

제강슬래그의 재활용

김 태 희

안동대학교 공과대학 신소재공학부
thkim@andong.ac.kr

1. 서 론

모든 분야에서 발생하는 폐기물은 그 자체가 원료 물질을 포함하고 에너지를 함유하고 있기 때문에 환경문제와 더불어 제품의 원가에 직접 영향을 미치게 된다. 폐기물 문제에 대한 해결책으로는 원천적으로 폐기물의 발생을 극소화하는 방법과 배출된 폐기물을 적절히 처리하는 방법이 있는데 대개는 후자에 의존하고 있다. 폐기물 처리방법에 있어 국토의 면적이 넓은 나라에서는 발생하는 폐기물을 매립하는 것이 가장 손쉬운 방법이다. 그러나 우리 나라와 같이 국토가 좁은 경우에는 폐기물의 발생을 근본적으로 줄이고 발생된 폐기물의 재활용 비율을 높이는 적극적인 기술을 개발하는 것이 필수적이다.¹⁻³⁾

철강산업은 그 제조공정의 특성상 다량의 원료와 에너지를 사용할 뿐 만 아니라 다양한 종류의 부산물과 폐기물을 필연적으로 발생시키고 있다. 즉 제철공정은 원료, 제선, 제강, 압연 등 복잡한 공정의 연결생산체제를 거치면서 수많은 종류의 부산물 및 폐기물을 다량으로 발생시키고 있다. 그 중에서 가장 많은 양을 차지하는 부산물이 고로슬래그와 제강슬래그로 구분되는 철강슬래그이다. 철강은 모든 산업의 기반이 되므로 어느 나라나 철강산업의 성장을 꾀하고 다수의 철강회사가 설립되어 경쟁을 하게 되면 내수 뿐 아니라 수출 면에서도 품질과 가격에서 경쟁력이 약한 회사는 어려움을 겪게 될 것은 분명하다. 이 뿐 아니라 환경문제가 대단히 큰 관심사가 되면서 폐기물을 다량 배출하는 제품은 규제를 받게 되어 더욱 경쟁력을 잃게 된다.

철강산업은 규모가 커서 슬래그도 대량으로 발생하

므로 다른 산업의 원료로 재활용되거나 토목건설용 또는 토양에 응용되지 않으면 그 처리가 문제가 된다. 따라서 철강 제조방법이 근본적으로 달라지지 않는 한 현재로서는 슬래그의 발생은 피할 수 없으며 특히 고로슬래그에 비하여 아직 재활용도가 낮은 제강슬래그의 재활용에 관한 기술개발이 필요하다.⁴⁻⁶⁾ 이미 약 2000년 전 로마에서는 철을 제조하는 과정에서 발생한 슬래그를 파쇄하여 도로건설에 재활용하였으며⁷⁾ 우리 정부에서도 철강공업 부산물의 자원화를 정밀화학공업 분야의 핵심 기술로 도출한 바 있다.⁸⁾

2. 철강슬래그의 발생과 특성

철강슬래그는 철광석, 코크스, 석회석 등을 원료로 하여 고로에서 선철을 만들어 내는 제선공정에서 발생하는 고로슬래그, 전로에서 선철을 강으로 제조하는 제강 공정 중에 발생하는 전로슬래그, 고철을 주원료로 사용하여 강을 제조하는 전기로에서 발생하는 전기로슬래그로 크게 나눌 수 있다. Fig. 1에 고로슬래그와 제강슬래그의 배출과정을 간단하게 나타내었다.⁹⁾

고로슬래그는 선철의 제조과정에서 사용되는 석회석

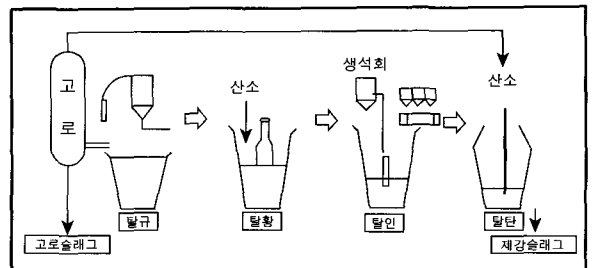


Fig. 1. 철강슬래그의 발생과정.

이 철광석 원료, 코크스의 연소재 그리고 각종 산화물질과 반응하여 생성되며 약 1500°C의 고온에서 용융된 상태로 고로에서부터 배출된다. POSCO에서 발생하는 고로슬래그의 양은 연간 약 8천200톤이다. 이 고로슬래그는 냉각방법 및 용도에 따라 수재 및 괴재 슬래그로 구분된다. 수재슬래그는 용융상태의 고로슬래그를 고압의 냉각수와 공기를 분사하여 급속 냉각시킬 때 생성된다. 용융슬래그가 고압의 냉각수에 의해 모래와 흡사한 모양의 유리질 입자상태로 파쇄된 후 탈수조로 유입되어 탈수과정을 거쳐 제품으로 출하된다. 또한 용융슬래그를 고로에 인접한 적당한 장소에 방치시켜 약간의 냉각수를 살포하고 자연냉각이 되도록 방치하면 슬래그의 고형화가 일어나 고강도의 슬래그가 생성되는데 이를 괴재슬래그라 한다. 방치된 슬래그가 충분히 냉각되면 슬래그를 파내어 일정한 크기로 파쇄하여 활용한다.

전로슬래그는 제강용 용선의 예비처리 후 배출하거나 용선의 취련 후 배출한다. 용광로에서 출선된 용선에는 탄소, 규소, 인, 황 등의 원소들이 함유되어 있는데 용강을 만들기 위해서는 이러한 원소들을 제거하여야 한다. 따라서 제강공정에서 용선 위에 산소를 취입하면서 이들을 제거하는데 이 때 규소, 인, 황이 쉽게 제거되도록 하기 위해서 생석회를 장입한다. 장입된 생석회는 이 원소들의 산화물과 반응하여 슬래그가 된다. 배출된 제강슬래그는 고로 괴재슬래그와 유사하게 냉각장에서 수냉 또는 공냉 처리하여 괴상의 슬래그를 만든다. 제강슬래그는 바위와 같은 형상을 하고 있으며 일반적으로 20% 이상의 철분을 포함하고 있기 때문에 고로슬래그에 비해 높은 비중을 가지고 있다.^{5,10,11)}

Table 1에 POSCO의 전로슬래그 발생 및 재활용 현황을 나타내었다. 공정개선 등을 통하여 용선이나 용강의 단위생산량당 철강슬래그의 발생량은 지속적으로 감소할 것으로 예상되나 철강의 용도가 다양하게 개발되고 수요가 증가할 것이므로 제강슬래그의 발생량은 더욱 증가할 것이다.¹²⁾ 따라서 제강슬래그의 재활용기술을 개발하기 위해 더욱 많은 노력을 기울여야 할 것이다.

전기로에서는 전로와는 달리 주원료로 고철을 사용하며 외부에서 열을 가하여 원료를 용해하여 정련한다. 전기로의 특징은 로 내의 분위기를 산화성, 환원성으로의

자유로운 변화가 가능하며 이 때 각각의 경우에 발생되는 슬래그가 산화슬래그와 환원슬래그이다.

철강슬래그는 CaO와 SiO₂가 주성분이며 이 외에 고로슬래그의 경우는 알루미늄과 마그네시아를, 전로슬래그는 산화철, 마그네시아, 산화망간 등을 함유하고 있다. 이러한 성분은 지구의 지각을 구성하는 주성분이다. 또한 제철 원료인 철광석 중에는 Cu, Cr 등의 중금속 성분은 거의 함유되어 있지 않은 것이 사용되며 이들 성분은 고로에서 광석으로부터 대부분은 환원되어 금속으로 변해 선철의 미량성분으로 존재하고 슬래그 중에 함유되지 않으므로 환경상 문제가 되는 중금속 등의 유해물질은 용출되지 않는다. 철강슬래그를 사용한 곳에 빗물이나 지하수가 통과하면 CaO 성분에 의해 투과수가 알칼리성을 나타내는 경우가 있다. 이 알칼리 농도는 에이징(aging)을 하였다고 해도 그다지 변화하지 않으며 처음에는 10~11.5 정도의 값을 나타낸다. 그러나 우리나라의 토양은 일반적으로 산성이며 알칼리성 물질에 대해서는 큰 흡착력을 갖고 있으므로 주변 환경에 대해 크게 나쁜 영향은 없다고 볼 수 있다. 또한 철강슬래그 용출수의 pH는 시멘트 또는 석회안정처리 용출수의 pH와 같거나 그보다 약간 낮은 값이라 할 수 있다.⁵⁾

이와 같이 철강슬래그는 재활용이 가능한 유효자원을 다량 함유하고 있으므로 귀중한 재활용 자원이라는 면에서 철강산업뿐만 아니라 국가적인 차원에서도 관심사로 대두되고 있다.

3. 철강슬래그의 재활용

철강슬래그의 일반적인 재활용 분야를 Table 2에 슬래그 종류별로 나타내었다. 우리나라의 고로슬래그는 POSCO에서 연간 약 820만톤이 발생하며 시멘트 원료 및 도로용 골재 등 용도가 다양하고, 시장성이 있어 리사이클링에는 별 어려움이 없으나 1998년과 같이 건설경기 등이 부진할 때에는 시멘트 생산량의 감축으로 잉여량에 대한 단순 도로용 골재로의 재활용에는 한계를 가지고 있다.

고로슬래그에 함유되어 있는 약 1% 정도의 황은 불안정한 황화칼슘으로 존재하고 있어 이를 제거하기 위해

Table 1. POSCO의 제강슬래그 발생 및 재활용 현황

(천톤)

		1995	1997	1998	1999	2000	2001
Production		3,502	4,089	4,613	4,266	4,589	4,433
Recycling	Fe-Source	859	1,077	1,037	1,108	1,124	1,264
	Cement	566	450	572	609	700	494
	Civil work	2,077	2,562	3,004	2,549	2,765	2,675

골재로 사용하기 전에 에이징 처리를 하면 대기의 수분과 공기에 의하여 황산칼슘 및 탄산칼슘으로 안정화된다. 안정화를 위한 에이징 과정에서 황화칼슘의 일부는 물에 의해 Ca^{++} 와 OH^- 으로 되기 때문에 약알칼리성을 띠게 되지만 일반적으로 토양을 통과하면 흙의 염기치 환성에 의해 중성으로 된다. 토양의 산성화 방지를 위해 개발된 규산질 비료는 고로슬래그로 제조되며 정부에서는 이 규산질 비료의 사용을 권장하고 있어 사용량이 증대되고 있는 추세이다.¹²⁾

수재슬래그는 독특한 수경성을 가지고 있어 고로시멘트의 원료나 일반 포틀랜드시멘트의 첨가재로 주로 이용되고 있으며 수재슬래그의 또 다른 특성을 이용하면 도로용 기층재나 뒷채움재, 콘크리트용 세골재, 토양개량제 등 그 활용범위를 넓히는 것이 가능하다.¹¹⁾

괴재슬래그는 도로건설과 같이 콘크리트가 사용되는 모든 형태의 작업에 골재로써 광범위하게 이용되고 있으며 일부는 비료나 암면제조용으로도 활용되고 있다.

괴재슬래그의 또 다른 용도로는 레미콘용 골재, 철도용 노반재 등이 있으며 괴재슬래그의 재활용도를 확대하기 위한 많은 노력이 진행되고 있다.¹³⁾ 특히 괴재슬래그는 물리적 특성에서 안정성은 약간 떨어지나 천연모래보다는 우수하다. 비중도 전로슬래그 보다는 낮으나 모래의 비중에 가깝다. 따라서 향후에는 고갈되고 있는 천연모래 대체재로서의 활용이 확대될 것으로 기대된다.¹⁴⁾

전로슬래그 중의 금속철 등 유가자원을 회수하기 위해 파쇄자선 설비를 설치하여 정광분, 분슬래그 등을 회수하고 있으며 이렇게 회수된 물질은 스크랩, 철광석 및 석회석 대용으로 사용된다. 이 과정에서 생기는 5~15mm의 슬래그는 다량의 철성분을 함유하고 있어 시멘트 공장의 철원으로 공급하고 있다. 한편 전로슬래그의 마모 및 압축에 대한 저항특성 때문에 도로용 미끄럼 방지재로 사용이 증가 추세에 있다.¹⁵⁾ 그러나 전로슬래그는 free CaO에 의해 그 자신이 가지고 있는 팽창붕괴의 불안정성 때문에 콘크리트용 골재로 사용하지 못하여 재활용의 한계를 보여 주었다. 최근에는 전로슬래그의 활용기술이 개발됨에 따라 에이징 과정을 거친 후 골재로써 활용이 증가되고 있다.^{16,17)}

전기로슬래그의 경우는 90% 이상의 재활용률을 나타내고 있다. 그러나 이들 대부분이 토목용이나 성토용으로 활용되었다. 전기로슬래그의 물리적 특성은 비중이 천연 모래보다는 크고 안정성이나 흡수율은 가장 양호한 것으로 나타나 있다. 또한 팽창률은 10% 이하로 전로슬래그에 비해 팽창붕괴성은 아주 낮아 대부분이 토목성토용으로 재활용되고 있다. 최근에는 오니고화제와 같은 새로운 재활용 기술이 연구되고 있다.¹⁸⁾

최근에는 제강슬래그가 Si, Ca, Mg, P 등 성분을 가지고 있으며 토양의 pH를 증대시켜줌으로써 작물의 발아율, 뿌리무게, 잎길이 및 잎폭 등을 증가시켜 성장촉진 효과를 주는 것으로 연구결과 밝혀지고 있다.^{19,20)}

Table 3에 전로슬래그의 일반적인 화학 조성을 나타

Table 2. 철강슬래그의 재활용 분야

슬래그의 종류		재활용 분야
철강슬래그	고로슬래그	<ul style="list-style-type: none"> · 도로용(기층, 보조기층, 필라) · 철도노상용 · 콘크리트용 골재 · 항만재료 · 지반개량제 · 규산석회비료 · 암면
	수재슬래그	<ul style="list-style-type: none"> · 시멘트 클링커 원료 · 콘크리트 혼화제 · 경량기포 콘크리트 원료 · 지반개량제 · 노상, 보조기층 안정처리 · 항만재료 · 토목용재
제강슬래그	전로슬래그	<ul style="list-style-type: none"> · 도로 노반재 · 아스팔트 콘크리트 · 시멘트 클링커 원료
	전기로슬래그	<ul style="list-style-type: none"> · 항만공사 뒷채움재, 복도용, Sand mat · 비료 및 토양개량제 · 적조방지제 · 석회질비료

내었으며 Fig. 2에 전로슬래그의 XRD 분석결과를 나타내었다. 화학성분과 구성광물에서 알 수 있듯이 제강슬래그는 고온의 열처리 과정을 거쳐 대부분 산화물로 존재하므로 상당히 안정된 물질이다. 제강슬래그는 표면의 요철이 많고 상당한 강도도 유지하므로 흡착에 의해 폐수처리 여재로 이용할 수 있으며²¹⁾ 제강슬래그 자체가 알칼리성이므로 산성의 공업 폐수에 대한 중화가 가능하다. 그리고 보고된 바에 의하면 중금속 제거 기능도 가지고 있다.^{22,23)} 제강슬래그를 구조용으로 활용하는데 장애가 되는 free-CaO 성분은 폐수 중의 인 성분과 반응하여 불용성 화합물인 hydroxyapatite를 형성하여 탈인 효과가 있다.^{21,24)} 또한 이와 같은 영양염류의 제거외에 적조원인생물의 억제, 저질 해양퇴적토의 개량 효과 등을 기대할 수 있어서 제강슬래그를 수질개선에 이용할 수 있는 소재로 개발하는 것은 대량 재활용할 수 있는 효과적인 방법이라고 생각한다.

제강슬래그를 효과적으로 활용하기 위해서는 용도에 맞게 형태를 제어하는 것도 중요하다. 이를 위해 전로에서 배출되는 용융상태의 전로슬래그에 고속의 공기를 불어 구형의 입자로 가공하는 기술이 개발되었다. 제강슬래그의 입도를 제어하는 기존의 방법은 용융상태의 제강슬래그를 적당한 장소에 쏟아 놓고 식은 뒤에 기계

적으로 파쇄하는 것이다. 제강슬래그는 강도가 크고 비중이 3.5 이상이므로 파쇄와 운반에 비용이 대단히 많이 든다. 그러나 풍쇄의 경우는 불어넣는 공기의 속도에 따라 구형의 제강슬래그 입도를 제어할 수 있을 뿐 아니라 안정화 효과도 얻을 수 있다. 이렇게 얻은 구형의 풍쇄 제강슬래그는 폐수처리용 여과재로 활용할 수 있으며 분말 형태의 풍쇄 제강슬래그는 염색폐수 등의 응집침전제로 활용되고 있다. 폐수처리에 활용되고 난 후 발생하는 슬러지 등 2차 폐기물도 제강슬래그를 첨가하여 고화처리하여 안정화할 수 있으며 그 고화체는 위생매립지의 인공 복토재로 활용할 수 있는 물성을 가진다.²⁵⁾

4. 결 론

철강슬래그의 발생과 재활용에 대하여 전로슬래그를 중심으로 재활용기술 현황과 연구 방향 등을 알아보았다. 제강슬래그의 재활용을 위해 다양한 기술개발이 진행되어 재활용율이 많이 높아졌으나 아직은 매립의 형태로 처리되는 양이 절반을 넘는다.

제강슬래그가 효과적으로 재활용되기 위해서는 새로운 재활용 용도와 기술의 개발로 폐기물의 위상을 벗어나 안전한 환경제품으로 인정을 받는 것이 필요하다. 그러나 무엇보다도 중요한 것은 우리의 인식이다. 아직은 주로 철강회사에서 재활용의 필요성을 인식하고 기술개발에 앞장서고 있지만 자원의 절약과 환경보전을 위하여 철강회사뿐 아니라 정부와 다른 모든 회사, 일반소비자, 특히 세라미스트들의 관심을 기대한다.

참고 문헌

1. 정용, 옥치상, 인간과 환경, 지구문화사(1996).
2. 박원훈, "청정기술의 국내외 개발동향과 한국의 전략", 첨단환경기술, 2(12) 2-10(1994).
3. K.S. Doh, K.W. Lee, Y.T. Park, and S.H. Lee, "A Study on the Resources Potential of Industrial Waste in Korea", J. Korea Solid Wastes Engin. Soc., 5(2) 145-156(1988).

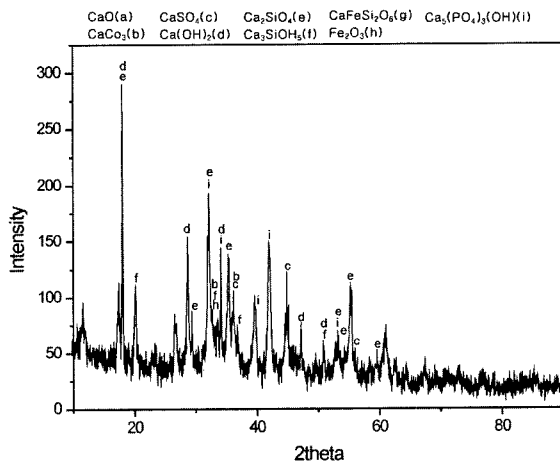



Fig. 2. 제강슬래그의 XRD 분석 결과.

Table 3. 전로슬래그의 화학 조성

(wt%)								
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	T-Fe	MgO	MnO	P ₂ O ₅	S	TiO ₂
40.8	12.61	2.57	22.81	7.16	4.05	1.7	0.029	1.16



4. 한국자원리사이클링학회, “리사이클링백서”, 문지사 (1999).
5. 김명환, 이박석, “전로슬래그의 이용현황”, 한국자원리사이클링학회 건설재료로서의 전로슬래그의 활용 심포지엄, 1997. 8. 26., 서울.
6. 한국자원리사이클링학회, “일본의 리사이클링 산업”, 문지사(1998).
7. Michael B. Bever, “Encyclopedia of Materials Science and Engineering”, Pergamon Press(1986).
8. 한국화학연구소, “정밀화학 차세대신도 기능소재 중 간진입점 조사연구”, 과학기술처(1996).
9. http://www.infosteel.net/tech_steelmaking.htm
10. 대한토목학회, “제강슬래그를 사용한 아스팔트포장 설계 · 시공지침” (1985).
11. 대한토목학회, “복합슬래그기층 및 보조기층 설계 · 시공지침” (1987).
12. 김창자, “철강슬래그를 이용한 규산질 비료의 제조방법 및 그 장치”, 대한민국특허 10-0253902(2000).
13. 강대일, “고로슬래그를 이용한 고강도 골재의 제조방법”, 대한민국 특허출원 93-4493(1993).
14. 변태봉, 김형석, 한기현, “슬래그 모래 제조기술과 활용개발”, RIST 연구논문, 13(3) 258-270.
15. 김석환, “제강슬래그를 이용한 미끄럼방지 시설용 골재의 제조방법”, 대한민국특허 특0165629(1998).
16. 김형석, 한기현, “전로slag 신속 aging 기술”, 한국자원리사이클링학회 건설재료로서의 전로슬래그의 활용 심포지엄, 1997. 8. 26., 서울.
17. 손진근, 김대영, 이재영, 이훈하, “스테인레스 제강 슬래그의 골재 활용연구”, RIST 연구논문, 13(3) 245-252(1999).
18. (주)제철세라믹, “전기로 슬래그로 오토화재 기술 개발에 관한 연구”, 산업자원부(1999).
19. 오세민, “제강슬래그를 주원료로 이용한 토양개량제 개발”, 포항산업과학연구원(1996).
20. C. I. Lee, “Basic Oxygen Furnace Slag as a Liming Agent for Paddy and Upland Field Soils”, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 7(1) 50-56 (1998).
21. T. H. Kim and K. B.Park, “Swine Wastewater Treatment Properties of Steel-making Slag”, Clean Technology, 6(2) 85-92(2000).
22. D.H. Choi, S.J. Maeng, D.C. Seo and D.H. Lee, “The Effect of Alkali Leaching from Steelmaking Slag on Heavy Metal Retainment”, J. Korea Solid Wastes Eng. Soc., 12(4) pp.429-436(1995).
23. 박사문, 김현순, 김상식, 고광섭, “제강슬래그를 이용한 산폐수 중화처리방법”, 대한민국특허 특1997-0006143(1997).
24. 김응호, 임수빈, 황환국, “제강전로슬래그에 의한 하 · 폐수중 인의 제거방법”, 대한민국 특허출원 95-8220(1995).
25. 김태희, “수처리 후 PS Ball의 최종처리를 위한 기술”, 한국자원재생공사(2002).

	<p style="text-align: center;">김 태 희</p> <ul style="list-style-type: none"> · 1983년 연세대학교 요업공학과 공학사 · 1985년 연세대학교 요업공학과 공학석사 · 1990년 연세대학교 요업공학과 공학박사 · 1990년 안동대학교 공과대학 신소재공학부 -현재 교수
--	---