

콘크리트용 잔골재로써 고로 수쇄슬래그의 특성연구

A Study on the property of the Blast-Furnace Slag as Fine Aggregate of Concrete

김동석^{*} 하상욱^{**} 구분창^{**} 하재담^{***} 이종열^{****} 채재홍^{*****}
Kim, D. S. Ha, S. W. Koo, B. C. Ha, J. D. Lee, J. R. Chae, J. H.

ABSTRACT

As a result of the reduction of natural aggregate, most of developed country have been studied the utilization of Blast-furnace Slag(BFS) as aggregate of concrete. but, in korea there are only basic study about these even though other country are using Blast-furnace Slag in production of Ready Mixed Concrete.

Accordingly, in this study, we carried out fundamental experiments in order to know the material properties of BFS and possibilities of the BFS as fine aggregate of concrete. It is included that analysis concerning material properties of BFS as like specific gravity, absorption, unit weight, grading including investigation of the surface shape by SEM, also, analysis concerning properties of concrete with BFS as like air-content, slump, compressive strength, etc.

1. 서론

고로 슬래그는 용광로에서 철광석으로부터 선철을 제조할 때 선철 1톤당 310kg 정도가 발생하며, 국내 '98년도 고로 슬래그 발생량은 약 1,000만톤에 달하고 있다. 이중 수쇄슬래그가 약 53%, 괴개슬래그가 약 17%를 차지하며 주로 시멘트 원료, 노반재료, 비료 등으로 약 74%정도가 활용되고 나머지 26%는 세철공장 자재의 호안공시, 집토용, 풍유수면 메립 등에 활용되고 있는 실정이다.

반면, 일본에서는 천연골재 자원의 부족현상에 따라 대체골재(원) 개발의 필요성이 대두됨에 따라 별도의 생산기술에서 임형 및 입도를 조정하여 콘크리트용 골재로 활용하기 위해 '70년대부터 '80년대 후반까지 이에 대한 많은 연구가 진행되었으며, 이러한 연구결과를 바탕으로 JIS 제정 및 관련학회의 설계시공 지침서가 제정되어 콘크리트용 골재로써 고로 슬래그의 사용은 일반화되어 있는 상태이다.

하지만 국내의 경우 고로 슬래그에 대한 연구는 최근 학계 및 업계를 중심으로 몇몇 단편적인 연구가 진행되었고, 주로 모르타르투입에 대한 기초적인 연구에 머물러 있어 콘크리트 품질투입 및 장기

김희원, 한국과학기술연구원 중앙연구소 콘크리트연구소 중앙연구원
김희수, 한국과학기술연구원 중앙연구소 콘크리트연구소 연구원
김희진, 한국과학기술연구원 중앙연구소 콘크리트연구소 선임연구원
김희영, 한국과학기술연구원 중앙연구소 콘크리트연구소 연구원
최성민, 한국과학기술연구원

내구특성에 대한 연구는 매우 빈약한 수준이며, 콘크리트용 골재로서 KS 규격에 제정되어 있으나 국내에서의 고로 슬래그 골재에 대한 사용실적은 진무한 상태라고 할 수 있다

따라서 향후 천연골재 자원의 고갈에 따른 대체골재(원) 개발과 환경보존 및 산업부산물 유효이용 차원에서 콘크리트용 잔골재로서 활용방안 모색을 위해 고로 수쇄슬래그를 대상으로 원재료특성 분석과 콘크리트 특성평가 실험을 수행하여 콘크리트용 잔골재로서의 적합성 검토와 함께 향후 효과적 사용을 위한 기초자료를 제시하고자 하였다

2. 실험개요

2.1. 사용재료

2.1.1 시멘트 및 혼화제

본 실험에 사용된 시멘트는 국내에서 보편적으로 가장 많이 사용되고 있는 1종 보통시멘트를 사용하였다. 혼화제는 T사 제품의 AE감수제 표준형을 사용하였으며, 그 자세한 내역은 각각 표1 및 표2에 나타낸 바와 같다

표1 시멘트의 화학성분 및 물리특성

시멘트 종 류	비 중	분말도 (g/cm ²)	화학성분 (%)						압축강도(kgf/cm ²)		
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	R ₂ O	3일	7일	28일
1종 보통	3.15	3,250	21.0	5.9	3.2	62.5	2.1	0.78	195	290	380

표2 사용 혼화제

종 류	제품명	주성분	표준사용량
AE 감수제(표준형)	NEO-MIX(T사)	멜라민 축합물	C×0.15%

2.1.2 골재

본 실험에 사용된 잔골재는 수쇄슬래그 잔골재와 하천사 2종류로서 수쇄슬래그 잔골재의 경우 별도의 파쇄 및 입도조정을 거치지 않고 제철공장에서 부산되는 포항제철산 고로 수쇄슬래그이고, 비교 시험용으로 사용된 하천사는 비중이 2.60, 흡수율이 1.10인 내진인근의 미호천 하천사이다. 또한 굵은 골재는 비중이 2.70, 흡수율이 0.98인 한창석산의 25mm 쇄석을 사용하였으며, 각 사용재료별 물리적 특성은 표3과 같다

표3 골재의 물성

구 분		비 중	흡수율(%)	단위용적(kg/m ³)	비 고
잔골재	고로 수쇄슬래그	2.30	2.11	1,053	도항제철산
	하천사	2.60	1.10	1,590	미호천(하천사)
굵은골재		2.70	0.98	1,550	한창석산(25mm쇄석)

2.2. 실험 항목 및 방법

본 실험은 고로 수쇄슬래그의 콘크리트용 잔골재로서의 적합성을 검토하기 위한 연구로 KS F2534(콘크리트용 고로 슬래그 골재)에 규정된 항목 및 규격치를 기준으로 고로 수쇄슬래그의 원재료 특성을 분석하였다. 일반적으로 제철공장에서 부산되는 고로 수쇄슬래그 자체는 콘크리트용 잔골재로써 입도 및 물리성능이 규격치를 벗어나므로 이러한 특성치를 개선하기 위하여 실험실 Lab Mill을 이용한 수쇄슬래그를 분쇄조제하여 그에따른 특성변화를 분석하였으며, 그 분석은 복은 고리와 같다 또한 콘크리트 실험으로 러미콘 25-210-12 기준배합을 사용하여 고로 수쇄슬래그 10% 이하, 수쇄슬래그

잔골재로 칭함) 및 30분 분쇄슬래그(이하, 분쇄 슬래그 잔골재로 칭함)를 대상으로 콘크리트 특성평가 실험을 수행하였다.

실험방법은 하천사 대비 동일 배합조건에서 수쇄슬래그의 치환율별 슬럼프 및 공기량 변화와 제령별 강도발현특성을 평가하였다. 또한 분쇄를 하지 않은 수쇄슬래그 잔골재를 대상으로 치환율에 따른 동일 슬럼프(12=2.5cm)를 기준으로 사용수량 변화 및 강도발현 특성을 비교평가하였으며, 자세한 실험내역은 표5에 나타낸 바와 같다

표4 원재료특성 분석항목

분석항목	시험내용 및 방법	비 고
화학적분	XRF에 의한 성분분석	KS F2544
물리적 특성	비중, 흡수율, 단위용적중량	
입도분석	입도분포, 조립율	
입형 및 표면상태	전자주사현미경(SEM) 관찰	-

표5. 콘크리트 실험내역

구 분	슬래그 치환율(%)	시험조건	평가항목
하천사+수쇄슬래그 잔골재	0, 30, 60, 100	배합고성, Slump고성	공기량, Slump, 압축강도(7, 28일)
하천사+분쇄슬래그 잔골재	0, 30, 60, 100	배합고성	

3. 실험결과 및 고찰

3.1 원재료 특성분석

3.3.1 화학성분

고로 수쇄슬래그의 화학성분은 규산 2석회(2CaO · SiO₂)와 같은 광물상으로는 존재하지 않고, Glass 상으로 되어 있기 때문에 광물학적으로 불안정성은 없는 것으로 알려져 있고, 화학성분 분석결과 표6.에 나타낸 바와 같이 KS F2544 규격에서 규정하고 있는 고로 슬래그 골재의 품질규격치를 만족하는 결과를 보인다

표6 고로 수쇄슬래그의 화학성분 분석결과

구 분	화학성분(%)									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	SO	K ₂ O	S	LOI
KS F2544	-	-	≤30	≤45.0	-	-	≤0.5	-	≤2.0	-
고로 수쇄슬래그	32.14	16.39	0.74	43.48	5.49	0.21	0.37	0.45	0.63	0.11
참고(하천사)	83.09	8.94	1.35	0.69	0.10	1.29	0	3.91	Tr	0.74

3.3.2 물리특성

콘크리트용 잔골재로써 수쇄슬래그의 물리특성은 중요한 품질특성치라고 할 수 있다 KS 규격성에는 콘크리트 품질에 영향을 미치는 기본항목으로 비중, 흡수율 및 단위용적중량 등을 규정하고 있으며, 고로 수쇄슬래그는 용융상태에서 Gas가 혼입된 상태로 냉각되어 조립구조가 다공성으로 입형이 거칠기 때문에 비중 및 단위용적중량이 낮은 것이 일반적이라 할 수 있다. 본 시료의 경우도 표7에서 보듯이 바와 같이 비중 및 단위용적중량이 상당히 낮은 결과로써 KS F2511에서 제시하고 있는 고로 슬래그 잔골재의 규정치를 크게 벗어나고 있다. 또한 흡수율의 경우는 규정치를 만족하고는 있으나 천연 골재보다는 비교가 큰 결과를 보인다. 이에 따라 품질특성치 개선을 위하여 실험실 Lab Ball Mill을 이용한 고로 수쇄슬래그의 분쇄특성을 검토하였다. 실험결과 표7에 나타낸 바와 같이 수쇄슬래그 원시료의 경우 분쇄시기에 따라 응집된 슬래그의 입자 또는 표면광택이 파괴되어 잔골재로써의 물리적 성질

은 개선되는 특성을 보였으며, 콘크리트용 잔골재로서 보편적으로 사용하기 위해서는 어느정도의 경분쇄 및 입도조정 과정이 필수적이라는 것을 확인할 수 있었다.

표7 분쇄조제에 따른 고로 수쇄슬래그의 물리특성 변화

구분	KS F2544	고로 수쇄슬래그				하천사
		원시료	20분분쇄	30분분쇄	40분분쇄	
절연비중	2.5이상	2.43	2.45	2.54	2.56	2.60
흡수율(%)	3.5이하	2.11	1.88	1.12	0.97	1.10
단위용적중량(kg/m ³)	1,450이상	1,210	1,290	1,340	1,430	1,590

3.3.3 입도분포

일반적으로 콘크리트용 잔골재의 입도분포는 가급적 연속입도를 가지는 것이 콘크리트의 단위수량저감 및 작업성(Workability) 향상에 유리 측면을 가지며, 본 실험에 사용된 고로 수쇄슬래그 원시료의 입도분석 결과 0.6~1.2mm 크기의 입도분이 다소 과다하고 단일입도에 가까운 분포로써 KS 규격에서 제시하고 있는 5mm 잔골재의 입도범위를 벗어나는 결과를 보였다.

결과적으로 수쇄슬래그의 경우 콘크리트용 잔골재로 직접 사용하는 것은 부적합하며, 표8 및 그림1에서 보는바와 같이 제철공장에서 부산되는 고로 수쇄슬래그는 최소한의 전처리과정이 필요하다는 것을 확인할 수 있었으며, 본 실험은 실험 여건상 Lab. Ball Mill을 사용하여 실험실적으로 단순 파괴한 경우로써 일반적으로 입도분포는 분쇄기의 종류에 따라 크게 달라질 것으로 판단된다.

표8 분쇄조제에 따른 수쇄슬래그의 입도분포 분석

종류	각계 잔류율(%)				하천사
	고로 수쇄슬래그				
	원시료	20분분쇄	30분분쇄	40분분쇄	
KS계 규격					
5(No4)	0	0	0	0	3.4
2.5(No8)	8.3	4.2	0.4	0	6.9
1.2(No16)	32.6	24.7	18.1	9.4	20.2
0.6(No30)	36.2	40.8	44.6	26.1	27.6
0.3(No50)	17.3	20.5	22.9	34.1	20.4
0.15(No100)	5.1	6.7	7.9	18.5	14.5
Pan	0.5	3.1	6.1	11.9	7.0
F.M	3.20	2.90	2.62	2.03	2.74

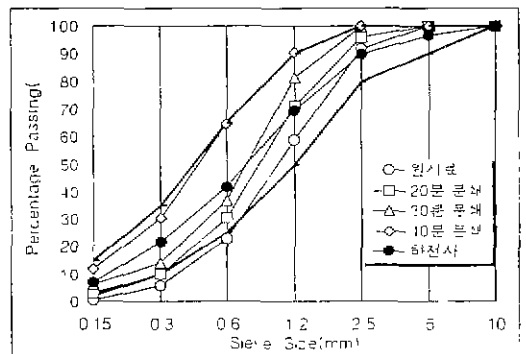
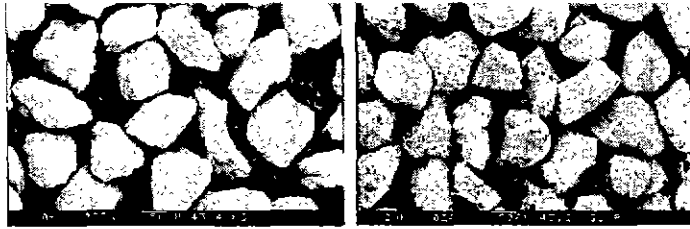


그림1 수쇄슬래그의 입도분포 곡선

3.3.4 입형 및 표면상태

전자주사현미경을 사용하여 수쇄슬래그의 원시료와 분쇄에 따른 수쇄슬래그의 입형 및 표면상태를 하천사 및 일본 유통 수쇄슬래그 잔골재와 비교 관찰하였다. 관찰결과 사진1에서 보는바와 같이 하천사의 경우 입형이 비교적 둥글고, 표면상태가 매끄러운 상태인 반면, 수쇄슬래그는 주요 특성으로 입형이 거칠고 각형이며, 표면형상은 미세한 공극을 다량 함유하고 있다는 것을 알 수 있다. 분쇄조제에 따라서는 사진상으로 수쇄슬래그의 입형이 다소 개선되는 경향은 보이나 난기 과쇄에 의해 수쇄슬래그의 입자크기만 작아지고 과쇄된 입자는 원래의 입자형상을 가짐으로써 과쇄에 의한 입형개선 효과는 크지 않은 것으로 관찰된다.

비교관찰용으로써 일본 레미콘공장에서 사용되고 있는 수쇄슬래그의 경우 입형이 국내 수쇄슬래그보다 다소 매끄러운 표면형상을 지니며, 국내 수쇄슬래그보다 표면의 거칠기 및 공극이 작고, 또한 수축소율을 가지며, 이는 제조조건에 따른 영향인 것으로 판단된다.

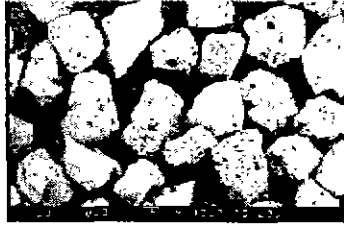


a) 하천사

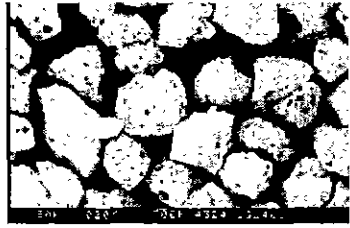
b) 일본 슬래그



c) 수쇄슬래그 원시료



d) 20분 분쇄슬래그



e) 40분 분쇄슬래그

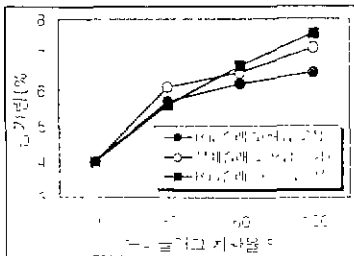
사진1 SEM에 의한 수쇄슬래그 잔골재의 입형 및 표면상태 관찰(×20배)

3.2 콘크리트 특성

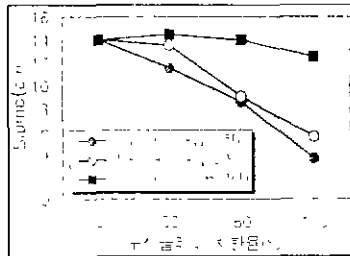
콘크리트용 골재로써 일반적으로 사용하고 있는 강모래 대비 수쇄슬래그 및 분쇄슬래그에 대한 차환율별 콘크리트 배합조건과 특성평가 결과를 표9에 나타내었다.

표9 콘크리트 배합조건 및 실험결과

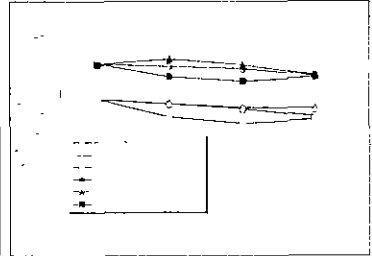
골재종류	배합량	W/C (%)	s/a (%)	단위체도량(kg/m ³)						Air (%)	Slump (cm)	압축강도(kgf/cm ²)	
				C	W	S		G	혼화제 (%)			7일	28일
						NS	SS						
이천사	NS100	49.5	45.0	374	185	774	-	982	0.15	4.0	14.0	292	379
하천사-수쇄슬래그	RS30	49.5	45.0	374	185	515	220	982	0.15	5.7	11.5	270	372
	RS60			374	185	310	440	982	0.15	6.2	8.5	268	368
	RS100			374	185	-	733	982	0.15	6.5	3.5	249	351
하천사-분쇄슬래그	GS30	49.5	45.0	374	185	545	220	982	0.15	6.1	13.5	281	391
	GS60			374	185	310	440	982	0.15	6.5	9.0	27	376
	GS100			374	185	-	733	982	0.15	7.2	5.5	250	353
하천사-수쇄슬래그	RS30	49.5	45.0	386	191	534	217	967	0.15	5.6	14.5	248	346
	RS60			400	198	300	425	950	0.15	6.7	14.0	241	336
	RS100			418	207	-	692	928	0.15	7.6	12.5	241	347



a) 공기량 특성



b) Slump 특성



c) 압축강도(7일) 특성

그림2 수쇄슬래그 및 분쇄슬래그 사용 콘크리트 특성

배합조건을 동일하게 고정한 경우 슬래그 치환량이 증가함에 따라 공기량은 양모래 대비 2%이상 증가되는 반면, 슬럼프는 대폭적으로 저하되며, 초기 압축강도(7일 제령)의 경우도 뚜렷한 감소 경향을 보였다. 수쇄슬래그의 분쇄조제에 따라서는 수쇄슬래그의 입도개선 효과에 따라 공기량은 Raw 슬래그와 동일한 수준이나 콘크리트의 작업성(Slump) 및 강도특성은 다소 개선되는 결과를 보였다.

또한 수쇄슬래그 이용측면을 고려한 동일한 작업성(Slump 기준)을 기준으로 실험한 경우는 양모래 단독사용 대비 수쇄슬래그의 치환량이 30%인 경우 약 3%, 60%인 경우 약 7%, 100%(단독)인 경우 약 12%의 단위수량 및 단위시멘트량이 증가하는 것으로 나타나고, 압축강도 저하경향(약 20%)은 더욱 뚜렷하게 나타났다.

따라서 본 실험결과를 기준으로 볼 때 실제 레미콘에서의 걱정 치환사용량은 배합 미세조정(단위수량 및 단위시멘트량, 혼화제 사용량 증량)을 통해 30% 이내가 적합할 것으로 사료되고, 경분쇄 및 입도조정 정도에 따라 상향조정은 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

콘크리트용 잔골재로 활용하기 위한 고로 수쇄슬래그의 원재료특성 분석과 분쇄조제에 따른 콘크리트특성을 검토한 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 원재료 특성분석 결과 국내 제철공장에서 부산되는 고로 수쇄슬래그 자체는 화학성분의 경우 KS F2544의 규정치를 만족하나 조직구조가 다공질이며, 입형이 불량하기 때문에 골재로써의 일부 항목이 KS 규격치를 크게 벗어나는 것으로 나타났다.

(2) 입도분포의 경우도 KS 입도규격을 벗어나고, 수쇄슬래그의 분쇄조제 결과 물리적 성질 및 입도분포가 개선됨에 따라 콘크리트용 잔골재로써 보편적으로 사용하기 위해서는 별도의 경분쇄와 함께 입도조정 과정이 필요하다는 것을 확인할 수 있었다.

(3) 콘크리트 특성실험 결과 고로 수쇄슬래그는 원재료 특성상 동일배합조건에서 하천사 대비 수쇄슬래그의 치환량이 증대됨에 따라 슬럼프 저감이 심하고, 초기 강도발현도 저하되는 경향을 보였으며, 반면에, 분쇄조제에 따라서는 이러한 특성이 다소 개선되는 것으로 나타났다.

(4) 고로슬래그 잔골재의 이용측면에서 콘크리트의 동일 작업성 확보를 위해서는 치환량이 증가함에 따라 콘크리트의 단위수량 증가와 함께 단위시멘트량 증량이 필요하므로 이에따른 콘크리트의 품질저하 및 레미콘 제조원가의 상승요인으로 작용할 것으로 판단된다.

(5) 따라서, 분쇄조제를 거치더라도 건설현장에서 수쇄슬래그 단독 사용은 곤란하며 수쇄슬래그의 적정 치환사용량은 배합 미세조정을 통해 30%이내 수준이 적합할 것으로 판단되며, 잔골재로써 가공처리 정도에 따라 다소 치환율 상향조정(30~50%)은 가능할 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

- 1) KS F2544 '콘크리트용 고로 수쇄슬래그 골재' 1997.
- 2) 竹田重三, "高爐スラク骨材", 콘크리트工学, No. 7, Vol 34, 1996.7
- 3) 高田成의 외, "高爐大碎スラク砂の水和反應とコンクリートの物性", セメント・コンクリート, No 390, 1979
- 4) 山崎竹徳의 외, "球粒化した製鋼スラクの招流動コンクリート用細骨材としてその用に關する研究", 콘크리트工学年次論文報告集 No.1, Vol 15, 1993
- 5) 赤田晋一の 외, "高爐スラク骨材の製造設備と品質管理", セメント・コンクリート, No 415, 1981
- 6) 沼田晋一の 외, "高爐スラク細骨材を用いたコンクリートの物性", セメント・コンクリート, No 415, 1981