

제강슬래그의 특성과 재활용 현황

Current State of Recycling and Properties of Steel Slag



김원기 Won-Ki, Kim
아세아시멘트 기술영업팀장
E-mail : kimwk16@asiacement.co.kr

1. 서론

제철소에서 선철(iron)과 강(steel)을 제조할 때 산출되는 부산물인 철강슬래그는 암석과 유사한 조성의 비금속 물질로서 고로슬래그와 제강슬래그로 나눌 수 있다. 고로슬래그는 고로에서 철광석을 용융, 환원 공정을 거쳐 선철을 제조할 때 나오는 부산물로 급랭 과정을 거친 수쇄슬래그는 콘크리트용 혼화재, 고로슬래그 시멘트용 등으로 이미 널리 활용되고 있다. 제강슬래그는 고로에서 생산된 용융선철로 조강을 제조하는 전로 공정의 부산물인 전로슬래그와 전기로에서 고철(scrap)을 녹여서 조강을 제조할 때 부산물인 전기로슬래그로 크게 나눌 수 있다. 이러한 슬래그들은 철강 산업의 특성상 엄선된 원재료의 사용, 일관된 공정조건의 유지, 제조공정 관리 등을 거쳐 산출되므로 부산물 중에서는 비교적 일정한 품질과 특성을 가지고 있다. 따라서 시멘트 제조용이나 골재 등 건설재료, 비료 등의 농업용 재료, 기타 다양한 용도로 활용할 수 있다. 본고에서는 이미 충분히 활용되고 있는 고로슬래그를 제외하고 현재도 재활용의 여지가 많이 남아있는 제강슬래그를 중심으로 슬래그의 특성과 재활용 확산을 위한 방안을 국내외 자료를 참고로 하여 정리하였다.

2. 제강슬래그의 특성

제강슬래그(steel making slag)는 철에서 강을 만들기 위해 쇳물에 녹아있는 탄소, 규소성분 등을 제거하는 공정에서 발생하며 전로슬래그와 전기로슬래그로 구분하는데 제강슬래그에는 CaO(free-CaO)가 포함되어 있으므로, 이것이 제강슬래그의 활용에 큰 변수가 되고 있다. 따라서 콘크리트 골재 등으로 이용하기 위해서는 수개월 정도 야적하거나 뜨거운 증기를 이용한 숙성(aging) 과정을 거치는 것이 필요하다. 제강슬래그는 통상 냉각장(야적장)에서 수냉 또는 공기 중에서 냉각하여 과상의 슬래그가 만들어 진다. 제강슬래그는 고로슬래그에 비교하여 철 함유량이 높아 밀도 값이 크다.

2.1 전로슬래그(convert slag)

전로슬래그는 고로에서 나온 용융선철(용선)을 전로에서 처리하는 과정에서 나오는 슬래그이다. 전로에서는 고온의 용융선철에 산소랜스로 고압의 산소를 불어넣어 선철에 포함된 탄소, 규소, 인 등을 산화시켜 제거하는데 이때 일부 철 성분도 함께 산화가 된다. 전로슬래그는 이 과정에서 용제로 추가된 생석회(CaO), 석회석(CaCO₃) 및 dolomite(MgCO₃·CaCO₃) 등과 규산질 원소가 결합하여 생성된 것이다¹⁾.

생성된 액상의 슬래그는 철과의 비중차로 상부에 뜨게 되며 이를 별도의 래들이나 도가니에 담아서 분리시킨 후 야적장에서 서냉하여 결정화가 되게 된다. 전로 슬래그의 밀도가 높은 것은 제강공정에서 철의 일부가 산화되었기 때문이다. 전로슬래그가 골재로서의 잘 활용되지 못하는 것은 전로슬래그에 포함된 free CaO 때문이며, 이 free CaO의 생성은 전로슬래그 생성 자체의 화학성분과 직접적인 관계가 있다^{2),3)}.

전로슬래그의 발생량은 원료 배합비에 따라 용강 1톤당 150~180kg 정도로 고로슬래그가 약 300kg 정도 발생되는데 비해서는 그 양이 적은 편이다²⁾.

2.2 전기로슬래그(electric arc furnace slag)

전기로는 아크열을 열원으로 하여 스크랩(고철)을 용해하여 조강을 정련한다. 특징은 전기로의 내의 분위기를 산화성이나 환원성으로 변화가 가능하다는 점이며, 이때 각각의 경우에 발생되는 슬래그가 산화슬래그, 환원슬래그이다. 산화 슬래그는 스크랩을 아크열을 열원으로 하여 용융할 때, 용강 중에 산소를 불어

넣어 산화시킨 불순물이 용제로 투입한 생석회와 결합하여 생성된다. 생성불순물이 용강으로 다시 혼입되는 것을 방지하기 위하여 생성된 슬래그를 환원정련에 앞서 배출하는데 산화슬래그는 조강 1톤 당 약 120kg~150kg이 산출된다. 산화 슬래그에는 Fe의 일부가 산화되어 슬래그 중에 들어 있기 때문에 보통의 천연 쇄석보다 무거우며 경질이 된다. 냉각시킨 전기로 산화슬래그는 기공이 거의 없는 강하고 치밀한 정방형 결정으로 마모 저항성이 높고 아스팔트와의 친화성이 매우 높다¹⁾. 환원 슬래그는 산화 슬래그를 배출한 용강 중에 산화 과정에서 강제적으로 혼입한 과잉의 산소제거와 탈황을 위하여 환원제로 알루미늄, 코크스 가루를 살포하고 생석회 등의 용제를 투입하여 환원처리하면 용강과 슬래그가 형성된다. 이때 발생하는 환원슬래그는 덩어리 모양과 가루 모양인 것이 있으며 조강 1톤 당 약 50kg이 산출된다^{1),2)}.

3. 제강슬래그의 특성

3.1 제강슬래그의 화학적 특성

1) 화학 조성

일반적으로 제철 슬래그나 제강 슬래그의 주성분은 CaO와 SiO₂로 이루어져 있다. 특히 고로 슬래그에는 Al₂O₃와 MgO가 함유되어 있으며, 전로 슬래그에는 FeO,

[표 1] 슬래그의 일반적인 화학 조성(%)

	고로 슬래그	전로 슬래그	전기로 슬래그		암석 토양	안산암	OPC
			산화슬래그	환원슬래그			
SiO ₂	33.8	13.8	17.7	27.0	59.6	59.6	22.0
CaO	42.0	44.3	26.2	51.0	0.4	5.8	64.2
Al ₂ O ₃	14.4	1.5	12.2	9.0	22.0	17.3	5.5
T-Fe	0.3*	17.5	21.2	1.5	-	3.1*	3.0**
MgO	6.7	6.4	5.3	7.0	0.8	2.8	1.5
S	0.84	0.07	0.09	0.50	0.01	-	2.0***
MnO	0.3	5.3	7.9	1.0	0.1	0.2	-
TiO ₂	1.0	1.5	0.7	0.7	-	0.8	-

*FeO, **Fe₂O₃, ***SO₃

MgO, MnO 등이 함유되어 있다. 이러한 성분들은 지각이나 천연 암석, 광물에서 발견되는 것이다. 따라서, 슬래그의 화학 조성은 침전암이나 포틀랜드 시멘트와 유사하다. 각 슬래그의 화학 조성을 표 1에 나타내었다⁴⁾.

2) 광물학적 특성

고로슬래그는 Melilite(Ca₂MgSi₂O₇-Ca₂Al₂SiO₇)나 Merwinite(Ca₃MgSi₂O₉)와 유사한 광물학적 특성을 가지고 있는 반면, 제강슬래그는 Belite(Ca₂SiO₄), Calcium Ferrite(Ca₂Fe₂O₉), Westite((Fe_{1-x}yMg_xMn_y)O₂), free-CaO 등으로 이루어져 있다¹⁾.

3) 물리적 특성

표 2는 슬래그와 천연 암석의 물리적 특성을 비교한 것으로 제강슬래그의 경우에는 철 화합물의 영향으로 밀도 값이 크고 강도나 마모저항성 등이 우수하여 free-CaO의

[표 2] 슬래그와 천연 암석의 물리적 특성

물성	고로슬래그	제강슬래그	현무암	경질사암
밀도(g/cm ³)	2.4	3.0	3.0	2.7
압축강도(MPa)	100	200	300	200
충격값(J/cm ²)	27	17	17	20
마모저항(PSV)	50	57	50	56
흡수율(%)	2	1	<0.5	<0.5
동결융해저항성(%)	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5

[표 3] 제강슬래그(전로+전기로)의 발생량과 재활용 비율 (발생량 : 천톤)

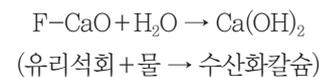
용도	2008		2009		2010	
	발생량	비율(%)	발생량	비율(%)	발생량	비율(%)
성토용 골재	4,256	47.1	27	0.3	8.8	0.1
도로용 골재	2,490	27.5	2,122	27.2	4,671	50.6
공정재사용	1,616	17.9	3,366	43.2	2,488	26.5
기초잡석용	329	3.6	1,689	21.7	1,194	12.9
시멘트원료	62	0.7	16	0.2	17	0.2
비료용	73	0.8	84	1.1	44	0.5
벽돌용 골재	21	0.2	212	2.7	250	2.7
기타	192	2.1	284	3.6	606	6.6
합계	9,039	100.0	7,800	100.0	9,240	100.0

처리만 해결된다면 여러 가지 용도로 활용이 가능할 것으로 기대된다⁴⁾.

3.2 제강슬래그에서 free-CaO의 문제

제강 공정에서 발생하는 슬래그는 일반적으로 야적장에서 상온으로 냉각하여 결정화시킨 다음 분쇄하여 처리하고 있다. 이러한 공정으로 발생하는 제강슬래그에는 미반응 유리석회 CaO(free-CaO 또는 F-CaO)의 함량이 0.1%~20%까지 다양하게 포함되어 있다²⁾.

F-CaO는 물(H₂O)과 반응하여 알칼리 화합물인 Ca(OH)₂를 생성하는데 이때 팽창 반응이 일어나며 비산하게 된다. 따라서 제강슬래그를 그대로 파쇄하여 골재로 사용하는 경우에는 콘크리트의 팽창 균열을 일으키게 된다. 이것을 방지하기 위하여 제강슬래그는 약 1개월~3개월의 야적에 의해 에이징하거나 증기에 의한 촉진 에이징 과정을 거쳐야 한다. 그러나 이러한 공정은 오랜 시간과 넓은 야적장의 요구, 환경문제(침출수, 비산먼지 등) 및 추가적인 문제가 발생한다²⁾.



4. 제강슬래그의 재활용 현황

4.1 제강 슬래그 발생과 재활용 현황

표 3은 2008~2010년 국내 제강슬래그 발생량과 재활용 현황을 나타낸 것이다²⁾. 주로 도로용 골재로 재활용되고 공정 재사용도 상당한 양이다.

4.2 기존의 재활용 기술

전로나 전기로(산화)슬래그를 재활용하는 방식은 발생한 슬래그를 야적장에서 서냉시킨

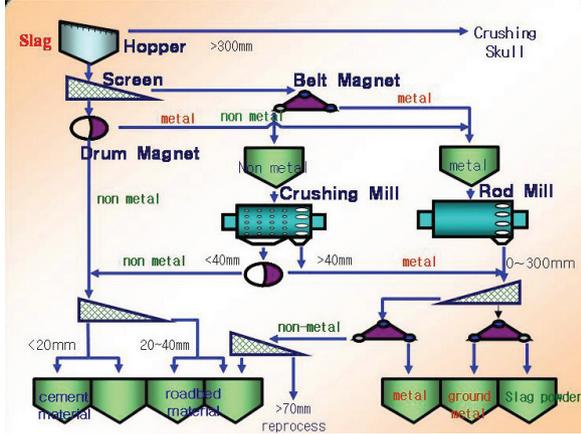


그림 1. 분별해체 제도 도입에 관한 설문조사 결과

후, 숙성, 파쇄, 선별, 숙성을 거쳐 출하하는 방식이다. 이 방식은 넓은 야적장이 필요하고 숙성, 파쇄 공정에서 비산 먼지와 침출수가 발생하므로 이에 대한 대책이 필요하다. 그림 1은 기존의 재활용 처리 공정을 나타낸 모식도이다²⁾.

4.3 새로운 제강슬래그 처리기술

기존 처리방식의 문제점을 해결하기 위한 방법으로 제강슬래그를 직접 처리하는 일종의 개질방식으로 급냉 처리 방식 즉 아토마이징과 BSSF 방식의 처리 기술이 있다²⁾.

1) 아토마이징

아토마이징(풍쇄 급냉 처리)을 통한 슬래그의 처리는 제강슬래그 용융물에 고속으로 바람을 불어넣어 급랭시키는 것으로 구형 입자 형태의 풍쇄 슬래그를 얻을 수 있다. 이 방법의 장점은 급랭 공정에서 에이징이 일어나므로 기존의 처리 방식의 대규모 야적장이 필요없고 비산 먼지나 침출수의 발생이 적어서 친환경적이며 에너지 소비 절감 및 생

[표 5] 급랭 제강슬래그 골재의 물리적 특성

구분	KS 잔골재	KS 부순골재	급랭제강 슬래그
최대크기(mm)	5.0	5.0	2.5
절건비중	2.5 이상	2.5 이상	3.56
흡수율(%)	3.0 이하	3.0 이하	0.42
단위용적중량(kg/m ³)	-	-	2,268
실적율(%)	-	-	63.7
조립율	-	-	3.10
75 μ m 잔입자량(%)	5 이하	5 이하	0.45
안정성(%)	10 이하	10 이하	2.6

산성 향상이 커진다는 것이다. 아토마이징 공정에 의한 급냉 제강슬래그의 물리·화학적 특성을 각각 표 4와 표 5에 나타내었다. 이 처리에 의해 얻은 슬래그 중의 free-CaO는 1% 미만으로 체적 안정성이 높아서 기존의 서냉 제강슬래그의 문제점인 F-CaO, FeO 등에 의한 팽창 붕괴성에 대하여 매우 안정적인 것으로 판단된다. 급랭 제강슬래그는 기존 콘크리트용 골재와 비교하여 입형은 구형에 가깝고, 흡수율은 낮으며, 비중은 높은 특징을 가지고 있다. 일본의 경우에는 급랭 제강슬래그 특성을 활용하여 해양용 소파블록용 골재, 차폐콘크리트용 골재, 강관충전 고유동 콘크리트용 골재로 활용 등 다양한 연구와 시공 사례 등이 발표되었다. 국내에서는 아직 급랭 제강슬래그에 대한 기초적인 연구에 머물러 있는 수준이지만, 향후 연구 활성화를 통하여 국내에서도 콘크리트용 골재로 활용할 수 있을 것으로 기대된다⁵⁾.

2) 급냉처리(BSSF)

BSSF는 고온용융상태의 야금 Slag를 Rotary Drum내에서 처리하는 기술로서, 5rpm 정도로 회전하는 드럼에

[표 4] 아토마이징 처리를 거친 제강슬래그의 화학성분(%)

구분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	기타	free-CaO
전로	12.7	2.2	30.0	40.3	8.0	6.8	0.15
열연전기로	9.4	4.0	44.7	30.7	5.4	6.5	-

[표 6] BSSF 슬래그의 화학 성분

구분	T-Fe	M-Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO
비자착	27.7	2.64	15.4	3.0	32.2	5.6	3.1
자착	59.8	42.6	7.2	1.6	18.1	3.2	1.4

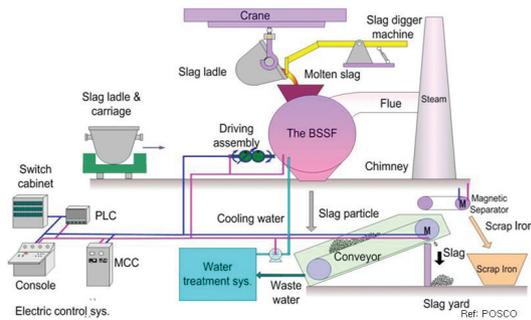


그림 2. BSSF 슬래그 처리 공정

고온의 슬래그를 투입하고 냉각수, 압축공기, 강철구를 이용하여 급속 냉각 및 분쇄하여 배출하는 방식이다. 그림 2는 이러한 처리 기술 공정도를 나타낸 것이다. 이 기술은 중국의 Bao Steel에서 최초로 개발한 기술로 슬래그를 신속하게 처리할 수 있어 야적장이 필요없으며 비산먼지 농도를 크게 감소시킬 수 있다. 현재 국내에는 POSCO 포항제철소에 2기, 광양제철소에 1기가 설치되어 운영중이다. BSSF 슬래그는 배출 후 자력선별 유무에 따라 자착 및 비자착 슬래그로 분류하며 표 6은 각각의 화학성분을 나타낸 것이다. BSSF 슬래그 골재의 물리적 특성은 비중은 3.3~3.5 범위로 일반 골재에 비해 비중이 높으며 입도 상으로는 잔골재와 굵은 골재의 중간 정도로 용도 개발이 과제이다⁶⁾.

4.4 기타 처리 방법

오염된 해저 퇴적물에서 오염물질 용출을 억제하는 복토정화용, 인공어초용, 여과재, 응집재 등으로 제강슬래그의 활용이 연구가 진행되고 있거나 적용중이다²⁾.

5. 결론

우리나라에서는 연간 1,000만톤 내외의 제강슬래그가 배출되고 있으며, 대부분은 도로용 골재나 공정 재투입 등으로 재활용되고 있다. 제강슬래그의 재활용에 있어서 가장 큰 과제인 free CaO에 의한 팽창 및 붕괴 현상은 최근 개발된 아토마이징이나 BSSF 처리 기술 등으로 해결이 가능하지만 이러한 처리 기술로 얻어진 슬래그의 재활용 용도 개발이 과제로 남아있다. 현재에도 다양한 방향으로의 적용을 위한 연구가 진행되고 있어서 향후 제강슬래그의 부가가치가 높은 재활용 확대가 기대되고 있다.

참고문헌

- 1) www.euroslag.org(유럽슬래그협회 홈페이지)
- 2) (사)한국폐기물학회, 철강슬래그 제도 개선 방안 마련 연구, 환경부, 2011. 11.
- 3) 최상원 외3인, 국내외 철강슬래그의 발생 및 이용 현황, 콘크리트학회지, 19(6), 2007.
- 4) www.slg.jp(일본철강슬래그협회 홈페이지)
- 5) 김진만 외 3인, 아토마이징 공정에 의한 급냉 제강슬래그의 특성, 콘크리트학회지, 19, 2007.
- 6) 조봉석, 철강슬래그를 활용한 건설산업용 소재화 기술, 2012년도 (사)한국콘크리트학회 기술강좌, 철강산업 부산물의 콘크리트에의 활용, 2012. 11.