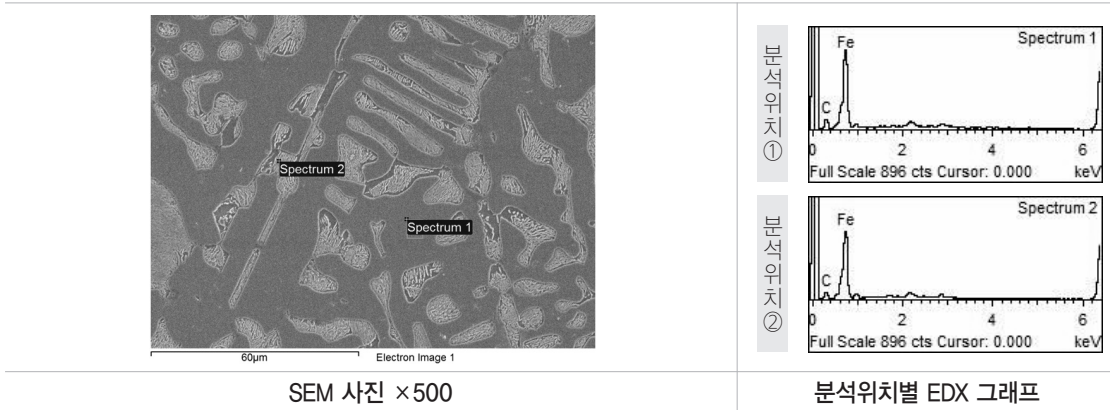
〈사진 8〉 2차 출탕 선철(21U-9)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 11〉 2차 출탕 선철(21U-9)의 분석결과



SEM-EDX(wt%)



성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Mn
①	88.02	11.98	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
②	90.27	9.73	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

C/S(wt%)		
성분	C	S
조성	3.9	0.075

회수	경도(HMV)			
	1	2	3	평균
Pearlite	324	347	365	345
Cementite	687	682	624	664

제 2차 출탕 선철(21U-9)의 현미경조직은 완전한 백주철 조직을 나타내고 SEM-EDX 분석에서도 백주철의 조직과 (Fe-Fe₃C)의 조성을 나타낸다.

C/S분석에서도 공정선철에 유사한 3.9wt%C의 탄소함량을 보여주고 있다.

현미경경도에서는 Pearlite가 HMV345이고 Cementite가 HMV664로 나타난다. 이는 일반적인 백주철의 현미경 경도로 형성되어 있다.

4.5 3차 출탕 선철(21U-10)

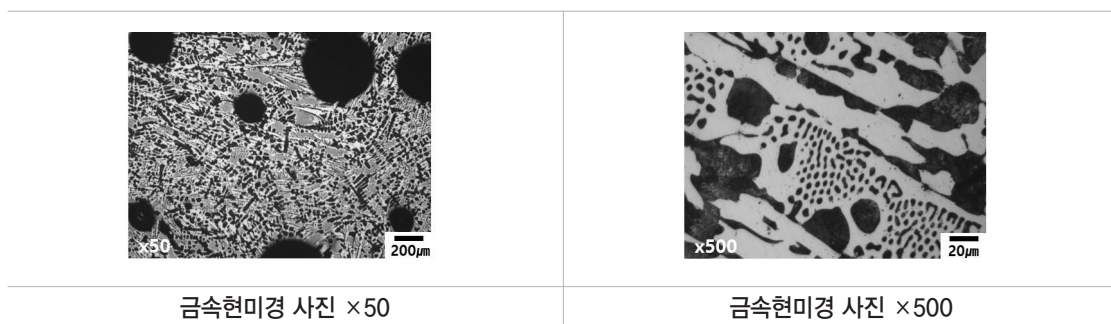
1) 시료의 채취

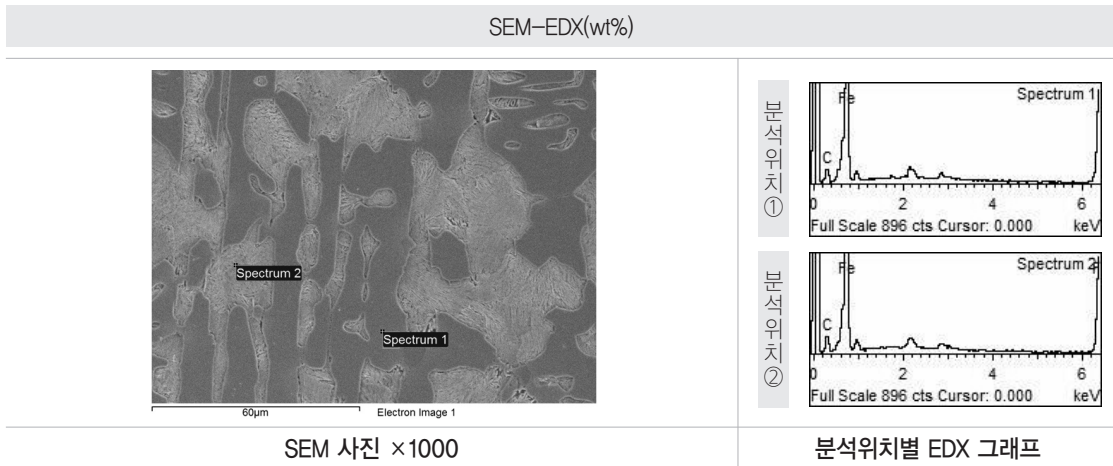


〈사진 9〉 3차 출탕 선철(21U-10)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 12〉 2차 출탕 선철(21U-9)의 분석결과





성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Mn
①	90.46	9.54	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
②	89.17	10.83	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

C/S(wt%)		
성분	C	S
조성	3.9	0.069

경도(HMV)				
회수	1	2	3	평균
Pearlite	396	359	372	376
Cementite	697	673	656	675

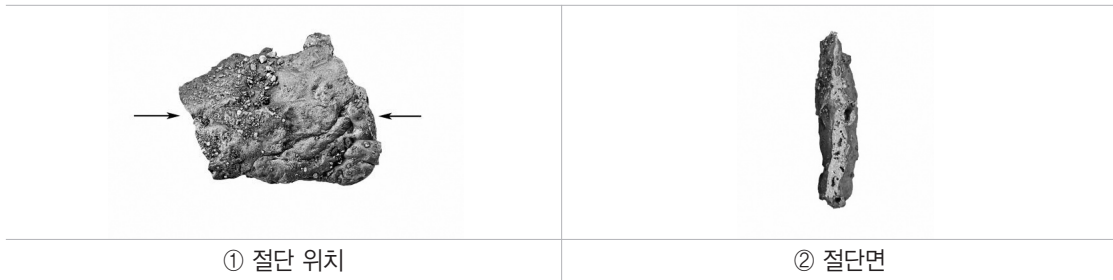
제3차 출탕 선철(21U-10)의 현미경조직은 완전한 백주철의 기지조직을 형성하고 조직 내부에 많은 기공이 형성되어 있다.

SEM-EDX분석에서도 Fe-Fe₃C의 조성을 보여주고 있다.

C/S분석에서 탄소함량은 3.9wt%C로서 아공정 백주철의 조성이다. 현미경경도는 Pearlite조직이 HMV376이고 Cementite조직이 HMV675를 나타낸다. 이는 일반적인 백주철의 현미경 경도를 나타내고 있다.

4.6 4차 출탕 선철(21U-11)

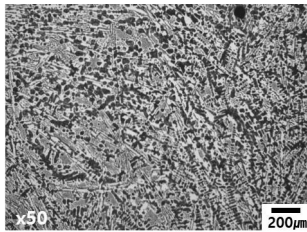
1) 시료의 채취



〈사진 10〉 4차 출탕 선철(21U-11)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

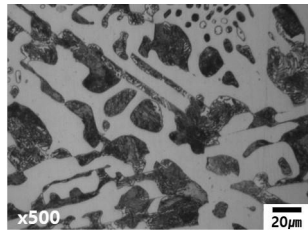
〈표 13〉 4차 출탕 선철(21U-11)의 분석결과



×50

200μm

금속현미경 사진 ×50

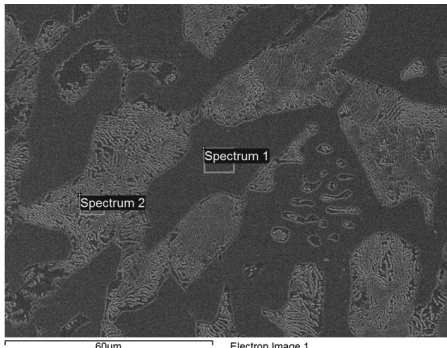


×500

20μm

금속현미경 사진 ×500

SEM-EDX(wt%)



Spectrum 1

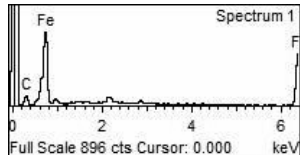
Spectrum 2

60μm

Electron Image 1

SEM 사진 ×1000

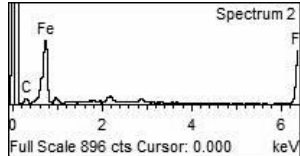
분석위치 ①



Spectrum 1

Full Scale 896 cts Cursor: 0.000 keV

분석위치 ②



Spectrum 2

Full Scale 896 cts Cursor: 0.000 keV

분석위치별 EDX 그래프

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Mn
①	88.83	11.17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
②	92.99	7.01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

C/S(wt%)

성분	C	S
조성	4.0	0.079

경도(HMV)

회수	1	2	3	평균
Pearlite	306	320	329	318
Cementite	559	576	583	573

제4차 출탕 선철(21U-11)의 현미경조직은 전형적인 백주철의 기지조직을 형성하고 SEM-EDX분석에서도 Fe-Fe₃C의 조성을 보여주고 있다.

C/S분석에서도 탄소함량이 4.0wt%C로서 공정탄소 함량에 가까운 조성을 나타낸다.

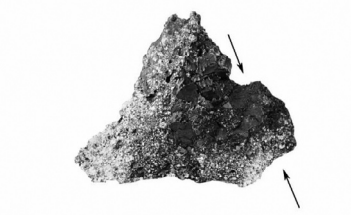
현미경경도는 Pearlite 조직이 HMV318이고 Cementite조직이 HMV573를 나타낸다. 이는 일반적인 백주철의 현미경 경도를 나타내고 있다.

5. 가마 바닥

가마 바닥 형성물 시료는 가마 바닥 경계부, 가마 바닥 경계 상부, 가마 바닥 중간 형성물 및 가마 바닥 형성물 시료들이 분석되었으며, 가마 바닥 중간 형성물은 선철 형성물과 철재를 구분하여 분석하였다. 가마 바닥 형성물의 단면을 보면 흑색의 철재 부분과 흰색의 규사질이 포함된 부분을 구분하여 분석을 실시하였다.

5.1 가마 바닥 경계부(21U-12)

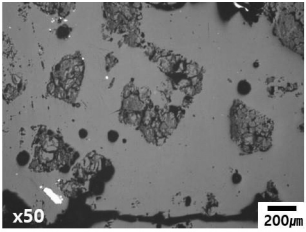
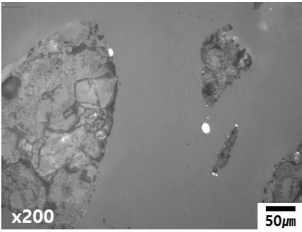
1) 시료의 채취

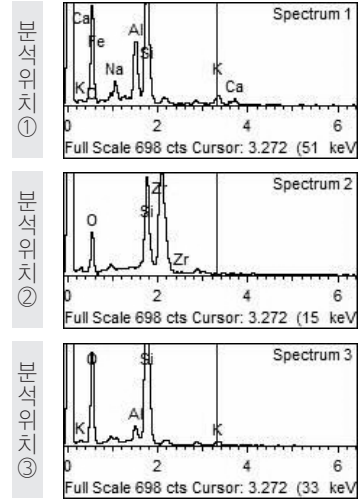
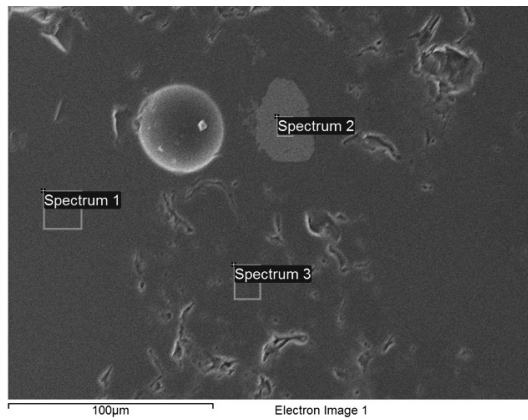
	
① 절단 위치	② 절단면

〈사진 11〉 가마 바닥 경계부 (21U-12)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 14〉 1차 선철 출탕 후 유리질 슬래그(21U-8)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	Zr
①	2.79	—	44.90	3.65	—	9.87	33.98	3.14	1.68	—	—
②	—	—	31.17	—	—	—	13.66	—	—	—	55.17
③	—	—	50.32	—	—	2.63	45.25	1.80	—	—	—

XRF(wt%)분석											
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
함량	0.70	77.81	9.25	2.27	3.11	0.60	5.82	0.14	—	0.08	—
성분	BaO	Co ₂ O ₃	NbO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	PbO	Cl
함량	0.05	0.02	0.03	0.01	0.02	0.02	0.05	—	—	—	0.02

가마 바닥 경계부(21U-12)의 현미경조직은 모래가 소결된 층으로 형성되어 있다.

SEM-EDX분석에서는 모래의 주성분인 SiO₂로 형성되고 일부조직은 ZrO₂산화물도 나타나고 있다.

XRF분석에서도 SiO₂가 주성분이고 이는 점토질에서 나온 알루미늄(Al₂O₃)과 알칼리(K₂O)로 나타난다.

5.2 가마 바닥 경계 상부(21U-13)

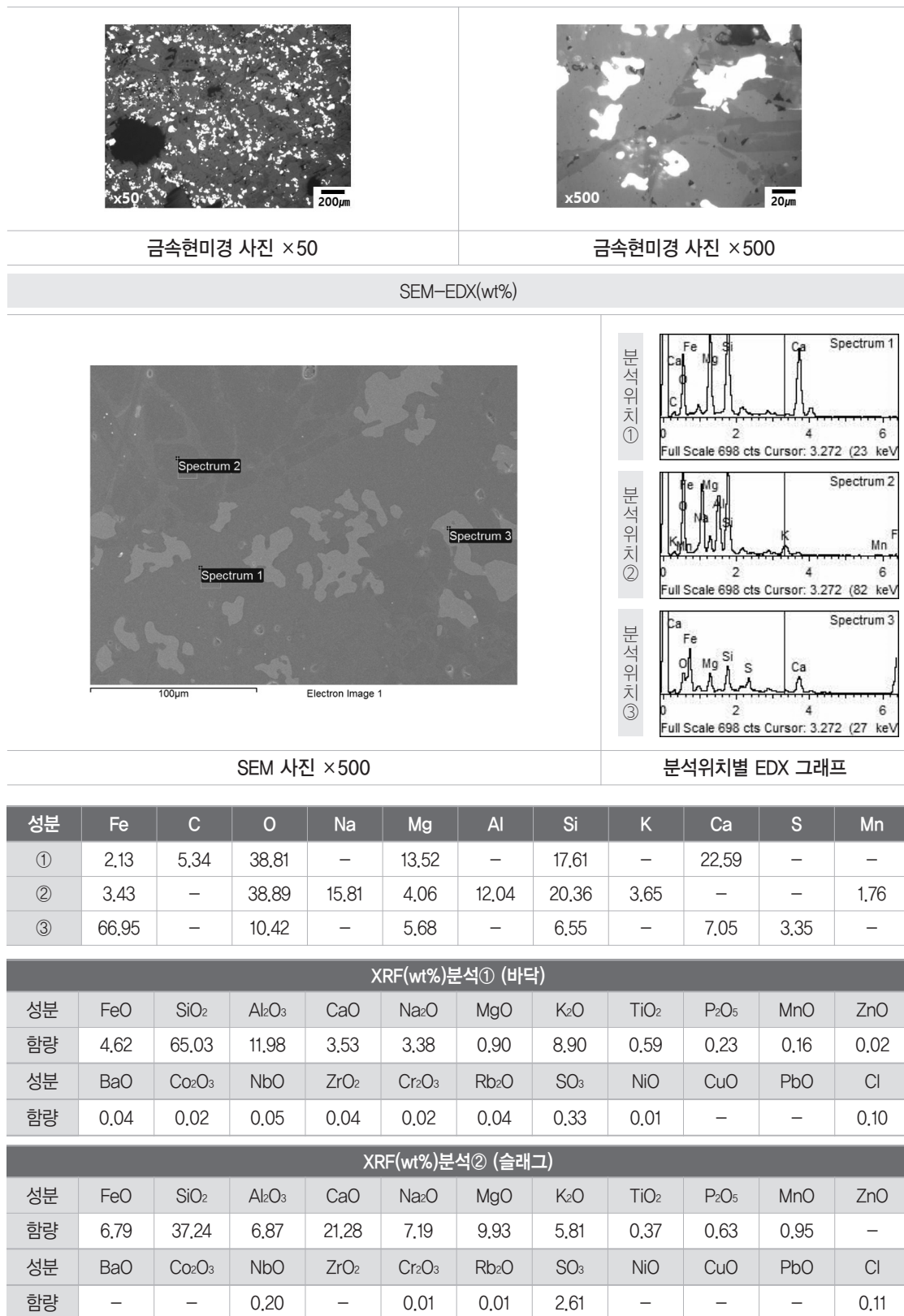
1) 시료의 채취



〈사진 12〉 가마 바닥 경계 상부(21U-13)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 15〉 가마 바닥 경계 상부(21U-13)의 분석결과



가마 바닥 경계 상부(21U-13)의 현미경조직은 점토질 기지 조직에 철산화물(FeO)이 산재하고 SEM-EDX 분석에서 FeO , CaO , SiO_2 , MgO 가 혼합된 조성을 나타낸다.

XRF분석① 바닥에서 점토성분인 SiO_2 , Al_2O_3 가 주성분이고 알카리(K_2O)가 높게 나타난다. XRF분석② 슬래그에서는 CaO , SiO_2 가 주성분이고 MgO 와 알카리(K_2O)가 높게 나타난다.

5.3 가마 바닥 중간 형성물-선철(21U-14M)

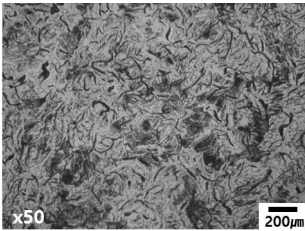
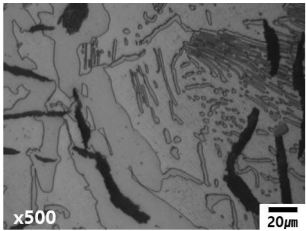
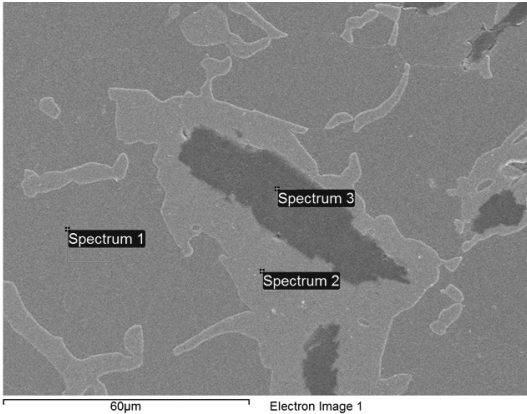
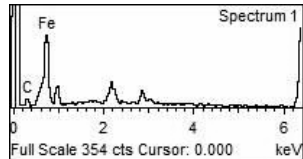
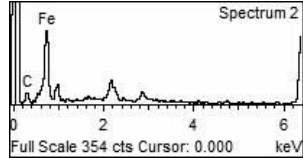
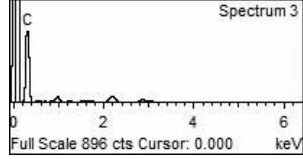
1) 시료의 채취



〈사진 13〉 가마 바닥 중간 형성물-선철(21U-14M)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 16〉 가마 바닥 중간 형성물-선철(21U-14M)의 분석결과

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

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	S	Mn
①	87.22	12.78	—	—	—	—	—	—	—	—	—
②	85.07	14.93	—	—	—	—	—	—	—	—	—
③	—	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—

C/S(wt%)		
성분	C	S
조성	4.3	0.057

경도(HMV)				
회수	1	2	3	평균
Pearlite	143	153	172	156
Cementite	469	440	450	453

가마 바닥 중간형성물-선철(21U-14M)의 현미경 조직은 회주철의 기지조직에서 간헐적으로 편상 흑연이 석출되어 있다. SEM-EDX분석에서도 같은 현상이며 흑연이 석출되고 기지조직은 Pearlite+Ferrite를 형성하고 있다.

C/S분석에서 탄소함량은 공정조성인 4.3wt%C를 나타내고 있으며 현미경 경도는 Pearlite가 HMV156이고 Cementite가 HMV453으로 나타난다. 현미경 경도는 배주철의 흑연화에 따라 조직은 Pearlite + Cementite가 Ferrite+흑연/Pearlite로 변태되어 있다.

5.4 가마 바닥 중간 형성물-철재(21U-14S)

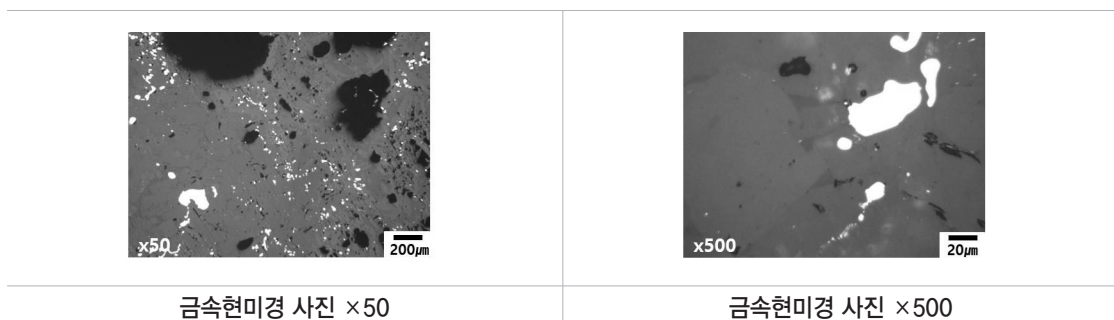
1) 시료의 채취

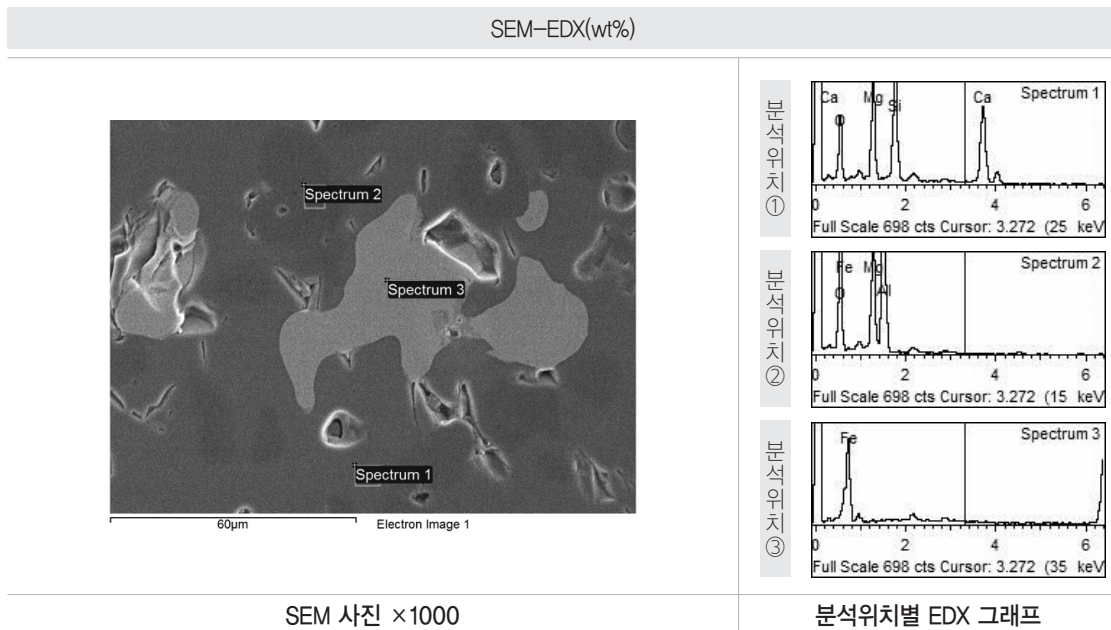


〈사진 14〉 가마 바닥 중간 형성물-철재(21U-14S)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 17〉 가마 바닥 중간 형성물-철재(21U-14S)의 분석결과





성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	—	—	40.88	—	14.49	—	19.50	—	25.13	—	—
②	2.40	—	43.11	—	18.67	35.83	—	—	—	—	—
③	100.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

XRF(wt%)분석											
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
함량	3.88	50.95	7.89	16.43	2.07	13.19	3.50	0.32	0.11	1.17	—
성분	BaO	Co ₂ O ₃	NbO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	As ₂ O ₃	Cl
함량	0.06	0.02	0.09	—	—	0.01	0.32	—	—	—	—

가마 바닥 중간형성물-철재(21U-14S)의 현미경조직은 기지조직이 유리질상을 형성하고 간헐적으로 철산화물(FeOx)가 산재하고 있다.

SEM-EDX분석에서 Al₂O₃, SiO₂, MgO의 혼합으로 형성되고 철산화물도 산재하고 있다.

XRF분석에서는 CaO·SiO₂, MgO·SiO₂를 주성분으로 한 슬래그 조성을 보여주고 있다.

5.5 가마 바닥 형성물-철재(21U-15B)

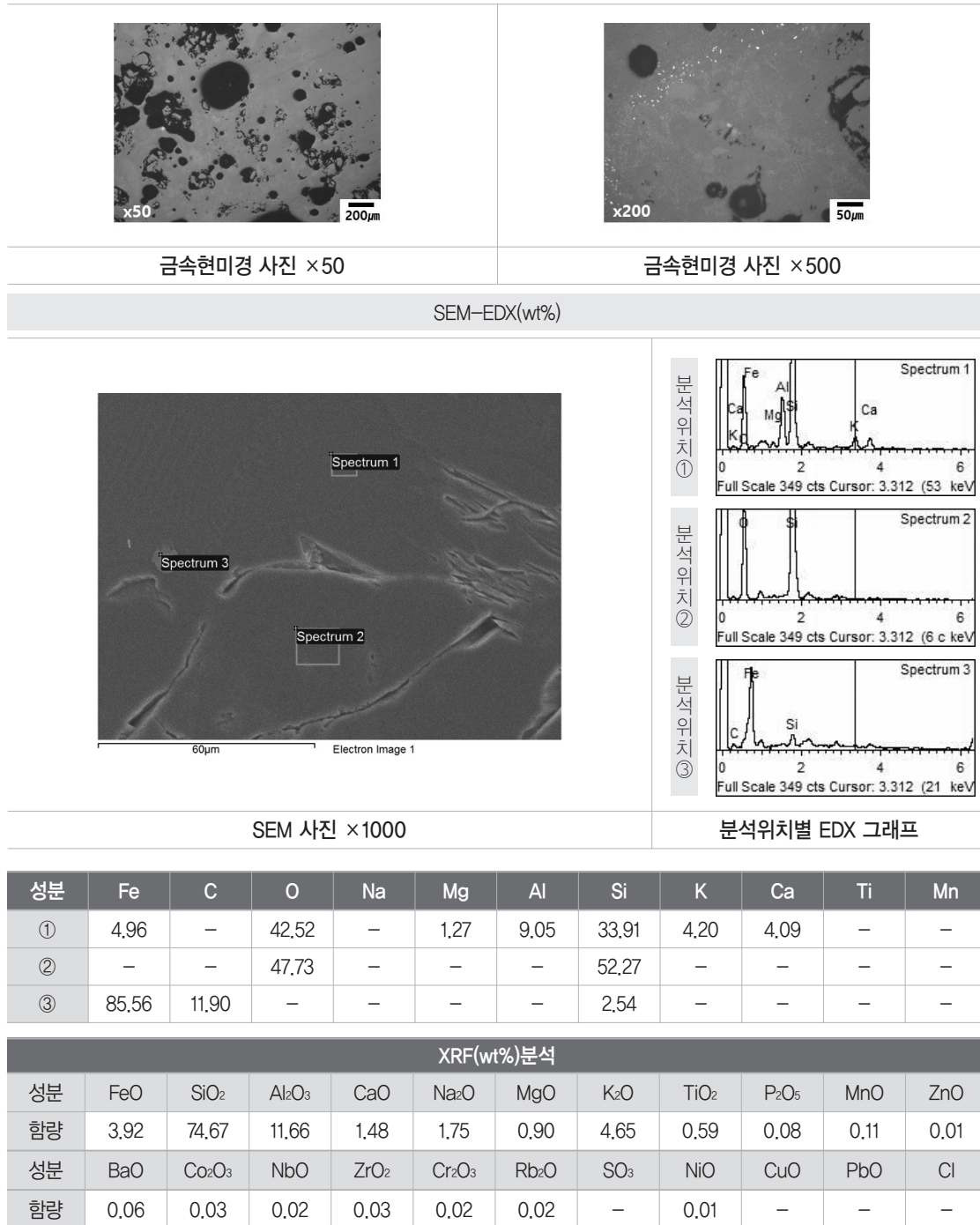
1) 시료의 채취



〈사진 15〉 가마 바닥 형성물-철재(21U-15B)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 18〉 가마 바닥 형성물-철재(21U-15B)의 분석결과



가마 바닥 형성물-철재(21U-15B)의 색깔은 흑색이며, 현미경 조직에서 기지조직은 유리질상이고 기공이 다량 산재하고 있다.

SEM-EDX분석에서 SiO₂가 주성분이며 Al₂O₃도 다량 나타난다.

XRF분석에서 황토성분 SiO₂, Al₂O₃가 다량 나타나고 알카리(K₂O) 성분도 나타난다.

5.6 가마 바닥 형성물-규산질 철재(21U-15G)

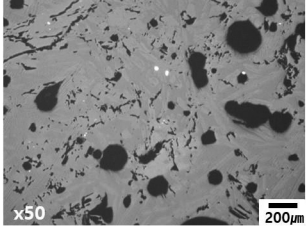
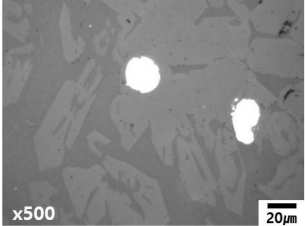
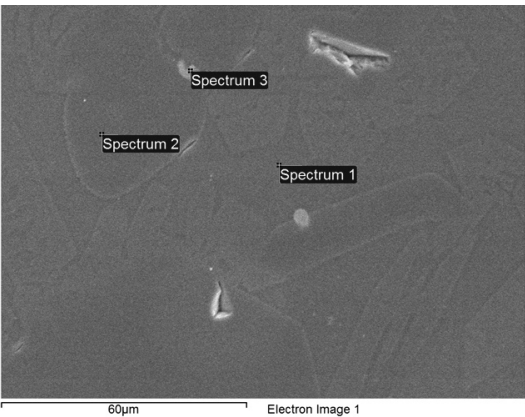
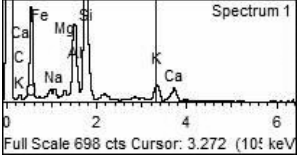
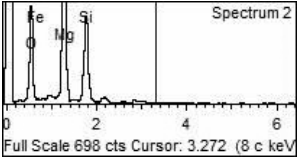
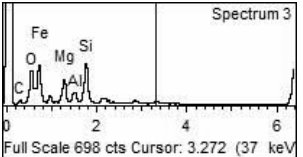
1) 시료의 채취



〈사진 16〉 가마 바닥 형성물-규산질 철재(21U-15G)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 19〉 가마 바닥 형성물-규산질 철재(21U-15G)의 분석결과

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

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	2.27	1.76	44.70	1.02	0.95	10.55	29.31	5.09	4.36	—	—
②	4.03	—	42.02	—	32.17	—	21.77	—	—	—	—
③	59.26	8.00	13.65	—	6.91	2.54	9.64	—	—	—	—

XRF(wt%)분석											
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
함량	5.95	51.23	9.20	8.61	1.04	18.29	2.81	0.52	0.04	2.15	—
성분	BaO	Co ₂ O ₃	NbO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	PbO	Cl
함량	—	0.02	0.02	0.02	—	0.01	0.08	—	—	—	—

가마 바닥 형성물-규산질 철재(21U-15G)의 현미경조직은 다공질의 슬래그 조직이며 SEM-EDX 분석에서 SiO₂ 및 MgO가 주성분이며 Al₂O₃, K₂O, CaO도 석출되고 있다.

XRF분석에서는 황토성분인 SiO₂, Al₂O₃를 주성분으로 MgO와 CaO가 편석되어 있다.

6. 가마 벽

송풍관의 용손 원인을 확인하고자 가마 벽 보수 황토, 송풍관 보강토, 송풍관 용손부 및 송풍관 용착부 시료들을 각각 1점씩 분석하고, 좌우측 가마 벽의 시료를 각각 채취하고 가마 벽의 단면을 기준으로 가마 벽측과 철재 용착부를 구분해 분석을 실시하고 출선구의 상부 가마 벽을 별도로 채취하여 분석을 실시하였다.

6.1 가마 벽 보수 황토(21U-16)

본 가마 벽 보수 황토(21U-16)는 실험 전 가마 벽 보수에 사용된 황토이며, 이를 보수에 사용하기 전에 채취하여 XRF분석한 결과이다.

〈표 20〉 가마 벽 보수 황토(21U-16)의 분석결과

XRF(wt%)분석											
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
함량	6.99	67.10	19.30	0.15	0.11	1.17	3.37	1.18	0.16	0.12	0.02
성분	BaO	Co ₂ O ₃	NbO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	PbO	Cl
함량	0.04	0.02	0.01	0.05	0.10	0.03	0.05	0.01	0.01	—	0.00

6.2 송풍관 보강토(21U-17)

본 송풍관 보강토(21U-17)는 가마 벽 보수 황토와 왕모래를 배합하여 송풍관 덧살용으로 사용 전에 채취하여 XRF분석한 자료이다. 주성분은 일반적인 황토의 조성을 갖고 있으며 알칼리 성분(K₂O, Na₂O)이 약간 높게 나타난다.

〈표 21〉 송풍관 보강토(21U-17)의 분석결과

XRF(wt%)분석											
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
함량	3.62	71.54	16.07	0.61	1.55	0.75	4.84	0.63	0.10	0.09	0.01
성분	BaO	Co ₂ O ₃	NbO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	PbO	Cl
함량	0.03	0.01	0.01	0.04	0.02	0.03	0.04	—	—	—	0.03

6.3 송풍관 용손(21U-18)

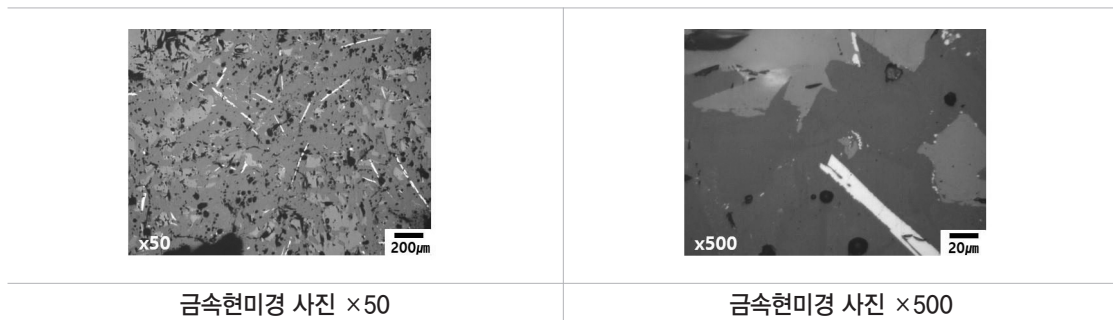
1) 시료의 채취

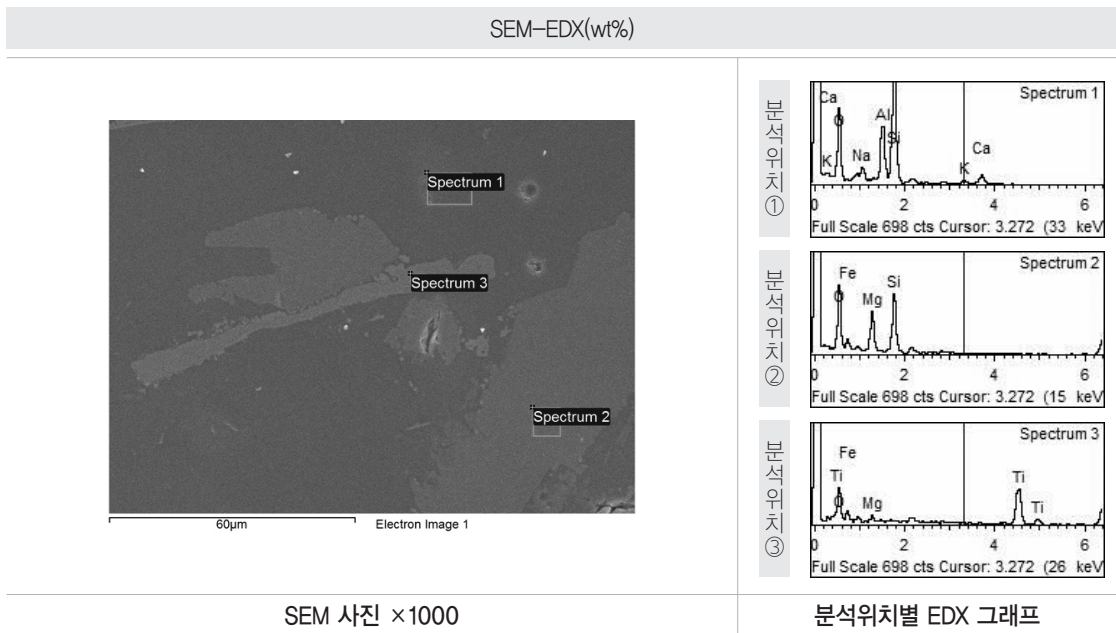


〈사진 17〉 송풍관 용손 (21U-18)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 22〉 송풍관 용손 (21U-18)의 분석결과





성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	—	—	46.74	3.02	—	12.26	31.41	1.94	4.63	—	—
②	35.62	—	33.09	—	12.86	—	18.42	—	—	—	—
③	37.58	—	31.99	—	2.12	—	—	—	—	28.31	—

XRF(wt%)분석											
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
함량	10.32	56.11	14.61	7.21	3.79	3.95	1.54	1.75	0.34	0.15	0.02
성분	BaO	Co ₂ O ₃	NbO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	PbO	Cl
함량	—	0.03	0.07	0.03	0.04	0.01	—	0.02	0.01	—	0.00

송풍관은 인조판석으로 제조되었으며 이 송풍관 시료(21U-18)의 현미경조직은 암석조직이다. SEM-EDX분석에서 주성분이 SiO₂·Al₂O₃의 모래 성분이며 MgO와 FeO가 용착되어 용손이 일어났음이 파악되었다.

XRF분석에서 SiO₂·Al₂O₃가 주성분으로 나타나고 FeO와 MgO가 융합된 상태로 나타난다.

6.4 송풍관 융착(21U-19)

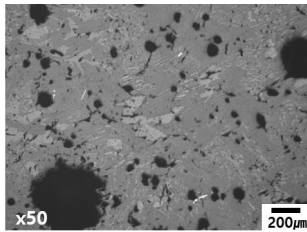
1) 시료의 채취



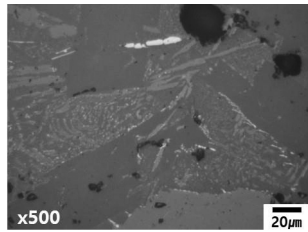
〈사진 18〉 송풍관 융착 (21U-19)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 23〉 송풍관 용착 (21U-19)의 분석결과

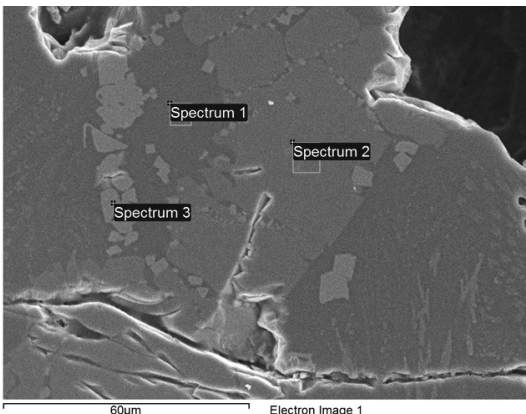


금속현미경 사진 ×50



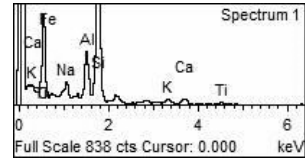
금속현미경 사진 ×500

SEM-EDX(wt%)

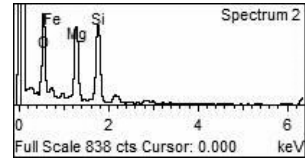


SEM 사진 ×1000

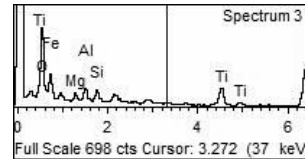
분석위치 ①



분석위치 ②



분석위치 ③



분석위치별 EDX 그래프

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	3.39	—	45.79	3.23	—	8.86	33.44	1.83	2.21	1.26	—
②	25.26	—	36.01	—	19.03	—	19.70	—	—	—	—
③	57.55	—	27.92	—	1.79	2.41	2.34	—	—	7.99	—

XRF(wt%)분석

성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
함량	10.24	54.66	13.68	7.46	3.24	0.46	1.70	1.55	0.27	0.50	0.01
성분	BaO	Co ₂ O ₃	NbO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	PbO	NbO
함량	—	0.04	0.06	0.03	0.04	0.01	0.04	0.02	—	—	0.01

송풍관 용착물(21U-19)의 현미경 조직은 슬래그 조직이며 SEM-EDX분석에서 Fayalite($2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$)와 MgO가 융합되어 있다.

XRF분석에서는 황토성분 $\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 를 주성분으로, FeO, CaO와 알카리 성분(Na_2O , K_2O)이 혼합된 상태로 보인다.

6.5 가마 내벽 좌측(21U-20)

1) 시료의 채취



〈사진 19〉 가마 내벽 좌측(21U-20)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 24〉 가마 내벽 좌측(21U-20)의 분석결과

금속현미경 사진 ×50

금속현미경 사진 ×500

SEM-EDX(wt%)

SEM 사진 ×1500

분석위치 ①

분석위치 ②

분석위치별 EDX 그래프

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	—	—	44.80	1.65	—	15.25	29.01	—	9.29	—	—
②	9.77	—	42.01	—	3.22	6.71	29.56	2.13	6.60	—	—

XRF(wt%)분석											
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
가마 벽	3.53	75.75	12.31	0.49	1.89	0.40	4.79	0.52	0.06	0.02	0.01
슬래그	3.20	76.86	11.77	0.43	1.84	0.41	4.65	0.51	0.06	0.07	0.01
성분	BaO	Co ₂ O ₃	NbO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	PbO	NbO
가마 벽	0.08	0.02	0.01	0.03	0.02	0.02	—	—	—	—	—
슬래그	0.08	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	—	0.01	—	0.01	0.00

조업 중에 녹아내린 가마 내벽 좌측(21U-20)의 현미경조직은 유리질과 유사한 슬래그상이며, SEM-EDX 분석에서도 황토 성분(SiO₂, Al₂O₃)을 주성분으로 하며 CaO가 결합된 용손물로 나타난다. XRF분석에서도 황토 성분을 주성분으로 하며 Fayalite(2FeO·SiO₂)와 알카리가 융합된 현상을 보여준다.

6.6 가마 내벽 우측(21U-21)

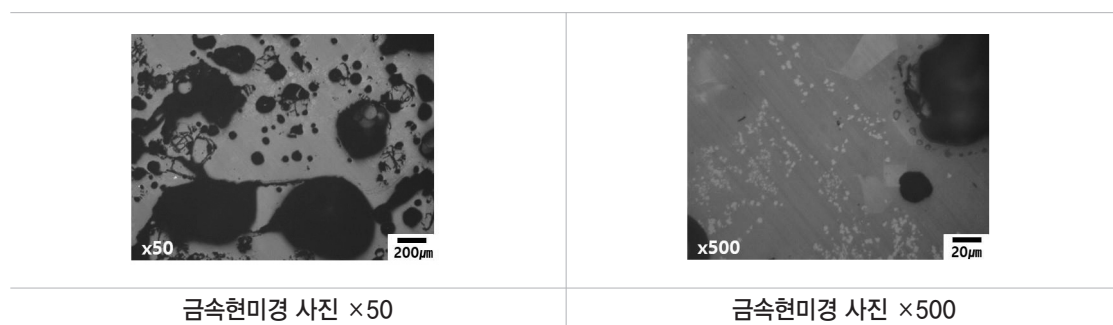
1) 시료의 채취



〈사진 20〉 가마 내벽 우측(21U-21)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

〈표 25〉 가마내벽 우측(21U-21)의 분석결과





성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	4.37	—	44.54	—	—	8.44	37.31	5.35	—	—	—
②	16.08	13.59	38.56	—	4.11	25.90	1.77	—	—	—	—

XRF(wt%)분석											
성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
가마 벽	2.91	76.48	12.05	0.52	2.21	0.33	4.79	0.42	0.05	0.06	0.01
슬래그	3.26	76.08	11.72	0.88	1.86	0.42	4.99	0.50	0.07	0.08	—
성분	BaO	Co ₂ O ₃	NbO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	PbO	NbO
가마 벽	0.07	0.02	0.01	0.03	0.01	0.02	—	—	—	—	0.00
슬래그	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	—	—	—	—	0.00

좌측과 마찬가지로 가마 내벽 우측(21U-21)의 현미경조직은 다공질의 슬래그 조직이며, SEM-EDX분석에서도 SiO₂, Al₂O₃조직을 바탕으로 Fayalite(2FeO·SiO₂)와 알카리(Na₂O, K₂O)가 융합된 것을 나타낸다.

XRF분석에서도 황토성분(SiO₂, Al₂O₃)을 주성분으로 알카리 성분(MgO, K₂O)이 융합된 상태로 나타난다.

6.7 출선구 상부 가마 벽(21U-22)

1) 시료의 채취



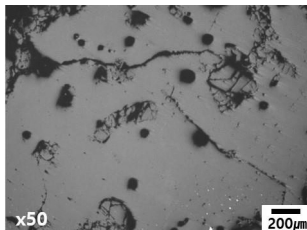
〈사진 21〉 출선구 상부 가마 벽(21U-22)의 절단면 위치와 절단면

2) 분석결과

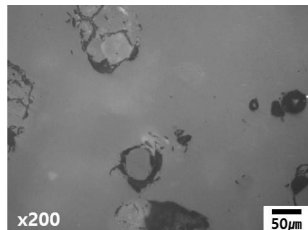
출선구 상부 가마 벽(21U-22)의 현미경 조직은 일반적으로 용융된 슬래그 조직이며, SEM-EDX 분석에서도 SiO_2 , Al_2O_3 를 주성분으로 K_2O 의 융합으로 형성되어 있다.

XRF분석에서도 황토성분 SiO_2 , Al_2O_3 를 주성분으로 Fayalite($2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$)와 알카리(K_2O)의 융합으로 형성되어 나타난다.

〈표 26〉 출선구 상부 가마 벽(21U-22)의 분석결과

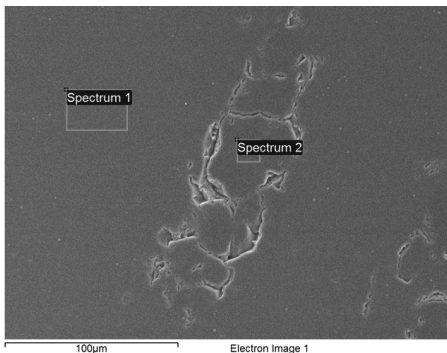


금속현미경 사진 ×50



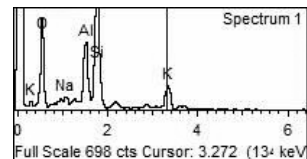
금속현미경 사진 ×500

SEM-EDX(wt%)

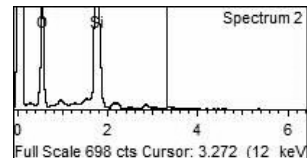


SEM 사진 ×500

분석위치 ①



분석위치 ②



분석위치별 EDX 그래프

성분	Fe	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn
①	—	—	46.60	1.32	—	10.48	32.72	8.89	—	—	—
②	—	—	50.69	—	—	—	49.31	—	—	—	—

XRF(wt%)분석

성분	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO
함량	9.63	67.79	10.02	2.51	1.51	2.48	5.06	0.37	0.09	0.34	—
성분	BaO	Co ₂ O ₃	NbO	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	Rb ₂ O	SO ₃	NiO	CuO	PbO	NbO
함량	0.07	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	—	—	—	0.00

IV 맺음말

제7차 복원실험의 분석 결과를 고찰해보면 다음과 같은 사항으로 요약할 수 있겠다. 쇠부리가마에서 토철과 같은 분광을 원료로 하여 제련작업을 추진한 결과 용융선철과 선철 판장석을 제조할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

그러나 판장석의 내부품질로 보면 무수한 기공이 잔존하여 향후 내부 품질개선에 남은 과제가 있다. 그리고 제련과정에서 유출재가 형성되지 못하여 반환원 철산화물로부터 철이 충분히 환원되지 못한 것은 철광석의 최종 회수율이 비교적 저조한 원인이다. 이는 제6차 복원실험 후 가마 내부 수리 과정에서 내부 미장을 점토 대신에 황토를 사용한 것에 영향을 받은 것으로 보인다.

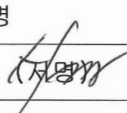
점토벽은 1,790℃의 내화도가 유지되지만 가마 내벽 미장재 황토는 환원 과정에서 반환원산화물(FeO_x)과 계면에서 반응하여 저융점의 Fayalite($2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$)를 형성하고 이것이 가마 내에서 과량으로 흘러내려 슬래그의 유출을 방해하고 가마 바닥 슬래그의 염기도를 떨어뜨리는 현상을 확인할 수 있었다.

3 자문의견서

자문위원 의견서		
사 업 명	2021년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험	
개최일시	2021년 10월 23일(토)	
자문내용	▶ 2021년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험에 대한 학술적 의견 ▶ 실험 준비·진행·결과 및 향후 계획 등에 대한 의견	
자 문 의 견		
제철복원실험에 대한 의견	울산쇠부리 제철 기술 복원은 필연적으로 실험에 의존할 수밖에 없다. 그동안의 실험을 통해 쇳물을 빼는 데는 많은 경험이 축적되어 나름 성과도 있었다. 그러나 실험의 관건은 적절한 온도와 양 조절을 통해 바탕쇠틀에 얼마나 양질의 판장쇠를 얻느냐이다. 이 또한 실험과 경험에 의존할 수밖에 없는 데 이에 대한 면밀한 관찰과 기록을 통해 시행착오를 최대한 줄여야 한다. 이번 7차 복원 실험은 그동안의 풍부한 경험 덕분에 지금까지와는 다른 양질의 쇳물을 얻을 수 있었던 점은 다행이다. 7차 실험은 제철 기술 복원에 한발 더 다가섰다는 데 그 의미가 있다고 본다.	
향후 추진방향	지금까지 7차에 걸쳐 복원 실험을 잘 진행해 왔다. 앞으로의 계획도 세밀하게 수립해야 한다. 예산의 문제나 행정 지원 체계 등이 지속적으로 이루어질 수 있도록 점검하고 확인해야 한다. 나아가 제철기술복원을 바탕으로 쇳부리소리와 함께 쇳부리문화 복원이라는 거시적 관점으로 접근해야 한다. 쇳부리문화는 전국 어느 곳에도 없는 울산만의 독특한 문화다. 잘 보존하고 계승해야 하는 것은 이 시대를 살아가는 우리의 사명이다.	
기타 의견	지금까지 많은 시간을 투자한 실험과 연구로 다양한 경험이 축적되어 전통 쇳부리 제철기술복원에 많이 접근했다. 관계한 모든 분들의 노고에 경의를 표한다.	
자 문 위 원		
소 속	전 공	성 명
울산대학교	구비문학(민속학)	김구한 
2021년 10월 28일		
울산쇠부리복원사업단 귀하		

자문위원 의견서		
사 업 명	2021년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험	
개최일시	2021년 10월 23일(토)	
자문내용	▶ 2021년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험에 대한 학술적 의견 ▶ 실험 준비 · 진행 · 결과 및 향후 계획 등에 대한 의견	
자 문 의 견		
제철복원실험에 대한 의견	* 조선시대 석축형제철로를 모델로 한 실험은 여러 차례에 걸쳐 선철을 생산하고 이를 직접 용범에 주입하여 판장쇠를 만듦으로써, 성공적으로 복원실험이 이루어졌다고 평가할 수 있다. 무엇보다 조업 중간 중간 송풍이나 골구멍 사용 석재가 녹는 등 여러 문제가 발생하였음에도 이를 기술적으로 통제해가면서 생산이 이루어졌다는 점에서 경험적으로 축적된 기술적 기반 또한 대단히 높아졌음을 알 수 있다. * 다만 안정적 조업이 가능한 기술적 기반이 축적되었다고는 하나, 과거 기술적 환경을 제대로 이해하고 복원하기 위해서는 관련 비교자료 축적이 계속 이루어져야 하며, 이를 통해 철 회수율을 향상시킬 수 있는 작업 개선방향에 대한 모색도 지속되어야 할 것으로 생각된다. * 특히 기계송풍이 지속적으로 일정한 풍압을 낼 수 있는 장점이 있는 반면에 순간순간 필요로 하는 최대 풍압은 발포무일 수 있는 만큼 상호 비교자료 축적이 꼭 필요할 듯 하다.	
향후 추진방향	* 현재 석축형제철로 내부에 벽돌을 넣어 구축하였으나, 발굴자료에서는 보이지 않는 만큼 발굴자료를 토대로 한 노 설계가 이루어지는 것이 바람직하다고 생각된다.	
기타 의견		
자 문 위 원		
소 속	전 공	성 명
충북대	역사고고학	성정용 
2021년 10월 일		
울산쇠부리복원사업단 귀하		

자문위원 의견서		
사 업 명	2021년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험	
개최일시	2021년 10월 23일(토)	
자문내용	▶ 2021년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험에 대한 학술적 의견 ▶ 실험 준비·진행·결과 및 향후 계획 등에 대한 의견	
자 문 의 건		
제철복원실험에 대한 의견	- 괴련철 제련 실험의 경우, 80% 이상의 성공률을 보이고 있고, 매년 성공률이 좋아지고 있음. - 매년 판장쇠바탕의 목표 무게를 늘리고 있으며, 이를 달성하기 위해 열심히 노력하고 있음. - 우리나라 전통 제철복원실험의 첫 선철 생산 사례가 되었으며, 아직까지 불안정한 쇳물 관리와 판장쇠바탕 제작에 대한 개선사항이 요구됨. - 생산 매뉴얼의 수립 및 이를 체계적으로 관리할 필요가 있음. - 달천철장에서 실험하여 더욱 넓은 공간 확보가 가능하고, 석축의 크기와 모양이 원형에 맞게 잘 구성되었음. - 판장쇠 바탕을 제작하고 형태를 잘 구성하였음. - 송풍시설이 효율적으로 제작되었고, 송풍이 고르게 잘 이루어졌음.	
향후 추진방향	- 한·중·일의 관련 문헌을 보다 많이 확보하고, 이를 적극 활용할 필요가 있음. - 문헌 및 현장 조사를 더욱 많이 실시하고, 외국과 협력하여 제철복원실험이 이루어질 수 있도록 계획할 것. - 제철복원실험과 함께 관련 콘텐츠를 엮어서 울산시를 대표하는 K-문화로 발전시킬 필요가 있음.	
기타 의견	- 매년 울산쇠부리 제철기술 복원실험이 아주 성공리에 잘 진행되고 있으며, 이러한 실험을 더욱 많이 할 수 있는 예산 지원 및 관심이 요구됨. - 앞으로 울산시의 주요 문화 콘텐츠 및 축제 아이템으로 적극 활용할 필요함.	
자 문 위 원		
소 속	전 공	성 명
울산대학교	재료공학	신상용 
2021년 10월 26일		
울산쇠부리복원사업단 귀하		

자문위원 의견서		
사 업 명	2021년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험	
개최일시	2021년 10월 23일(토)	
자문내용	▶ 2021년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험에 대한 학술적 의견 ▶ 실험 준비·진행·결과 및 향후 계획 등에 대한 의견	
자 문 의 건		
제철복원실험에 대한 의견	1. 3차례의 쇳물 출탕 작업이 시도되었다는 점에서 향후, 선철 대량생산을 위한 노하우를 체득했다고 판단된다. 2. 그러나 잦은 초롱구멍과 잡쇠구멍에 대한 철재 제거 작업으로 조업 온도가 오르지 않고 정체되었다는 점에서 개선책 마련이 필요하다. 즉, 철재 제거 작업 시기에 대한 판단 기준이 필요하다고 판단된다. 3. 바람골이 노 내부에 조성된 상부 점토가 내려 않는 현상에 대한 원인 분석이 필요하다고 판단된다. 4. 판장쇠바탕은 실험당시 충분한 건조 과정을 거치지 않은 상태에서 출탕 작업이 이루어져 판장쇠의 형태가 불완전하게 형성된 것으로 추정된다. 따라서 다음 실험에서는 불완전한 건조상태에서 만들어진 판장쇠바탕 사용은 지양되어야 한다. 5. 첨가제로 철재 파편을 투입하였는데 철재의 사용 이유와 성질에 대한 구체적인 사유가 제시될 필요가 있다. 6. 실험을 위한 준비 작업으로 충분한 예열이 진행되었는지에 대한 기록 검토가 필요하다.	
향후 추진방향	1. 다음 실험에서는 충분한 예열과 충분히 건조된 판장쇠바탕을 사용할 필요가 있으며 첨가제의 사용 필요성에 대한 충분한 설명이 필요하다. 2. 아울러 대안동쇠부리가마의 축소형은 여러 측면에서 고려해야할 변수가 많다는 점에서 동일한 크기로 복원하여 실험하여야 보다 설득력있는 결과도출될 것으로 판단된다.	
기타 의견		
자 문 위 원		
소 속	전 공	성 명
한림대학교 한림고고학연구소	고고학	심 재 연 
2021년 10월 일		
울산쇠부리복원사업단 귀하		

자문위원 의견서		
사 업 명	2021년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험	
개최일시	2021년 10월 23일(토)	
자문내용	▶ 2021년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험에 대한 학술적 의견 ▶ 실험 준비·진행·결과 및 향후 계획 등에 대한 의견	
자 문 의 건		
제철복원실험에 대한 의견	분광을 원료로 대량의 선철을 생산하는 기술을 복원한 점에 큰 의미가 있는 실험이다. 특히 작년 실험에 비해 용선의 생산 및 배출량이 많았던 점은 제철기술 복원에 한 걸음 더 접근한 것으로 평가할 수 있다. 현재 기술체계의 유지 발전을 위하여 몇 가지 검토할 점에 대해 의견을 제시하고 싶다. 1. 원료 400kg 투입, 선철 25% 생산이라는 조업 계획을 달성하였는지, 검토할 필요가 있다. 2. 조재제로 이전 조업한 철재를 투입하였고, 별도의 산화칼슘의 투입은 없었다. 하지만, 철재에 이미 10%CaO 이상의 칼슘이 포함되어 있기 때문에, 투입된 철재에 일정 비율의 산화칼슘이 투입되었을 가능성이 높다. 이에 대한 금속학적 분석 및 결과를 검토하여 실험 계획과 비교 검토할 필요가 있다. 3. 조업 과정에서 송풍구 입구까지 차오른 철재를 제거하면서 많은 시간이 소모되고, 노내 온도의 저하가 있었다. 또한 철재를 제거하며, 많은 철 형성물의 손실이 있었을 가능성이 있다. 철손실을 확인하기 위해서는 외부로 배출된 철재와 내부의 잔여 철재, 작년 실험에서 배출된 철재의 철함량 비교가 필요하다. 또한 철재를 조재제로 투입하고, 이를 조업 중 제거하기 위해 많은 노력이 필요하다면, 전반적이 조업 방식에 대한 재검토가 요구된다. 그 방법으로는 송풍(구)관의 높이를 높이거나, 선철의 배출을 통한 높이 조절 등이 있다.	
향후 추진방향	1. 올해 실험의 결과를 평가하기 위해 금속학적 분석결과를 활용하고, 내년 실험 계획에 분석결과를 적극 반영하여야 한다. 2. 향후 제철복원실험을 위해서 조업방식이나, 노구조(송풍관, 송풍구 위치)에 대한 수정이 필요해 보인다.	
기타 의견		
자 문 위 원		
소 속	전 공	성 명
아주대학교 도구박물관	고고학	최영민(서명)
2021년 10월 27일		
울산쇠부리복원사업단 귀하		

자문위원 의견서		
사 업 명	2021년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험	
개최일시	2021년 10월 23일(토)	
자문내용	▶ 2021년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험에 대한 학술적 의견 ▶ 실험 준비 · 진행 · 결과 및 향후 계획 등에 대한 의견	
자 문 의 견		
제철복원실험에 대한 의견	1. 전반적으로 작년에 비해 양호한 판장쇠 제작이 되지 않음. 이에 대한 원인 규명이 필요함. - 작년의 첨가제로 패각과 슬래그 중 올해는 슬래그만을 선택해 사용한 점 - (육안으로 관찰하지는 못했지만) 노내 피복점토가 녹아 석재가 노출된 점 - 유출 슬래그가 원활하지 않고 찌든하게 형성된 점→녹은 노벽 때문인지, 슬래그 첨가제 때문인지 확인이 필요 - 송풍관이 자주 막힘 → 흘러내린 노벽 때문인지, 찌든한 슬래그가 하강하지 못해 찬 것인지 - 온도가 평균 1,200~1300℃를 유지한 점 → 1,400℃ 유지 못한 점 ▶ 복합적인 원인이 작용했을 것으로 추정됨으로 이에 대해 노의 제작 단계부터 꼼꼼한 점검과 분석을 통한 규명이 필요 2. 범형 문제 - 범형이 완전히 건조되지 않고 수분이 함유되어 있어 철물이 나오면서 냉각 - 철물이 양이 너무 많아 밀려 채워졌던 2차 출탕을 제외하고는 쇠괴형으로 철물을 범심으로 밀어야 하는 상황이 발생. 유동성이 범형에서 줄어듦. → 향후 확실한 건조가 필요	
향후 추진방향	1. 작년 실험과 올해 실험의 비교표 작성을 통해 환경적 측면과 조업적 측면 등 실험결과에 대한 원인 분석이 필요 2. 슬래그 첨가제의 효능(선철을 보온하는 효과)이 확인됨. 다만 철재의 유동성 저하와의 관련성 점검 필요 3. 범형의 건조상태를 차후에는 사전에 반드시 선행되도록 일정 조정 필요 4. 노 내벽 미장점토 시료와 실험 후 노 내벽 분석을 통해 왜 흘러 내렸는지 원인 규명이 필요	
기타 의견	노벽에 대한 면밀한 관찰과 보수에 대한 계획 수립이 필요함 점토제의 선정 문제 및 내화토 사용 문제 등도 논의 필요	
자 문 위 원		
소 속	전 공	성 명
국립중원문화재연구소	고고학	한 지 선 (서명) 
2021년 10월 일		
울산쇠부리복원사업단 귀하		

2021 울산쇠부리복원사업 자문위원 의견서		
사 업 명	2021년 울산쇠부리복원사업	
개최일시	2021년 12월 12일	
자문내용	실험 평가 및 보고서 작성 등에 대한 사항	
자 문 의 건		
이번 7차 제련복원실험에서는 예년 실험의 경험과 성과를 충분히 살려 비교적 완성도가 높은 결과를 거두었음. 다만 한, 두 가지 아쉬운 부분에 대해 간단히 논의하고자 함. 첫째, 가마의 구조나 조성방법에 별다른 문제는 없어 보임. 다만 제련로의 조성 과정에서 내화도가 다소 떨어지는 황토를 이용해 벽체 외면을 마감하여 이것이 노의 내부 온도에 부정적인 영향을 미쳤을 가능성이 제기됨. 둘째, 송풍관의 재질에 있어서 문제가 있었을 가능성이 있음. 아마도 양질의 대리석 석재로 제작된 바람굴이 아니어서 이것이 결과적으로 원할한 송풍을 방해했을 가능성이 제기됨. 차후 실험에서는 이처럼 가마의 구조에 영향을 미치는 제반 요소들에 대한 보다 철저한 준비가 요구됨.		
자 문 위 원		
소 속	전 공	성 명
전북대	고고학	조대연(인/서명)
2021년 12월 12일		
울산쇠부리복원사업단 귀하		

2021 울산쇠부리복원사업 자문위원 의견서		
사 업 명	2021년 울산쇠부리 복원사업	
개최일시	2021. 12 - 12	
자문내용	쇠부리 평가, 번식 적성, 복제 실험 및 환경성에 대해 다룬다.	
자 문 의 건		
*제1차 실험 · 노의 보육 과정, 결과, 실험 과정에서 가해진 현상을 기록으로 남길 필요가 있음 · 실험의 번식 제작에 대한 정확한 이해도를 통하여 제공되어야 함. · 복제 실험의 개체 시점과 폐쇄구역에 대한 검토 필요함. *쇠부리 번식 적성 · 다양한 유전적 특성으로 인하여 가시적인 효과를 반영하는 것은 중요하나 각 유전자 내의 각 유전형의 의미에 대하여 자세히 설명이 필요하다. * 현재까지 유전 판독 기관에 대한 데이터 제시 필요. 또한 노의 번식 인공 번식은 관제가 있다. * 제2차 실험 · 실험이라는 용어로 각 유전형의 목적을 정확히 설명하고 매뉴얼에 따른 진행을 평가해 준다. - "환경적 특성" 실험에 사용하려는 의도는? * 현재까지 공개 결과를 <u>각 유전형별</u> 자문위원 통하여 <u>각 유전형</u> 검토를 받는 평가		
소 속	전 공	성 명
울산대학교 환경과학부	고 고 령	신 지 연 (신지연)
2021년 12월 12일		
울산쇠부리복원사업단 귀하		

2021 울산쇠부리복원사업 자문위원 의견서		
사 업 명	2021 울산 쇠부리 복원사업	
개최일시	2021 . 12 . 12	
자문내용	2021년 쇠부리 복원사업 결과 검토	
자 문 의 견		
1. 첨가제 사용을 재검토 하며, 2019년과 2020년, 2021년 제철용인 철강치 차이는 확인해, 첨가제 적용량 문제를 해결해야 한다. 2. 운영방식 가운데 순환을 생산하고, 배출되는 방식에 대한 재검토가 필요하다. 기존 가리이 방식은 리튬을 생산 방식에 기반한 있기 때문에 순환생산에 맞게 변경할 필요가 있다.		
자 문 위 원		
소 속	전 공	성 명
아주대학교 도구박물관	근근학	최영민 (원/서명)
2021년 12월 12일		
울산쇠부리복원사업단 귀하		

2021 울산쇠부리복원사업 자문위원 의견서		
사 업 명	울산 쇠부리 가습복원사업(제7차)	
개최일시	2021. 12. 12	
자문내용	7차 시험제사에 대한 평가, 향후제 등	
자 문 의 견		
1. 송풍량문제 : 분기가습(제7차 안테면 전동구2기습)의 사례에도 보듯이, 송풍량이 크면 그만큼 흡입은 속도가 빨라진다. 울산쇠부리 7차의 경우, 천정상강립 3시간만에 싹틔운 속탕하였는데, 이러한 송풍량의 적절성을 검토한 필요가 있다, 결국 7차도 저기에 노병이다수 되고, 공구명도 녹아 천정상디 목탄량을 다 넘겨 못하는 간접내용도 분강선외생상, 조영어려움 등등으로 이어졌다. 나면 현재의 송풍량은 적절하냐? 너무 다다하다. 금원소는 천정상 강립후 6시간정도 걸리게, 공풍으로 속지 않게 해이해 무리한 송풍은 하지 않는다. 2. 안생구등등 주온전공, 전염가 무속필요 : 이번 7차 시험에서 속탕(속탕구)문제, 천정상강립문제, 거북질 문제, 제각각 전공문제, 온도, 노병문제 등 각종이 필요하다. 3. 스프레이유동성 저하문제 : 이번 7차 시험에서 스프레이유동성이 매우 안좋았다. 첨가제로 스프레이사용하는데, 이것이 유동성에 영향을 주었거나, 2일이 계획 대비 많이 정어고인것인지 확인이 필요하다. 4. 온도대습제 : 1350°C - 1100°C사이 형성되겠다. 이온도는 리튬화합물에서 유사, 좀더 높게 형성되어야 하는것도 아닌지 검토가 필요하다.		
자 문 위 원		
소 속	전 공	성 명
국립중앙과학연구원	고고학	한 기 신 (2021.4명)
2021년 12월 12일		
울산쇠부리복원사업단 귀하		

4 판장쇠 분리실험 보고(2020년 6차 실험 1차 출탕)

1. 판장쇠란?

판장쇠는 제련과정에서 생산된 철괴(鐵塊) 및 이를 가공해 일정 크기와 모양으로 만든 철 소재를 말한다. 괴련철 생산의 경우, 가마 바닥에 생성된 잡쇠덩이를 다음 공정인 정련단야·단련단야를 거쳐 판상(板狀)·봉상(棒狀)의 철 소재로 만들며, 선철 생산의 경우에는 가마 내에 생성된 선철 쇳물을 판장쇠바탕에 흘려 부어 역시 일정한 크기의 판상(板狀) 철 소재로 만든다. 즉 전자는 괴련철 판장쇠, 후자는 선철 판장쇠라고 할 수 있다.

판장쇠라는 용어를 울산 달천지역 전통쇠부리사회에서 발굴해 낸 권병탁의 자료를 보면 다음과 같다.

【판장쇠란 전통시대의 쇳덩치이다. 학계에서는 일반적으로 이것을 철정(鐵錠), 방주형철봉(方柱形鐵棒) 또는 장방형철판(長方形鐵板)이라고 하고 있다. 여기서 굳이 『판장쇠』라고 한 것은 다음과 같은 이유 때문이다.

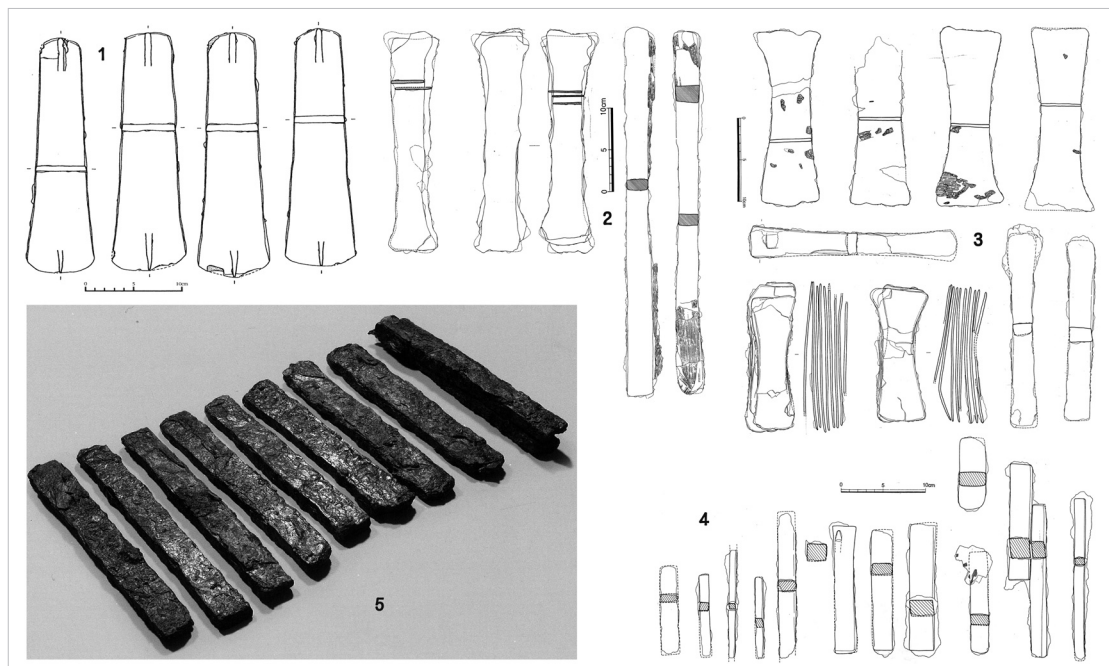
① 판장쇠란 순수 우리말이다. 전통사회에 있어서는 쇳점(冶鐵場)이나 유기점에서 원자재철로 써 왔었다. 어떤 의도한 그릇을 방짜하려고(달구어 두드려 만듦) 할 적에 가마(爐)에서 끓는 쇳물을 물판(熔型)에 부어서 굳히거나 강엿쇠를 여러 번 다루고 망치질하여 만든 두리납작한 작은 철판을 판장쇠 또는 무대가리라고 한다】(권병탁 2004, 551).

즉 판장쇠는 전통사회에서 원자재로 사용한 쇳덩치로, 괴련철 및 선철 제련과정에서 생산된 철 소재를 통칭한다. 괴련철을 소재로 사용하는 단조철기 제작과정(대장간) 및 선철을 소재로 사용하는 주조철기 제작과정(무질부리)에서 사용하는 원자재철을 말하는 것이다.

초기철기~삼국시대 분묘에서는 철 소재로 여겨지는 많은 철기유물이 출토되는데, 대표적인 기종이 판상철부(板狀鐵斧)·봉상철기(棒狀鐵器)·철정(鐵錠) 등이다. 판상철부는 장방형 또는 사다리꼴의 납작한 철판 한쪽에 날이 있는 도끼로, 기원전 2세기 무렵부터 기원후 4세기까지 자귀나 도끼와 같은 목공구로 사용되다가 점차 무덤의 부장품으로 중시되었다. 또한 철기의 중간 소재 및 교환 매체, 부와 권력을 상징하는 재화의 기능도 하였다. 철정은 납작하게 두드려 만든 쇳덩이로, 덩이쇠라고도 한다. 4세기경 판상철부가 날이 퇴화되어 철정으로 변화하였다. 무덤에 부장되는 위세품이기도 하지만, 판상철부와 마찬가지로 화폐의 기능 및 철기 제작을 위한 중간소재로 사용되었다고 보는 견해가 대부분이다. 판상철부와 함께 기원전 1세기~기원후 3세기 영남지역 무덤에서는 봉상철부가 출토된다. 봉상철부는 판상철부와 유사한 형태를 가지지만 판상철부보다 길고 날이 끝과 같이 좁은 것이 특징이며, 4세기 이후 영남지역 및 충북·강원 지역에서 출토된 날이 없는 장방형의 철괴(鐵塊)를 봉상철기(棒狀鐵器)라고도 한다. 영남지역 봉상철부를 낙랑에 공급하기 위해 특별히 제작한 물품으로 보기

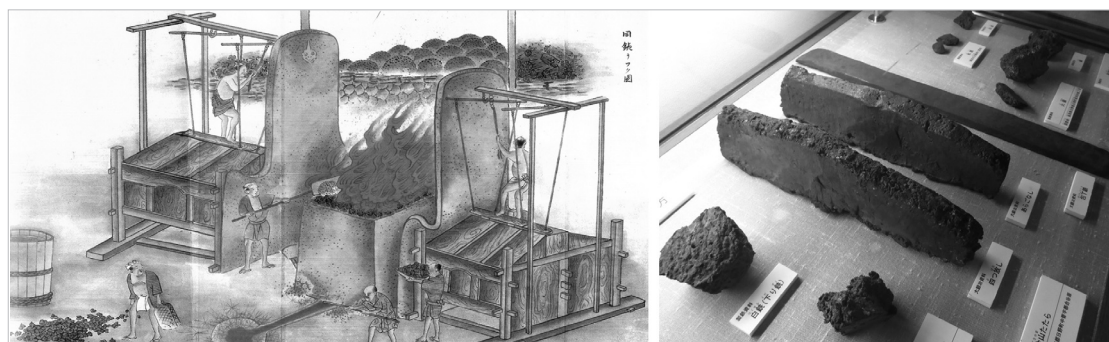
도 하고, 2세기 중엽부터 3세기 전엽의 일정 시점에 판상철부가 없어지고, 이를 봉상철부가 대체하여 일시적으로 사용된 것으로 보기도 한다(이재현 2015).

이와 같이 판상철부·봉상철기·철정 등 고대 단조철기의 소재로 사용된 철기들은 통칭하여 철정(鐵錠)이라 할 수 있으며, 이를 우리말로 하면 바로 판장쇠가 된다. 단조철기 및 주조철기를 철 소재로 유통 및 사용하기 위해서는 일정한 크기로 가공할 필요가 있는데, 철정은 철기 제작을 위한 철 소재로 유통되기에 가장 적합한 형태를 띠고 있다(성정용·성수일 2012, 657).



〈그림 1〉 고대 분묘 출토 철 소재 각종
(1-경산 임당동 A1-74호, 2-경주 황남대총 남분, 3-부산 복천동 54호, 4. 합천 옥전 M3호, 5. 충주 탄금대토성 수조유구)

위에서 언급한 철기들은 모두 단조철기 소재이고, 고대 주조로 제작된 철 소재는 아직 확인되지 않았다. 다만 본 실험연구의 대상인 조선후기 울산쇠부리의 판장쇠와 북한 자강도 풍청리 일건쇠부리의 선철은 제련단계에서 생산된 주조철기 제작용 철 소재이다.



〈그림 2〉 타타라제철 즈쿠오시의 선철 출탕(좌-繪卷『先大津阿川村山砂鉄洗取之図』) 및 대단야를 통해 생산된 판장쇠(우-츠코야마타타라 출토 호쵸우테츠, 와코박물관)

한편 일본의 근세 타타라제철은 선철 생산을 목적으로 하는 즈쿠오시(ずくおし-鋳押)와 강 생산을 목적으로 하는 게라오시(けらおし-鋳押)가 있다. 즈쿠오시의 경우, 노 내에서 생성된 선철은 탕장(湯場)이라고 불리는 직경 1m, 깊이 30~60cm의 웅덩이(窪)로 흘러보내져 냉각시키며, 이 외 정형화된 형틀(湯溜まり)에 선철을 직접 흘러보내는 방식도 있다. 게라오시의 경우에는 노 내에 생성된 선철·부게라(歩鋳) 등을 일정 크기로 파쇄한 후 사게바(下げ場)에서 가열 및 단타해 불순물을 제거하고 탈탄해 괴상(塊狀)의 사게테츠(下げ鐵)를 생산하고, 바로 옆의 혼바(本場)에서 재차 가열·단타해 길이 60cm, 너비 11cm, 두께 1cm 정도의 호쵸우테츠(庖丁鐵)라는 소재를 생산하게 된다(角田德幸 2014). 즉 탕장(湯場) 혹은 형틀(湯溜まり)에 흘러 보낸 쇳물은 굳어서 선철 판장쇠가 되고, 대단야 공정을 거쳐 제작된 호쵸우테츠는 괴련강 소재의 판장쇠인 것이다.

2. 판장쇠의 생산

위에서 본 바와 같이 판장쇠는 괴련철 및 선철로 제작된 판상 혹은 봉상의 철 소재를 통칭하는 것으로, 본 실험연구의 목적인 조선 후기 울산쇠부리와 관련해서는 선철 판장쇠를 생산하는 것이 목적이다. 따라서 본절에서는 쇳부리가마에서 생성된 쇳물을 판장쇠바탕에 흘러 부어 선철 판장쇠를 생산하는 방법에 대해 살펴보고자 한다. 앞에서 본 바와 같이 울산쇠부리 선철 생산에서는 쇳물을 미리 준비한 물판(熔型), 즉 판장쇠바탕에 흘러 들어가게 해 판장쇠를 생산한다. 이와 관련해 권병탁 자료에는 다음과 같은 내용이 있다.

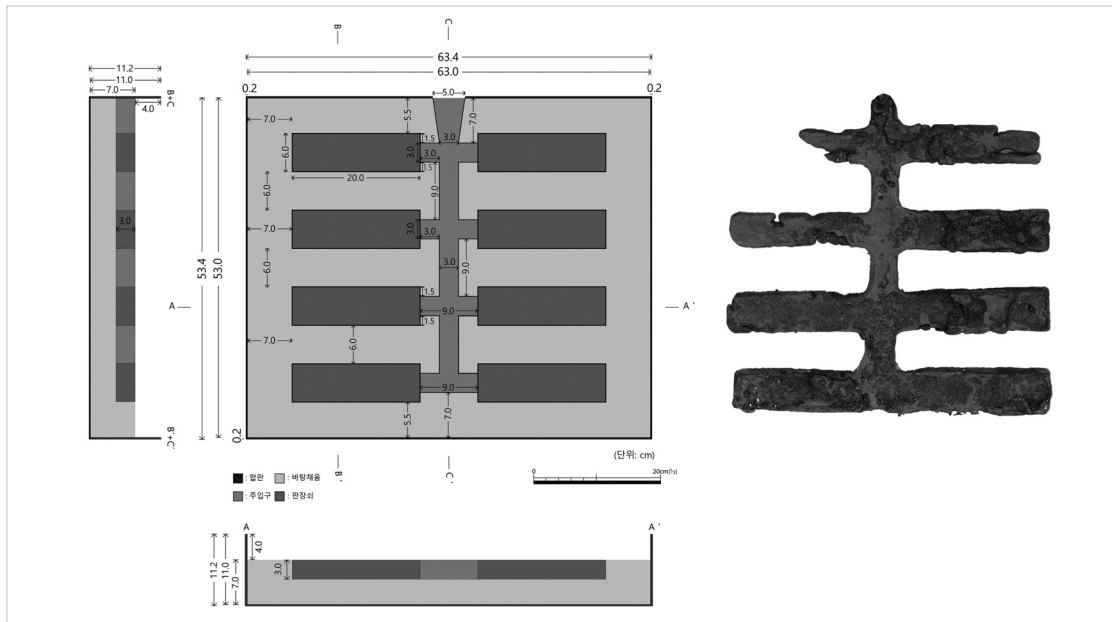
【점화한 지 7~8시간이 지나 강한 풀무바람을 받은 도가니안의 화염은 하늘을 찌른다. 이때 골편수는 토독의 외벽을 쇳망치로 가볍게 쳐 보면서 쇳물이 고인 정도를 확인한다. 한편 독수리는 초롱구멍 아랫땅바닥에 판장쇠 바탕자리를 좌우로 4날씩 8개를 깨끗하게 준비해 둔다. 가장 호조건일 때 점화한 지 8~9시간이 지나면 골편수는 쇳창으로 초롱구멍을 뚫는다. 금빛 쇳물은 골을 따라 흘러내려 첫째 바탕에 고이고 이어서 둘째, 셋째, 차례로 고여서 강엿처럼 굳어진다. 굳어지기 전에 독수리는 감나무 고무래로 쇳물 위에 뜨는 찌꺼기를 조심성 있게 끌어낸다. 쇳물이 멎으면 골편수는 초롱구멍을 점흙으로 다시 막는다】(권병탁 2004, 578~579).

【작업조건에 따라 동일하지 않지만 보통 일주야에 80근짜리 판장쇠(중방철)를 1회에 평균 3개씩만 얻으면 그 작업은 성공적이라고 한다. 이러한 작업은 여타조건만 허락되면 불을 끄지 않고 며칠이고 계속하는 것이지만 단위작업에서 사흘간을 계속 할 수 있으면 전주는 큰 이익을 얻는다고 한다】(권병탁 2004, 579).

한편 권병탁이 제시한 쇠부리점터 가상도와 쇠부리가마 구조도에 판장쇠바탕이 표현되어 있다. 〈그림 3〉의 위에는 좌우 6매씩 모두 12매로 이루어진 판장쇠바탕으로 표현되어 있고, 아래에는 좌우 3매씩 6매로 된 판장쇠바탕이 묘사되어 있다. 반면 위에서 본 바와 같이 일부 기술에서는 좌우 4매씩 8매로 이루어져 있다고도 하였다. 즉 한번 출탕으로 좌우 3~6매, 모두 6~12매의 판장쇠가 생산되었던 것으로 추정할 수 있다. 아쉬운 점은 판장쇠의 정확한 크기나 판장쇠바탕 제작방법에 대해서는 알려진 바가 없다는 것이다. 하지만 고대 철기유물 자료나 일본 타타라제철 관련자료, 권병탁 자료 등을 종합한다면, 울산쇠부리에서 생산된 판장쇠는 다소 얇은 판상이고 유통시기에 적합한 무게를 가지며, 용해로에 장입하기 위해 분할하기에 적당한 두께였던 것으로 이해할 수 있다.



우리 울산쇠부리복원사업단에서는 2019년 제5차 실험부터 판장쇠바탕을 제작해 실험에 사용하였다. 2019년 제5차에서는 1회, 2020년 제6차에서는 3회, 이번 2021년 제7차에서는 4회에 걸쳐 판장쇠바탕에 쇳물을 출탕하였다. 냉각된 판장쇠는 바탕에서 분리해 전시·보관 중인데, 탕도에 남아 같이 냉각된 선철을 포함해 여러 매의 판장쇠가 서로 연결된 상태이다. 이러한 판장쇠가 서로 잘 분리될 수 있는지 확인이 필요했으며, 이에 우리 사업단에서는 2021년 6월 27일 9시 30분에서 11시 10분까지 판장쇠 분리실험을 진행하였다. 이에 그 결과를 간략히 보고한다.



〈그림 4〉 2020년 제6차 실험의 판장식바탕 설계도(좌)와 1차 출탕 판장식(우)

이번 판장식 분리실험에는 2020년 제6차 실험에서 생산된 판장식을 대상으로 하였다. 제6차 실험 1차 출탕 판장식은 2020년 10월 10일 14시 39분에 출탕되었으며, 모두 8매로 구성되어 있다. 출탕구와 먼 쪽 6매의 판장식은 쇳물이 바탕에 거의 채워져 굳었으며, 앞쪽 2매는 1/2 정도 채워진 상태였다. 전체 길이는 46cm, 너비는 35cm이며, 중량은 10.5kg이다.

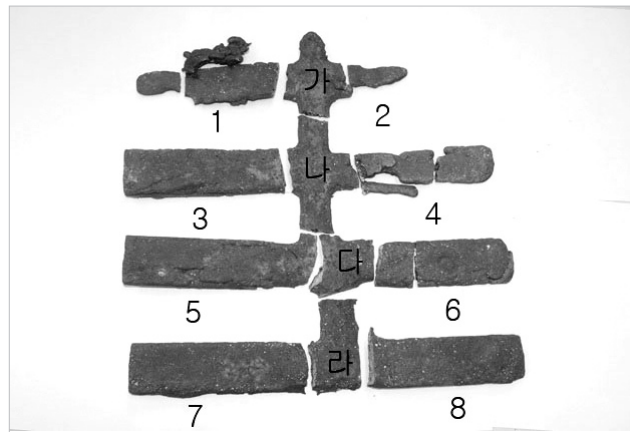


〈그림 5〉 판장식 분리실험 광경 ①



〈그림 6〉 판장식 분리실험 광경 ②

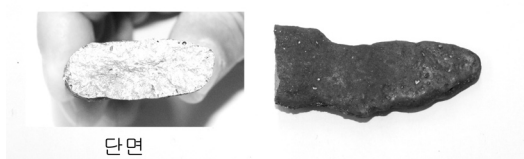
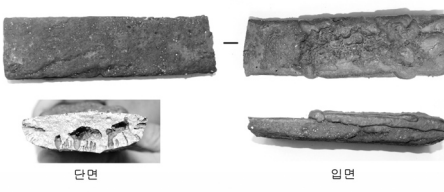
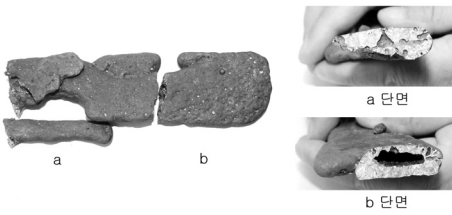
판장쇠 분리실험은 쇠모루 위에 판장쇠를 올려놓은 후 출탕 시 추가로 유출되어 덧붙여진 선철을 우선 분리하였다. 이후 각 판장쇠에 개별 번호를 부여한 다음 분리할 부위에 정을 대고 망치로 타격을 가하였다. 몇 번의 망치질로 분리하고자 하는 부위는 쉽게 분리가 되었고, 일부 판장쇠 내부에 형성된 수축공에 의해 취성이 발생한 부분은 먼저 분리되기도 하였다. 대체적으로 원하는 부분이 분리되었으나 <그림 7>에서 보는 바와 같이 정확한 선을 따라 분리되지 않은 점과 일부 판장쇠 자체가 깨어진 점은 향후 개선되어야 할 것이다.

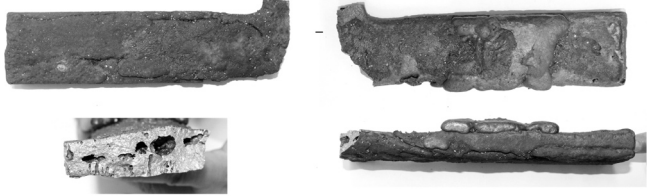
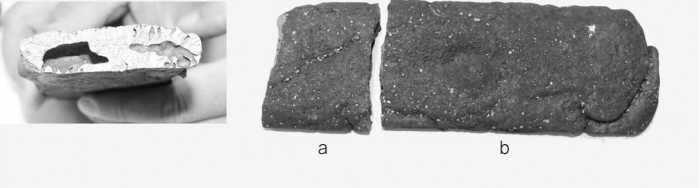
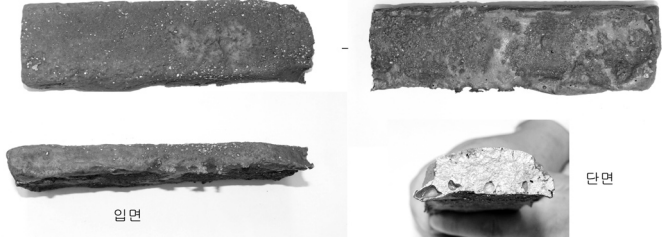
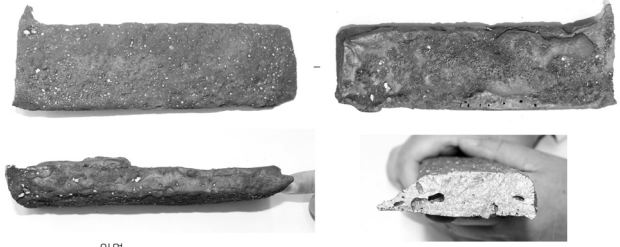
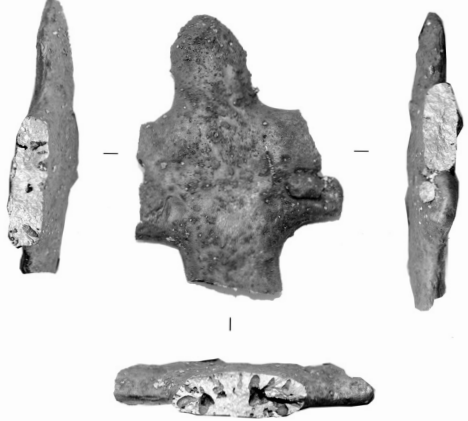


<그림 7> 판장쇠 분리 후 모습

각 부위별 특징은 다음 표로 정리하였다.

<표 1> 판장쇠 각 부위별 특징

구분	특징	사 진
판장쇠 1	2개체로 분리, 내면에 수축공 확인됨. 중량 0.8kg a:길이 13.0cm, 너비 5.5cm, 두께 1.4cm, b:길이 6.04cm, 너비 3.0cm, 두께 1.2cm	
판장쇠 2	수축공 확인되지 않음. 길이 8.0cm, 너비 3.3cm, 두께 1.3cm, 중량 0.1kg	
판장쇠 3	나중에 출탕된 선철이 상부에 뚜렷하게 덮여있음. 수축공 확인됨. 중량 1.8kg 길이 20.0cm, 너비 5.5cm, 두께 1.9~2.8cm	
판장쇠 4	4개체로 분리, 수축공 확인됨. 중량 0.5kg a: 길이 10cm, 너비 5.0cm, 두께 1.2cm b: 길이 7.9cm, 너비 6.2cm, 두께 1.2cm	

구분	특징	사 진
판장쇠 5	수축공 확인. 길이 20.5cm, 너비 5.8cm, 두께 1.9~2.5cm 중량 1.65kg	 단면 입면
판장쇠 6	2개체로 분리, 수축공 확인 중량 0.75kg a : 길이 4.2cm, 너비 5.7cm, 두께 1.5cm b : 길이 12.5cm, 너비 5.9cm, 두께 1.6cm	 a b
판장쇠 7	길이 20.5cm, 너비 6.0cm, 두께 2.0cm 중량 1.4kg	 입면 단면
판장쇠 8	길이 19.0cm, 너비 5.7cm, 두께 2.0cm 중량 1.25kg	 입면 단면
출탕구 '가'	길이 13.0cm, 너비 8.8cm, 두께 1.5cm, 중량 0.85kg	

구분	특징	사 진
출탕구 '나'	길이 15.2cm, 너비 8.8cm, 두께 1.6cm, 중량 0.7kg	
출탕구 '다'	길이 7.2cm, 너비 5.6cm, 두께 1.7cm, 중량 0.4kg	
출탕구 '라'	길이 10.5cm, 너비 5.6cm, 두께 1.7cm, 중량 0.6kg	

4. 약간의 검토

2020년 제6차 실험에서는 2.83kg짜리 6매로 이루어진 판장쇠바탕 2본과 2.83kg짜리 8매로 이루어진 판장쇠바탕 1본을 제작하는 것으로 설계하였으며, 개별 판장쇠의 크기는 길이 20cm, 너비 6cm, 높이 3cm가 되도록 하였다【 $20\text{cm} \times 6\text{cm} \times 3\text{cm} \times 7.87(\text{비중}) = 2.83\text{kg}$ 】. 두께 2mm의 철판으로 사방과 바닥을 짜고 주물사를 이용해 제작하였으며, 바닥에 공기구멍을 조성해 쇠물 주입 시의 가스가 빠져나갈 수 있도록 하였다. 이렇게 제작된 판장쇠바탕 3본에 쇠물을 모두 주입한다면 생산할 수 있는 선철의 양은 56.60kg이 된다($16.98\text{kg} + 16.98\text{kg} + 22.64\text{kg} = 56.60\text{kg}$). 1회 출탕에서 80근(약 48kg)을 생산한다는 권병탁 자료와는 다소 차이가 있지만, 가마의 크기가 축소된 점 등을 고려한 것이다.

판장쇠바탕 제작에 있어 가장 주안점을 둔 것은 판장쇠의 두께였는데, 판장쇠가 너무 두터우면 분리 및 분할이 어려울 수 있고, 용해로에 장입해 재용해할 때 용융이 순조롭지 않을 수 있기 때문이다. 이에 두께 3cm가 적절하다는 여러 의견에 따라 판장쇠바탕의 판장쇠 틀 깊이를 3cm로 하였다.

실험 대상으로 한 판장쇠는 분리 전 전체 길이 46cm, 너비 35cm, 중량 10.5kg이다. 모루 위에 분리할 부분을 대고 정과 망치를 이용해 내려치자 예상했던 대로 쉽게 분리가 되었다. 오랜 경험을 가진 장인(이은철 연구원)과 실제 쇠를 다루어 본 경험이 별로 없는 비장인(김권일 연구원)의 작업에도 결과는 마찬가지였다. 다만 <그림 7>에서 보듯 대부분의 판장쇠는 탕도 부분과 분리가 되었으나, 4번과 6번은 내려칠 때의 충격으로 인해 판장쇠 자체에서도 균열이 가 서로 분리되었다. 1·3·4·5·6번의 단면 사진을 보면 내부에 크고 작은 빈 공간이 형성되어 있다. 이는 출탕 및 냉각 시 가스가 외부로 충분히 방출되지 못했기 때문인데, 이러한 기공으로 인해 4번과 6번은 충격을 이기지 못하고 깨어진 것으로 판단된다.

판장쇠 내부에 기공이 형성되는 원인에 대해서는 충분한 검토가 필요한데, 우리 사업단에서는 이를 두 가지로 유추하였다. 첫째는 모래와 주물사를 사용해 판장쇠바탕을 제작하였는데, 계획과 달리 미리 제작되지 못해 실험 당일에서야 제작되었기 때문이다. 그 과정에서 모래와 주물사에 물을 섞었으며 이를 건조할 충분한 시간이 부족했다. 즉 판장쇠바탕이 충분히 건조되지 않고 수분이 많이 남아 있어 용선 내 가스가 제대로 방출되지 못했던 것이다. 둘째는 형성된 선철 쇠물 자체에 다량의 가스가 발생되었고, 탕도를 통해 판장쇠 틀로 주입되는 과정에서 쇠물의 온도가 너무 낮고 유동성이 좋지 않아 일률적이고 신속한 속도로 주입되지 못했기 때문이 아닌가 생각된다.

이상과 같이 2020년 제6차 실험에서 생산된 선철 판장쇠를 탕도 부분과 분리하는 실험을 실시하였다. 정과 망치를 이용한 타격에서 원활하게 분리가 되었으며, 이에 판장쇠 두께를 3cm로 설정한 것은 적절한 것으로 판단된다. 하지만 판장쇠바탕의 건조가 충분하지 않았고 쇠물의 온도 및 유동성이 부족해 판장쇠 내부에 기공이 다수 형성되었다. 이로 인해 분리 시 판장쇠 자체가 깨어지는 현상이 발생하였다. 물론 깨어진 부분도 엄연한 선철이므로 다음 공정, 즉 용해주조 공정의 소재로 사용될 수 있지만 유통을 고려한 안정적 판장쇠 생산을 위해서는 이에 대한 해결책이 필요하다. 먼저 탕도에서의 원활한 분리와 용해주조 공정에서의 사용 편의를 위해 탕도와 판장쇠 틀, 그리고 판장쇠 틀 중앙

에 삼각형으로 흠을 내어 분리 타격 시 정확한 위치에서 분리되도록 해야 할 필요가 있으며¹⁾, 쇳물의 온도 유지와 유동성 확보를 위한 대책이 필요한 것으로 검토되었다. 후자에 대해서는 금속분석 결과 등 다양한 자료의 추가검토가 필요하다.

이번 판장쇠 분리실험은 국내 최초로 이루어진 실험이라는데 큰 의의가 있다고 생각된다. 일부 예상치 못한 실수가 있기는 하였지만 그 원인을 찾아 내 하나하나 개선해 나가는 것이 본 실험연구의 목적이라는 점을 감안하면 의미있는 실험이었다고 할 수 있다. 우리 사업단에서는 지속적인 판장쇠 생산 실험과 함께 추가적인 판장쇠 분리실험도 진행하여 울산쇠부리 기술복원에 더 가까이 다가서도록 노력할 것이라는 다짐으로 짧은 보고를 마치고자 한다.

1) 판장쇠가 냉각된 후 분리를 원활하게 하기 위해 탕도와 판장쇠 틀 사이 및 판장쇠 틀 중앙 아래에 삼각형 흠을 내는 것은 이번 2021년 제7차 실험에 적용하였다.

5 울산쇠부리복원실험의 성과와 과제

김권일 · 강성귀(울산쇠부리복원사업단)

I. 울산쇠부리기술

울산쇠부리기술은 삼한시대부터 조선후기까지 울산 달천광산 주변지역에서 행하여지던 전통 제철 기술로, 달천광산 산출 철광석 및 토철의 채광에서부터 이를 쇠부리가마에 목탄과 함께 장입해 풀무질을 하여 철 소재인 판장쇠를 생산하고, 또 이 판장쇠를 이용해 대장간에서 낫·호미 등의 단조철기와 무쇠술·쟁기 등의 주조철기를 제작하는 기술을 통칭하는 말이다. 특히 조선후기 구충당 이의립 및 그 후손들에 의해 개발·전승된 토철제련법(土鐵製鍊法)은 대형 쇠부리가마에서 토철을 녹여 다량의 선철 쇳물을 생산한 것으로 알려져 있으며, 국내에서 유사한 사례를 찾기 힘든 독창적인 기술문화로 알려져 있다.¹⁾

1960년대 권병탁에 의한 경제사학적 민속·지표조사 이후 고고학 조사 및 이를 토대로 한 소수의 연구가 시도되다가, 2016년도 울산쇠부리축제 추진위원회 산하(2017년도부터는 울산북구문화원 산하로 이관)에 울산쇠부리복원사업단이 결성되어 울산쇠부리기술 복원연구를 위한 제철복원실험이 연차적으로 실시되고, 그 결과는 매년 보고서로 간행되어 오고 있다(이남규 외 2016·2018a, 2018b·2019·2021).

울산쇠부리기술은 민속학·고고학 조사연구를 시작으로 차츰 그 원형(原形)에 다가가고 있으며, 특히 문헌·민속·고고·금속분석·장인(匠人)의 노하우 등 관련분야가 망라된 제철복원실험은 가마의 구조, 원료와 연료, 송풍 및 온도, 생산품과 파생품 등에 대한 구체적인 자료를 확보·검증하는데 결정적 역할을 하고 있다.

본고에서는 2016년도부터 2021년까지 총 7차례에 걸쳐 실시된 울산쇠부리 복원실험에 대해 정리하고, 지금까지의 성과와 앞으로의 과제에 대해 검토하고자 한다.

1) 울산쇠부리기술과 관련된 학술적 사항은 그간의 실험보고서에 개략적인 내용을 수록하였고, 참고문헌을 통해 나타내었으므로 본고에서는 따로 기술하지 않는다.

II. 울산쇠부리복원실험 현황

울산쇠부리복원실험은 울산쇠부리축제 기간에 축제의 일환으로 진행되고 있으며, 2016년 5월 제1차 실험을 시작으로, 2017년도에 2회, 2018~2021년도 각 1회 등 모두 7차에 걸쳐 실시되었다.

1. 제1차 실험

2016년 5월 13일부터 15일까지 울산쇠부리축제 기간 중 울산 북구청에서 실시되었다. 고대 원통형 제련로의 복원을 통한 괴련철 생산을 목적으로 하였다. 당시 조선후기 울산쇠부리에 대해서는 연구가 거의 없었고, 선철 쇳물을 생산하는 실험도 전무한 상태여서 곧바로 조선후기 울산쇠부리기술을 실험하는 것은 불가능하여 울산에 포함한 고대 영남지역 제철기술을 복원하고자 실험을 실시하였다.

실험로의 형태는 밀양 사촌제철유적 1호 제련로²⁾를 모델로 설정하였다. 규모는 내경 80cm, 높이 200cm이며, 상단 60cm는 안으로 좁아지게 하였다. 노의 하부에는 20cm 정도 크기의 할석을 3단 쌓았고, 노 벽체는 25×17×15cm의 점토블록을 쌓았으며, 그 내·외면을 점토로 마감하였다. 풀무는 4인용 발풀무를 사용하였으며, 송풍관은 도제로 직관 2개는 풀무와 노를 연결하였고 곡관 1개는 노 내부에 관입되도록 설치하였다. 배재구는 50×30cm의 장방형으로 구축하였다. 광석은 한국연구재단에서 지원받은 강원도 양양군 철산마을산으로, 배소 후 2~5cm 크기로 선광하였고 첨가제³⁾로는 패각과 황토를 사용하였다.

실험 중 광석은 460kg, 목탄 760kg(만장입 277kg, 광석장입 개시 후 485kg), 패각 70kg, 황토 47kg을 장입하였으며, 비율은 1:1.65(0.6/1.05):0.152:0.102이다. 온도⁴⁾는 상부가 1,100℃ 전후로 낮았고, 배재구측은 1,239℃, 송풍관측은 1,400℃의 온도를 유지하다가 실험 중·후반부터 하강하였다. 광석장입 이후 평균온도는 1,197℃이다.

실험 결과, 노 내부에 형성된 생산품은 송풍관 쪽으로 치우쳐, 노 바닥에서 약 50cm 높이에 괴련철괴가 형성되었다. 괴련철괴의 바닥은 노의 바닥 형태를 따라 둥글며, 철괴 하부에는 고탄소가 형성되었고 상부 및 중부에는 저탄소 철괴가 형성되었다. 총 생산량은 69.7kg이다. 슬래그는 유동성 좋은 슬래그 315kg이 배출되었다.

2) 원형의 노와 타원형의 배재구로 구성되어 있으며, 노는 외경 137cm, 깊이 63cm, 내경 85cm 크기로 2~3단 굴착하였다. 하단은 방습시설을 설치하였고, 상단 가장자리에는 20cm 크기의 할석이 남아있었다. 오랜기간 결락 등의 훼손과 내면에 미장하는 점토두께를 감안하여 본 실험에서는 내경 80cm로 상정하여 노를 설계하였다.

3) 철재의 형성과 배출을 원활하게 하기 위해 패각이나 황토 등 조제제를 첨가하였다.

4) 송풍관 상부의 좌측과 우측 각 1개, 송풍관 하부와 배재구 하부 각 1개씩 모두 4개의 온도센서를 설치하였다.

2. 제2차 실험

2017년 5월 12일부터 14일까지 축제 기간 중 울산 북구청에서 진행하였다. 1차 실험과 마찬가지로 고대 원통형로 복원을 통한 괴련철 생산을 목적으로 하였다. 노의 구조, 장입물 등 1차 실험과 동일한 조건하에서 실험을 진행하였다. 실험 중 광석은 425kg, 목탄 632.5kg(만장입 250kg, 광석장입 후 382.5kg), 패각 52kg, 황토 39kg을 장입하였으며, 비율은 1:1.49(0.59/0.9):0.12:0.09이다. 온도⁵⁾는 송풍관 상부가 1,100℃ 전후로 가장 낮았고, 송풍관측은 1,300℃~1,500℃ 사이의 고온, 배재구측은 1,200℃ 중반대를 유지하다가 실험 중·후반부터 하강하였다. 광석장입 이후 평균온도는 1,215℃이다.

실험 결과, 노 내부에 형성된 생성물은 상면이 평탄하고 배재구 쪽으로 경사가 진다. 상부는 판상·스폰지상의 철괴 혼합물, 하부는 박편형·철괴·스펀지형·알갱이형·기포형 등 다양한 형태의 저탄소 환원철과 철재, 복합산화물 등의 혼합물로 형성되었으며, 생산된 철은 모두 113.15kg이다. 슬래그는 유동성이 양호한 상태에서 끈적이는 상태로 점차 나빠졌으며, 배출량은 168.9kg이다.

3. 제3차 실험

문화관광체육부의 ‘2017 문화의 달’ 행사 일환으로 2017년 10월 20일부터 22일까지 울산 북구청에서 실험을 진행하였다. 3차 실험은 1·2차 실험과 달리 달천광산 산출 토철의 선철 생산 가능성을 타진하기 위한 예비실험의 목적으로 실시되었다. 따라서 토철과 유사한 형태의 분광을 괴광과 함께 사용해 선철 쇳물을 생산하는 것을 목적으로 하였다. 광석은 강원도 정선군 신예미광산 산출품으로, 3cm 내외의 괴광과 1cm 이하의 분광을 선별하였다. 분광은 황토·패각과 혼용하여 달걀크기의 펠릿으로 제작한 후 배소를 진행하였고, 3~4cm 크기로 파쇄하여 괴광과 혼합하여 장입하였다. 실험 중 광석은 170kg, 목탄 590kg(만장입 250kg, 광석장입 후 340kg), 패각 17kg, 황토 21.19kg을 장입하였으며, 비율은 1:3.47(1.47/2.0):0.1:0.125이다. 온도⁶⁾는 광석 장입 이후 평균 1,224℃로 안정적이었으나 송풍관 좌우측의 온도가 고르지 않았다. 송풍관 우측의 온도는 1,119℃, 좌측의 온도는 1,280℃로, 이들의 온도 차이는 161℃이다.

실험 결과, 모두 4회에 걸쳐 노 밖으로 선철이 유출되었고, 노 내 생산품은 송풍관 쪽으로 치우쳐 바닥에서 35cm 높이에 철괴가 형성되었다. 송풍관 오른쪽은 녹지 않은 광석과 펠릿이 그대로 남아 있기도 하였다. 노 내부 생산품은 스펀지 상태의 괴련철, 구슬형태의 선철, 다량의 환원철과 등이 확인되었다. 유출된 선철 12.75kg과 노 내 생산품 57.8kg 등 모두 70.55kg의 철이 생산되었다. 슬래그는 유동성이 좋지 않아 엇가락처럼 찌뚱거렸고, 선철 출탕 시 강제로 배출되었다. 배출된 슬래그 양은 33.2kg이다.

5) 송풍관 상부, 송풍관 우측, 배재구 우측에 각 1개의 온도센서를 설치하였다.

6) 송풍관 좌·우측과 송풍관 상부, 배재구 우측에 각 1개씩 모두 4개의 온도센서를 설치하여 측정하였다

4. 제4차 실험

2018년 5월 11일부터 13일까지 축제기간 중 울산 북구청에서 진행하였다. 4차 실험 역시 조선후기 달천광산 산출의 토철을 제련해 선철을 생산할 수 있는지 알아보기 위한 예비실험 성격으로 진행되었다. 이에 가마의 구조를 원통형에서 울산쇠부리가마와 유사한 방형으로 변경하였다.⁷⁾ 가마의 한 변은 80cm이며, 높이는 3차보다 20cm 높여 220cm로 축조하였다. 앞창에는 10×8cm 크기의 초롱구멍과 7cm 우측위에 직경 7cm의 잡쇠구멍을 새롭게 설치하였다. 가마 앞에는 선철을 받을 수 있는 탕장(湯場)을 마련하였고, 4mm 이하 분광만 장입하였다. 첨가제는 CaO 성분이 다음 공정에 유리하다는 의견에 따라 소성패각만 사용하였다. 목탄은 초기 예열에 대탄, 광석을 장입하는 동안에는 소탄과 중탄을 사용하였다. 장입량은 광석 300kg, 목탄 1,230kg(만장입 610kg, 광석장입 동안 600kg, 광석장입 종료 후 20kg), 패각 60kg로, 비율은 1:4.1(2.03/2.0/0.67):0.2이다. 송풍은 기존 풀무 용적의 1.8배에 달하는 4인용 발풀무를 새롭게 제작하여 사용하였다. 온도⁸⁾는 실험 초반 다른 온도계에 비해 앞창 좌측과 송풍관 하부가 1,500℃ 전후로 고온이었으나, 광석은 노 내부의 평균온도가 1,200℃를 넘긴 안정적인 온도에서 장입하였다. 선철출탕은 평균온도 1,269℃보다 높은 1,310℃에서 진행하였다.

실험 결과, 선철은 가마 밖으로 1회 출탕되었고, 가마 내 형성물은 가마 바닥에서 약 37cm 높이까지 형성되었다. 최상층은 반환원괴와 노벽편, 소량의 철재, 상층과 하층은 반환원괴와 구상·판상·부정형·괴상·입상 등 다양한 형태의 소형선철, 최하층은 가마 밖으로 빠져나가지 못한 선철이 수평적으로 형성되었다. 생산품은 유출 선철 24kg과 가마 내 선철 37.9kg, 혼합철괴 126.4kg 등 모두 188.3kg이다. 슬래그는 선철이 출탕되기 전 유동성이 양호한 상태로 배출되었으며, 잡쇠구멍과 바닥의 높이차에 의해 계단상으로 쌓였다. 배출된 슬래그는 18.1kg이다.

5. 제5차 실험

2019년 5월 10일부터 12일까지 축제기간 중 울산 북구청에서 진행하였다. 제5차 실험부터는 3·4차 예비실험에서 확인한 바와 같이 분광을 원료로 사용한 선철 제련의 본격적인 실험으로 실시되었다. 따라서 새로이 쇳물을 받기 위한 판장쇠바탕을 제작해 쇳물을 유출시킬 수 있도록 하였다. 가마는 울산 쇠부리가마와 유사한 방형이며, 규모는 한 변 80cm, 높이는 4차보다 30cm 높은 250cm이다. 벽체는 가마 바닥에서 125cm 높이까지는 길이 30cm 정도의 석재를, 상부 125cm는 비소성 점토블록을 방 모양으로 쌓아올리고, 그 내면은 점토로 미장하였다. 풀무와 가마를 연결하는 바람구멍과 가마 내부에 설치되는 골구멍은 한 변 15cm인 방형의 도랑형태이며, 바람구멍은 목재, 골구멍은 석재를 이용하여 설치하였다. 골구멍은 가마 내부에 20° 각도로 경사지게 하여 송풍 방향은 초롱구멍 위를 향하도록 하였

7) 이하 울산쇠부리기술과 관련해 권병택이 수집한 전통 쇠부리용어를 사용하고자 한다.

8) 앞창 좌·우측의 상·하부, 송풍관 상·하부에 각 1개씩 모두 6개의 온도센서를 설치하여 측정하였다

다. 송풍은 발포무와 조업종료 전 기계송풍을 병행하였다. 앞창은 50×30cm 크기의 장방형으로 설치하였고, 바닥에는 직경 10cm의 초롱구멍과 그 5cm우측 위에 직경 7cm의 잡쇠구멍을 뚫었다. 앞창 앞에는 판장쇠 바탕⁹⁾을 놓아 유출되는 선철을 받아 냉각시키고자 하였다. 가마 양측으로는 석축을 쌓아 양측으로 갈수록 낮아지도록 하였는데, 석축의 길이는 우측 520cm, 좌측 460cm이다. 실험 중 장입량은 분광 380kg, 목탄 1,380kg(만장입 630kg, 광석장입 후 750kg), 폐각 60kg이고, 비율은 1:3.63(4.66/1.97):0.16이다. 온도¹⁰⁾는 골구멍의 좌측과 우측이 각각 1,100℃ 후반대, 1,200℃ 중반대로 고르지 않았으며, 상부는 1,273℃의 안정적인 온도를 보였다. 전체 평균온도는 1,219℃이다.

실험 결과, 모두 9회에 걸쳐 가마 밖으로 선철을 출탕시켰다. 1회는 잡쇠구멍을 통해 유출되었고, 2회는 판장쇠바탕¹¹⁾에 초롱구멍 가까운 쪽 일부가 채워질 정도로 출탕되었다. 이후에는 선철이 초롱구멍을 막아 출탕이 쉽지 않았으며, 슬래그와 혼합된 상태로 앞창 앞에 설치된 구덩이(湯場)에 받아 냉각시켰다. 선철은 총 83.95kg이 생산되었다.

6. 제6차 실험

2020년 10월 9일부터 11일까지 축제기간 중 실시되었는데, 실험 장소는 울산쇠부리축제 추진위원회의 결정에 따라 울산 북구청이 아닌 달천철장에 새로이 실험장을 조성하였다. 이전까지는 매년 5월에 축제가 개최되었으나 코로나19의 영향으로 인해 다소 연기되어 10월에 실시되었다. 5차와 마찬가지로 조선후기 토철제련법을 복원하기 위한 목적으로 실시되었으며, 쇠부리가마는 2019~2020년 발굴조사된 대안동 쇠부리가마¹²⁾를 모델로 해 새로이 축조하였다. 다만 대안동 쇠부리터는 상당히 대형의 가마인데, 실험단의 여건상 이를 절반으로 축소한 크기로 복원하여 실험을 실시하였다. 가마의 형태는 평면 장방형이며, 가마의 크기는 길이 60~90cm, 너비 40~70cm, 높이 250cm로 하였다. 가마의 벽체는 가장 외면에 30cm 정도 크기의 석재를, 내면에는 10×10×15cm 크기의 비소성 황토벽돌을 방모양으로 쌓고 그 내면에 황토로 미장하였다. 앞창은 60×40cm의 아치형으로 구축하였고, 직경 10cm의 초롱구멍을 15° 경사지게 뚫었으며, 10cm 우측 위에는 직경 7cm의 잡쇠구멍을 뚫었다. 앞창 앞에는 5차와 마찬가지로 판장쇠바탕¹³⁾을 놓았다. 석축은 가마 바닥에서 150cm 높이, 좌우측의 길이가 각각 565cm이다. 분광은 5차와 달리 배소를 진행하였고, 첨가제는 폐각과 함께 제5차 실험에서 배출된 슬래그를 파쇄하여 사용하였다. 목탄은 초기 예열에 대탄, 광석 장입이후에는 중탄과 소탄을 사용하였다.

9) 판장쇠바탕은 10kg짜리(24.7cm×8cm×6.6cm×7.87(비중)) 6매, 1회 출탕시 60kg의 판장쇠가 생산될 수 있도록 하였다. 외형틀은 철판으로 제작하였으며, 하부는 가스 배출을 위한 구멍을 뚫었다. 틀 내부에는 주물사를 넣어 판장쇠틀을 찍는 방법으로 1회 제작하였다.

10) 온도 센서는 골구멍 좌·우측의 상·하단에 각 1개, 앞창 우측 상·하단에 각 1개 모두 6개를 설치하였으나, 앞창측 하단은 두꺼운 가마 벽으로 인해 가마 내부의 온도를 정확히 측정할 수 없었고, 상부 온도는 고장으로 온도를 측정할 수 없었다.

11) 판장쇠바탕 틀을 철판으로 제작하다보니 출탕 이후 너무 무거워 이동이 자유롭지 못했다.

12) 대안동 쇠부리가마의 규모는 길이 204cm, 너비 168cm이며, 잔존 최대높이는 250cm 정도이다. 1/2 크기로 축소한다면 길이 102cm, 너비 84cm가 되어야 하지만 내벽의 침식을 감안하여 가마의 규모를 설계하였다.

13) 판장쇠바탕은 1회 출탕 시 22.64kg이 생산될 수 있도록 2.83kg짜리(20cm×6cm×3cm×7.87(비중)) 8매의 판장쇠가 대칭되도록 설계하였으며, 외형틀은 목재를 사용하였고, 가스 배출을 위해 바닥은 만들지 않았다. 외형틀 내부에 주물사를 넣어 판장쇠틀을 찍는 방법으로 3회에 걸쳐 제작하였다.

실험 중 장입물의 양은 분광 310kg, 목탄 1,150kg(만장입 390kg, 광석장입 개시 후 660kg, 분광장입 종료 후 100kg), 패각 30kg, 슬래그 22kg로 하였으며, 장입비율은 1:2.45(1.26/2.13/0.32):0.097:0.071이다. 송풍은 코로나19 방역체계에 따라 참석인원 제한으로 인해 기계송풍기를 사용하였다. 온도¹⁴⁾는 분광 장입이후 평균 1,191℃이며, 하부 온도는 평균 1,278℃로 안정적이었다. 중부는 상승과 하강을 반복하면서 평균 1,228℃를 기록하였고, 상부는 실험 내 1,000℃ 내외의 낮은 온도를 기록하였다.

실험 결과, 선철은 4회에 걸쳐 가마 밖으로 출탕시켰다. 1~3회는 판장쇠바탕에 받아 냉각시켰는데, 1회는 판장쇠 7매, 2회는 판장쇠 2매, 3회는 판장쇠 8매를 모두 채울 정도로 선철이 출탕되었고, 4회는 탕장에 받아 냉각시켰다. 유출된 선철은 총 72.25kg이다. 슬래그는 선철이 출탕되기 전 용선 상부에 형성되어 우선 제거해 주었다.

7. 제7차 실험

역시 코로나19의 영향이 이어졌다. 2021년 10월 22일부터 24일까지 축제기간 중 달천철장에서 실험을 진행하였다. 5·6차 실험에서 쇳물을 판장쇠바탕에 출탕시켜 판장쇠를 생산한 바 있으나 이를 더욱 고도화시키기 위한 목적으로 실시되었다. 가마는 제6차 실험에서 사용한 것을 보수하여 재활용하였다. 판장쇠바탕¹⁵⁾은 6차 실험 때보다 1회 출탕량을 줄이고 4회 받아 냉각시키고자 하였다. 첨가제는 6차 실험에서 배출된 슬래그를 1~2cm 크기로 파쇄하여 사용하였다. 실험 중 분광은 300kg, 목탄 1,050kg(만장입 430kg, 광석장입 개시 후 600kg, 분광장입 종료 후 20kg), 슬래그 28kg을 장입하였고, 비율은 1:3.5(1.43/2.0/0.067):0.093이다. 온도¹⁶⁾는 분광장입 이후 평균 1,190℃이다. 하부는 1,287℃로 안정적이었으며, 중부는 서서히 상승하여 종료시점에 1,354℃와 1,259℃를 기록하였다. 상부는 줄곧 1,000℃ 정도의 낮은 온도를 기록하였다.

실험 결과, 선철은 4회에 걸쳐 출탕시켜 판장쇠바탕에 받았는데, 1회와 2회는 판장쇠 6매를 모두 채웠고, 3회는 5와 1/2매, 4회는 4매를 채웠다. 유출된 선철은 총 47.85kg이다. 가마 내부에는 바닥 중앙부와 골구멍 하부에 잔존하던 선철괴가 확인되었다. 생산된 선철의 총량은 84.25kg으로, 장입량 대비 회수율은 28.08%이고 광석의 함철량¹⁷⁾ 대비 회수율은 62.1%이다. 슬래그는 유동성이 부족하였으며, 선철이 출탕되지 않는 시간에 지속적으로 배출되었다. 배출된 슬래그의 양은 총 64.75kg이다.

14) 온도는 높이에 따라 상·중·하로 구분하여 6개의 온도센서를 설치하였다. 상부는 바닥에서 150cm, 중부는 100cm, 하부는 50cm 높이며, 상부는 앞창과 골구멍 상부, 중부는 골구멍 좌측과 우측, 하부는 앞창 좌측과 우측이다.

15) 판장쇠바탕은 1회 출탕 시 16.98kg의 판장쇠가 생산될 수 있도록 2.83kg짜리(20cm×6cm×3cm×7.87(비중)) 6매의 판장쇠 대칭되도록 설계하였으며, 목형 틀 내부에 주물사를 넣어 판장쇠틀을 찍는 방법으로 4회에 걸쳐 제작하였다.

16) 6차 실험 가마를 재활용하였기 때문에 온도센서의 위치 또한 6차 실험과 동일하다.

17) 분광 분석결과 함철량은 45.2%이다.

〈표 1〉 제1~7차 실험 비교표

실험명	1차	2차	3차	4차	5차	6차	7차	비 고
	2016.05.13~15	2017.05.12~14	2017.10.20~22	2018.05.11~13	2019.05.10~12	2020.10.9~11	2021.10.22~24	
가마 내경(㎝)	80	80	80	80	80	상부 50~70, 중부 70~90, 하부 40~60	6차와 동일	1~3차 평면 원형, 4차·5차 평면 방형, 6차·7차 동일·평면 방형형, 중부가 넓고 상·하부로 갈수록 좁아짐
가마 외경(㎝)	130	130	130	130	160	상부 90~110, 중부 150, 하부 150~170	6차와 동일	
가마 높이(㎝)	200	200	200	220	250	250	6차와 동일	노상(鋪床) 기준
광석 장입량(kg)	460	425	170	300	380	310	300	
목탄 장입량(kg)	760(277·483)	632.5(250·382.5)	590(250·340)	1,233(610·600·20)	1,380(630·750)	1,150(390·660·100)	1,050(430·600·20)	장입 총량(광석 장입 개시 전·후·종료 후)
황토 장입량(kg)	47	39	21.19	-	-	-	-	
폐타 장입량(kg)	70	52	17	60	60	30	-	
슬래그 장입량(kg)	-	-	-	-	-	22	28	
장입 비용	1/165/0.1/0.15	1/1.49/0.09/0.12	1/3.47/0.125/0.1	1/4.1/0.2	1/3.63/0.16	1/3.7/0.071/0.097	1/3.5/0.093	목탄 장입 총량 기준
광석/목탄/슬래그·황토/폐타	1/105/0.1/0.15	1/0.90/0.09/0.12	1/2.0/0.125/0.1	1/2.0/0.2	1/1.97/0.16	1/2.13/0.071/0.097	1/2.0/0.093	광석 장입 개시 후·광석 장입 종료 전
송풍 시간(분)	620	659	660	680	856	677	762	광석 장입 개시 후·조업 종료 전
광석 장입시간(분)	485	540	512	372	537	470	514	
평균 최저온도(℃)	1,126	1,049	1,142	1,192	1,165	1,121	1,156	광석 장입 개시 후 전체
평균 최고온도(℃)	1,277	1,307	1,329	1,316	1,267	1,266	1,252.6	광석 장입 개시 후 전체
평균 온도(℃)	1,197	1,215	1,224	1,289	1,219	1,191	1,190	광석 장입 후 안정온도부타의 평균
조업 개시	10:15	9:23	9:23	9:48	08:30	09:10	08:55	1~6차 정화 또는 송풍시작으로 조업 개시, 7차 목탄 장입 개시
송풍 개시	10:40	9:31	9:31	9:50	09:15	09:10	09:07	1~5차 발물무, 6~7차 기계 송풍
광석 장입 개시	12:00	10:50	11:40	13:51	11:06	11:10	11:46	
목탄 장입 개시	12:06	9:31	9:26	9:50	08:33	06:30	08:55	잔입부터 예열
슬래그 장입 개시	12:17	11:16	11:40	-	-	11:12	11:49	1~3차 황토 수차임
폐타 장입 개시	12:07	10:56	11:40	13:52	11:07	11:25	-	
철재 배출 시작	14:27	15:21	15:15	20:34	17:02	13:34	16:52	1차 출탕 후
선철 출탕 시작	-	-	15:15	20:38	17:02	14:39	15:10	
광석 장입 종료	20:05	19:50	20:12	20:03	20:03	19:00	20:20	
목탄 장입 종료	20:08	19:52	20:20	20:06	20:18	20:18	20:39	
슬래그 장입 종료	20:05	19:52	20:12	-	-	15:40	15:32	
폐타 장입 종료	20:05	19:52	20:12	20:04	19:03	18:42	-	
송풍 종료	21:00	20:30	20:31	21:10	23:31	20:27	21:49	
배재구 개방	2016.05.15./06.23	2017.05.14./06.30	2017.11.11	2018.05.13./06.16	23:43	익일 10:00	2021.12.12	조업 종료 후 노 내부 관찰 위한 개방
철재 배출량(kg)	315	168.9	33.2	18.1	100.4	131.15	69.25	
절 생산량(kg)	69.7	113.15	과관철, 산철(3.7) 반합원리	188.3(산철61.9, 혼합과126.4) [유출산철-24.0 / 노내 혼합철 -126.4, 노내 산철-37.9]	83.95	72.25	84.25	
철 회수율(%)	15.2	26.6	41.5	62.7(유출-8.0 / 산철-20.6) 49.0(산철만 포함)	22.09	23.3	28.08	
철 회수량	-	-	-	-	50.0	53.9	62.1	광석 품인(4차 41.95, 5차 43.94, 6차 43.2, 7차 45.2)
생산물의 함탄량(%)	0.01~1.64 13건 중 11건 0.01~0.316 2건 0.64, 1.64	0.014~0.192	유출산철 4.26/4.36 공정 산철	3.10~4.70 아공정배산철, 공정산철	3.85~4.50 공정산철	3.53~4.25 아공정배산철	3.9~4.4 배주철, 회주철	3차 선철 유출(1회·3회)
참고 사항	단아실험 병행	단아실험 병행						

Ⅲ. 울산쇠부리복원실험의 성과와 과제

앞에서 본 바와 같이 울산쇠부리복원실험은 2016년도 제1차 실험을 시작으로, 2017년도 제2차 및 제3차, 2018년도 제4차, 2019년도 제5차, 2020년도 제6차, 2021년도 제7차 등 모두 일곱 차례에 걸쳐 진행되었다. 각 실험의 목적을 중심으로 크게 구분해 보면, 제1·2차는 고대 원통형 제련로에서 단조철기 소재용 괴련철을 생산하는 것이었고, 제3차는 달천광산 토철과 유사한 형태의 분광 제련 가능성을 타진해 보기 위한 것이었다. 제4차는 가마의 평면형태를 울산쇠부리가마와 유사한 방향으로 변경하였고, 원료는 모두 분광만을 사용해 선철을 출탕시킬 수 있는지 확인하는 것을 목적으로 하였다. 제5차부터는 당시 막 발굴조사된 울산 대안동 쇠부리가마의 크기를 1/2로 축소해 장방형으로 축조하였고, 앞창 앞에 판장쇠바탕을 설치해 실제 판장쇠를 생산할 수 있도록 하였다.

이상과 같이 실험 목적상 제1·2차는 괴련철 생산, 제3·4차는 선철 생산의 예비실험, 제5~7차는 선철 생산으로 구분할 수 있다. 이에 본장에서는 크게 3그룹으로 분류해 각각의 성과 및 앞으로의 과제에 대해 간략히 살펴보고자 한다.

1. 괴련철 생산

제1·2차 실험에서는 고대 원통형 제련로의 구조를 복원해 단조철기 소재용 괴련철을 생산하는 것을 목표로 하였다. 울산에서는 고대 철 제련로가 발굴조사된 바 없기 때문에 인근의 밀양 사촌제철유적 1호 제련로를 모델로 그 구조를 복원하였다. 이에 내경 80cm, 높이 200cm의 위가 좁아지는 원통형 실험로를 축조하였으며, 당시까지의 연구성과를 바탕으로 조업매뉴얼을 수립하였다. 원료는 발굴현장에서 출토된 바 있는 철광석 괴광을 사용하였으며, 연료는 목탄으로 하였다. 실험을 위해 제작된 풀무와 도제 송풍관을 이용해 순수 인력으로 송풍하였다.

실험은 괴광 1차 460kg, 2차 425kg을 장입하였으며, 연료는 1차 760kg, 2차 632.5kg을 사용하였다. 다만 괴광 장입 전 가열을 위한 장입을 제외하고 괴광 장입 이후부터의 장입량만을 계산하면 1차 483kg, 2차 382.5kg이 된다. 첨가제로는 조재(造滓) 및 유동의 기능으로 황토(주성분-SiO₂)와 패각(주성분-CaO)을 장입하였는데, 황토는 1차 47kg, 2차 39kg, 패각은 1차 70kg, 2차 52kg을 장입하였다. 결과적으로 광석/목탄/패각/황토의 비율은 1차-1/1.05/0.15/0.1, 2차-1/0.9/0.12/0.09가 되었다.¹⁸⁾

생산품은 노 하부에 커다란 잡쇠덩이로 형성되었는데, 1차에서는 69.7kg, 2차에서는 113.15kg을 수습하여, 장입된 광석 대비 회수율은 1차 15.2%, 2차 26.6%가 되었다. 1차 생산품 시료의 탄소 함량은 0.011~1.64%C로, 13건 중 11건은 탄소 함량이 0.011~0.316%C, 2건은 0.64~1.64%C였다.

18) 이하에서 말하는 장입 비율은 광석 장입 개시 이후의 장입량이다.

2차 생산품 시료의 탄소 함량은 0.014~0.192%C이다. 즉 일부 최하단부에 생성된 철괴는 침탄이 되기도 하였으나 대부분 탄소 함량이 낮은 괴련철 성분으로 확인되었다.

이처럼 초반 실험임에도 불구하고 괴련철 생산에 성공할 수 있었던 이유는 우리 연구단의 연구원들 중 많은 수가 2002년 철박물관의 실험, 2014~2015년 국립중앙문화재연구소(이하 중문소)의 1~3차 실험, 2015~2016년 전통제철기술연구단(이하 연구단)의 1·2차 실험에 연구원 혹은 자문단으로 참여하였기 때문이었다. 특히 1·2차 실험에서는 연구단과 연계하여 분야실험을 병행하여, 실제 고대 분묘 출토 철기를 모델로 해 단조철기를 제작하였다.

이상과 같이 고대 원통형로를 모델로 해 괴련철을 생산하는 실험은 우리 사업단 뿐만 아니라 2014년도부터 시작된 중문소와 연구단의 실험연구와 연계해 진행함으로써 많은 시너지 효과가 있었다. 중문소에서는 현재까지도 매년 2회의 철 제련복원실험을 진행하고 있고, 우리 사업단의 연구원들도 참여하고 있다. 이처럼 전체적인 연구성과를 감안한다면 고대 원통형로에서 철광석 괴광을 제련해 단조철기 소재용 괴련철을 생산하는 기술은 현재 80% 정도가 복원된 것으로 평가할 수 있다.

2. 선철 예비실험

2017년도 10월의 제3차 실험은 문화관광체육부의 ‘2017 문화의 달’ 행사의 일환으로 실시되었으며, 달천광산의 토철과 유사한 형태의 분광 제련 가능성을 타진해 보는 것이 목적이었다.¹⁹⁾ 가마의 구조는 제1·2차와 동일한 지름 80cm, 높이 200cm의 원통형으로 하였다. 제1·2차 실험과의 차이는 원료로 10mm 이하 크기로 파쇄된 분광과 3cm 내외 크기의 괴광을 같은 비율로 혼합해 170kg을 장입하였다는 점이다. 분광은 비산(飛散)을 우려해 첨가제인 황토, 폐각과 혼합하여 달걀 크기의 펠릿으로 만들어 배소 후 3~4cm 크기로 파쇄해 장입하였다. 총 장입량은 광석 170kg, 목탄 590kg(만장입 250kg, 광석 장입 후 340kg), 폐각 17kg, 황토 21.19kg이며, 광석:목탄:폐각:황토의 비율은 1:2:0.1:0.125이다.

실험에서는 4회에 걸쳐 소량의 선철이 가마 바깥으로 유출되었으나 그 양은 미미하였으며 1·3회 유출분은 탄소 함량 4.26~4.36%C의 공정 선철이었다. 대부분의 생산품은 가마 바닥에서부터 35cm 높이까지 덩어리 형태로 생성되었는데, 스펀지 상태의 괴련철, 소결 상태의 괴광, 작은 구슬 형태의 선철 등 다양한 양상으로 확인되었다. 유출된 선철 12.75kg, 노 내 생산품 57.8kg 등 모두 70.55kg의 철이 생산되었으며, 노 내에 형성된 철은 대부분 환원이 완료되지 못한 반환원괴로 확인되었다. 다소 변수가 많기는 하였지만 분광을 제련해 선철 쇳물로 유출시킬 수 있다는 결론을 도출시킨 아주 중요한 실험으로 평가되었다.

2018년도 5월의 제4차 실험에서는 제3차 실험에서 확인된 분광의 제련 가능성에서 한 발 더 나아가 분광만을 사용하기로 하였고, 가마의 구조는 한 변 80cm(내측), 높이 220cm의 평면 방형으로 변경하

19) 분광 제련실험은 1991년 3월(1차), 1993년 3월(2차)과 4월(3차) 등 3회에 걸친 한국과학기술연구원 최주 박사팀의 실험이 있었다. 1~3차에서는 각각 달천광산의 분광 50kg, 222kg, 35kg을 소요하였고, 대부분 저탄소·중탄소의 괴련철이 생산되었다.

였다. 또한 이전에는 설치되지 않았던 앞창에 초롱구멍(출선구)과 잡쇠구멍(출재구)을 설치하고, 그 바깥에는 유출된 선철을 모을 수 있도록 쇳물 구덩이(湯場)를 설치하였다. 즉 선철 쇳물을 생산하는 실험으로 방향이 대폭 변경된 것이다. 하지만 온전한 쇳물 형성을 자신할 수 없었기에 판장쇠바탕도 설치하지 않는 등 3차 실험과 마찬가지로 선철 생산을 위한 예비실험적 성격으로 진행되었다.

총 장입물은 분광 300kg, 목탄 1,230(600 · 20)kg, 패각 60kg이며, 첨가제는 사용하지 않아 분광/목탄/패각의 비율은 1:2.0:0.2가 되었다. 실험 결과, 쇳물 24kg을 포함한 선철 61.9kg과 선철·괴련철·반환원괴·철재가 혼합된 혼합괴 126.4kg을 생산하였다. 가마 내부에 용융 풀(pool)이 형성되었고, 상층의 철재를 배출시킨 후 초롱구멍을 개방해 24kg의 용융선철을 생산한 점은 국내 최초의 선철 유출 성공이라는 점에서 큰 의미가 있는 것으로 평가되었다.

이와 같이 2회의 예비실험을 통해 달천광산의 토철과 유사한 분광을 방형 쇳부리가마에 장입해 선철을 생산할 수 있음이 확인된 것이다. 이후 울산쇠부리복원실험은 조선후기 이의립의 토철제련법 복원을 위한 선철 생산으로 전격 변환되었다. 지면 관계로 3·4차 실험의 의미를 모두 언급할 수는 없지만, 이러한 예비실험 없이는 토철제련법과 같은 중요한 실험계획을 수립할 수 없음이 자명하다. 특히 실험이 울산쇠부리축제 기간 중 진행된다는 점에서 관람객들과 언론의 관심은 실험 결과(쇳물 생산 실패 등)에 대한 큰 부담으로 작용하였다. 사실 이러한 예비실험은 본 실험에 앞서 소규모로 실시하는 것이 바람직하지만, 사업단에 소속된 연구원들이 모두 다른 기관에 소속된 비상임 신분이고, 한정된 예산과 일정 안에서 이를 수행하기는 사실상 불가능하였다. 아무튼 사업단에서는 이러한 예비실험을 통해 선철 생산에 자신감을 가지게 되었고, 이후로는 울산쇠부리축제 추진위원회 등 지역사회에서 요구하는 바와 같이 조선후기 이의립의 토철 제련기술을 실험하는데 주력하게 되었다.

3. 선철 생산

두 차례의 예비실험을 거쳐 2019년 제5차 실험부터는 조선후기 구충당 이의립의 토철제련법 복원을 위한 본격적인 선철 생산에 착수하였다. 실험의 원료는 달천광산 특산(特産)의 토철이 되어야 하지만, 토철은 달천광산에서만 산출되며 현재 울산광역시 기념물 제40호로 지정되어 있어 채광이 불가능하다. 따라서 형태상 이와 유사한 분광을 선별해 원료로 사용하였다.

2019년도 제5차 실험에서는 가마의 좌·우에 각각 5.3m, 4.6m 길이의 석축을 설치하고, 가마의 높이를 250cm가 되도록 하였다. 판장쇠 규격품을 생산하기 위하여 길이 24.7cm, 너비 8cm, 두께 6.6cm 크기의 판장쇠 6매를 제작할 수 있는 판장쇠바탕 2본을 제작해 실험에 사용하였다. 결과적으로 1차 출탕 시 쇳물의 양이 충분하지 않아 판장쇠 2매를 채울 분량밖에 유출시키지 못하였으나, 3~9차 유출분을 모두 포함해 83.95kg의 선철이 수습되었다. 이는 장입 분광 대비 22.09%에 해당되는 적절한 회수율로 평가되었다.

2020년 제6차 실험에서는 가마의 높이를 제5차와 동일한 250cm로 하고, 내면 크기를 40~90cm(상부 50~70cm, 중부 70~90cm, 하부 40~60cm)로 해 가운데가 가장 넓은 구조가 되도록 하였다. 판장쇠 8매를 제작할 수 있는 판장쇠바탕을 설치해 4차에 걸쳐 용융선철을 출탕시켰으며, 1차-11.25kg, 2차

-9.45kg, 3차-27.1kg, 4차-8.65kg, 기타-15.8kg 등 모두 72.25kg의 선철을 생산해 23.3%의 회수율을 기록하였다. 특히 3차 유출에서는 판장쇠 8매를 모두 채우는 데 성공하였다.

2021년 제7차 실험의 경우, 가마의 구조는 제6차와 동일하였고 300kg의 분광을 장입해 4회에 걸쳐 선철을 출탕하였다. 1차-10.05kg, 2차-20.75kg, 3차-11.0kg, 4차-11.35kg, 기타-31.1kg 등 모두 84.25kg의 선철을 생산해 28.08%의 회수율을 기록하였다. 특히 이번 실험에서는 2차 출탕에서 거의 완전한 형태로 판장쇠바탕을 채웠으며, 나머지 3회의 출탕에서도 2019년 실험의 출탕보다 한결 양호한 상태로 출탕이 이루어졌다.

〈표 2〉에서 보는 바와 같이 분광 장입량 대비 선철 생산량은 22.09%→23.3%→28.08%로 점점 개선되고 있고, 생산된 선철 역시 탄소함량 4.3%C의 공정선철에 가까운 양상을 보인다. 향후 실험에서도 선철 출탕을 통한 판장쇠의 생산에는 큰 문제가 없는 것으로 전망된다. 안정적인 판장쇠 생산이라는 결과를 전제로, 향후 3차례 정도의 추가실험을 실시한다면 ‘토철제련법’ 표준매뉴얼의 수립이 가능할 수 있을 것으로 예상된다.

〈표 2〉 울산쇠부리 선철 생산실험 현황

구 분	5차	6차	7차
	2019.05.10~12	2020.10.9~11	2021.10.22~24
가마 내면 크기(cm)	80	90×70	90×70
가마 높이(cm)	250	250	250
분광 장입량(kg)	380	310	300
장입 비율 분광/목탄/(황토+슬래그)/패각	1/1.97/0.16 첨가제-패각	1/2.13/0.071/0.097 첨가제-패각+슬래그	1/2.0/0.093 첨가제-슬래그
평균 온도(℃)	1,219	1,191	1,190
철 생산량(kg)	83.95	72.25	84.25
철 회수율(%)	22.09	23.3	28.08
생산품의 함탄량(%C)	3.85~4.50 공정선철	3.53~4.25 아공정선철	3.9~4.4 공정선철

4. 향후 과제

앞에서 울산쇠부리의 조선후기 토철제련법을 통한 선철 생산의 성과에 대해 간략하게 언급하였지만 해결되어야 할 과제도 만만치 않다. 우선 실험에 사용할 수 있는 토철을 구할 수 없기 때문에 분광과 토철과의 유사성 및 차이점에 대한 심도있는 비교검토가 필요하다. 지금까지 토철에 대한 금속학적 분석은 수차례 실시되어 왔지만 분광과의 객관적인 비교검토가 쉬운 것은 아니다.

우선 표준 토철의 확보 문제가 있다. 쇠부리터 출토품이나 일부 개인 소장 토철은 오랜 세월을 지나는 동안 풍화 혹은 산화가 진행되어 함철량이 현저히 떨어지는 등 조선후기 조업 당시의 토철이라 보기 어렵다. 또한 토철 시료의 금속분석 방법에 대한 문제도 있다. 개인이 소장한 토철이나 쇠부리

터 유적에서 수습된 토철 일부에 대해 금속분석이 이루어졌지만 XRF 등의 정량분석이 이루어지지 않아 객관적인 비교검토가 불가능한 경우가 대부분이다. 따라서 표준매뉴얼을 수립한다고 해도 분광과 토철과의 물리·화학적 동질성이 인정되지 않는다면 진정한 토철제련법 기술복원을 인정받기 어려울 수 있다. 이러한 문제들에 대해서는 우리 사업단에서 좀 더 정밀한 검토를 거쳐 해결해 나가야 한다.

두 번째로 쇠부리가마의 크기 문제이다. 발굴조사된 울산 대안동 쇠부리터의 규모는 잔존길이 204cm, 잔존너비 120~168cm, 잔존높이 250cm로, 사업단에서 제작한 실험로의 두 배에 달한다. 가마의 세부구조를 모두 복원한다고 해도, 가마의 크기는 조업에 큰 영향을 줄 수 있기 때문에 언젠가 동일한 규모에서의 실험도 반드시 필요하다.

세 번째, 울산쇠부리기술은 토철제련법으로 끝나는 것이 아니다. 2021년도 울산쇠부리축제 추진위원회에서도 제기되었지만, 철 소재인 판장쇠를 생산한 다음 이를 무쇠부리 공정(용해주조)의 용광로(용해로)에서 다시 녹여 무쇠술을 생산하는 것까지가 완성이라고 할 수 있다. 권병탁에 의하면 1904년 당시 청도 운문면 솔계 일대에는 모두 9개의 무쇠술 공장이 있었는데, 원료는 운문산 일대의 쇠부리가마에서 녹인 판장쇠를 사용했고 일제강점기에는 일본에서 고철을 사서 녹여 사용했다고 한다. 당시 경상도에서는 청도 솔계에서만 무쇠술을 주조해 다른 지역으로 공급했으며 이러한 대규모의 무쇠술 생산은 일제강점기까지 계속되었다고 한다. 솔계에서 생산된 무쇠술은 인근의 자인시장을 거쳐 영천·경주·언양·밀양·청도 등지의 시장으로 운송되었으며, 많을 때는 한 장(5일) 동안에 500여개의 술이 빠져 나갔다고 한다(권병탁 2004).

즉 조선후기 울산쇠부리기술은 토철을 녹여 만든 판장쇠로 무쇠술을 제작하는 것까지라고 할 수 있으며, 울산쇠부리복원사업단에서도 토철제련법 복원이 완수되면 다음 단계로 판장쇠를 이용해 무쇠술을 생산하는 기술을 복원할 필요가 있다. 다행히 실험을 통해 판장쇠는 계속 제작되고 있으며, 우리나라에는 무쇠술을 생산하는 공장이 꽤 있고, 이 중에는 안성주물 등 4대에 걸쳐 전통 무쇠술 제작기술을 보유한 장인(匠人)도 있다. 우리 사업단에서는 2022년도 실험부터는 안성주물 4대 김성태 대표를 학술자문위원으로 위촉하고, 지난 3월 15일 안성주물을 방문해 판장쇠바탕 제작 및 출탕 등에 관한 고견을 얻은 바 있다.

끝으로 앞서 잠시 언급한 바와 같이 한반도 초기 철 제련기술 복원연구를 위한 실험을 울산에서 선점할 필요가 있다. 그 이유는 채광 시기가 기원전 1세기대까지 올라가는 달천광산은 우리나라에서 가장 일찍 철광석을 제련한 곳이고, 당연히 울산에서 가장 일찍 철 제련이 시작되었을 가능성이 높기 때문이다. 다행히 우리 사업단의 구성 및 실험 노하우로 보아 소형 제련로에서 소량의 괴련철을 생산한 것으로 추정되는 초기 철 제련로 실험은 그리 어렵지 않을 것으로 예상된다. 실험 연구를 통해 한반도 초기 철 제련기술을 규명한다면, 삼한에서 조선후기에 이르는 우리나라 전통 쇠부리기술의 연구메카가 바로 울산이 될 수 있는 매우 의미있는 일이 될 것이며, 울산을 진정한 철의 도시로 규정하는데 어떠한 이의도 제기하지 못할 것이다.

● ● ● 참고문헌

- 權丙卓, 1972, 『韓國經濟史特殊研究』, 嶺南大學校附設 産業經濟研究所.
- 권병탁, 2004, 『한국 산업사 연구』, 영남대학교출판부.
- 권용대, 2021, 「울산 쇠부리터 출토 목탄 -대안동 쇠부리터 출토 목탄을 중심으로-」, 『2021 울산쇠부리복원사업 워크샵 자료집』, 울산북구문화원·울산쇠부리복원사업단.
- 김권일, 2009, 「영남지역 조선시대 製鐵文化의 기초적 연구-石築型 製鐵爐의 설정-」, 『嶺南考古學報』31, 嶺南考古學會.
- 김권일, 2012, 「한반도 고대 제철문화의 검토」, 『한반도의 제철유적』, 대전: 한국문화재조사연구기관협회.
- 김권일, 2014, 「고고학적으로 본 석축형제철로의 조업방식」, 『조선시대 울산 쇠부리의 조업방식』, 울산쇠부리축제 추진위원회·한국철문화연구회.
- 김권일, 2020, 「석축형제철로(石築型製鐵爐)의 조업방식 재고」, 『신라문화유산연구』, 신라문화유산연구원.
- 신경환·김권일·최영민, 2015, 「석축형제철로(石築型製鐵爐)의 조업방식 연구」, 『야외고고학』, 제22호, 한국매장문화재협회.
- 신경환·이남규·황호순·이재웅, 2020, 『전통 제련 복원실험의 물리화학적 해석연구(1차년)』, 국립중앙문화재연구소.
- 성정용·성수일, 2012, 「鐵鋌을 통해 본 古代 鐵의 生産과 流通」, 『한반도의 제철유적』, 한국문화재조사연구기관협회.
- 이남규, 2019, 「한국 고대 제철공정의 재검토-중국과의 비교적 시각에서-」, 『한국고고학보』 제111집, 한국고고학회.
- 이남규·김권일·강성귀, 2016, 『2016년도 울산쇠부리 고대 원형로 복원실험 연구보고서』, 울산쇠부리축제 추진위원회·울산쇠부리 복원사업단.
- 이남규·이태우·김권일·이은철·최영민·강성귀, 2018a, 『2017 울산쇠부리 제철기술복원실험 연구보고서』, 울산광역시 북구문화원·울산쇠부리복원사업단.

● ● ● 참고문헌

- 이남규·이태우·이은철·최영민·강성귀, 2018b, 『2018년도 울산쇠부리 제철기술 복원실험 연구 보고서』, 울산광역시 북구문화원·울산쇠부리 복원사업단.
- 이남규·이태우·신경환·김권일·이은철·강성귀·권용대·이민아, 2019, 『2019 울산쇠부리 제철기술 복원실험 연구보고서』, 울산광역시 북구문화원·울산쇠부리 복원사업단.
- 이남규·이태우·신경환·이은철·김권일·권용대·강성귀·이재용·이민아, 2021, 『2020 울산쇠부리복원사업 연구보고서』, 울산광역시북구문화원·울산쇠부리복원사업단.
- 이재현, 2015, 「주조철부·판상철부」, 『韓國考古學專門事典 -古墳遺物篇-』, 國立文化財研究所.
- 최영민·이현진, 2020, 「중세 제련기술 복원실험 결과 보고」, 『科技考古研究』26, 아주대학교 박물관.
- 國立金海博物館, 2001, 『密陽沙村製鐵遺蹟』.
- 울산광역시 북구청 · 울산연구원 문화재센터, 2021, 『울산 대안동 쇠부리터 - 울산 쇠부리터 정비사업부지 내 유적 보고서』.
- 角田徳幸, 2014, 『たたら次製鐵の成立と展開』, 清文堂.

2021년도
울산쇠부리 복원사업
연구보고서
SOEBURI



발 행 일 : 2022. 04.

발 행 인 : 박원희

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

발 행 처 : 울산광역시 북구문화원

주 소 : 울산광역시 북구 산업로 1104

전 화 : 052)294-2222

팩 스 : 052)286-0031

홈페이지 : <http://www.ubcc.or.kr/>

이 메 일 : soeburi@hanmail.net

디자인·편집 : 디자인문

울산광역시 남구 삼산중로 131번길 42-10

전 화 : 052)260-1870

팩 스 : 052)269-5110

※이 책은 울산광역시 북구청 보조금으로 발행되었습니다.