

산업부산물 및 폐기물을 이용한 콘크리트용 골재

## 고로슬래그 골재 Blast-Furnace Slag Aggregate



문한영\*



정상진\*\*



임남기\*\*\*

### 1. 서 론

경제발전과 함께 시작된 우리건설분야의 급속한 성장은 골재수요를 급격히 증가시켜, 강자갈·강모래를 거의 소진시킴으로써 해사와 쇄석 및 쇄석사 사용을 부채질하고 있다. 그러나 환경 및 자연보존이라는 대명제하에서 쇄석 및 쇄석사 채취가 곤란을 겪기 시작하였으며, 해사 사용에 따른 대체골재의 필요성이 증대됨에 따라 철강석 제조사 부산물로 산출되는 슬래그를 매립 등의 수동적 활용보다는 환경보존과 경제적 활용이 가능한 골재로서의 적극적 활용이 시급한 실정이다. 현재 슬래그의 사용 상황은 기층재, 보조기층재등으로의 사용비율이 가장 높지만 재료특성상콘크리트용 골재로서의 활용 가능성이 매우 높으므로 본고에서는 고로 급냉 및 서냉슬래그의 콘크리트용 골재분야에 국한시켜 그 특성과 활용성을 조

사 정리하고자 한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 고로슬래그의 정의 및 생성과정

고로(Blast Furnace)는 철광석과 코크스를 장입하고 1200-1250 °C 의 고온 열풍을 불어 넣어 코크스를 연소시킴으로써 발생하는 연소열과 환원성 가스(CO gas)를 이용하여 철광석을 환원, 용해하여 철 함유율 94-95%의 선철을 제조하는 철 생산의 첫 번째 공정이 진행되는 곳이다.(그림 1)

고로슬래그는 선철의 원료가 되는 철광석과 석회석 중 철이외의 성분이 용해되어 철 위에 뜨는 광재로서 비중의 차이를 이용하여 철과 분리해 내게 되며, 선철 1톤을 생산하는데 약 330kg의 슬래그가 생성된다. 생산공장은 포항제철과 광양제철이며, 생산

\* 정회원, 한양대학교 건축공학과 교수

\*\* 정회원, 단국대학교 건축공학과 교수

\*\*\* 정회원, 단국대학교 대학원 박사과정

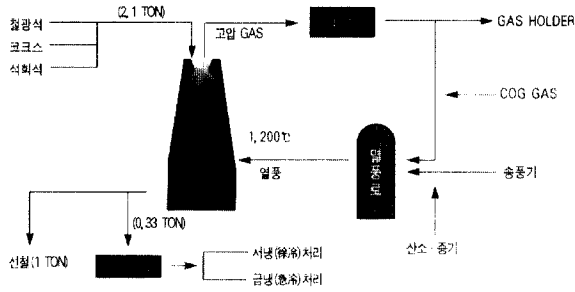


그림 1 고로슬래그의 생성과정

표 1 우리나라의 연도별 슬래그 발생량

구분	1989	1991	1993	1995	1998	2001
고로(BF) 슬래그	5281	6889	8003	8120	9832	9825
전로(BOP) 슬래그	3045	3792	4518	4894	4981	5818

\* 수쇄(급냉)슬래그 및(전체 고로슬래그의 38.5%임)

되는 슬래그량은 표1과 같다.

## 2.2 고로 슬래그의 종류와 용도

### 2.2.1 생성 방법에 따른 분류

고로에서 배출된 슬래그는 약 1500°C의 고온, 용융상태이므로 냉각시켜야 하며, 냉각방법에 따라 형상과 성질이 다른 슬래그가 생성된다. 고로 슬래그는 크게 나누어 수쇄(급냉)슬래그와 서냉슬래그로 구분할 수 있다.

#### 1) 서냉슬래그

용융상태의 고로슬래그를 고로옆에 설치되어있는 드라이피트(슬래그 냉각장)에 흘려넣어 서서히 살수하면서 2-4시간 공냉하여 고화시킨다. 이렇게 처리된 슬래그는 압상의 피상태가 되므로 불도저나 쇼벨카로 굴착하여 처리한다.

#### 2) 수쇄슬래그

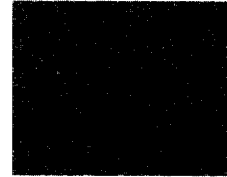
고온에서 선철과 분리되어 흘러 나오는 고온, 용융상태의 슬래그에 고압의 가압수를 다량 방출하여 급냉한 것으로 유리질이 90%이상이 되며, 외견은 모래와 비슷하다. 수쇄슬래그는 성분조성이 시멘트와 비슷하며, 수축성을 가지고 있기 때문에 시멘트의 원료로 사용되고 있다.

#### 3) 용도

서냉슬래그 및 수쇄슬래그의 용도는 각종의 골재



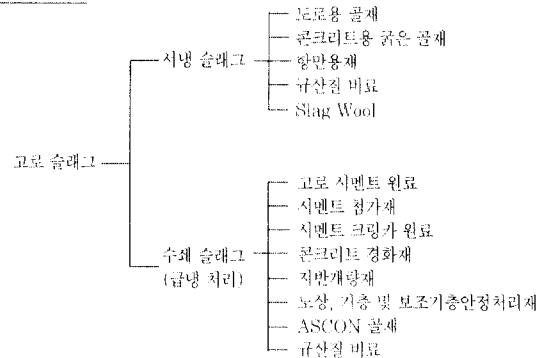
[서냉슬래그]



[급냉(수쇄)슬래그]

사진 1 슬래그의 외형

표 2 고로 슬래그의 주요 용도



를 비롯하여 상당히 다양하다. 주요한 용도를 표2에 표시한다.

### 2.2.2 골재 크기에 따른 분류

#### 1) 고로 슬래그 굵은 골재

##### (1) KS 및 지침

① 1981. 12 한국 공업 규격 KS F 2544 "콘크리트용 고로 슬래그 굵은 골재" 제정

② 1983. 1 "고로슬래그 굵은 골재 콘크리트 설계 시공지침" 제정

(2) 고로 슬래그 굵은 골재의 입도표준 : 5-40mm를 표준으로하여 5종류로 구분되며, 표3과 같다.

(3) 고로 슬래그 굵은 골재의 제조 흐름도는 그림2와 같다.

(4) 호칭 방법 : 절건비중, 흡수율, 단위 용적 무게

표 3 고로 슬래그 굵은 골재의 입도 표준

종 류	입자의 크기의 범위	체를 통과하는 것의 무게 백분율 %							
		50	40	25	19	13	10	No. 4	No. 8
고로 슬래그 굵은 골재 467	4 0 - 5	100	95-100	-	35-70	-	10-30	0-5	-
고로 슬래그 굵은 골재 4	40-20	100	90-100	20-55	0-15	-	0-5	-	-
고로 슬래그 굵은 골재 57	2 5 - 5	-	100	95-100	-	25-60	-	0-10	0-5
고로 슬래그 굵은 골재 67	2 0 - 5	-	-	100	90-100	-	20-55	0-10	0-5
고로 슬래그 굵은 골재 7	1 5 - 5	-	-	-	100	90-100	40-70	0-15	0-5

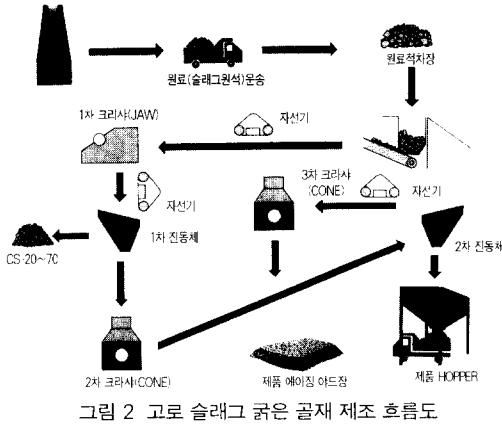


그림 2 고로 슬래그 굵은 골재 제조 흐름도

표 4 고로 슬래그의 분류방법

분 류	질건비중	흡수율(%)	단위용적무게 (kg/l)
A	2.2 이상	6 이하	1.25 이상
B	2.4 이상	4 이하	1.35 이상

표 5 고로 슬래그 품질

항 목	규 정 치
산화칼슘(CaO)	45.0 % 이하
황(S)	2.0 % 이하
3 산화황(SO <sub>3</sub> )	0.5 % 이하
철(FeO)	3.0 % 이하
수중 침지 시험	균열, 분해, 니상화, 분화 등의 현상이 없을 것.
자외선(360.0nm)조사 시험	발광하지 않거나 또는 균일한 자색을 띠고 있을 것

표 6 천연골재와 고로슬래그의 물성비교

굵은골재 종류	최대지수 (mm)	표기바중	흡수율 (%)	단위용적중량 (kg/m <sup>3</sup> )	실적율 (%)	마모감량 (%)	조립율
고 로 슬래그	25	2.63	3.51	1,500	57	44	7.11
	40	2.56	4.00	1,560	63	44	7.41
하 천 자갈	25	2.70	0.80	1,693	63.3	29	7.17
	40	2.69	0.90	1,717	65.7	29	7.35
부순돌	25	2.66	1.10	1,580	60.0	26.5	6.83
	40	2.64	1.10	1,580	60.3	26.5	7.24

기준에 따라 A, B로 분류하며 통상 "고로 슬래그 굵은골재(종류), (A또는B)로 호칭한다.

보 기 : 고로 슬래그 굵은 골재 467A

고로 슬래그 굵은 골재 57A

(5) 품 질

고로 슬래그 굵은 골재의 화학성분 규정값은 표5 를 만족해야 한다.

(6) 천연골재와의 물성 비교예를 표6에 나타낸다. 고로슬래그 골재가 내부에 공극이 많아 흡수율이 크고 단위용적 중량이 다소 가볍고 마모감량이 크게 나타나고 있으므로, 천연골재 보다는 다소 약한 골재이다.

(7) 고로 슬래그 굵은골재 콘크리트의 설계 계산에 관한 일반사항

① 단위 무게 : 시험을 통해 구한 값 또는, 2.3t/m<sup>3</sup>

② 탄성 계수 :

$$E_c = W^{1.5} * 4270 \sqrt{\sigma_{ck}}$$

W가 2.3t/m<sup>3</sup> 이면

$$E_c = 15000 \sqrt{f_c}$$

W = 콘크리트 단위무게 (t/m<sup>3</sup>)

$\sigma_{ck}$  = 콘크리트 설계기준강도(kg/cm<sup>2</sup>)

③ 콘크리트 선팽창 계수 : 1 \* 10<sup>-5</sup> / °C

④ 허용 응력 : 재령 28일의 압축강도로 정하는 설계기준강도 ( $\sigma_{ck}$ )에 준하여 다음과 같이 규정한다.

- 허용 휨응력 :  $\sigma_{ca} = 0.4\sigma_{ck}$   
 허용 인장응력 :  $\sigma_{ct} = 0.42\sqrt{\sigma_{ck}}$   
 허용 전단응력 :  $\tau_u = 0.25\sqrt{\sigma_{ck}}$  (약산식)  
 ( 기타 복잡한 공식들은 제외함 )

2) 고로 슬래그 잔골재

- (1) 1983년 한국공업규격 KS F 2599로 지정 되었으나 설계 시공지침은 미 제정.
- (2) 제조 방법은 수쇄 급냉 슬래그를 입도 조정하여 사용하거나 서냉 슬래그를 파쇄 입도조정하여 사용하는 방법의 2종류.
- (3) 고로 슬래그 잔골재의 종류는 표7과 같다.
- (4) 고로 슬래그 잔골재의 화학성분 및 재질은 표8과 같다.
- (5) 고로 슬래그 잔골재의 입도범위는 표9와 같다.
- (6) 현재까지 세골재로 사용되는 비율이 매우 저조

표 7 고로 슬래그 잔골재의 종류

종 류	입자의 크기(mm)
5mm 슬래그 잔골재	5 이하
2.5mm 슬래그 잔골재	2.5 이하
1.2mm 슬래그 잔골재	1.2 이하
5-0.3mm 슬래그 잔골재	5-0.3

표 8 고로슬래그 잔골재의 화학성분 및 재질

항 목	규정값	
화학성분 (%)	산화 칼슘(CaO)	45.0 이하
	총황(S로 표시)	2.0 이하
	3산화황	0.5 이하
재 질	총철(FeO로 표시)	3.0 이하
	절대 건조 비중	2.5 이상
	흡수율%	3.5 이하
	단위 부피 무게(kg/l)	1.45이상

표 9 고로 슬래그 잔골재의 입도

종 류	슬래그잔골재 입도범위						
	체를 통과한 것의 무게 백분율						
	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15
5mm 슬래그 잔골재	100	90-100	80-100	50-90	25-65	10-35	2-15
2.5mm 슬래그 잔골재	100	95-100	85-100	60-95	30-70	10-45	2-20
1.2mm 슬래그 잔골재	-	100	95-100	80-100	35-80	15-50	2-20
5-0.3mm 슬래그 잔골재	100	95-100	65-100	10-70	0-40	0-15	2-10

표 10 고로 슬래그의 성분비교

성 분	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	S	MnO	TiO <sub>2</sub>
고로 슬래그	33.4	41.0	14.5	0.4	6.0	1.0	0.7	1.5
보통 포틀랜드 시멘트	22.1	64.6	5.4	3.1	1.4	2.0	-	-

하나 점차 고로 급냉슬래그의 생산비율이 높아지면서 해사등을 대체할 고로슬래그 세골재의 사용율이 높아질 것으로 사료된다.

2.3 고로 슬래그 성질

2.3.1 고로 슬래그의 성질

고로 슬래그를 잔골재 및 조골재로 사용한 콘크리트의 성질을 천연골재(강사, 강자갈, 쇠석등)사용 콘크리트와 비교하면 다음과 같다.

1) 고로 슬래그 세골재 사용 콘크리트가 강사 사용 콘크리트에 비하여

(1) 재령에 따른 압축강도는 초기 강도에서 약 10%낮다 (슬래그 세골재의 큰 흡수성 때문). 그러나 장기강도는 증가하여 28일 강도는 비슷하고, 71일 부터는 높아져 1년에서 0-30%, 2년에서 10-40% 정도의 강도가 증가된다.

(2) 인장강도와 휨강도는 유사하다.

(3) 건조수축량은 10-30%적다.

2) 고로 슬래그 쇠석사용 콘크리트가 천연쇠석이나 자갈사용 콘크리트에 비하여

(1) 압축강도는 유사하지만 초기 강도는 평균적으로 7일강도에서 10 - 20%, 28일에서 5 - 10% 정도 높으며, (고로 슬래그 쇠석의 형상과 표면상태의 영향) W/C가 낮아질수록 더욱 그러하다.

(2) 인장강도는 비슷하나 휨강도는 약간높다.

(3) 건조수축은 작다 (고로 슬래그 쇠석의 골재내부 세공구조의 장기수분 함유때문)

(4) 동결융해 저항성은 좋은 품질의 쇠석이나 자갈 사용 콘크리트와 동등하다.

(5) 내열성이 우수하여 특수용도에 활용이 기대된다.

### 2.3.2 고로 슬래그 자체의 성질

1) 유황성분을 함유하고 있으나 에이징(AGING) 과정에서 안정화되어 고정되므로 규격화된 제품으로서 손색이 없고 환경문제도 없다.

2) PH가 제조 초기에는 10.0 - 11.5 로서 강한 알칼리성을 가지나 해독성보다는 산성토양과 산성비에 대한 중성화를 보완하는 긍정적 효과가 있다.

3) 시멘트와 성분이 유사하여 수경성이 있으며, 수쇄 슬래그는 강한 잠재수경성을 지내며, 서냉 슬래그는 장기간(1년)에 걸쳐 수경성이 발휘된다.

4) 미분말 형태가 되면 포졸란 작용을 하여 재료분리와 블리딩을 감소시켜 시공연도를 개선하며, 수화열이 낮아 Mass 콘크리트에 채용시 효과적이며, 무수화산 저항성이 크고, 굵은 골재로 채용시 내구성, 내화성, 단열성이 우수하다.

## 3. 결 론

이상의 정리 결과에 따르면 슬래그 골재는 골재로서의 특별한 문제점이 없으나 생산지가 주 소비도시와는 거리가 멀어 수송비가 높아진다는 가장 큰 문제점과 실제 적용 경험부족, 물리 화학적 연구부족 등으로 인하여 골재로서의 활용도가 낮은 현실이다. 또한 고로 슬래그는 산업폐기물로서 일반폐기물 가운데 무기물류로 분류되어 전체 폐기물의 40% 정도를 차지하고 있으며, 슬래그 생산량이 많고 콘크리트에 적용비율이 높은 일본, 미국, 오스트리아, 벨기에, 룩

셈부르크 등의 활용방법 등을 적극적으로 수용 국내 실정에 맞게 수정 보완 함으로써 슬래그 골재생산에 대한 기술력을 제고시킴은 물론 콘크리트용 골재로 채택가능한 적용실적과 연구를 지속적으로 병행시켜 나감으로써 훌륭한 재활용 골재가 개발된다면 천연 자갈과 모래 부족에 따른 산림훼손과 바다오염 등 자연환경보호, 자원절감 등의 효과가 기대되며, 슬래그 골재 자체의 특징을 살려 특수 목적용 콘크리트 등에 활용한다면 그 활용 비율을 훨씬 더 높힐 수 있을 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. 콘크리트용 고로 슬래그 굵은골재, KS F 2544, 1981
2. 콘크리트용 고로 슬래그 잔 골재, KS F 2559, 1983
3. 고로 슬래그 굵은골재 콘크리트 설계시공 지침, 사단법인 대한토목학회, 1983.1
4. 社團法人 土木學會 高爐 Slag 細骨材 を 用いたコンクリートの 設計施工指針(案), 1983.2
5. 문한영 외 2명 고로 슬래그를 골재로 사용한 콘크리트의 제성질에 관한 연구, 대한 토목학회 학술강연, 1984.10
6. 문한영 외 2명 고로 슬래그 굵은골재를 사용한 콘크리트 강도에 대한 고찰, 대한토목학회 학술강연, 1985.10
7. 정상진 외 5명 수채사 모르타의 FLOW특성에 관한연구, 한국콘크리트학회 97추계 학술발표대회 논문집, 1997.10
8. 정상진 외 5명 수채슬래그 모르타의 강도 특성에 관한연구, 대한건축학회 97추계 학술발표대회 논문집 1997.10
9. 환경처 철강슬래그의 재생이용 등에 관한 지침, 1990.12
10. 포항 종합제철/동서개발 주식회사 철강슬래그의 재생이용 활성화 방안, 1991.12
11. 동서 개발 주식회사 고로 슬래그 파쇄골재, 1994 