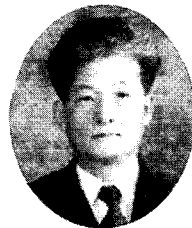


슬래그 골재의 특성

- Properties of Slag Gravel -



서상교*



최정호**

지구 온난화, 천연 자원의 고갈, 처분 장소의 압박 등 환경문제가 사회적인 문제로 대두되고 있다. 특히 건설분야에서 천연산 골재의 부족은 매우 심각한 상황에 있으며, 이를 해결하기 위해 재생골재의 재활용 등 많은 연구가 이루어져 1999년도에는 아스팔트 콘크리트용 재생골재(KS F 2572), 콘크리트용 재생골재(KS F 2573), 도로기층용 재생골재(KS F 2574)에 대한 규격을 제정함으로써 실용화의 단계에까지 이르고 있다.¹⁾ 그러나 제철소의 제강 및 정련 공정상에서 발생하는 철강슬래그를 콘크리트용 골재로서 활용하기 위한 국내의 연구는 몇몇 연구자들에 의해서만 이루어지고 있어 초기 단계에 있다고 할 수 있다.^{2)~5)}

이에 본고에서는 콘크리트용 천연산 골재의 대체 재료로서 각종 철강슬래그의 적극적인 재활용을 도모하기 위해 최근 슬래그를 골재로서 사용하기 위해서 연구한 결과 및 실례를 수록한 문헌을 조사 검토하

여 슬래그 골재의 특성에 대하여 소개하고자 한다.

1. 머리말

철강슬래그 골재라는 것은 철, 니켈, 동 등의 금속을 광석으로부터 추출(製鍊이라고 함)하거나, 금속으로부터 유해한 불순물을 제거(精鍊이라고 함)할 시에 부산물로 발생하는 슬래그를 파쇄한 후 입도 조정하여 콘크리트용 골재로 만든 것이다. 슬래그 골재의 품질은 주 제품인 금속의 종류, 제련 등의 방법, 슬래그의 냉각조건 등에 의해 현저하게 변화한다. 따라서 소요 콘크리트의 품질이 확보될 수 있도록 슬래그의 종류에 따라 사용방법과 배합을 적절하게 선정하는 것이 중요하다.

일본에서는 천연산 골재자원의 고갈과 자원의 유효한 이용이 중요한 과제로 대두되면서 슬래그를 콘크리트용 골재로서 이용하자는 방안이 1974년부터 본격적으로 연구검토가 시작되었다.⁶⁾ 그 결과 1992년에 고로슬래그 곱은골재·잔골재와

Ferro-Nickel-Slag 잔골재의 규격을 포함시켜 JIS 5011(콘크리트용 슬래그 골재)을 개정하여 제정하였다. 이에 부응하여 일본 토목학회 및 일본 건축학회는 각각 슬래그콘크리트의 사용시의 요점과 시공방법에 대한 시공지침서를 출판하였다. 그로 인해 국가 공공기관을 비롯하여 민간 기업에서는 술선 수범하여 구조물에 슬래그콘크리트를 적용하여 슬래그의 이용확대를 도모하고 있다.^{16),17)}

한국은 한국산업규격 KS F 2544(콘크리트용 고로슬래그 골재)에 고로슬래그 골재에 대한 규격을 제정해 놓았고, 콘크리트표준시방서⁷⁾에서도 콘크리트용 골재로서 사용할 수 있도록 하였다. 그러나 제강슬래그(전로슬래그, 전기로슬래그)는 고로슬래그와 비교하여 실리카분과 석회분이 적고 철분이 많지만, 유리석회와 유리마그네슘에 의한 팽창 붕괴성이 우려되므로 콘크리트표준시방서에서는 콘크리트용 골재로서 사용해서는 안된다고 규정하고 있다. 따라서 제강슬래그는 골재로서 재활용되지 못하고 시멘트 원료, 규산질비료 원료, 도

* 정희원, 충북대학교 건축공학과 교수

** 정희원, 충북대학교 건축공학과 박사과정

로 포장의 보조기층재, 매립재 등으로 재 활용되고 있다.

한국산업규격에서는 1997년에 KS F 2535에 “도로용 철강슬래그”에 대한 규격을 제정하고 있다. 슬래그 중에는 아직도 매립·처분되거나 단순히 뒤채움재와 비슷한 용도로 사용되고 있는 것도 있지만, 환경의 보전, 자원의 유효이용 등이 국가적 차원에서 중요성이 증가되고 있는 이때, 슬래그의 유효한 활용은 중요한 과제인 것이다.

2. 슬래그의 종류와 생산량

콘크리트용 골재로서 사용되고 있는 철강슬래그의 종류로서는 고로슬래그 굵은골재, 고로슬래그 잔골재 및 Ferro-Nickel-Slag 잔골재가 있다. 이 외에 아직 활용하고 있지 않은 주요한 골재로서는 동슬래그, 전기로산화슬래그, 전로슬래그 등이 있으며, 콘크리트용 골재로서의 적합성에 대한 검토가 진행 중에 있다. 일본과 한국의 슬래그 생산량을 <표 1>에 나타낸다.

고로슬래그의 주 제조 공장은 포항제철소와 광양제철소이며 생산량은 연간 800만 톤에 이르며, 제강슬래그는 포항종합제철소와 인천제철소를 비롯한 몇몇 제강회사에서 연간 약 604만 톤이 발생하고 있다. 건설용 골재의 총 수요량에 비하면 매우 적은 양이다.

그러나 슬래그 골재는 제조 공장의 인

근 지역에 있어서 골재부족의 완화, 혼합 사용에 의한 천연산 골재의 품질개선에 효과적이므로, 슬래그 골재는 이와 같은 지역성을 고려하는 것이 중요하다.

표 1. 각종 슬래그의 생산량

(단위 : 100만 톤)

슬래그의 종류		일 본	한 국
고로슬래그	서냉	7.4	3.42
	급냉	14.5	4.5
Ferro-Nickel-Slag		1.5	-
동슬래그		1.9	-
전기로슬래그		2.7	2.14
전로슬래그		9.9	3.88

* 한국¹⁾은 1998년도, 일본²⁾은 1994년도 통계

3. 각종 슬래그 골재의 품질

3.1 슬래그 골재 품질의 요점

각종 슬래그 골재의 품질 및 화학 성분을 <표 2>에 나타낸다. 슬래그의 품질은 함유하고 있는 성분뿐만 아니라, 고온 용융 상태에서부터의 냉각 공정상에서 영향을 받는 광물조성이 중요하며, 함유하고 있는 광물에 따라서는 콘크리트용 골재로서 사용할 수 없는 것도 있다. 앞으로 활용이 기대되고 있는 동슬래그, 전기로 산화슬래그, 전로슬래그의 비중은 천연산 골재에 비해 매우 커서, 배합 설계나 콘크리트의 품질에 영향을 미치기 때문에 주의가 필요하다. 즉, 급냉 처리한 슬래그 골재의 석

질은 일반적으로 유리질로 되어 있어, 보수성이 적고 불리딩을 쉽게 일으키는 경향이 있기 때문에 콘크리트 배합시에 대책을 강구하는 것이 중요하다. 혼합용 잔골재로서 사용하는 경우, 슬래그 골재에 대한 혼합률의 결정이나 혼합 잔골재의 입도분포를 표시할 때에는 골재의 비중차에 의한 영향을 고려할 필요가 있는 경우도 있다.

3.2 고로슬래그 골재

(1) 제조방법과 특징

고로슬래그는 철광석으로부터 선철(銑鐵)을 제조할 때 부산물로서 선철 1톤당 약 300 kg이 발생하고 있다. 용융슬래그의 냉각방법에 따라 서냉슬래그와 급냉슬래그로 분류된다. 서냉슬래그는 용융슬래그를 고로에 인접한 냉각장에서 공기 및 살수에 의해 천천히 냉각시킨 것이므로 결정질의 안정화된 조직으로 응고(固化)된 것으로서, 일명 과체슬래그(Air cooled slag)라고도 한다. 이것을 부수어 입도 및 입형을 조절하여 고로슬래그 굵은골재로 사용한다. 급냉슬래그는 용융상태의 고로슬래그를 고압의 물을 사용하여 빠른 속도로 냉각시킨 것으로 결정질이 형성되지 않고 비정질상의 모래와 유사한 입상으로 생성된 것으로, 일명 수쇄슬래그(Granulated Blast-Furnace-slag)라고도 한다. 급냉슬래그는 화학 반응성이 활발하며 수화 반응에서 생성된 수산화(Ca(OH)₂)가 존재하면 수화 반응을 일으키는 잠재 수경성을

표 2. 각종 슬래그의 품질¹⁾

구분	슬래그 항목	고로슬래그		Ferro-Nickel-Slag	동슬래그	전기로 산화슬래그	전로슬래그
		굵은골재	잔골재	잔골재			
물리적성질	질건비중	2.46-2.57	2.57-2.69	2.76-3.13	3.41-3.67	3.16-4.20	3.23-3.54
	흡수율(%)	2.43-3.29	0.40-1.49	0.10-2.00	0.21-1.00	0.66-3.00	0.71-3.26
	단위용적질량	1.39-1.46	1.49-1.58	1.65-1.99	1.89-2.05	-	2.01-2.55
	실적률	54.4-59.5	56.1-59.8	-	51.5-60.0	-	-
화학성분 (%)	SiO ₂	32-35		51.9-53.3	30.3-34.1	10.7-25.9	8.4-15.6
	Al ₂ O ₃	13-15		1.78-2.44	2.8-6.2	2.9-27.6	0.4-8.3
	CaO	41.4-42.4	40.8-41.9	0.39-5.16	2.2-6.0	8.3-42.4	34.3-57.7
	FeO	0.30-0.50	0.3-0.5	Fe 5.6-7.4	Fe 33-38	8.2-43.6	Fe 9.4-29.3
	S	0.9-1.0	0.7-0.9	0.02-0.06	0.3-1.2	0.02-0.26	0.02-0.46
	SO ₃	0.04-0.20	-	-	-	-	-
	MgO	4-6		28.8-35.6	1.0-2.7	1.4-14.8	2.4-10.4

나타내기 때문에 대부분이 고로 시멘트 제조시의 혼합재나 콘크리트용 혼화재인 고로 슬래그 미분말(KS F 2563 콘크리트용 고로 슬래그 미분말)로서 활용되고 있다. 또한 급냉 슬래그의 일부는 고로 슬래그 잔골재의 입자크기로 가볍게 파쇄한 다음, 입도를 조정하여 콘크리트용 잔골재로서 사용한다.

(2) 품질 및 입도

고로슬래그 골재의 화학성분은 <표 2>에서 나타낸 바와 같이 산화칼슘, 실리카, 알루미늄을 주로 함유하고 있다. 고로슬래그 골재는 파쇄과정의 냉각방법과 파쇄과정의 차이에 따라 품질상에 변동이 심하므로 골재로서 적당치 않은 것도 있어 사용시 주의하여야 한다. 고로슬래그 굽은골재에 대한 규격은 KS F 2544에 있으며, <표 3>에서와 같이 비중과 흡수율에 따라 A종(비중 2.20 이상, 흡수율 6.0% 이하)과 B종(비중 2.40 이상, 흡수율 4.0% 이하)으로 구분하여 규정하고 있다. <표 3>의 규격에서 B종에 해당하는 슬래그

굽은골재는 밀실하여 흡수율이 작기 때문에 부순자갈과 같이 일반 콘크리트에 사용할 수 있다. 그러나 <표 3>에서 A종에 해당하는 슬래그 굽은골재는 다공질이며 흡수율이 크기 때문에, 내구성을 고려할 필요가 없고, 또한 설계기준 강도가 210 kg/cm² 이하인 콘크리트에만 한정시켜서 사용하도록 규정하고 있다. 고로슬래그 굽은골재의 입도에 의한 구분(KS F 2544)을 <표 4>에 나타낸다.

고로슬래그 잔골재는 천연산 잔골재의 입도를 조정하거나 바다모래의 사용시 염분 함유량의 저감 등을 목적으로 할 때 혼합해서 사용할 수 있으며, KS F 2544(고로슬래그 잔골재)의 규격에서는 <표 5>에 나타낸 바와 같이 4종류로 입도를 구분하고 있다. 5 mm 고로슬래그 잔골재 및 2.5 mm 고로슬래그 잔골재는 단독으로도 사용할 수 있다. 슬래그 골재에 대하여 KS F 2544에서 규정하고 있는 품질 기준을 <표 6>에 나타낸다.

고로슬래그 골재에 대한 콘크리트 내에서의 화학적 안정성은 양호하며, 알칼리 골재반응이 발생할 우려는 없는 것으로 확인되었다.⁹⁾ 또한 급냉슬래그로 제조한 고로슬래그 잔골재의 경우는 슬래그와 시멘트 페이스트와의 경계면에서 수화반응에 의한 반응층이 생성되고 있는 것이 인정되어, 잔골재의 전량을 고로슬래그 세골재로 대체한 콘크리

트의 강도는 장기간에 걸쳐서 강도가 증가하고 있는 것이 밝혀졌다.¹⁰⁾

고로슬래그 굽은골재를 콘크리트용 굽은골재로 사용할 경우 충분히 물을 미리 흡수시켜(Pre-wetting) 사용하는 것이 필수 조건이며, 충분한 흡수에 의해 운반 중에 슬럼프의 변화가 적고, 부순돌 콘크리트와 동일하게 사용할 수가 있다. 최근 일본에서 LNG 지하탱크의 저판 콘크리트 시공에 고로슬래그 굽은골재는 50% 치환, 시멘트에 대한 플라이애쉬는 50% 치환, W/C는 55%로 하여 제조한 콘크리트를 사용한 실례가 있으며, 철저한 품질관리를 하면 품질상의 변동을 줄일 수 있음을 확인하였다.¹¹⁾

고로슬래그 잔골재는 고온시기에 단독으로 저장하면 잠재수경성 때문에 고결하는 경우가 있어, 저장설비로부터 꺼내기가 곤란한 경우가 있다. 고로슬래그 잔골재의 시험성적표에는 저장의 안전성을 고려하여 고결되기 쉬운 것과 고결되지 않는 것을 구분하여 놓아야 한다. 고온시기에는 장기간 저장하지 말고 빠른 시일 내에 사용하거나 또는 천연산 잔골재와 혼합해서 저장하면 문제는 없다.⁷⁾

3.3 Ferro-Nickel-Slag 잔골재

(1) 제조방법 및 특징

Ferro-Nickel-Slag(이하 FNS라고 약기함)는 스테인리스 스틸의 주원료인

표 3. 고로 슬래그 굽은골재의 구분(KS F 2544)

구분	절건 비중	흡수율(%)	단위 용적 중량 (kg/m ³)
A	2.20 이상	6.0 이하	1,250
B	2.40 이상	4.0 이하	1,350

표 4. 고로슬래그 굽은골재의 구분(KS F 2544)

종 류	입자 크기의 범위 (mm)
고로슬래그 굽은골재 467	40 - 5
고로슬래그 굽은골재 4	40 - 20
고로슬래그 굽은골재 57	25 - 5
고로슬래그 굽은골재 67	20 - 5
고로슬래그 굽은골재 7	13 - 5

표 5. 고로슬래그 잔골재의 구분(KS F 2544)

종 류	입자 크기의 범위 (mm)
5 mm 고로슬래그 잔골재	5 이하
2.5 mm 고로슬래그 잔골재	2.5 이하
1.2 mm 고로슬래그 잔골재	1.2 이하
5-0.3 mm 고로슬래그 잔골재	5 - 0.3

표 6. 슬래그 골재의 품질기준(KS F 2544)

화학성분	고로슬래그 굽은골재		고로슬래그 잔골재	
	A	B		
화학성분 총 함유량(%)	산화칼슘(CaO)	45.0 이하		45.0 이하
	황(S)	2.0 이하		2.0 이하
	삼산화황(SO ₃)	0.5 이하		0.5 이하
	철(FeO)	3.0 이하		3.0 이하
물리적 성질	절대건조비중	2.2 이상	2.4 이상	2.5 이하
	흡수율(%)	6.0 이하	4.0 이하	3.5 이하
	단위용적중량 (kg/m ³)	1,250 이상	1,350 이상	1,450 이상
수중 침지시험	균열, 분해, 니상화, 분파 등의 현상이 없을 것			-
자외선(360.0 nm) 조사시험	발광하지 않거나 또는 균일한 자색을 띠고 있을 것			-

Ferro-Nickel을 전기로 또는 로타리 킬른에서 제련할 때 생성되는 부산물이며, 용융 슬래그를 물 또는 공기로 냉각시켜 응고시킨 것을 콘크리트용 잔골재로 제조한 것이 FNS 잔골재이다. 니켈 1톤당 약 30톤의 슬래그가 발생하며, 일본에서는 총량 약 200만 톤의 잔골재가 제조되고 있다. 제조와 냉각방식에 따라 전로 서냉슬래그, 전로 풍쇄슬래그, 전로 급냉슬래그, 로타리킬른 급냉슬래그가 있다. 전로 서냉슬래그는 용융슬래그를 냉각 야드에 1.5mm 정도의 두께가 되도록 배출시켜, 대기에 열을 방열한 후 서서히 냉각시킨 것이다. 전로 풍쇄슬래그는 용융상태의 슬래그를 노즐을 통해 내보내는 고압의 공기로 냉각시킴에 따라 구상 입자로 되어 있기 때문에, 취급하기 편리하도록 파쇄한 것과 함께 섞여 출하하고 있다. 전로 수쇄슬래그는 물로 급냉처리 했기 때문에 유리질이며 미립분이 적은 단일 입도의 크기로 되어 있다. 로타리킬른 수쇄 슬래그는 Ferro-Nickel과 슬래그가 함께 섞여 있는 반응용 상태의 슬래그를 물로 급냉시켜 입자상으로 파쇄한 후 Ferro-Nickel을 비중 및 자력에 의해서 선광 분리한 것이다. 따라서 1.2mm 체에 잔류하는 입자는 몇 퍼센트에 그쳐 주로 세립사이며 물로서 분급하기 때문에 미립분이 적은 것이 특징이다. 일본에서는 1992년에 슬래그 골재에 대한 규격(JIS A 5011)을 정리 통합할 때 FNS 잔골재도 규격에 포함시킴으로써 그 전까지 단지 지반 개량용이나 도로 포장의 보조 기층재로서만 사용할 수 있었던 것을 콘크리트용 골재로서 사용할 수 있도록 하였다. 한국에서는 FNS 잔골재에 대한 규격은 아직 제정되어 있지 않다.

(2) 품질 및 입도

FNS 잔골재의 화학 성분은 <표 2>에 나타난 바와 같이 실리카 및 산화마그네슘의 함유량이 비교적 많고, 또한 철분을 5~7% 함유하고 있기 때문에 비중이 큰 특징이 있다. 입도에 의한 구분은 <표 5>의 고로슬래그 잔골재의 입도구분과 동일

하며, 고로슬래그 잔골재와 같이 단독 혹은 천연산 모래의 혼합용 골재로서 사용할 수가 있다. 참고로, FNS 잔골재에 대하여 JIS에서 규정하고 있는 품질기준을 <표 7>에 나타낸다.

표 7. Ferro-Nickel-Slag의 품질 기준 (JIS A 5011)

화학적성분(%)	CaO	15.0 이하
	S	0.5 이하
	SO ₃	-
	FeO	13.0 이하
	MgO	40.0 이하
물리적성질	Fe	1.0 이하
	절건 비중	2.7 이상
	흡수율(%)	3.0 이하
	단위 용적 중량(kg/ℓ)	1.5 이상
알카리실리카반응	손실 중량 백분율(%)	7.0 이하
		무 해

FNS 중에는 제조 조건에 따라 알카리 골재반응을 일으키고 있는 것도 있으므로 알카리 실리카 반응성이 없는 것이 JIS에 적합하다. 또한 FNS 잔골재를 사용한 콘크리트는 고온·고압 양생시에 폼아웃을 발생시키는 것도 있기 때문에 Auto-clave 양생으로 제품을 만들 때는 사용하지 않는 것으로 되어 있다. 그러나, 보통의 자연 환경에서 양생할 경우 이와 같은 현상은 일어나지 않는 것으로 확인되어 있다.^{6),10)}

3.4 동(銅)슬래그

(1) 제조방법과 특징

동슬래그는 반사로, 자용로(自熔爐), 자전로(自電爐), 연속 제동로 등에서 광석을 용해해서 동을 제련할 때, 광석의 암석 성분과 용제인 석회석과 규석 등이 결합한 것으로서 동 1톤당 약 1.8톤의 슬래그가 발생한다. 동 제련방식은 여러 가지가 있으나 발생하는 슬래그의 품질에는 차이가 없고, 모가 난 형상의 유리질인 경질슬래그이다. 동슬래그는 용융슬래그를 물로 급냉시켜 생산한 수쇄슬래그이다. 이제까지 동슬래그의 일부는 시멘트의 원료나 매립용 등의 자재로서 이용되고, 나머지는 이용되지 않고 퇴적된 상태로 방치하고 있

다. 이 때문에 일본 광업협회에서는 1986년부터 동슬래그의 유효이용에 대한 조사 검토를 시작하여 현재는 동슬래그 연구위원회를 발족시켜 동슬래그의 콘크리트용 잔골재로서의 소요 품질에 대한 연구를 계속 진행하고 있다. 이제까지의 연구결과 동슬래그는 콘크리트용 골재로서 충분히 적용할 수 있다는 것을 확인하였고, 동슬래그의 콘크리트용 잔골재의 품질기준(안)을 작성하여 일본공업규격으로서 활용할 수 있도록 현재 정리하고 있는 중이다.¹³⁾

(2) 품질과 입도

동슬래그 잔골재의 화학성분은 <표 2>에 나타난 바와 같이 철분의 함유량이 33~38%로 높은 값을 나타낸다. 이 철분의 대부분은 동슬래그의 주요 구성물인 광물상 및 유리상 속에 안정된 상태로 존재한다(결정광물인 Fe₃O₄, Fe₂O₃, Fe₂SiO₃ 등의 형태로 미소한 입자로서 소량 존재하고 있음). 이들의 철분이나 유황을 비롯한 제 성분은 외부로의 용출이나 시멘트 페이스트와의 반응은 전혀 없는 것으로 확인되었다. 일반적으로 다량의 철분을 함유하고 있으므로 비중이 크고, 흡수율이 매우 적은 것이 특징이다.

동슬래그 잔골재는 천연산 골재의 입도 조정과 바다모래의 염분함유량을 저감시킬 목적으로 사용하는 것을 고려하여 <표 5>와 동일하게 입도를 구분하고 있다. 냉각시킨 수쇄슬래그를 그대로 사용할 경우에는 비비는 도중에 약간 입도가 변하기 쉬운 경향이 있기 때문에 콘크리트용 골재로서 사용하려면 사전에 분쇄처리를 실시하여 입도의 안정과 입형을 개선시킬 필요가 있다. 동슬래그 잔골재를 단독으로 사용한 경우에는 천연산 보통모래를 사용한 경우보다 단위수량은 약 3~5kg/m³ 정도 많아지고, 블리딩량은 많아지지만, 동슬래그 잔골재의 혼합률을 50% 이하로 보통모래와 혼합하여 사용하면 특별한 문제는 발생하지 않는다.

입축강도에 있어서 채령 7일까지의 강도발현은 보통 콘크리트에 비해 약간 낮지

만, 90일 이후의 장기강도는 보통콘크리트보다 높은 강도를 나타내고 있다. 그 외에 건조수축, 크리프특성, 중성화깊이 진행은 보통콘크리트보다 우수하며, 동결융해에 대한 저항성은 물시멘트비를 55% 이하로 배합하면 보통콘크리트와 동등함을 실험결과 확인하였다.¹³⁾ 동슬래그 잔골재를 100% 사용한 경우, 콘크리트의 단위용적중량이 약 2,570 kg/m³로 천연산 모래를 사용한 콘크리트보다 중량이 약 300 kg/m³로 커지므로 동슬래그를 이용한 콘크리트는 소파 블록 등 중량을 필요로 하는 경우에 적합하며, 일반콘크리트에 사용할 경우에는 천연산 모래에 대한 대체 혼합비를 30% 정도로 하여 사용하는 것이 적절하다.

3.5 전기로 산화슬래그

(1) 제조방법과 특징

선철이나 고철 등의 철 원료를 정련해서 소정의 품질을 갖춘 강을 제조하는 것이 제강공정이다. 현재 제강법에는 제철소의 고로로부터 나온 선철을 정련하는 전로법과 고철을 전기로에서 정련하는 전기로법이 있으며, 이들 제강공정 상에서 발생하는 제강슬래그를 전로슬래그와 전기로슬래그라고 한다. 제강슬래그 중 전기로슬래그는 조강 1톤당 약 125 kg이 발생하며, 연간 214만 톤 정도이며 그중 약 208만 톤 정도가 재활용되고 있으나, 우리나라는 고로방식에 의한 일관제철소 건설이 제약을 받음으로써 전기로슬래그의 발생량이 당분간 계속 증가될 것으로 전망하고 있다.¹⁴⁾

전기로법에서는 철 원료를 전기로에 장입하고, 전극간에 아크를 발생시켜서 고철원료를 가열·용융시키며, 이어서 산화기와 환원기를 거치는 동안에 일어나는 반응에 의해서 강으로 정련한다. 산화기에서는 용강에 산소를 불어넣어 철 원료 중의 규소, 탄소, 수소, 인 등을 산화시키고, 이외의 일산화탄소와 물로 되어 기화(氣化)하는 산화물이 부원료로서 장입한 석회석,

생석회 및 규소 철분 등의 용제와 용융·결합된 것이 산화 슬래그이며, 용강으로부터 분리시킨다. 이때 로벽에 사용되고 있는 마그네시아계 등의 내화물의 일부도 용출하며, 철 원료 중의 철과 망간의 일부도 산화되어 이들이 산화슬래그의 성분을 이룬다. 산화슬래그를 전기로로부터 배출시킨 후, 용강에 재차 생석회등을 장입해서 환원분위기로 한 환원기에서 초과된 산소를 제거함과 동시에 탈황하여 만든 것이 환원슬래그이다. 환원슬래그는 철, 망간, 혹은 인 등의 산화물이 적은 반면, 유리석회, 유리마그네슘의 성분을 고정(固定)시킬 수 없는 초염기성 산화물이기 때문에 분체(粉體)로 되기 쉬워 골재로서는 부적당하다.

배출된 슬래그의 냉각방법은 슬래그포트에 의해 냉각야드로 배출시켜 천천히 냉각시킨 서냉슬래그, 용융슬래그를 강제의 판 위에 깊이 80 mm 정도로 배출시킨 후 물에 의해서 냉각시킨 수냉슬래그, 용융슬래그를 회전드럼이나 고압의 공기등에 의해서 비산(飛散)시키면서 물로서 급냉시킨 입자상의 풍쇄슬래그(입상화 급냉 슬래그)가 있다. 풍쇄 입상화해서 급냉시킨 풍쇄슬래그는 처리과정에서 산화철성분의 산화도가 서냉시킨 것보다도 높고, 또한 최근의 전기로 제강법은 로 외에서 원료의 사전 정련처리와 석회질 부원료를 용해기에 장입할 수 있도록 처리기술이 진보되어 석회의 원단위(原單位)를 저장시킬 수 있으며, 염기도가 적은 산화슬래그를 제조할 수 있기 때문에 체적안정성이 양호한 콘크리트용 골재를 얻을 수 있다.

(2) 품질

종래의 전기로슬래그는 유리석회 혹은 유리마그네슘 함유량이 많아 팽창성 붕괴를 일으키기 때문에 콘크리트표준시방서에서는 콘크리트용 골재로서는 부적당하다고 하고 있다.¹⁴⁾ 그러나 전술한 바와 같이 제강방법의 진보에 의해서 전기로슬래그의 경우 유리석회의 함유량은 종래의 것보다 1/2 ~ 1/3 정도 저하하고 있고, 유리마그

네슘은 0.004% 정도 저하하고 있어 콘크리트용 골재로서의 활용이 주목되고 있다.¹⁵⁾

전기로 산화슬래그의 화학성분은 <표 2>에 나타난 바와 같이 산화철, 실리카, 알루미늄이 주성분이고, 철분의 함유량이 많아 비중이 크다. 동일 제조공장에서 제조한 것이라도 화학성분상의 변동이 심하고 표전비중의 편차도 일반 잔골재보다 큰 편이다. 또한 조립의 풍쇄슬래그를 가볍게 파쇄해서 세립의 잔골재와 혼합한 잔골재를 단일 입도군으로 분류해서 비중·흡수율을 측정해 보면 조립일수록 내부 공극이 많고 비중이 적어 흡수율이 커지는 경향을 나타내고 있으며, 입도 범위가 2.5 ~ 5 mm의 것은 흡수율이 3.0 이상으로 된다.¹⁵⁾

2.5 mm 이하의 풍쇄슬래그를 잔골재로서 사용한 콘크리트는 W/C를 50% 이하로 하면 재료 분리도 일어나지 않고 단위수량도 일반콘크리트보다 약 12% 정도 줄일 수 있다. 또한 1.2 mm 이하의 풍쇄슬래그를 천연산 모래와 적절히 혼합하고 증점제를 사용하면, 재료분리를 일으키지 않는 유동화 콘크리트를 제조할 수 있다는 연구결과도 있다.¹⁶⁾

3.6 전로슬래그

(1) 제조방법

제철소의 고로에서 제조된 선철은 탄소 함유량이 많고, 그 외 규소, 인, 유황 등의 강재로서는 필요없는 불순물을 함유하고 있다. 이들 불순물을 제거하기 위해 일관제철소의 고로에서 나온 용선을 전로에 장입하고 동시에, 불순물을 포착해서 용강으로부터 분리하기 위해 부원료로서 생석회나 석회석을 투입하는 제강공정에서 발생하는 것이 제강슬래그의 일종인 전로슬래그이며, 조강 1톤당 약 161 kg 정도가 생성되며 총량 약 400만 톤이 발생하고 있다.

전로슬래그는 용융상태에서 슬래그 운반차로 냉각야드에 운반되어 공냉과 살수

를 병행하면서 냉각 고화(固化)시키며, 고화된 슬래그는 파쇄, 체가름공정을 거쳐 소정의 입도로 조정하여 출하한다.

(2) 품질

전로슬래그의 화학성분은 <표 2>에 나타난 바와 같이 석회, 이산화규소, 알루미늄이 주성분이며, 비중과 단위용적중량이 천연산 골재보다 큰 편이다. 생성직후의 전로슬래그 중에는 미반응 광물인 β - C_2S , C_2F , CaO , MgO , C_3S 등이 있다. 이들 중 유리석회와 유리마그네슘은 수화반응에 의해서 팽창 붕괴를 일으키는 것으로 알려져 있다. 유리석회는 유리마그네슘에 비해 수화반응 속도가 빠르기 때문에 초기팽창에 기여하며, β - C_2S 는 장기적인 팽창에 기여한다고 지적한 연구결과가 있다.^{14),17)} 현재는 에이징(파쇄 후 공기 및 물과 반응시키는 것) 처리에 의해 안정성을 도모하는 방법이 확립되어 있으며, 에이징 처리방법으로서의 옥외에 수개월 간 폭로시키는 대기에이징과, 증기에 의해 단기간에 안정성을 확보할 수 있는 증기에이징 등이 있다. 전로슬래그는 전기로 산화슬래그와 같이 콘크리트용 골재로서 사용한 경우에, 팽창 붕괴를 일으킬 우려가 있어 한국산업규격 KS F 2544(콘크리트용 고로슬래그 골재)와 콘크리트표준시방서에서는 골재로서 사용을 금지하고 있으며, 한국산업규격 KS F 2535(도로용 철강슬래그)에서는 도로포장의 보조기층재, 아스팔트포장 혼합용 골재로서만 사용할 수 있도록 규정하고 있다.

최근 일본의 운수성 제2항만건설국 등을 중심으로 FS 콘크리트 연구위원회가 설립되어 재생콘크리트인 「FS 콘크리트」에 대한 연구개발이 진행되어 그 결과 제강슬래그를 실제구조물에 콘크리트용 골재로서 사용할 수 있다는 가능성을 제안하고 있다.¹⁷⁾ FS 콘크리트라는 것은, 굵은 골재는 고로슬래그(GS)만 사용하고, 잔골재로서는 플라이애쉬(F)와 전로슬래그(SS)를 사용하여, 천연산 골재는 일체 사용하지 않은 콘크리트를 말한다. 증기에이

징 처리한 강제슬래그를 대량의 플라이애쉬와 함께 사용하면 포졸란반응에 의해 전로슬래그의 팽창을 억제할 수 있음을 확인한 후 호안구조물과 소파블록 등에 이용하고 있다.

역학적 특성을 보면, FS 콘크리트의 28일 압축강도는 보통콘크리트와 거의 동등한 값을 나타냈으나, 3개월 이후인 장기강도는 훨씬 더 증가하는 경향을 나타냈다.¹⁴⁾ 철근콘크리트 부재에 있어서 인성률은 보통콘크리트와 거의 동등한 것이 확인되었다. 해수 환경하에 있어서 FS 콘크리트의 내해수성은 보통콘크리트보다 우수함이 입증되었다. 이와 같이 FS 콘크리트가 장기강도 증가와 내구성에서 우수한 이유는 전로슬래그의 팽창억제 효과를 기대하여 대량으로 사용한 플라이애쉬(전 모래에 대한 대체율 30~50%, 나머지는 전로슬래그)의 포졸란 반응때문인 것으로 확인하였다.¹⁷⁾

4. 콘크리트용 골재로서의 요점과 과제

4.1 골재시험

슬래그 골재의 입자형상은 모가 진 것이 많고, 특히 미립분이 많은 잔골재의 경우와 입자의 형상에 따라서는 표건비중 및 흡수율을 결정할 때 기준이 되는 표건상태를 플로우콘으로 판정하는 것은 일반적으로 곤란하다. 이 때문에 슬래그 골재의 한국산업규격 KS에서는 KS F 2511(잔골재에 포함된 잔입자 시험방법)에서 규정하고 있는 방법에 의해서 씻은 것을 시료로서 사용할 수 있다고 정하고 있다. 따라서 슬래그 잔골재의 표건상태의 판정방법에 대한 개발이 요망된다.

4.2 혼합 잔골재의 품질

금후, 품질이 좋은 천연산 모래의 부족이 더욱더 심각해질 것이 예상되므로 저품질의 천연산 잔골재에 슬래그 잔골재를 혼합해서 품질개선을 도모하면 양쪽 모두를

유효하게 이용할 수 있으며, 이와 같은 품질 개선 효과로서는 입도의 조정이나 바다 모래의 염분함유량의 저감을 예로 들 수 있다. 그러나 흡수율이 큰 천연산 모래에 슬래그 잔골재를 혼합한다고 해도 모래의 다공성이 개선되는 것이 아니기 때문에 혼합하기 전의 골재는 요구하고 있는 비중, 흡수율의 값 등을 만족시킨 것이어야만 한다. 혼합한 후의 잔골재의 물리적 성질이나 입도 등은 시방서 등에서 규정하고 있는 값을 만족시켜야 한다는 것은 당연하다. 또한 알카리 골재반응 시험에 의해 무해하다고 판정된 보통모래와 혼합한 경우 일지라도, 혼합된 전체의 골재는 무해한 것이 확인되지 않은 골재로 취급하여야 한다.

4.3 입도분포

슬래그 골재는 인공적으로 파쇄 및 입도를 조정하여 제조한 것으로서 원리적으로는 이상적인 입도범위 내에 들어갈 수 있도록 조절이 가능하다. 현재, 슬래그 잔골재는 천연산 모래의 혼합용으로서 굵은 모래용, 가는 모래용 등을 고려해서 입도에 따라 구분되어 있지만 KS에 규정되어 있는 입도분포의 범위는 매우 넓게 되어있다. 콘크리트의 워커빌리티의 확보나 블리딩의 억제 등을 고려하면, 슬래그의 비중이나 입자의 파쇄형상에 따라 콘크리트의 유동성이나 충전성을 확보할 수 있는 이상적인 입도분포를 검토하는 것이 금후의 과제이다.

바다모래등의 보통 골재와 각종의 슬래그 골재를 함께 혼합한 골재는 양자의 비중이 크게 다를 경우 입도의 표시에 주의가 필요하다. 골재의 입도분포는 체를 통과하는 양을 중량백분율로 표시하는 것이 관례로 되어 있고, 골재의 종류 및 입경에 따른 비중차를 무시할 수 있는 경우에는 중량에 의한 입도분포와 용적에 의한 입도분포와는 동일한 것으로 간주할 수가 있다. 또한, 비중에 현저한 차이가 나는 2종 이상의 것을 혼합한 골재는 체를 통과하는

것의 중량백분율만으로는 정확한 입도분포를 나타낼 수가 없다. 따라서 혼합하기 전에 각각의 골재에 대한 비중 및 입도 분포를 시험해서 용적에 의한 정확한 입도분포를 알아 놓을 필요가 있다. 특히, 각종 슬래그 골재의 대부분은 미립분의 함유율에 특징이 있으며, 유리질이어서 보수성이 낮아 블리딩을 일으키기 쉽기 때문에 입도분포에 대한 올바른 인식이 필요하다.

4.4 블리딩의 억제

Ferro-Nickel-Slag 잔골재, 동슬래그와 제강슬래그 등의 잔골재는 비중이 크고, 유리질이며 보수성이 낮기 때문에 이들을 잔골재로 사용한 콘크리트는 블리딩을 일으키기 쉬운 경향이 있다. Ferro-Nickel-Slag를 잔골재로 사용해서 만든 콘크리트의 동결융해에 대한 시험결과, 블리딩률이 큰 것일수록 내구성 지수가 낮아지는 것이 확인되었다.⁶⁾ 따라서 비중이 큰 슬래그 잔골재를 사용할 때에는 슬래그 잔골재의 혼합률을 50% 정도 이하로 한 혼합 잔골재로 하는 것이 바람직하다. 또한, 고성능 AE감수제 등의 사용에 의한 단위수량의 저감, 그리고 고로슬래그 미분말이나 석회석 미분말 등과 같은 광물질 혼화재 등을 사용하여 분체량을 증가시키는 방법에 의해 블리딩을 억제하면, 보통콘크리트와 같은 수준의 품질을 갖는 콘크리트를 만들 수 있다.

4.5 콘크리트의 단위용적중량의 증대

Ferro-Nickel-Slag, 동슬래그, 제강슬래그 등의 잔골재는 비중이 현저하게 크므로 콘크리트의 단위용적중량이 증대한다. Ferro-Nickel-Slag 잔골재 및 동슬래그 잔골재를 사용한 콘크리트의 단위용적중량은 슬래그의 혼입률에 따라 약간 다를 수가 있지만, 각각 2.45 및 2.6 kg/ℓ 정도이다. 콘크리트용 골재로서의 사용적합성을 고려할 때 단위용적중량이 크다는 것을 단점으로 보지 말고, 단위용적중량이

클수록 유리한 콘크리트 구조물에서의 이용 방안을 강구하는 것이 바람직하다. 콘크리트의 단위용적중량이 클수록 유리한 구조물로서는 수중 및 부력의 영향을 받는 블록류, 전도(轉倒) 등 안전성을 확보할 필요가 있는 중력식 사방댐, 소파용 콘크리트블록, 인공어초 등 해안 구조물에서의 이용이 적절할 것이다.

5. 맺음말

이상 본고에서 소개한 바와 같이 철강슬래그의 잠재적 용도는 콘크리트용 골재 이외에도 많이 있지만, 제강슬래그의 특성을 유효 적절하게 이용하여 골재로서 사용하면, 재생골재로 제조한 재생콘크리트와 동등하거나 그 이상의 품질을 갖춘 슬래그 콘크리트를 제조할 수 있을 것으로 기대한다. 자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률 및 동 시행령에 의해, 철강슬래그는 지정 부산물로 되어 있어 재생자원으로서 이용을 촉진하는 것이 특히 필요한 산업부산물이다. 따라서 리사이클 정신에 입각하여, 콘크리트용 골재로서 각종 철강슬래그를 보급하기 위해서는 많은 연구자·실무자 등이 연구 및 시공 실적을 쌓을 필요가 있으며, 더 나아가서 그를 바탕으로 한국 산업규격인 KS로서의 제정 및 재정비는 물론, 제조기술의 프로세스에 관한 공장 인정제도를 만들어 소비자가 안심하고 사용할 수 있도록 하여야 한다.

끝으로 본고가 슬래그 골재를 이용한 콘크리트의 개발 및 실용화에 도움이 되기를 기대한다. □

참고문헌

1. 박승범, "건설폐기물의 국내의 재활용 기술의 현황 그리고 처리 및 재활용 실례", 한국콘크리트학회 2000년도 가을 학술발표회 논문집(I), Vol. 12, No. 2, pp.46~53, 2000. 11.
2. 정상진 외 2인, "서냉슬래그 모르타르의 Flow 특성에 관한 연구", 한국콘크리트학회 1998년도 가을 학술발표회 논문집, Vol.

- 10, No. 2, pp.54~59, 1998. 11.
3. 문한영 외 3인, "전기로슬래그 굵은골재 사용 콘크리트의 재물성", *ibid*, pp.72~75, 1998. 11.
4. 문한영 외 2인 "콘크리트용 골재로서 건조로슬래그의 활용", 한국콘크리트학회 2000년도 가을 학술발표회 논문집(I), Vol. 12, No. 2, pp.379~382, 2000. 11.
5. 정상진 외 4인 "슬래그 모래 특성에 따른 모르타르의 강도에 관한 연구", *ibid*, pp.383~388, 2000. 11.
6. 國府勝郎, "슬래그骨材を用いたコンクリート", *コンクリート工學*, Vol. 34, No. 3, pp.88~93, 1996.
7. 한국콘크리트학회 편저, "콘크리트표준시방서 해설", 기문당, 2000.
8. 한국철강협회, "철강슬래그 재활용 실적(1998)", 1999. 1.
9. 山本 等, "高爐スラグ骨材コンクリートアルカリ反應に對する安定性", *コンクリート年次講演會論文集*, Vol. 8, pp.157~160, 1986.
10. 下山・國府, "高爐スラグ細骨材コンクリートの10年試驗結果", *セメント・コンクリート*, No. 584, pp.18~23, 1995. 10.
11. 井上禎治 外 3人, 高爐スラグ粗骨材を用いたLNG地下タンク底版コンクリートの施工", *コンクリート工學*, Vol. 38, No. 8, pp.56~61, 2000. 8.
12. 山本・秋山, "フェロニッケルスラグを用いたコンクリートのポップアウト", *土木學會論文集*, No. 390, Vol. 8, pp.171~178, 1988. 2.
13. 梶原敏孝, 槿山昌寬, "銅スラグ細骨材", *コンクリート工學*, Vol. 34, No. 7, pp.96~98, 1996. 7.
14. 문한영, 유정훈, "콘크리트용골재로서 전기로슬래그의 적용성에 대한 연구", *콘크리트학회논문집*, Vol. 11, No. 3, pp.101~111, 1999. 6.
15. 沼田普一, "電氣爐酸化スラグの骨材への利用", *コンクリート工學*, Vol. 34, No. 7, pp.99~101, 1996. 7.
16. 肥後桂介 外, "球狀化した鋼製スラグの超流動コンクリート用細骨材としての利用に關する研究", *コンクリート工學年次論文報告書*, Vol. 15, No. 1, pp.161~166, 1993.
17. 伊藤正憲 外, "RC構造物への適用を目指したFSコンクリートの開發", *コンクリート工學*, Vol. 38, No. 10, pp.10~21, 2000. 10.