

고대 제철로 복원실험 제련 슬래그 분석과 해석 방법에 관한 연구

김수진¹ | 김수기*

(재)겨레문화유산연구원, *용인대학교 문화재학과

A Study on Analysis of Smelting Slags Produced Reproduction Experiment of Iron Smelting Furnace and Interpretation Method for the Slags

Su Jin Kim¹ | Soo Ki Kim*

Gyeong Institute of Cultural Heritage, Goyang, 10523, Korea

*Department of Cultural Heritage, Yong-In University, Yongin, 17092, Korea

¹Corresponding Author: charming0422@naver.com, +82-31-973-2961

초록 본 연구는 고대 제철로 재현실험의 제련 슬래그를 대상으로 성분을 분석하고, 기존의 연구방법 대신 슬래그의 주성분에 대한 다른 성분들의 상대적인 비율을 활용한 해석 방법을 제시하여 슬래그 간의 경향성을 파악함으로써 노(爐) 내에서 슬래그가 기인된 성분 출처를 연구하고자 하였다. 분석 데이터를 이변량 및 삼각좌표 비교 분석 그래프로 작성한 결과 기준시료의 주요 성분에 따라 일정한 경향성을 띠며 그룹을 형성하는 것이 확인되었다. 기준시료인 광석을 중심으로 형성된 광석 슬래그군은 CaO와 TiO₂함량이 높았고, 점토와 마사토를 중심으로 형성된 점토 슬래그군은 Al₂O₃와 SiO₂함량이 높았다. 또한 그래프 상에서 군집에 속하지 못하는 경우 어느 군집에 더 근접한가에 따라 슬래그가 기인한 성분의 추정이 가능한 것으로 판단하였다. 실험에 사용된 광석 및 점토, 첨가제와 제련 슬래그에서 공통적으로 TiO₂함량이 1.6% 이상으로 비교적 높게 나타났고, 모든 슬래그 분석 결과에서 CaO/SiO₂값이 0.4 이하로 분석되었다. 복원실험이 철광석 제련이었다는 점과 조업 시 조제제를 첨가하지 않았다는 것을 고려했을 때, 슬래그를 해석하는데 있어 단순 함량보다 성분 간 비율을 종합적으로 파악하는 방법이 더욱 정확한 해석 방법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

중심어: 슬래그, 성분 간 비율, 이변량 그래프, 삼각좌표, 출처

ABSTRACT This study produced smelting slag through the reproduction of an ancient iron manufacturing technique, with the aim of facilitating a comprehensive understanding of the process by analyzing the slag components. The research suggests an interpretation method using the ratio of the subcomponents relative to the main slag components as an alternative to existing methods. We investigated the component source within the smelting furnace from which the slag is derived by developing an understanding of the tendency between slags. Based on bivariate graph and triangular coordinate data analysis, it was found that a slag can be categorized according to its components. The groups were identified as the ore slag group(centered on the ore), and the clay slag group(centered on clay and granite soil). This research determined that it is possible to estimate the components derived from the slag, depending on which group they belong to or resemble, as shown in Figure 4~7. It was found that a comprehensive understanding of the ratio between the components

was more accurate than a simple analysis of the contents, for the interpretation of ancient iron manufacturing processes. This is based on the fact that a higher ratio of TiO_2 was detected by the components analysis, and an analysis of all the slag showed that the value of CaO/SiO_2 ratio was lower than 0.4, which corresponds to the reproduction experiment condition in which flux was not used.

Key Words: Slag, Ratio between components, Bivariate graph, Triangular coordinate, Source

1. 서 론

인류는 철을 이용해 도구를 제작·사용하게 되면서 이전 시대보다 한층 더 풍요롭고 발전된 사회를 이룩하였다. 철제 농기구의 보급은 농업 생산력을 비약적으로 증가시켰으며, 철제 무기의 개발은 강력한 군사력의 강화를 가져와 세력 확충의 절대적 바탕이 되었다(Jungwon National Research Institute of Cultural Heritage, 2014). 즉, 철의 사용은 생산력 발전과 고대 국가의 성장에서 매우 중요한 역할을 수행해왔으며, 철의 생산과 이를 이용한 철기의 제작은 고대 사회 운영에서 가장 중심이 된 기술력의 하나로 인식되고 있다(Choi *et al.*, 2001).

철을 생산하는 제작공정은 추출하는 제련공정과 제련된 철을 대상으로 탄소 함량을 조절하여 강을 생산하는 제강공정, 철 또는 강을 기본 소재로 완제품을 생산하는 제작공정 모두를 일컫는다. 슬래그는 철을 생산하는 과정에서 제철할 때 생긴 제품 이외의 찌꺼기로서 철광석 또는 사철을 제련하여 철을 생산할 때는 물론 철을 가공할 때도 생긴다(Yoon, 1986). 슬래그와 비금속개재물(非金屬介在物)을 구성하는 비환원화합물, 즉 NRCs(Non-reduced compounds)는 제련공정이 끝난 후에도 남아있는 성분으로, NRCs의 분석을 통해 광석 및 제련온도, 철 생산 공정 등을 추정해볼 수 있다(Blakelock *et al.*, 2009). 따라서 슬래그나 비금속개재물 분석은 철기 유물 분석에서는 얻을 수 없는 고대 제철기술에 관한 정보를 제공할 수 있기 때문에 유용하다.

슬래그나 비금속개재물과 같은 산화물 분석에 있어 해석에 관한 기존 연구들은 단순 함량을 가지고 논하는 경우가 일반적이다. 그러나 슬래그를 조성하는 성분은 다양하며 철의 환원에 따라서 그 함량이 차차하는 상대적 비율도 달라지기 때문에 단순히 한 가지 성분의 함량만으로 판단하는 것은 오류가 있을 수 있고, 성분 간 비율 비교 분석을 통해 종합적으로 판단할 필요가 있다.

고대 제철기술에 관한 연구의 일환으로 진행되었던 고대 제철로 복원실험에서 생성된 제련 슬래그를 대상으로

성분을 분석하여 분석 결과를 토대로 기존의 해석 방법 대신 Al_2O_3/SiO_2 와 CaO/SiO_2 같이 슬래그의 주성분에 대한 다른 성분들의 상대적인 비율을 활용하여 제련공정을 해석하는 시도를 하였다. 또한 성분 간 비율을 비교하여 경향성을 파악함으로써 노(爐) 내에서 슬래그가 기인된 성분 출처를 연구하고자 하였다. 성분 간 비율을 활용한 해석 방법과 슬래그 기원 성분의 출처 연구를 통해 정확한 고대 제철기술을 파악하기 위한 슬래그 또는 비금속개재물 분석 데이터의 해석 방법을 정립해보고자 하였다.

2. 연구 대상 및 분석방법

2.1. 연구 대상

연구의 대상 실험인 제철로 복원실험은 2015년 7월에 진행되었으며, 직접 제철법인 고체저온환원법을 적용하였다. 제련로에 광석과 목탄을 넣고 온도를 올리면 대략 $700\sim 800^\circ C$ 에서 환원이 시작된다. 철은 녹는점이 높지만 고대에는 제련로 구조상 고온으로 올릴 수 없었으므로 $700\sim 800^\circ C$ 에서 반응용된 철재가 바닥에 가라앉으면 그 철 덩어리를 가공하여 철을 얻었고 이를 고체저온환원법

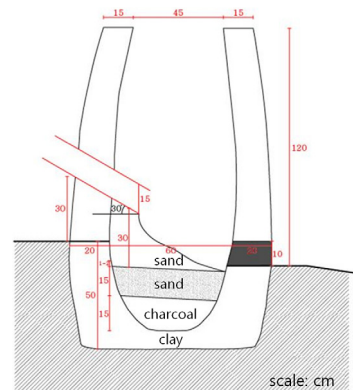







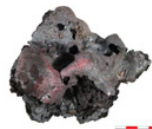










Figure 1. Smelting furnace structure (Kim, 2015).

Table 1. Study subject slags

			
Semi-molten ore1	Semi-molten ore2	Semi-molten ore3	Blast pipe piece1
			
Blast pipe piece2	Blast pipe piece3	Center of furnace slag1	Center of furnace slag2
			
Bottom of furnace slag1	Bottom of furnace slag2	Furnace wall slag1	Furnace wall slag2
			
Slag from slag gate1	Slag from slag gate2	Slag from slag gate3	Slag flowed from blast pipe

이라 한다(Yu, 2003). 실험 제련로는 원형의 반지하식이고 상부로 갈수록 좁아지는 구조이며, Figure 1과 같이 높이는 120 cm, 노벽 상부두께는 15 cm, 하부두께는 20 cm이다. 송풍관은 직선관으로 지면에서 30 cm 위쪽에 설치하였고 기울기는 30°로 하였다. 강원도 양양산 철광석과 마사토, 목탄만을 장입하여 조업하였다.

연구 대상 시편은 슬래그 출처 연구의 기준시료인 실험에 사용된 철광석, 노벽 점토, 마사토와 노 내 생성 슬래그들이다. 노 내 생성 슬래그는 복원실험 과정과 실험이 끝나고 난 뒤 공랭 후 수습하였다. 공랭 후 수습한 슬래그 위치는 Figure 2에 표시하였고, 사진은 Table 1에 정리하였다. 시편은 diamond disk를 사용하여 슬래그 중앙에서 채취했으며 노벽 슬래그의 경우 1이 2보다 노벽 점토에 더 가까운 곳에서 채취한 것이다.

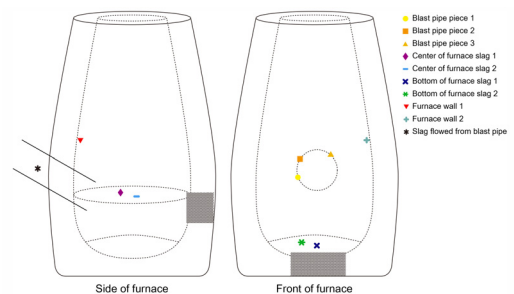


Figure 2. Location of study subject slag.

2.2. 분석방법

2.2.1. 시편제작

출처의 기준이 되는 점토와 마사토는 미세분말로 제작 후 강화하여 시편으로 제작하였고 광석 또한 분광하여 분

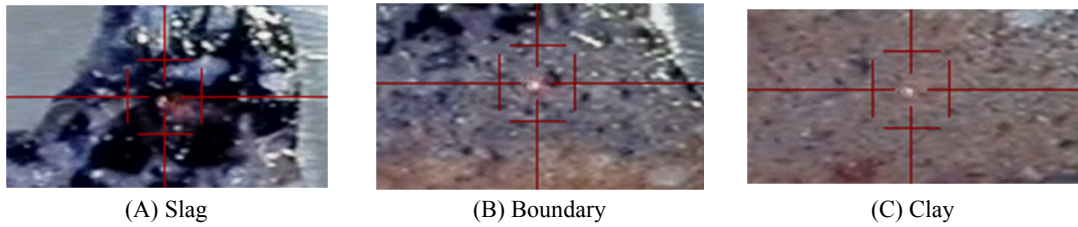


Figure 3. Blast pipe piece analytical point.

Table 2. XRF analysis data of slags produced from the furnace

Classification		Oxide concentration(wt.%)							
		MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	FeOx	
Standard samples	Ore	aver.	16.479	5.762	36.074	1.559	7.396	8.884	24.203
		min.	12.879	4.566	31.893	1.334	6.206	6.068	17.318
		max.	20.686	7.184	43.232	1.613	13.318	10.866	26.922
	Granite soil (Additives)	aver.		21.192	71.555	3.073	0.799	2.054	1.109
		min.	-	19.679	68.275	2.172	0.559	1.616	0.853
		max.		22.491	73.870	6.301	0.903	2.294	1.429
	Clay (Furnace, Blast pipe)	aver.		26.767	62.364	2.478	0.091	4.624	3.698
		min.	-	25.860	61.258	2.201	0.075	4.161	3.434
		max.		28.038	62.813	2.779	0.268	5.055	3.923
Slags produced from the furnace	A*	aver.	5.511	19.736	60.949	2.080	6.427	3.198	5.578
		min.	4.417	14.435	52.715	1.674	3.189	2.437	3.320
		max.	6.218	23.993	65.109	2.949	11.031	3.820	9.935
	B**	aver.	3.525	23.970	64.810	1.102	3.245	2.706	2.010
		min.	1.836	21.305	63.539	0.858	1.986	1.810	1.404
		max.	5.893	25.870	68.065	1.189	4.221	3.871	3.468
	C***	aver.	-	24.882	66.817	1.092	2.949	2.593	1.513
		min.	-	19.965	63.879	0.773	2.224	1.800	1.143
		max.	-	26.605	74.095	1.200	4.656	2.958	1.783
	Furnace wall slag1	aver.	4.748	20.601	61.367	2.536	3.233	2.988	4.649
		min.	3.027	14.988	58.507	1.006	2.448	2.517	1.415
		max.	6.783	23.679	64.529	3.840	4.000	3.780	8.495
	Furnace wall slag2	aver.	5.176	10.075	48.741	2.971	6.519	8.063	18.200
		min.	1.324	6.210	37.306	2.606	2.141	3.816	9.704
		max.	13.433	14.163	68.838	3.577	9.739	12.601	21.507
Semi-molten ore	aver.	9.165	5.566	37.072	1.961	11.129	9.237	25.855	
	min.	1.210	2.850	29.221	1.052	7.626	6.450	21.929	
	max.	17.543	7.952	41.467	2.482	21.277	10.809	30.256	
Center of furnace slag	aver.	14.192	8.082	36.904	2.258	6.877	9.256	29.118	
	min.	9.868	2.584	29.349	1.333	1.786	7.688	26.373	
	max.	21.581	12.362	42.266	7.263	10.218	10.775	35.461	
Bottom of furnace slag	aver.	8.766	8.791	41.812	3.090	6.444	8.987	23.645	
	min.	3.255	6.500	36.133	1.151	4.028	6.838	18.570	
	max.	17.135	17.345	43.649	11.452	8.357	11.292	31.393	
Slag from slag gate	aver.	5.204	8.071	44.314	2.522	6.933	9.242	23.392	
	min.	2.574	6.450	39.434	1.693	5.581	6.331	19.942	
	max.	8.743	9.522	48.801	4.088	9.340	11.078	29.635	
Slag flowed from blast pipe	aver.	8.023	9.639	41.365	1.658	9.661	12.278	22.250	
	min.	4.358	6.785	39.194	1.177	6.360	8.249	18.417	
	max.	8.256	11.276	42.744	5.346	10.969	13.243	25.051	

*Slag **Boundary ***Clay

석하였다. 노 내 생성 슬래그에서 채취한 시료는 epoxy resin을 이용하여 cold mounting하여 시편을 제작하였다. 제작된 시편은 정밀절삭가공선반을 이용하여 시편의 양면을 수평으로 절단한 다음 sand paper #800~#2000까지 순차적으로 grinding을 통한 조연마를 실시하였다. 조연마를 끝낸 시편은 diamond suspension을 이용하여 6 μm , 1 μm , 0.05 μm 순으로 정밀연마하고 마무리하였다.

2.2.2. 성분분석

제작한 시편의 주성분분석을 위해 X선형광분석기(portable μXRF -Spectrometer, ARTAX, Bruker, Germany)로 분석하였으며, Area Mapping 프로그램을 활용하여 각 시편 당 4~9 point씩 측정하였다. 송풍관편의 경우 슬래그(Figure 3A), 경계(Figure 3B), 점토(Figure 3C)부분으로 나누어 분석하였다. 분석조건은 Helium Flushing 상태에서 X-ray가 발생되는 구경인 collimator 직경이 650 μm , 전압 20 kV, 전류 800 μA , 측정시간은 120 s로 하였다.

2.2.3. 데이터 해석

단순 함량으로 해석하던 기존의 방법대신 XRF 분석 데이터를 산화물 식으로 변환한 후 성분 간 비율을 계산하고 그를 바탕으로 해석하는 시도를 하였다. 나아가 성분 간 비율 값을 반영하여 이변량 비교 분석 그래프를 작성하였고, 좀 더 종합적인 고찰을 위해 산화물 삼원상태도와 같은 방법으로 삼각좌표를 만들어 균집을 확인하였다. 그래프를 통해 광석과 첨가물 및 노벽 등과의 상관관계를 파악하여 슬래그가 기인한 성분을 확인하고자 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 성분분석

성분분석 결과를 Table 2에 정리하였으며, 수치는 분석 지점들의 최소, 최대값을 작성하고 평균의 경우 최소, 최대값은 제외하고 계산하였다. 기준시료를 보면, 광석의 경우 MgO, CaO와 TiO₂함량이 높고, 점토와 마사토의 경우 SiO₂와 Al₂O₃의 비율이 높은 것으로 확인된다. MgO는 광석에서만 검출되었고, TiO₂는 모두 1.6%이상으로 비교적 높게 나타나지만 광석이 점토와 마사토보다 약 2~4배 더 높은 것을 알 수 있다. 반대로 Al₂O₃는 점토와 마사토에 광석보다 약 4배 더 높게 함유되어 있고, SiO₂는 광석, 점토 성분에 관계없이 고르게 높은 비율로 분석되었다.

노 내 생성 슬래그들 중 송풍관편과 노벽 슬래그는 다른 시편들에 비해 Al₂O₃와 SiO₂의 함량이 높게 나타났고 그 외의 다른 시편에서는 CaO가 더 높은 함량을 보이고 있으며 이와 같은 결과는 기준시료 성분분석 결과와 일치한다. 기준시료와 제련 슬래그 간에 일정한 경향성이 있을 것으로 생각되고 이는 성분 간 비율을 파악함으로써 가능할 것으로 판단된다.

또한 모든 제련 슬래그 시편들의 TiO₂함량이 1.8% 이상으로 기준시료와 같이 비교적 높은 함량을 나타내고 있는 것이 확인되는데, 본 연구 대상의 실험이 철광석을 사용한 제련실험이라는 점에서 볼 때 단순히 TiO₂ 함량이 1% 이상이라는 근거로서 사철제련으로 판단하는 것은 오류가 있을 수 있음을 알 수 있다.

3.2. 성분 간 비율 비교

슬래그의 해석 방법과 기인한 성분 출처 연구를 위해 주 성분에 대한 다른 성분의 비율을 Table 3에 정리하였다. SiO₂는 광석과 점토 관계없이 고르게 높은 비율로 분석되어 슬래그 주성분으로서 비율 계산의 기준으로 하였다. Al₂O₃는 점토를 대표하는 성분으로서 선정하였다. TiO₂는 자철광석이나 사철을 대변하는 성분이고, CaO는 본 연구의 대상 실험에서는 사용하지 않았으나 일반적으로 조제제의 주성분이며, 제련 시 조제제 첨가 여부를 판단하는데 사용하는 성분이므로 선정하였다. FeO_x는 각각의 시편들에서 차지하는 비율이 높으나 제련 과정에서 환원되는 부분이 있어 변동이 많기 때문에 성분 간 비율 비교 대상에서는 제외하였다.

기준시료의 Al₂O₃/SiO₂를 보면 광석은 평균 0.160, 마사토와 점토는 0.310 이상으로 약 2배가량 마사토와 점토의 Al₂O₃/SiO₂ 값이 더 높은 것으로 나타났다. 반면 마사토와 점토의 CaO/SiO₂, TiO₂/SiO₂ 값은 모두 0.1 미만이며 광석은 CaO/SiO₂가 평균 0.209, TiO₂/SiO₂는 평균 0.251로 높게 나타났다. 이를 기준으로 볼 때, 아래 노 내 생성 슬래그들 중 송풍관편과 노벽 슬래그1이 마사토, 점토의 값과 유사하고 나머지는 광석의 값과 유사한 것으로 나타났다.

슬래그는 여러 성분들의 집합체로 단순히 한 가지 성분의 함량으로 광석의 종류나 조제제를 판단하는 것은 오류가 있을 수 있다. 따라서 기존 연구의 단순 함량 비교가 아닌 성분 간 비율을 통해 판단할 것을 제안한다. 조제제의 경우 기존의 연구에서는 CaO의 함량이 높게 나타난다는 것으로 첨가 유무를 판단하였으나 주성분에 대한 상대적

Table 3. Ratio between components of standard samples and slags produced from the furnace

Classification		Al ₂ O ₃ /SiO ₂	CaO/SiO ₂	TiO ₂ /SiO ₂		
Standard samples	Ore	aver.	0.160	0.209	0.251	
		min.	0.131	0.174	0.140	
		max.	0.178	0.308	0.321	
	Granite soil	aver.	0.358	0.008	0.036	
		min.	0.310	0.006	0.029	
		max.	0.411	0.009	0.041	
	Clay	aver.	0.429	0.002	0.074	
		min.	0.413	0.001	0.066	
		max.	0.458	0.004	0.081	
Slags produced from the furnace	A*	aver.	0.325	0.109	0.053	
		min.	0.254	0.049	0.037	
		max.	0.373	0.208	0.072	
	Blast pipe piece	B**	aver.	0.373	0.050	0.042
			min.	0.321	0.030	0.028
			max.	0.407	0.065	0.058
	C***	aver.	0.373	0.044	0.039	
		min.	0.269	0.030	0.024	
		max.	0.416	0.073	0.045	
	Furnace wall slag 1	aver.	0.338	0.053	0.048	
		min.	0.232	0.038	0.042	
		max.	0.375	0.068	0.065	
Furnace wall slag 2	aver.	0.196	0.145	0.182		
	min.	0.158	0.031	0.055		
	max.	0.342	0.238	0.308		
Semi-molten ore	aver.	0.159	0.227	0.245		
	min.	0.126	0.193	0.206		
	max.	0.201	0.278	0.338		
Center of furnace slag	aver.	0.178	0.171	0.216		
	min.	0.126	0.120	0.190		
	max.	0.239	0.201	0.258		
Bottom of furnace slag	aver.	0.178	0.137	0.210		
	min.	0.118	0.114	0.166		
	max.	0.225	0.178	0.331		
Slag from slag gate	aver.	0.183	0.156	0.208		
	min.	0.143	0.119	0.134		
	max.	0.224	0.237	0.281		
Slag flowed from blast pipe	aver.	0.166	0.172	0.228		
	min.	0.141	0.158	0.202		
	max.	0.197	0.185	0.267		

*Slag **Boundary ***Clay

인 비율로서 판단하는 것이 더 바람직한 방향의 해석 방법 일 것이다. 보통 CaO/SiO₂의 값이 0.4 이상일 때 조재제를 인위적으로 추가했을 가능성이 있는 것으로 판단하게 되는데(Kim, 2014; Choi, 2015), Table 3의 노 내 생성 슬래 그들의 CaO/SiO₂의 값을 살펴보았을 때, 모두 0.4 이하로

나타남을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 조재제를 사용하여 조업하지 않았을 가능성을 보여주며, 실제로 본 연구의 대상 실험은 마사토만을 사용한 조업으로 분석 결과와 일치함을 보여준다. 즉, 첨가제로 황토나 마사토를 사용했을 경우 CaO함량만으로는 조재제 첨가여부를 판단하기

어려움을 반증하는 것이며, 성분 간 비율로서 해석하는 것이 오류를 줄일 수 있는 해석 방법이라고 판단된다.

3.3. 이변량 비교 분석 그래프

앞에서 분석한 성분 간 비율 데이터를 이변량 비교 분석 그래프로 작성하였다. 그래프를 통해 표의 수치만으로는 확인하기 어려운 경향성을 파악하고자 하였으며 Al_2O_3/SiO_2 - CaO/SiO_2 (Figure 4), Al_2O_3/SiO_2 - TiO_2/SiO_2 (Figure 5), 그리고 CaO/SiO_2 - TiO_2/SiO_2 (Figure 6) 비교 분석 그래프를 작성하였다.

Figure 4는 Al_2O_3/SiO_2 - CaO/SiO_2 비교 분석 그래프로 A는 광석, B는 점토와 마사토의 분석 지점들이다. 반응용 광석, 노 내 중앙, 노 바닥, 송풍관 역류, 배재구 수습 슬래그들은 A를 중심으로 C군을 형성하고 있으며 송풍관편 슬래그들과 노벽 슬래그1은 B 가까이 D군을 이루고 있다. 각 군집의 기준이 되는 점토와 광석이 슬래그 출처 성분인

라 할 수 있으며, 광석을 기준으로 한 그룹을 광석 슬래그군, 점토와 마사토를 중심으로 한 그룹을 점토 슬래그군이라 할 수 있다. 반응용 광석, 노 내 중앙, 노 바닥, 송풍관 역류, 배재구 수습 슬래그들이 이루는 C군이 광석 슬래그군이 되며 송풍관편 슬래그들과 노벽 슬래그1이 이루는 D군이 점토 슬래그군이다.

송풍관편(슬래그)과 노벽 슬래그2의 일부 포인트는 C, D군 둘 다에 속하거나 두 그룹 사이에 위치해 있음을 알 수 있는데 이는 송풍관과 노벽의 점토 성분과 노 내의 광석 성분이 맞는 곳에서 형성된 슬래그들이기 때문에 나타나는 현상으로 어느 군에 가까이 있는가에 따라 어떤 성분에서 더 많이 기인하였는가를 추정해볼 수 있다. 즉, 그래프는 성분 간 비율 비교 분석을 통해 슬래그가 기인한 출처를 추측해 볼 수 있음을 보여준다.

Figure 5는 Al_2O_3/SiO_2 - TiO_2/SiO_2 비교 분석 그래프이다. Al_2O_3/SiO_2 - CaO/SiO_2 비교 분석 그래프(Figure 4)와 마찬가지로 두 그룹이 형성되어 있음을 알 수 있다. A는 광

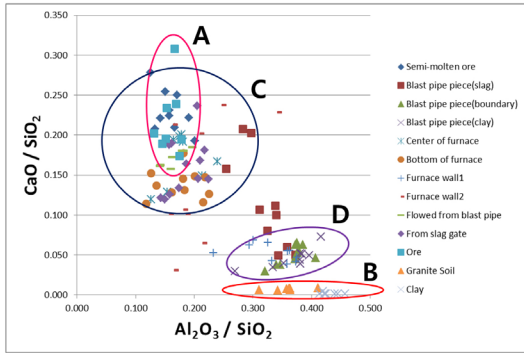


Figure 4. Bivariate graph of Al_2O_3/SiO_2 - CaO/SiO_2 .

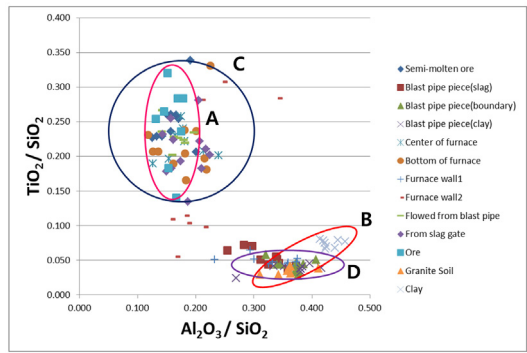


Figure 5. Bivariate graph of Al_2O_3/SiO_2 - TiO_2/SiO_2 .

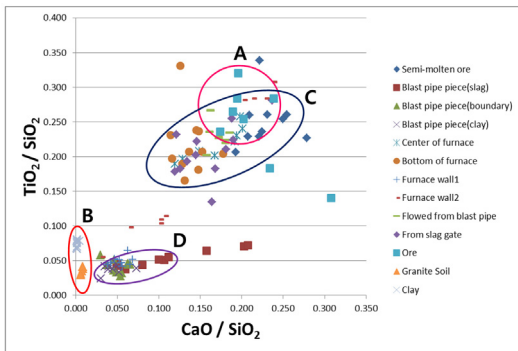


Figure 6. Bivariate graph of CaO/SiO_2 - TiO_2/SiO_2 .

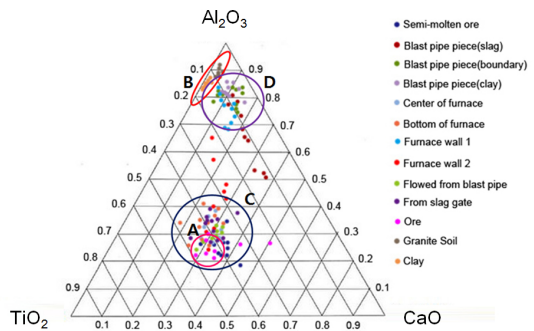


Figure 7. Triangular coordinate of ratio between components (divided by SiO_2).

석, B는 점토와 마사토이며 A를 중심으로 한 C군이 광석 슬래그군이고 B쪽에 형성된 D군이 점토 슬래그군이다. D군에는 $Al_2O_3/SiO_2-CaO/SiO_2$ 비교 분석 그래프(Figure 4)와 같이 송풍관과 노벽 슬래그1이 속해있으며, 반응용 광석, 노 내 중앙, 노 바다, 송풍관 역류, 배재구 수습 슬래그들은 모두 C군에 위치해 있다. 송풍관편(슬래그)과 노벽 슬래그2의 일부 포인트들이 C군과 D군의 경계 부분에 위치해 있는데 이는 점토 성분과 광석 성분 둘 다의 영향을 받아 형성된 슬래그로 해석할 수 있다.

Figure 6은 $CaO/SiO_2-TiO_2/SiO_2$ 비교 분석 그래프로 기준 광석 A에 가까이 위치하는 C군이 광석 슬래그군, 점토와 마사토 B에 가까이 위치하는 D군이 점토 슬래그군이다. 송풍관과 노벽 슬래그1은 D군에 속해있고, 반응용 광석, 노 내 중앙, 노 바다, 송풍관 역류, 배재구 수습 슬래그들은 C군에 속해 있다. 군집에 위치하지 않은 노벽 슬래그2와 송풍관편(슬래그)은 광석과 점토 두 성분 모두에서 기인한 것이며 근접한 군집 성분에서 더 많은 영향을 받은 것으로 해석할 수 있다.

3.4. 삼각좌표 비교 분석 그래프

세 변량을 종합적으로 파악하기 위해서 Figure 7과 같이 삼각좌표로 작성한 결과 이변량 비교 분석 그래프와 마찬가지로 군집이 형성되는 것을 알 수 있다. 삼각좌표 위쪽 점토와 마사토 B쪽에 형성되어있는 그룹이 점토 슬래그군인 D군이고, 송풍관편 슬래그와 노벽 슬래그1이 포함되어 있다. 삼각좌표 아래쪽 광석 A를 중심으로 형성된 그룹은 광석 슬래그군인 C군이며 반응용 광석, 노 중앙, 노 바다, 송풍관 역류, 배재구 수습 슬래그들이 속해있음을 확인할 수 있다. 노벽 슬래그2와 송풍관편(슬래그)의 일부는 군집 사이영역에 속해있고 어느 군집에 가까운지에 따라 슬래그 형성 시에 노벽 또는 송풍관의 점토 성분의 영향을 많이 받았는지 노 내 광석의 영향을 많이 받았는지 그 출처를 추측해 볼 수 있다.

이변량, 삼각좌표 비교 분석 그래프를 통해서 표의 수치로는 확인하기 어려운 슬래그들의 경향성을 파악할 수 있었다. 모든 그래프 상에서 기준시료 성분을 토대로 점토와 광석 슬래그군, 두 그룹이 형성됨을 알 수 있었고 어떤 그룹에 가까이 위치하는가에 따라 슬래그가 형성될 때 어떤 성분에서 더 많이 기인하는가를 추정할 수 있었다. 즉, 슬래그 주성분에 대한 각 성분 간의 비율이 일정한 경향성을 띠고 있으며 이로써 경향성에 따른 슬래그의 분류가 가능

하고 슬래그가 기인한 성분의 출처를 추정해 볼 수 있음을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 제철로 복원실험을 통해 생성된 제련 슬래그를 대상으로 성분을 분석하였으며, 슬래그의 주성분에 대한 다른 성분들의 상대적인 비율을 비교하여 경향성을 파악함으로써 슬래그가 기인된 출처 성분을 연구하고자 하였다. 분석과 고찰을 통해 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

첫째, 복원실험에 사용된 광석 및 점토, 첨가제와 실험 결과 생성된 제련 슬래그에서 공통적으로 TiO_2 함량이 1.6% 이상으로 높게 분석되는 것이 확인되었으며, 복원실험이 철광석 제련이었던 것을 고려했을 때 단순 TiO_2 함량으로만 제련 광석종류를 판단하는 것은 오류를 범할 수 있다.

둘째, 모든 슬래그 분석 결과에서 CaO/SiO_2 값이 0.4 이하로 나타나는 것과 실제 복원실험에서 조재제를 사용하지 않았다는 것이 일치하는 것으로 보아 CaO 함량만으로 인위적인 조재제 첨가 판단은 오류를 범할 수 있음을 알 수 있다.

따라서 위의 두 결론을 통해 고대 제철기술을 밝히기 위해 슬래그를 해석하는데 있어 단순 함량으로 해석하는 방법보다 성분 간 비율을 종합적으로 파악하는 방법이 더욱 정확한 데이터 해석 방법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

셋째, 분석 결과 데이터를 이변량 비교 분석 그래프와 삼각좌표 비교 분석 그래프로 작성한 결과 기준시료의 주요 성분에 따라 일정한 경향성을 띠며 그룹을 형성하는 것이 확인되었다. 본 논고에서는 기준시료인 광석을 중심으로 형성된 그룹은 광석슬래그군으로, 점토와 마사토를 중심으로 형성된 그룹은 점토 슬래그군이라 명명하였으며, 점토 슬래그군은 Al_2O_3 와 SiO_2 함량이 높았고, 광석 슬래그군은 CaO 와 TiO_2 함량이 높았다. 또한 그래프 상에서 군집에 속하지 못하는 경우 어느 군집에 더 근접한가에 따라 슬래그가 기인한 성분의 추정이 가능한 것으로 판단된다. 그러나 슬래그란 여러 출처에서 나온 성분들이 혼합되어 생성되는 것이므로 본 연구가 기준으로 했던 광석, 점토, 첨가제 외에 연료나 조재제 등을 추후에 함께 고찰할 필요가 있을 것으로 판단된다.

슬래그 분석 데이터의 해석 방법에 대한 연구는 단순 함량으로 논하던 기존 연구에 대하여 새로운 방향을 모색하고자 진행한 것이며, 고대 제철기술을 연구하는데 있어 더

욱 정확한 데이터 처리방법을 제시하였다는 것에 의의가 있다. 성분 간 비율을 통해 제련공정을 해석하고, 경향성을 파악함으로써 슬래그가 기인한 물질이 어떤 것인지 추론하는 것은 슬래그 해석에 있어 기초 데이터를 구축하는데 사용될 수 있고, 기존의 연구와는 다른 방향의 연구내용을 얻을 수 있을 것으로 예상된다. 다만 한정적인 시료 및 사례, 슬래그가 가지는 복합성으로 인해 연구에 한계가 있으나 고대 제철기술을 밝히기 위한 노력이 계속해서 이뤄지고 있으므로 본 연구가 제시한 해석 방법과 고찰이 기반이 되어 실험 결과를 추가하고 데이터를 축적해 나간다면 더욱 신뢰도 높은 연구 성과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 논문은 2014년도 정부 재원으로 한국연구재단의 학제 간 융합연구 지원 사업(NRF-2014S1A5B6037922)의 일환으로 이루어졌으며, 감사드립니다.

REFERENCES

- Choi, J.H., 2015, A study on manufacture technology and operation temperature of iron artifacts from Geumgwan Gaya : Centering on iron artifacts from the Daeseongdong. Master's thesis, Yong-In University, Yongin. (in Korean with English abstract)
- Choi, J.T., Jang, E.J. and Park, J.S., 2001, Iron technologies of the Three Kingdoms period in Korea. Seoul National University Museum, Seoul. (in Korean)
- Blakelock, E., Martinon-Torres, M., Veldhuijzen, H.A. and Young, T., 2009, Slag inclusions in iron objects and the quest for provenance: An experiment and a case study. *Journal of Archaeological Science*, 36, 1745-1757.
- Jungwon National Research Institute of Cultural Heritage, 2014, Natural science analysis report of iron artifacts excavated from the iron production site of Jungwon area. 8. (in Korean)
- Kim, S.K., 2014, A study on iron manufacturing and technology through analysis reports of iron artifacts in the Baekje area. *Journal of Conservation Science*, 30(4), 335-343. (in Korean with English abstract)
- Kim, S.K., 2015, A study on the possibility of continuous operation through traditional smelting experiment. 2015 Jungwon National Research Institute of Cultural Heritage Conference, Chungju, September 14, 12-27. (in Korean)
- Yoon, D.S., 1986, On the slag produced in early iron metallurgy. *Journal of the National Academy of Sciences; Natural Science*, 25, 197-226. (in Korean with English abstract)
- Yu, J.E., 2002, Ancient iron technologies as observed in the microstructure of iron artifacts excavated from fortresses in Gyeonggi-do province. Ph. D. dissertation, Dankook University, Yongin, 20. (in Korean with English abstract)