

콘크리트용 골재로서 철강산업 부산물의 활용

Field Application and Characteristics of Composite Slag Fine Aggregate for Ready Mixed Concrete



최성우 Sung-Woo Choi
유진기업(주) 기술연구소 차장
E-mail : friendpo@eugenec.co.kr



김영선 Young-Sun Kim
롯데건설(주) 기술연구원 책임연구원
E-mail : kimys76@lotte.net



류득현 Deug-Hyun Ryu
유진기업(주) 기술연구소 전무
E-mail : lionyu@eugenec.co.kr



조봉석 Bong-Suk Cho
포항산업과학연구원
환경자원연구그룹 전문연구원
E-mail : chos8@rist.re.kr

1. 서론

건설시장의 활성화로 레미콘의 사용량이 매년 증가하고 있는 추세이지만, 콘크리트 원재료인 골재의 경우에는 환경문제로 인해 천연골재의 개발이 제한되고 있으며, 바다모래의 경우에도 신규 채취 허가는 중단된 상태로, <그림 1>과 같이 EEZ에서의 바다모래 채취양도 감소하고 있으며, 특히 양질의 바다모래인 웅진군과 같은 연안에서 채취되는 모래는 2018년부터는 채취가 중단된 상태이다.

콘크리트용 잔골재로서 사용되는 바다모래의 수급 감소와 더불어 석산 개발도 제한되고 있어서 건설시장에 양질의 부순모래 공급도 감소하고 있는 추세이며, 국내 일부 지역에서는 잔골재의 수급 문제가 건설현장에 레미콘 공급 중단으로 이어지는 등 콘크리트용 잔골재의 수급 안정화가 절실히 요구되고 있는 실정이다. (<사진 1> 참조)

콘크리트용 잔골재로 이용할 수 있는 종류에는 KS F 2527에서 규정하고 있는데, 바다모래, 부순모래와 같은 천연골재는 물론, 다른 산업에서 발생하는 산업부산물을 활용할 수 있도록 제시되어 있으며, 본 기고에서는 천연골재의 대체 자원으로서 활용 가능성이 매우 높은 산업부산물 중 철강산업에서 발생하는 슬래그를 콘크리트용 골재로 활용하는 방안을 소개하고자 하였다.

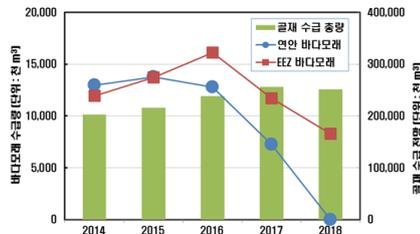


그림 1. 골재 수급 현황¹⁾

부산지역 '레미콘 대란'에 건설현장 아우성

강성훈 기자 입력 2019-05-10 09:00 수정 2019-05-10 09:00

골재 등 원재료값 상승에 수요 줄어... 37개 레미콘 업체 공장가동 중지 부산시도 장기화 대비해 예의주시



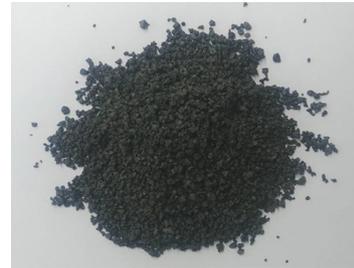
그림 2. 레미콘 수급 관련 기사²⁾



고로 슬래그



전기산화 슬래그



페로니켈 슬래그

사진 1. 슬래그 잔골재

2. 철강산업 부산물

콘크리트용 잔골재에 대한 품질 기준은 종류에 따라 개별적으로 KS 품질관리 기준을 구분하여 관리하였으나, 2017년에 개별 관리되던 골재 종류별 관리 규격들을 KS F 2527 콘크리트용 골재로 통합시켜 천연골재 및 부순골재 이외의 골재들에 대한 활용을 보다 용이하도록 품질 기준을 제시하고 있다. [표 1]과 같이 개정된 KS F 2527에 의하면 콘크리트용

잔골재로서는 일반적으로 사용되고 있는 천연골재, 부순골재 및 순환골재 이외에 철강산업 부산물로서 고로 슬래그, 전기산화 슬래그, 페로니켈 슬래그가 콘크리트용 잔골재로서 사용 가능한 것으로 제시하고 있는데, 철강산업 부산물인 슬래그 잔골재는 발생량과 콘크리트용 잔골재로서 성능 및 사용에 따른 경제성 등을 고려할 경우 활용 가치가 매우 높은 것으로 알려져 있으며, 국내외로 슬래그 잔골재의 활용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있기 때문에 향후 골재 자원으로

[표 1] 발생원에 따른 잔골재 분류 (KS F 2527)

종류	기호	내용
천연 골재	NS	하천, 산림, 공유수면이나 그 밖의 지상, 지하 등에 부존하는 자연상태의 모래 또는 자갈을 파쇄, 입도선별, 세척 등을 통해 생산하는 골재
부순 골재	CS	천연 상태의 암석 또는 공사현장 등에서 발생하는 암석, 모래, 자갈을 파쇄, 입도선별, 세척 등을 통해 생산하는 골재
고로 슬래그 골재	BFS	용광로에서 선철과 동시에 생성되는 용융 슬래그를 물 또는 공기로 급격히 냉각시켜 입도 조정한 것
전기산화 슬래그 골재	EFS	전기로에서 용강과 동시에 생성되는 용융 산화 슬래그를 물 또는 공기로 급격히 냉각시키거나 공기 중에서 서서히 냉각시킨 후 철분을 제거하여 입도 조정한 것
동 슬래그 골재	CUS	로에서 동과 동시에 생성하는 용융 슬래그를 물 또는 공기로 급격히 냉각시키거나 공기 중에서 서서히 냉각시켜 입도 조정한 것
연 슬래그 골재	LS	연광석을 제련로에서 연속으로 용융, 환원될 Eo 생성되는 용융 슬래그를 물 또는 공기로 급격히 냉각시키거나 공기 중에서 서서히 냉각시켜 입도 조정한 것
페로니켈 슬래그 골재	FNS	로에서페로니켈과 동시에 생성되는 용융 슬래그를 물 또는 공기로 급격히 냉각시키거나 공기 중에서 서서히 냉각시켜 입도 조정한 것
용융 슬래그 골재	MS	일반 폐기물 및 하수 슬러지의 용융 고화 시설에서 제조된 용융물을 냉각 고화하여 입도 조정한 것
순환 골재	RS	기존 콘크리트 구조물의 철거로 인해 발생하는 폐 콘크리트 등과 같이 이미 경화된 콘크리트를 파쇄하여 가공한 골재
구조용 경량 골재	ALS	고로슬래그, 점토, 규조토암, 석탄회, 점판암과 같은 것을 팽창 소성, 소피하여 생산되는 골재
	NLS	경석, 화산암, 응회암과 같은 천연재료를 가공한 골재
	BLS	화력발전소에서 부산되는 바텀애시를 가공한 골재

서 매우 높은 활용 가치를 갖고 있다.

슬래그원에 따른 콘크리트용 잔골재로서 품질 기준을 [표 2]에 나타내었다.

2.1 고로 슬래그 잔골재

고로 슬래그는 제철소 고로에서 선철을 제조하는 과정에서 발생하는 부산물로서, 철광석, 코크스와 석회석 등이 고로에서 용융과정에 부유되는 물질을 말하며, 구성원소는 일반 암석의 구성과 유사하며, 화학성분은 시멘트와 유사한 조성을 갖고 있다. 고로 슬래그의 냉각 방식에 따라 급냉 슬래그(수재 슬래그)와 서냉 슬래그(괴재 슬래그)로 구분되며, 일반적으로 급냉 슬래그는 분쇄하여 시멘트 대체재인 혼화재 또는 시멘트 원료로 사용되고, 서냉 슬래그는 노반재 및 비료 등으로 활용되고 있다.

[표 2] 슬래그 잔골재 종류에 따른 품질 기준 (KSF 2527)

구 분	단위	고로 슬래그	전기로산화 슬래그	페로니켈 슬래그
절건밀도	g/cm ³	2.5 이상	3.1 이상 4.0 미만	2.7 이상
흡수율	%	3.5 이하	2.0 이하	3.0 이하
단위용적질량	kg/L	1.45 이상	1.80 이상	1.50 이상
안정성(5회)	%	(10 이하)	-	-
조립율	-	2.3~3.1	-	2.3~3.1
알칼리잠재반응	mmol/L	-	-	무해
CaO	%	45 이하	40.0 이하	5.0 이하
SO ₃	%	0.5 이하		-
MgO	%	-	10.0 이하	40.0 이하
S	%	2.0 이하		0.5 이하
Fe	%	-		1.0 이하
FeO	%	3.0 이하	50.0 이하	13.0 이하
납	mg/L	3 이하		3 이하
연기도			2.0 이하	

수재 슬래그는 냉각과정에서 슬래그가 수축 파쇄되어 입자 크기가 모래와 유사한 8mm 이하의 크기로 생산되고 괴재 슬래그는 40mm 이하의 크기로 생산되기 때문에 콘크리트용 잔골재로서 활용 가치는 생산 효율성을 고려할 경우 수재 슬래그가 매우 효과적이다.³⁾⁴⁾

2.2 전기로산화 슬래그 잔골재

전기로산화 슬래그는 제강 슬래그의 일종으로 고철을 전기로에서 용융시키는 과정에 부유되는 부산물을 말한다. 전기로의 특징은 경로 내의 분위기를 산화성, 환원성으로 변화시키기 때문에 발생하는 슬래그도 산화 슬래그, 환원 슬래그가 발생되며, 전기로산화 슬래그는 밀도가 높고 슬래그 자체의 경도도 높기 때문에 콘크리트용 골재로서 활용이 가능하지만, 전기로환원 슬래그는 물을 만나면 팽창반응성을 갖고 있는 미반응 유리석회(F-CaO)의 함량이 높고 슬래그 자체의 강도도 매우 낮기 때문에 콘크리트용 골재로서의 활용이 불가능하다.⁵⁾⁶⁾

2.3 페로니켈 슬래그 잔골재

페로니켈 슬래그는 스테인리스강의 주원료인 페로니켈을 제조하는 과정에서 발생하는 용융 슬래그로서, 철과 니켈을 혼합 용해 및 제련 과정에서 발생하는 부유물이며, 냉각 방법에 따라 급냉 및 서냉 슬래그로 구분된다. 서냉 슬래그는 입자 크기가 굵기 때문에 노반재로 주로 사용되며, 급냉 슬래그의 경우에는 골재의 입자 크기가 작아 최근 콘크리트용 잔골재로서 활용을 위한 다양한 연구가 진행되고 있다.⁷⁾

3. 슬래그 잔골재 종류에 따른 콘크리트 기초물성 비교

3.1 실험 계획

철강 부산물인 슬래그를 콘크리트용 잔골재로 사용한 경우 콘크리트의 기초물성 변화를 살펴보기 위한 실험계획을 [표

[표 3] 슬래그 잔골재 종류에 따른 기초물성 평가 계획

슬래그 잔골재 종류 및 산지		슬래그 잔골재 치환율(%)	시험 항목
고로 슬래그 (B)	광양	0, 50, 100	· 슬럼프[mm] · 공기량[%] · 60분 경과 후 유동성 · 재령별 압축강도
전기로산화 슬래그 (E)	창원		
페로니켈 슬래그 (F)	광양		

3]에 나타내었다. 슬래그 잔골재 종류는 KS F 2527에서 제시하고 있는 콘크리트용 골재 중에서 고로 슬래그, 전기로산화 슬래그, 페로니켈 슬래그를 선정하여 고로 슬래그 및 페로니켈 슬래그는 생산된 제품을 그대로 사용하였으며, 전기로산화 슬래그는 생산된 골재원을 체가름을 진행하여 콘크리트용 잔골재 기준을 만족시키도록 선별과정을 거쳐 사용하였다. 슬래그 잔골재의 사용 방법은 부순모래 100% 사용을 기준으로 부순모래에 대해 슬래그 잔골재를 50, 100% 용적 치환한 경우에 대해서 콘크리트의 유동성 및 강도 발현 특성을 평가하였다.

사용된 콘크리트 기준 배합은 [표 4]에, 사용된 잔골재의 물리적 특성을 [표 5]에, 잔골재 입도 특성을 <그림 3>에 나타내었다.

3.2 시험 결과 및 고찰

슬래그 잔골재 종류 및 치환율에 따른 콘크리트 기초물성 변화는 제조 직후 콘크리트의 슬럼프 및 공기량 변화를 <그림 4>에, 60분 경과 후 유동성 변화 <그림 5>에 나타내었다.

부순모래를 100% 사용한 기준배합에 비해 고로 슬래그 및 전기로산화 슬래그 잔골재를 치환한 경우에는 치환율이 증가할수록 슬럼프는 저하하지만 페로니켈 슬래그는 반대의 경향을 나타내고 있다. 이는 고로 슬래그는 조립율이 낮고 잔골재 입도 분포도 잔입자가 많은 것에 기인하며, 전기로산화 슬래그 잔골재는 미립분 함유량이 높는데 기인하는 것으로 판단된다. 페로니켈 슬래그는 조립율이 높고 굵은 입자가 다

[표 4] 콘크리트 기준 배합

W/C (%)	S/a (%)	W	단위중량(kg/m ³)					
			1종 시멘트	고로 슬래그 미분말	플라이 애시	잔골재	굵은 골재	AD (Cx%)
49.1	49.8	162	231	66	33	898	954	2.64

[표 5] 사용 잔골재의 물리적 특성

	CS	BFS	EFS	FNS	
조립률	3.05	2.50	2.92	3.60	
밀도 (g/cm ³)	표건	2.60	2.77	3.16	2.94
	절건	2.59	2.78	3.13	2.91
흡수율(%)	0.9	1.4	1.0	0.6	

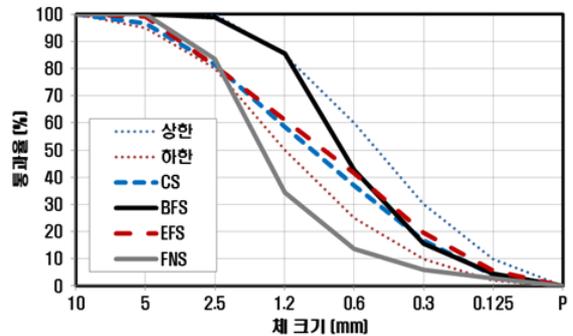


그림 3. 사용 잔골재 입도분포곡선

량 함유함에 따라 초기 유동성이 증가한 것으로 판단된다. 또한 고로 슬래그는 공기량 발현이 매우 높게 나타나고 있는데 이는 골재 입형이 다공질의 특성을 갖고 있기 때문에 연행된 공기 보다는 갇힌 공기에 의한 영향으로 판단된다.

슬래그 잔골재 치환에 따른 재령별 압축강도 발현을 <그림 6>에, 재령 3일 대비 강도 증진율을 <그림 7>에 나타내었다.

고로 슬래그를 치환한 경우에는 치환율 50%에서는 기준 배합에 비해 강도 발현이 증가하지만, 치환율 100%에서는 강도 발현이 저하하는 것으로 나타났다. 그러나, 장기재령에서는 치환율이 증가할수록 강도 증진 효과가 있는 것으로 나타났다. 이는 고로 슬래그 입자 자체의 다공성의 영향으로

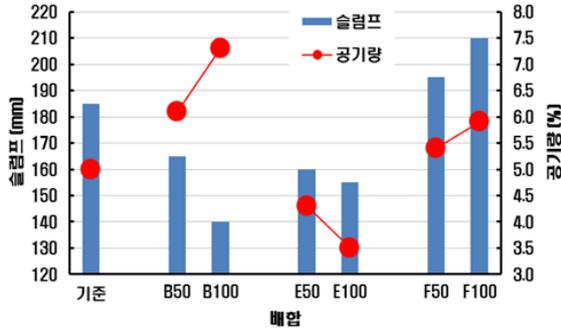


그림 4. 제조 직후 슬럼프 및 공기량

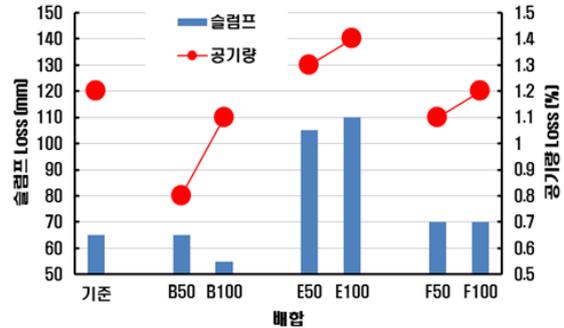


그림 5. 슬럼프 및 공기량의 경시변화량

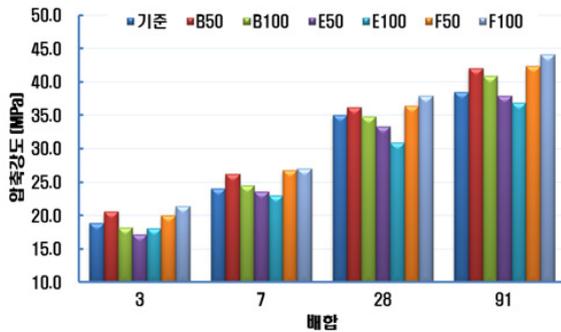


그림 6. 재령별 압축강도

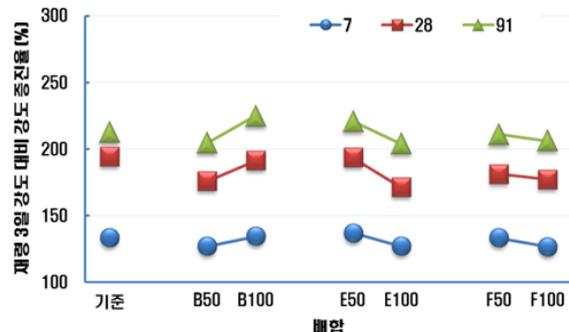


그림 7. 기준 배합 대비 재령별 강도 발현율

강도 발현을 저해시키지만, 골재 표면에서 잠재수경성과 같은 반응이 진행되어 재령이 증가할수록 골재 표면의 접착력이 증가되고 압축강도 증진 효과가 나타나는 것으로 판단된다. 전기로산화 슬래그를 치환한 경우에는 기준 배합에 비해 강도 발현이 저하하며, 치환율이 증가할수록 강도 저하가 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 전기로산화 슬래그 미분의 영향으로 판단된다. 페로니켈 슬래그는 치환율이 증가할수록 강도 발현성도 향상되는 것으로 나타났으며, 골재 밀도가 높고 미립분의 양이 적는데 기인하는 것으로 판단된다. 전기로산화 슬래그 및 페로니켈 슬래그는 고로 슬래그와 달리 장기재령에서의 강도 증진효과는 기대하기 어려운 것으로 나타났다.

4. 결론

최근 콘크리트용 잔골재의 수급 및 품질 문제는 레미콘 산업에서 가장 중요한 이슈로서 건설현장에서 해결해야 되는 중요한 선결과제가 되었다. 천연자원의 난개발에 따른 환경 문제를 해소하고 지속적으로 품질이 안정된 건설자재를 건설현장에 공급하기 위해서는 천연골재를 대체하고 산업부산물물의 폐기를 감소시킬 수 있는 다양한 산업부산물물의 재활용에 대해서 지속적이고 광범위한 연구가 필요하다. 본 기고에서는 산업부산물 중 철강산업 부산물의 재활용이라는 측면에서 슬래그 골재의 활용 가능성을 제시하였으며, 슬래그의 활용 확대를 위한 보다 다양하고 장기적인 관점에서의 연구가 심도 깊게 진행되어 건설자재에서도 친환경 기술의 보편화가 진행되기를 기대한다.

참고문헌

1. Ministry of Land, Infrastructure, and Transport. (2018). The sixth basic plan for aggregate supply and demand. [in korean].
2. Website. <http://www.donga.com/news/article/all/20190509/95458428/1> [in korean].
3. Moon, H.Y., Choi, Y.W. (1992). An experimental study on the properties of water cooled blast furnace slag as a fine aggregate for concrete. KSCE Journal of Civil Engineering. 12(1). 107-113 [in korean].
4. Lee, B.j. (2011). Study on the Engineering Properties and Improving Performance of Environmentally Friendly Concrete using Composite Slag Aggregate for Restoring Coastal Ocean. Chungnam National University. Doctoral thesis [in korean]
5. Ryu, D.H., Kim, K.H., Park, C.G., Son, Y.S. (2009). The Study of Concrete Basic Properties Using Oxidized Electric-furnace-slag Aggregate. Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction. 25(8). 143-150 [in korean].
6. Choi, S.W., Kim, V., Chang, W.S., Kim, E.Y. (2009). The Present Situation of Production and Utilization of Steel Slag in Korea and Other Countries. Magazine of the Korea Concrete Institute. 19(6). 28-23 [in korea].
7. Lee, H.G., Bae, S.H., Lee, H.J., Choi, Y.W., Cho, B.S. (2018). Mechanical Properties and Resistance to Freezing and Thawing of Concrete Using Air-Cooled Ferronickel Slag Fine Aggregate. Magazine of RCR. 6(4). 319-323 [in korean].

담당 편집위원 : 최형길(경북대학교)

●● 학회지 원고모집 안내

Magazine of RCR(한국건설순환자원학회지)은 계간으로 발행되어 회원을 비롯한 관련 업계, 학회, 유관기관 및 단체 등에 배포되고 있습니다. 회원 여러분의 많은 원고 투고 부탁드립니다.

1. 원고 종류

논단, 특집기사, 기술기사, 공사기사, 해외 기술정보 및 번역기사(뉴스), 현장탐방(국내외 연구소 및 국제학술대회 참가), 우리 회사소개, 신기술 또는 신제품 소개 등

2. 원고 분량

글씨크기 11 pt, 줄 간격 160 %

- 1) 특집기사, 기술 및 공사기사 : A4용지 10매 이내
- 2) 해외 정보소개, 현장탐방 및 우리회사 소개기사 : A4용지 8매 내외

3. 원고 작성

- 1) 원고의 모든 내용(사진, 그림 등 기타 부속물 포함)은 한글 작성이 원칙임. 단, 의미 전달이 모호할 우려가 있는 경우에는 그 원어를 괄호 안에 표기함.
- 2) 제목의 작성 : 제목은 가급적 10자 이내로 정하며 영문 제목도 동시에 표기함.
- 3) 저자의 소개 : 성명, 소속, 직위, 전공분야/관심분야, 연락처, e-mail 주소, 저자 사진(컬러)
- 4) 제출 마감일 : 발행일 30일 전까지(발행일 : 3, 6, 9, 12월)

4. 제출할 곳

한국건설순환자원학회 오경숙 과장(E-mail : rcr@rcr.or.kr)