

전기로 폐 MgO-C계 내화재의 제강원료 활용 가능성 연구

§왕제필* · 김행구** · 고민석*** · 이동현***

*국립부경대학교 금속공학과, 마린융합디자인공학과(첨단소재공학), **한국해양대학교 에너지자원공학과,
***국립부경대학교 마린융합디자인공학과(첨단소재공학)

Basic Study on the Recycling of a Waste MgO-C Refractory Material as a Flux for EAF Steelmaking

§Jei-Pil Wang*, Hang-Goo Kim**, Min-Seok Go*** and Dong-Hun Lee***

*Department of Metallurgical Engineering, Department of Marine Convergence Design Engineering
(Advanced Materials Engineering), Pukyong National University

**Major of Energy & Resources Engineering, Korea Maritime&Ocean University

***Department of Marine Convergence Design Engineering(Advanced Materials Engineering),
Pukyong National University

요 약

현재 EAF 전기로 제강공정에서는 슬래그 중의 MgO 함량을 증가시켜 탈황능과 내화재 수명을 개선시키고자 돌로마이트(백운석) 용제(Flux)를 첨가하고 있으며, 또한 에너지효율을 증가시키기 위해 용강 중에 가탄재를 투입하고 있다. 이러한 견지에서 폐 MgO-C계 내화재를 재활용하는 연구를 진행하였다. 폐 MgO-C계 내화재는 MgO(>70%)과 탄소(>10%)를 대량 함유하고 있기 때문이다. 이런 목적으로 제강 슬래그를 대상으로 해서 폐 MgO-C계 내화재를 첨가하는 효과를 실험하였고 그 결과를 경소 돌로마이트를 첨가한 결과와 비교하여 폐 MgO-C계 내화재 재활용 효과를 평가하였다. 폐 MgO-C계 내화재를 사용해서 얻은 결과가 슬래그 염기도 측면에서 경소 돌로마이트를 사용한 결과와 유사하게 나타남으로써 기존 경소 돌로마이트 대체 가능성을 확인하였다. 특히 폐 MgO-C계 내화재를 사용한 경우에는, 폐 내화재에 다량 함유된 흑연 성분에 의한 슬래그 중의 철산화물과의 환원반응으로 CO가스가 발생하여 생긴 크고 작은 기포들이 관찰되었으며 이로써 슬래그 Foaming 효과를 기대할 수 있는 것으로 확인하였다.

주제어 : 경소 돌로마이트, 제강, 슬래그, MgO, 내화재

Abstract

In EAF steelmaking industries, MgO content in slag increases due to the addition of dolomite flux to protect refractory lines of furnaces and improve the desulfurization capability of slag. In addition, coal powder is injected in the molten steel bath to increase the energy efficiency of the process. In this regard, the utilization of waste MgO-C refractory material as a flux was examined because it has high amounts of MgO (>70%) and graphite carbon (>10%). A series of experiments were carried out using industrial EAF slag with added light burnt dolomite and waste MgO refractory material from a Korean steel company. The results for the addition of the two fluxes were similar in terms of slag basicity; therefore, it is expected that waste MgO-C

· Received : November 26, 2021 · Revised : December 17, 2021 · Accepted : December 20, 2021

§ Corresponding Author : Jei-Pil Wang (E-mail : jpwang@pknu.ac.kr)

Department of Metallurgical Engineering, Pukyong National University, Yongso-ro 45, Nam-gu, Busan 48513, Korea

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

refractory material can successfully replace dolomite flux. In addition, when the waste MgO-C refractory material was added as flux, slag foaming phenomenon was demonstrated because of the reaction between the graphite from the refractory material and iron oxides in the slag.

Key words : Light burnt dolomite, Steel making, Slag, MgO, Refractory materials

1. 서 론

내화재는 무기 재료로서 광석이나 금속을 녹이는 용융로와 고온 상태로 유지하거나 운반하는 용기 및 저장고 내부에 사용되므로, 고온이나 급격한 열충격에 잘 견딜 수 있고 기계적 강도가 높아 가스나 용융체 등과 접촉할 때 서로 반응하지 않고 침식되거나 마모되지 않는 특성을 가지도록 제조되고 있다. 내화재는 산성 내화재(SiO_2 계, ZrO_2 계), 중성 내화재(Al_2O_3 계, Cr_2O_3 계) 그리고 염기성 내화재(MgO계, CaO계)로 분류되며, 제조하고자 하는 물질의 조성에 맞게 내화 재질을 선택하여 사용한다. 전로, 전기로, Ladle로 등을 사용하는 제강공정에는 슬래그의 고염기성을 고려하여 MgO계 재질의 고내부식성 내화재를 주로 사용하고 있으며, Table 1에 MgO계 내화재 종류와 그 조성범위를 나타내었다.

따라서 이런 제강공정에서 발생하는 폐 내화재는 MgO계가 많다. MgO계 내화재는 다른 내화재에 비해 재활용율이 다소 높은 편이지만, MgO 및 Cr_2O_3 함량에 따라 재활용이 제한되며, MgO 함량은 재생품의 순도, Cr_2O_3 함량은 환경처리와 관계된다¹⁾. MgO계 내화재 중에서도

MgO Magnesia계 내화재의 재활용은 여러 분야에서 가장 많이 이루어지고 있으나, MgO-C계 내화재 재활용은 MgO-C계 내화재 재생이나 노부수 내화재 원료로 일부 대체원료로 사용되고 있고^{2,3)}, 다른 MgO계 내화재와 분리되지 않은 채로 수거되어 대부분 재활용되지 못하고 폐기되고 있는 실정이다.

제강공정에서는 MgO계의 내화재 수명을 개선시키고 용강의 탈황 능력을 개선하기 위해 MgO 성분을 높게 유지하고 있으며, 이를 위해 돌로마이트(백운석)를 첨가하고 있으며^{4,9)}, 에너지효율을 증가시키기 위해 용강 중에 가탄재를 투입하고 있다^{6,7)}. MgO-C계 내화재에는 Table 1에서 알 수 있는 바와 같이 70%이상의 MgO와 15% 내외의 탄소 성분을 함유 있어, 이에 본 연구에서는 상기 3가지 효과를 경제적으로 동시에 달성하는 방안으로 폐 MgO-C계 내화재를 EAF 전기로 제강공정에서의 Flux로 재활용하는 기초연구를 진행하였다. 제강슬래그 Flux로 재활용하는 이전 연구가 있지만, 현장에서의 이루어진 백석 함량이 높은 직접환원철(Direct reduction iron, DRI) 원료로하는 연구^{10,11)}로 Scrap을 원료로 하는 일반 전기로 공정과는 거리가 있다.

2. 실험방법

EAF 제강 슬래그를 대상으로 해서 폐 MgO-C계 내화재를 첨가하는 효과를 실험하였고 그 결과를 경소 돌로마이트를 첨가한 결과와 비교하여 폐 MgO-C계 내화재 재활용 효과를 평가하였다. 실험에 사용된 시료인 전기로 슬래그, 경소 돌로마이트, 그리고 폐 MgO-C 내화재는 국내 H 철강기업에서 공급받았으며, 그 조성은 Table 2와 같다. 실험 조건으로서 슬래그 100g에 MgO-C계 내화재 혹은 경소 돌로마이트를 10g 첨가한 후 혼합하여 흑연 혹은 마그네시아 도가니에 장입하고 수직 관상로((주)세진 영테크, 최고사용온도 1650°C)에서 용융 반응시켰다. 용융 반응 시 승온 속도는 5°C/min이었고, 1,600°C에서 1시

Table 1. Classification of magnesite refractories

	Classification	Composition ranges
1	MgO	92%<MgO<97%, SiO ₂ +Al ₂ O ₃ <5%
2	MgO-C	70%<MgO<87%, SiO ₂ +Al ₂ O ₃ <10% 5%<C<20%
3	MgO-Al ₂ O ₃ spinel	80%<MgO<93%, 5%<Al ₂ O ₃ <9% SiO ₂ <3%
4	MgO-Al ₂ O ₃ -C	65%<MgO<70%, 6%<Al ₂ O ₃ <10% 8%<C<10%
5	MgO-Cr ₂ O ₃ -C	65%<MgO<80%, 7%<Cr ₂ O ₃ <18% SiO ₂ +Al ₂ O ₃ <10%

Table 2. Chemical compositions of EAF slag, light burnt dolomite, and waste MgO-C refractory used in this study (carbon content is extra one, and other contents are on the no carbon basis)

wt%	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	FeO	C
EAF slag	22.67	22.09	11.64	12.93	5.99	19.40	0.038
Light burnt dolomite	62.15	1.92	33.97	0.95	0.08	0.51	8.48
Waste MgO-C refractory	5.92	8.06	72.78	10.40	0.11	1.67	15.3

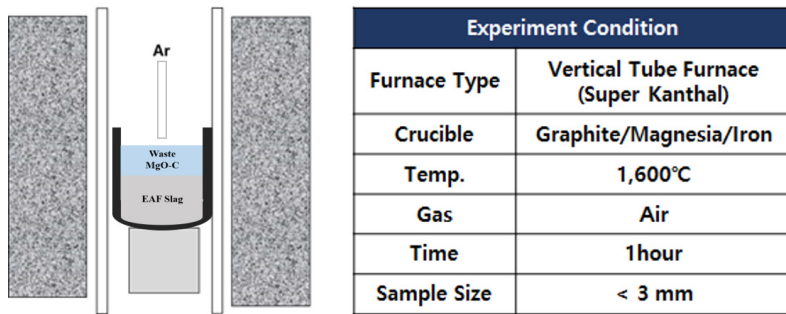


Fig. 1. Experimental conditions used in this study.

간 용융 반응을 유지하였다. 실험 결과 분석은 XRD(X-ray Diffractometer, D/Max 2500, RIGAKU), XRF(X-ray Fluorescence, XRF-1800, SHIMADZU), 및 C/S 분석기 (Carbon/Sulfur analysis, CS600, LECO사의 CS600)를 사용하여 수행하였다. 본 연구에 사용된 실험 조건은 Fig. 1과 같다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 실제로 EAF 제강공장에서 발생된 제강 슬래그를 대상으로 해서 폐 MgO-C계 내화재를 첨가하는 효과를 실험하고, 그 경우를 경소 돌로마이트를 첨가한 경우와 비교하였다. 도가니 선정에 어려움이 있었으나, 본 연구는 기초 연구로 우선 Graphite 도가니와 Magnesia 도가니 두가지를 사용하여 두 Flux 첨가 실험을 각각 수행한 후, 슬래그 조성 변화와 슬래그 중 철산화물 환원회수 등의 관점에서 폐 MgO-C 내화물의 경소 돌로마이트 대체 가능성을 분석하였다.

3.1. Graphite 포화 실험

Graphite 도가니를 사용하여 얻은 결과를 Figs. 2~4 그리고 Table 3 및 Table 4에 나타내었다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 경소 돌로마이트 및 폐 MgO-C 내화물을 Flux로

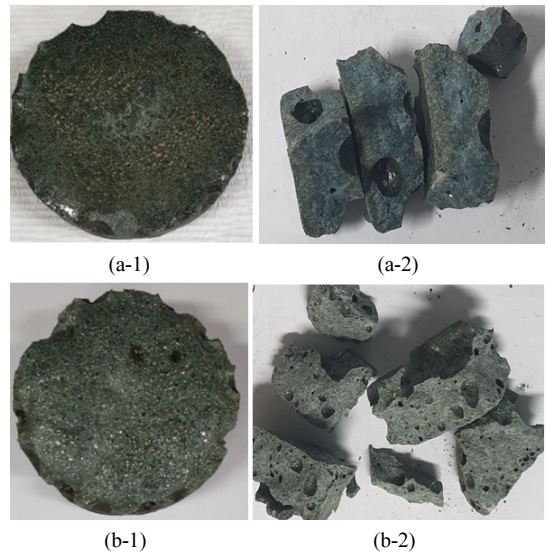


Fig. 2. Photographs of slag parts in the use of a graphite crucible: (a) addition of a light burnt dolomite (before and after crushing) (b) addition of a waste MgO-C refractory material (before and after crushing).

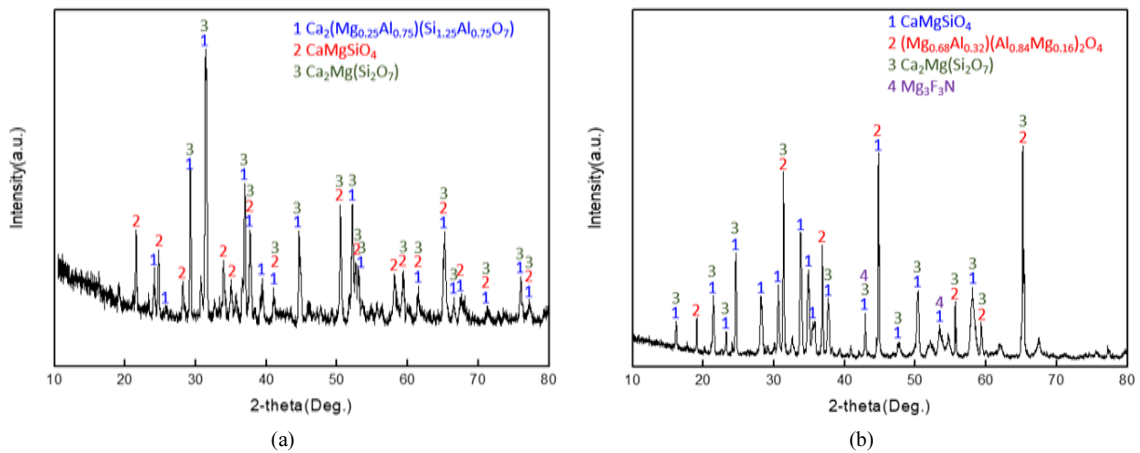
사용한 실험 모두 슬래그 내부에 기포가 형성되어 있음을 알 수 있는데, 이는 흑연 도가니를 사용했기 때문에 슬래그 중에 함유된 철산화물과 흑연 도가니가 반응해서 CO 가스가 발생했기 때문이다. 하지만 경소 돌로마이트를 첨가했

Table 3. Chemical compositions of EAF slag parts in the use of a graphite crucible, after additions of a light burnt dolomite and a waste MgO-C refractory material

wt%	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	FeO	B2
EAF slag	22.67	22.09	11.64	12.93	5.99	19.40	1.03
Addition of a light burnt dolomite	30.77	26.29	16.74	18.90	4.05	0.50	1.17
Addition of a waste MgO-C refractory material	29.07	27.96	21.51	15.21	4.11	0.17	1.04

Table 4. Chemical compositions of recovered metal parts in the use of a magnesia crucible, after additions of a light burnt dolomite and a waste MgO-C refractory material

wt%	Fe	C	Mn	Cr	Al	Si
Addition of a light burnt dolomite	65.4	8.4	12.7	11.0	1.29	0.60
Addition of a waste MgO-C refractory material	65.3	7.7	13.3	11.2	0.89	0.88

**Fig. 3.** XRD results of slag parts in the use of a graphite crucible: (a) addition of a light burnt dolomite (b) addition of a waste MgO-C refractory material.

을 때보다 폐 MgO-C 내화물을 첨가한 경우가 슬래그 내부에 크고 작은 기포들이 내부 전체에 많이 분포되어 있음을 알 수 있다. 이 내부 기포 대부분은 폐 MgO-C 내화물에 균일하게 분포된 흑연성 탄소 성분에 의한 것으로 판단되며, 폐 MgO-C 내화재 물질을 첨가함으로써 Slag-foaming 현상을 기대할 수 있고 또한 이로써 에너지 저감 효율도 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 3에서는 응고 후 XRD 분석 결과를 나타내었는데, CaO 성분 차이가 있는 두 Flux를 첨가하므로 생성된 두 슬래그 내의 CaO, MgO, SiO₂, Al₂O₃ 등의 비율이 달라져 응고과정에서 석출된 상들이 달라졌을 것으로 판단되지만 별 특이한 사항은 없었다. Table 3에는 두 Flux 첨가 후 생성된 각 슬래그 조성을 나타내었는데, 두 경우다 슬래

그내 철산화물 함량이 크게 줄었으며, 경소 돌로마이트를 첨가했을 때보다 폐 MgO-C 내화재 물질을 첨가한 경우가 슬래그내 MgO 성분이 크게 증가한 것으로 나타났다. 철산화물 함량이 크게 줄어 든 것은 흑연 도가니를 사용한 결과이고, 폐 MgO-C 내화재 물질을 첨가한 경우가 슬래그내 MgO 성분이 크게 증가한 것은 폐 MgO-C 내화재 물질에는 CaO 성분이 적어 B2 염기도(CaO/SiO₂)가 줄어들었기 때문으로 판단된다. 본 연구에서 폐 MgO-C 내화재 물질을 첨가한 경우에는 슬래그 중에 MgO 함량이 다른 연구결과¹²⁻¹⁴⁾에 비해 비교적 높은 값으로 나타나 MgO 포화도를 넘을 수도 있을 것으로 예상되지만, XRD 분석 상에는 MgO 독립상이 없어 XRD 분석한계를 생각해도 MgO 첨가 효과는 존재하는 것으로 예측된다.

Fig. 4와 Fig. 5에서 알 수 있듯이 두 경우다 슬래그내의 산화철의 환원 반응으로 금속부분이 얻어졌으며, 이 금속부분은 철이나 망간 탄화물로 이루어져 있는 것으로 나타났다. Table 4에 나타나낸 바와 같이 슬래그 부분과는 달리 금속부분은 두 경우 큰 차이가 없는 것을 알 수 있었다.

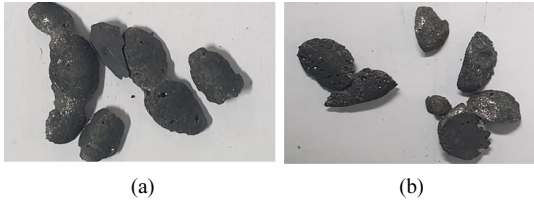


Fig. 4. Photographs of metal part in the use of a graphite crucible: (a) addition of a light burnt dolomite (b) addition of a waste MgO-C refractory material.

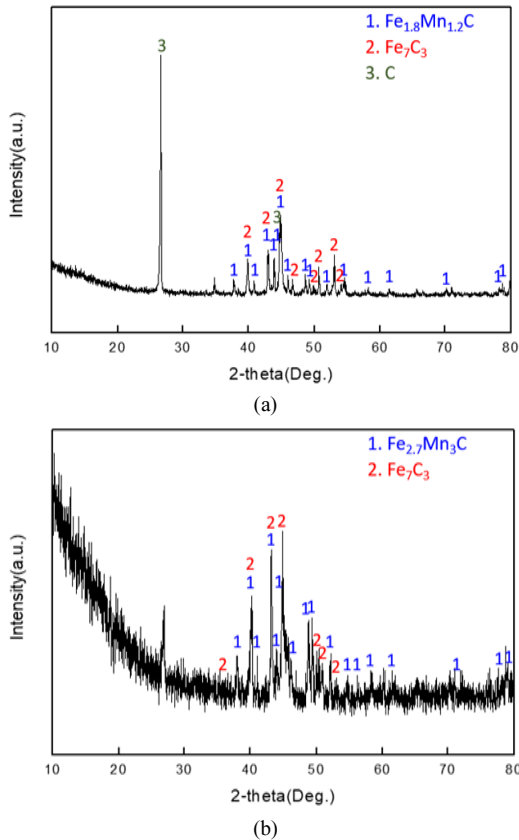


Fig. 5. XRD results of metal parts in the use of a magnesia crucible: (a) addition of a light burnt dolomite (b) addition of waste MgO-C refractory material.

3.2. Magnesia 포화 실험

Magnesia 도가니를 사용하여 얻은 결과를 Fig. 6에서 Fig. 7 그리고 Table 5에 나타내었다. Graphite 도가니를 사용한 결과와 비교해 볼 때 다소 다른 결과를 얻었다.

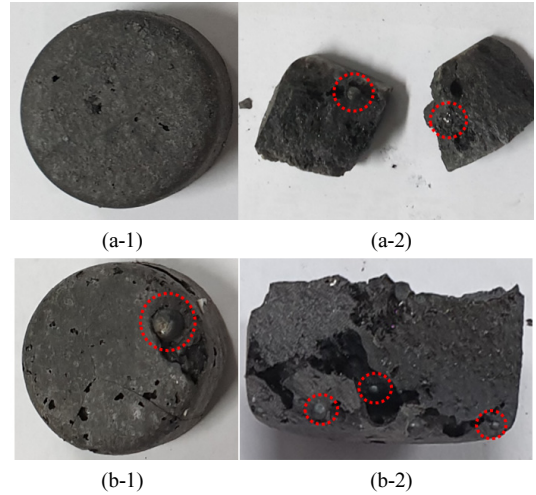


Fig. 6. Photographs of slag parts in the use of a magnesia crucible: (a) addition of a light burnt dolomite (before and after crushing) (b) addition of a waste MgO-C refractory material (before and after crushing).

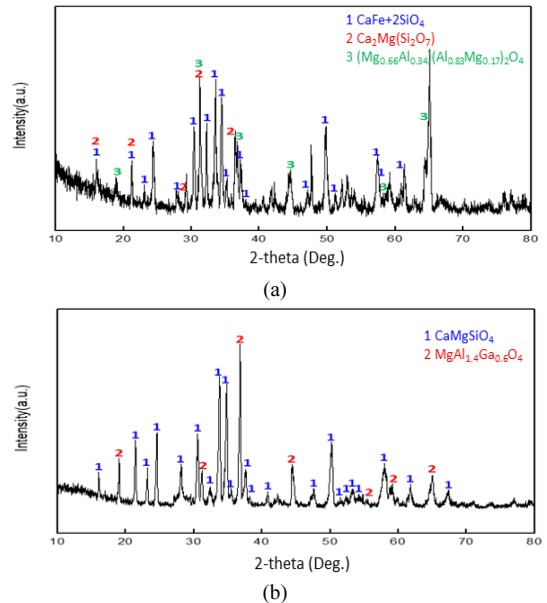


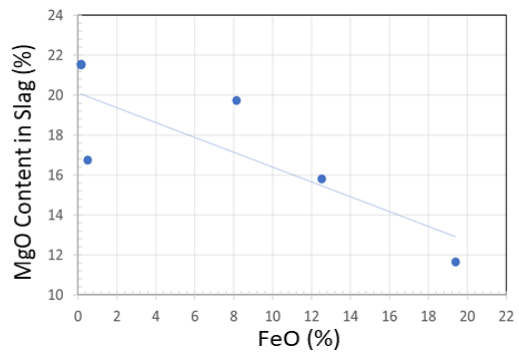
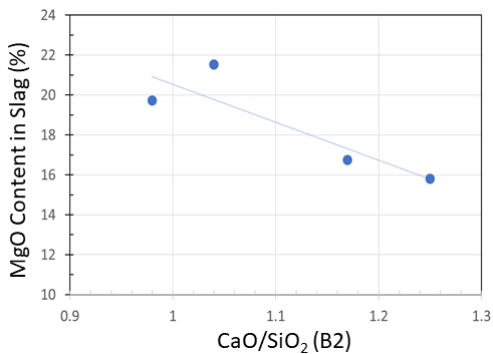
Fig. 7. XRD results of slag parts in the use of a magnesia crucible: (a) addition of a light burnt dolomite (b) addition of waste MgO-C refractory material.

Table 5. Chemical compositions of EAF slag parts in the use of a magnesia crucible, after additions of a light burnt dolomite and a waste MgO-C refractory material

wt%	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	FeO	B2
EAF slag	22.67	22.09	11.64	12.93	5.99	19.40	1.03
Addition of a light burnt dolomite	25.75	20.62	15.80	14.14	6.09	12.53	1.25
Addition of a waste MgO-C refractory material	22.86	23.36	19.72	13.97	7.04	8.15	0.98

Table 6. Comparison of slag basicity between the two addition cases of a light burnt dolomite and a waste MgO-C refractory material (*C=CaO, S=SiO₂, M=MgO, A=Al₂O₃)

	EAF Slag	Graphite crucible		Magnesia crucible		Requirement for good performance ¹⁵⁾
		Light burnt dolomite	Waste MgO -C refractory	Light burnt dolomite	Waste MgO -C refractory	
C/S	1.03	1.17	1.04	1.25	0.98	1.0 - 1.4
(C+M)/S	1.55	1.81	1.81	2.01	1.82	> 1.4
(C+M)/(S+A)	0.98	1.05	1.17	1.19	1.14	1.0 - 1.3

**Fig. 8.** Effects of the basicity(B2) and the FeO content on the MgO content in the slag.

FeO와 MnO 성분의 환원이 많이 일어나지 않아 슬래그에 남은 양이 많았고, 이로 인해 상대적으로 CaO, SiO₂, Al₂O₃ 등의 함량은 증가한 것으로 나타났다. 슬래그내 MgO 함량은 다소 감소한 것으로 나타났는데 이는 Graphite 도가니를 사용한 경우보다 슬래그내 FeO 함량이 많이 남아 있기 때문으로 판단된다. 한편 경소 돌로마이트를 첨가한 경우와 폐 MgO-C 내화재 물질을 첨가한 두 경우를 비교했을 때는 대체로 Graphite 도가니를 사용한 경우에서 얻었던 경향이 그대로 나타남을 알 수 있다. Magnesia 도가니 사용 경우에도 용융 환원된 금속상이 나타났는데 그 회수율이 적고 함량이 적어, Fig. 6에 적색 파선으로 표시한 바와 같이 작은 구형 상으로 슬래그내 널리 분포되어 나타났다. 그리고 경소 돌로마이트를 첨가한 경우에는 슬래그 내부에 기포가 거의 관찰되지 않았으나, 폐 MgO-C 내화

재 물질을 첨가한 경우에는 슬래그 내부에 큰 기포들이 관찰되어 이로써, 폐 MgO-C 내화재 물질을 첨가함으로써 Slag Foaming 현상을 기대할 수 있음을 다시한번 확인할 수 있었다.

3.3. 고찰

Graphite와 Magnesia 두 도가니를 사용하여 얻은 결과를 염기도 관점에서 정리하여 Table 6에 나타내었다. 본 연구에서 폐 MgO-C 내화재 물질을 첨가한 경우에는 슬래그 중에 MgO 함량이 다른 연구결과¹²⁻¹⁴⁾에 비해 비교적 높은 값으로 나타나 MgO 포화도를 넘을 수도 있을 것으로 예상되지만, 그럼에도 불구하고 정상조업에 해당하는 염기도를 유지하고 있다. 또한 Fig. 8에서 나타낸 바와 같이 슬래그 중 CaO/SiO₂(=B2) 염기도나 FeO 함량이 증가

함에 따라 슬래그 MgO 함량이 줄어드는 경향이 나타났으며, 이러한 경향은 다른 문헌^{11,16,17)}에서도 보고되어 있다. FeO 경우는 용점이 낮은 물질인데도 FeO 함량이 증가함에 따라 MgO 용해도가 감소하는 것으로 나타나, 용점보다는 염기성 산화물(CaO+FeO+MgO) 총량 증가 영향으로 인해 MgO 용해도가 감소하는 것으로 판단된다.

폐 MgO-C계 내화재를 사용해서 얻은 결과가 경소 돌로마이트를 사용한 결과와 유사하게 나타남으로써 기존 경소 돌로마이트 대체 가능성을 확인할 수 있으며, 특히 폐 MgO-C계 내화재를 사용한 경우에는 슬래그 내부에 크고 작은 기포들이 관찰되어, 폐 내화재에 다량 함유된 흑연성 탄소 성분에 의한 Slag Foaming 현상을 기대할 수 있고 이로써 전력 에너지 저감에도 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 폐 MgO-C계 내화재를 대량 재활용하는 한 방안으로 EAF 전기로 제강공정에서의 Flux로 재활용하는 기초연구를 진행하였다. 이를 위해 EAF 제강 슬래그를 대상으로 해서 폐 MgO-C계 내화재를 첨가하는 효과를 실험하였고 그 결과를 경소돌로마이트를 첨가한 결과와 비교하여 폐 MgO-C계 내화재 재활용 효과를 평가하였다. 폐 MgO-C계 내화재를 사용해서 얻은 결과가 경소 돌로마이트를 사용한 결과와 유사하게 나타남으로써 기존 돌로마이트 대체 가능성을 확인하였으며, 특히 폐 MgO-C계 내화재를 사용한 경우에는 슬래그 내부에 크고 작은 기포들이 슬래그 내부 전체에 관찰되어, 폐 내화재에 다량 함유된 흑연성 탄소 성분에 의한 Slag Foaming 현상을 기대할 수 있는 것으로 나타났다. 현재는 MgO-C계 내화재의 활용도가 크지 않아 다른 MgO계 내화재와 분리되지 않은 채로 수거되어, 대부분 재활용되지 못하고 폐기되고 있는 실정이지만, 제강용 Flux로서의 대량 재활용성이 입증되면 효율적인 분리수거를 통해 그 재활용이 더욱더 가속화될 수 있을 것으로 기대되므로, 이를 위해 좀더 정밀한 연구가 계획되어 연속해서 진행될 예정이다.

감사의 글

이 연구는 2021년도 산업통상자원부 및 산업기술평가

관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20016138).

References

- Liesbeth Horckmans, Peter Nielsen, Philippe Dierckx, et al., 2019 : Recycling of refractory bricks used in basic steel-making : A review, Resources, Conservation & Recycling, 140, pp.297-304.
- Kun Mok Shon, Jang Su Kim, Si Wan Kim, et al., 2002 : Recycling of waste refractory materials for steel, Ceramist, 5(5), pp.35-42.
- POSCO Chem-Tech, 2011. KR. KR20110124661A.
- Mohammed Tayeb, Andre N. Assis, Seetharaman Sridhar, et al., 2015 : MgO Solubility in Steelmaking Slags, Metallurgical and Materials Transactions B 46(3), pp.1112-1114.
- Ping Wang, Qing-min Meng, Hong-ming Long, et al., 2006 : Influence of Basicity and MgO on Fluidity and Desulfurization Ability of High Aluminum Slag, High Temp. Mater. Proc., 35(7), pp.669-675.
- K. S. Kwong., J. P. Bennett., 2000 : Balancing MgO for Foamy Slag and Refractory Protection, D.L. Schroeder & Associates, Twenty Second Annual Symposium, Process Systems for Electric Furnace Steelmaking, Orlando, Florida, 9-10 November 2000.
- Deisi Vieira, Rodolfo Arnaldo Montecinos de Almeida, Wagner Viana Bielefeldt, et al., 2016 : Slag Evaluation to Reduce Energy Consumption and EAF Electrical Instability, Materials Research, 19(5), pp.1127-1131.
- Young Hwan Kim, Jung-Min Yoo, Hyung-Sic Um, 2019 : Effect of Carbon Materials on the Slag Foaming in EAF Process, Journal of the Korean Institute of Resources Recycling, 28(2), pp.40-45.
- A. P. Luz, T. A. Ávila, P. Bonadia, et al., 2011 : Slag Foaming: Fundamentals, Experimental Evaluation and Application in the Steelmaking Industry, Refractories Worldforum, 3(2), pp.91-98.
- Kyei-Sing Kwong and James P. Bennett, 2002 : Recycling practices of spent MgO-C refractories, Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, 1(2), pp.69-78.
- A.N. Conejo, R.G. Lule, F. Lopez, et al., 2006 : Recycling MgO-C refractory in Electric Arc Furnaces, Resources Conservation and Recycling, 49(1), pp.14-31.
- Rodolfo Montecinos Almeida, Deisi Vieira, W. V. Bielefeldt, et al., 2017 : MgO Saturation Analysis of CaO-SiO₂-FeO-MgO-Al₂O₃ Slag System, Materials Research, 21(1).
- Marcus Kirschen, 2020 : Visualization of Slag Data for Efficient Monitoring and Improvement of Steelmaking Slag Operation in Electric Arc Furnaces, with a Focus on MgO Saturation, Metals – Open Access Metallurgy Journal,

- 11(1), pp.17.
14. Marcus Kirschen, In-Ho Jung and Gernot Hackl, 2020 : Phase Equilibrium Diagram for Electric Arc Furnace Slag Optimization in High Alloyed Chromium Stainless Steel-making, *Metals*, 10(6), pp.826.
15. Alena Pribulova, Peter Futas, Jozef Petrik, et al., 2018 : Comparison of cupola furnace and blast furnace slags with respect to possibilities of their utilization, *Arch. Metall. Mater.*, 63(4), pp.1865-1873.
16. James Bennett, Kyei-Sing Kwong, 2010 : Thermodynamic Studies of MgO Saturated EAF Slag, *Ironmaking & Steelmaking*, 37(7), pp.529-535.
17. Fruehan, R J., Li, Y., Brabie, L., 2003 : Dissolution of magnesite and dolomite in simulated EAF slags, *ISSTECH-Conference Proceedings*, pp.799-812, Iron & Steel Society International Technology Conference and Exposition, Indianapolis, IN., USA, 2003.

왕제필

- 미국 University of Utah 석/박사
 - 현재 국립부경대학교 금속공학과 교수
 - 당 학회지 제25권 6호 참조
-

김행구

- 한양대학교 금속공학과 학사
 - 한양대학교 금속공학과 석사
 - 유타대학교 금속공학과 박사
 - 해양대학교 해양건설-에너지자원공학과 연구교수
-

고민석

- 국립부경대학교 신소재시스템공학과 학사
 - 현재 국립부경대학교 마린융합디자인공학과 (첨단소재공학) 석사과정
-

이동현

- 국립부경대학교 신소재시스템공학과 학사
 - 현재 국립부경대학교 마린융합디자인공학과 (첨단소재공학) 석사과정
-