

동슬래그의 콘크리트용 골재 활용에 관한 기본연구

송태협^{1)*} · 이문환¹⁾ · 이세현¹⁾

¹⁾한국건설기술연구원 건축연구부

(2002년 1월 28일 원고접수, 2002년 11월 19일 심사완료)

A Fundamental Study of Ferro Copper Slag for Concrete Aggregate

Tae-Hyeob Song^{1)*}, Mun-Hwan Lee¹⁾, and Sea-Hyun Lee¹⁾

¹⁾ Building Research Division, KICT, 2311, Daehwa-dong, Ilsan-gu, Koyang, 411-712, Korea

(Received January 28, 2002, Accepted November 19, 2002)

ABSTRACT

To use ferro copper slag as aggregate in the construction, an evaluation upon the two kinds of ferro copper slag being produced was conducted to determine the basic physical, and mechanical properties, chemical component and environmental noxiousness. As a result of experiment, it was found that two kinds of ferro copper slag satisfies the physical and mechanical properties of aggregate, prescribed in KS F 2526, and that in the result of noxious heavy metal eruption test by single bach extraction, no eruption of noxious heavy metal was detected or the eruption was far below the reference value. And mortar test was conducted by replacing sand of 25, 50, 75, 100% and the performance level was presented upon reviewing the fluidity property and variable aspects of unit weight. The increase of strength in accordance with replacement rate of sand was found to be the below than the equivalent level compared to the testing specimens that did not use ferro copper slag, but those of 25% replacement rate was above than 0%.

Thus, two kinds of ferro copper slag, produced in the domestic, were found to be possessing the enough physical properties to use as concrete aggregate assuming that used with sand and in particular, it was reviewed to be advantageous in manufacturing concrete or mortar that requires weight.

Keywords : ferro copper slag, industrial by-product, heavy weight concrete

1. 서 론

슬래그의 재활용은 부산자원의 활용이라는 측면에서 여러 분야로 접근될 수 있으나, 건축 및 토목분야는 그 사용량이 막대하므로 다양한 제품과 공법에 응용될 수 있는 기술적 가능성이 있다. 특히 슬래그를 건설재료로 사용하는 것이 가능할 경우, 건축 및 토목분야의 기본 소재인 골재라는 상품특성에서 그 활용 가능성이 크게 인정된다.

고로슬래그는 이미 국내외적으로 활발한 연구가 진행되어 토목·건축용 골재는 물론 시멘트 혼화제로도 범용적으로 사용되고 있다¹⁾.

동슬래그의 경우에는 고로슬래그에 비하여 그 생산량이 적고 그간의 안정적인 소비로 인하여 적극적인 용도개발 및 연구가 진행되지 않았다. 그러나 천연골재의 고갈로 인해 쇄석을 얻기 위한 석산개발, 바다모래의 채취 등이

끊임없는 환경과피 논쟁을 일으키고 있어 건설용 골재의 수급에 많은 어려움이 따르고 있다. 또한, 슬래그 자체의 입형 및 생산과정이 고로슬래그와 유사하고, 입도 자체를 생산과정에서 조절할 수 있는 장점으로 인하여 건설용 골재로서의 활용 가능성에 대한 관심을 가지게 되었다²⁾.

일본의 경우에는 콘크리트용 동슬래그 골재에 대한 JIS 규격을 이미 1997년도에 제정하여 그 활용을 촉진하고 있고, 미국에서는 주로 지반 공학적인 특성에 대한 연구가 다수 진행되고 있다³⁾.

따라서 본 연구는 국내에서 연간 70만톤 이상 발생하는 동제련 슬래그를 대상으로 콘크리트용 잔골재로 재활용하기 위한 연구의 일환으로 동슬래그의 물리적 특성, 화학조성, 환경 유해성 등을 평가하였고, 천연골재를 일정부분 치환하여 제작한 모르타르 실험을 통하여 유동성 및 강도특성을 천연모래와 비교·고찰하여 향후 콘크리트용 잔골재로서의 활용을 위한 기초자료 제공을 목적으로 하고 있다.

* Corresponding author
Tel : 031-910-0352 Fax : 031-910-0713
E-mail : thsong@kict.re.kr

2. 동슬래그의 종류 및 생산

현재 세계적으로 동제련 설비의 주된 공법은 핀란드 오토컴프(Outokumpu)사의 자용로 공법과 일본 미쓰비시(Mitsubishi)사의 연속동제련 공법이다. 동제련이란 일차 동광석을 녹여 조동(Anode)을 만들고 정련과정을 거쳐 전기동을 생산하는 일련의 공정을 말하는데, 일반적으로 동광석은 황화광 정광을 이용하며 주성분은 $CuFeS_2$ 로 Cu, Fe, S의 양이 거의 비슷하다. 이러한 정광을 용제(Flux)인 규사(SiO_2)와 혼합하여 고농도의 산소부화공기와 반응시키면 정광 중의 S는 산소와 결합하여 가스상대인 SO_2 로 연소되고, 이 가스는 포집되어 황산(Sulfuric acid)으로 제조된다. Fe는 산화물 형태인 FeO 로 역시 산화되어 용제인 SiO_2 와 만나 슬래그를 형성하고, Cu가 주성분인 매트(Matte)와 비중차에 의해 분리 제거된다⁴⁾.

생성된 매트는 전로공정(Converting), 정제로공정(Fire refining), 전해정련(Electro refining) 등 일련의 정련(Refining)과정을 통하여 99.99%의 전기동으로 생산되어 전선제조업체 등으로 공급된다. 제련과정 중에서 매트와 분리된 동슬래그는 전기로(Electric resistance furnace)에서 유가금속회수를 위한 Setting 과정을 거친 후 고압수에 의해 수쇄된다. 수쇄 후의 동슬래그는 미립(Granule) 상태로 대략 0.3~5.0mm의 입도 분포를 갖게 된다.

동슬래그는 동 1톤을 제련하는데 일반적으로 1.4톤이 발생하며 국내에는 연간 약 70만톤 정도의 동슬래그가 발생하고 있고 이중 연속로 슬래그(이하 CCS)가 45만톤, 자용로 슬래그(이하 FCS)가 약 25만톤 정도(2000년 기준)를 차지하고 있다.

1200°C 이상의 고온 용탕 상태로 배출되는 동슬래그는 고압의 수쇄수에 의해 입형으로 제조되고 건조-입도선별 공정을 거쳐 제품으로 출하되는데, 주요 용도로는 시멘트 철성분을 공급하기 위한 가철재, 선박수리시 녹 제거용으로 사용되는 샌드블라스팅재가 있으며, 일부 해외로 수출되어 벽돌 등의 제조에 사용되고 있다.

샌드블라스팅재는 과거에 모래를 사용하였으나 모래 사용시 분진 발생 등으로 인한 환경오염과 천연골재 고갈로 인한 가격상승 때문에 현재 전 세계적으로 동슬래그가 주로 사용되고 있다.

한편, 동슬래그는 Fe 함량이 높아(35~45%) 철광석의 대용으로 시멘트의 산화철 성분을 공급하기 위한 목적으로 투입되고 있다.

외국에서는 동슬래그 활용에 대한 연구가 다수 수행되었으며, JIS 및 DIN과 같은 국가 규격⁵⁾으로 이미 제정이 된 경우도 있다. 그러나 동슬래그는 생산공정에 따라 입형 및 물리적 특성이 다르므로 국내에서 생산되는 동슬래그에 대해 별도의 특성분석이 필요하다.

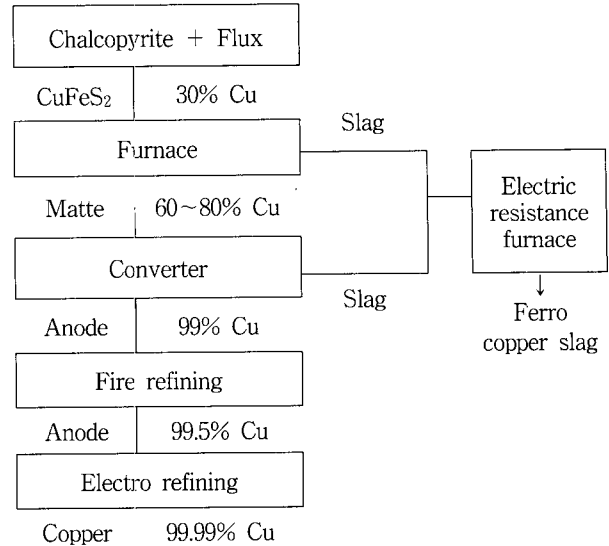


Fig. 1 Copper Smelting Process

Table 1 Product amount and consumption of ferro copper slag⁵⁾

		(1,000ton)			
Usage		Year			
		1997	1998	1999	2000
Product amount		342	526	652	700
Consumption	Cement materials	196	280	393	244
	Sand blasting	120	113	132	97
	Construction	-	-	-	341
	etc	-	3	152	103

3. 동슬래그 골재의 활용도 평가

본 연구에서는 국내에서 생산되고 있는 2종의 동슬래그를 대상으로 콘크리트용 골재로서의 활용 가능성을 검토하기 위한 기본적인 물리적 특성 및 화학조성을 분석하고, 잔골재를 치환한 모르타르를 제작하여 물리·역학적 특성 변화를 비교·분석하였다. 즉, 한국산업규격에서 규정하고 있는 콘크리트용 잔골재의 특성 기준에 따른 기초적인 물리적 특성 파악과, 슬래그의 결정특성을 SEM과 XRD를 이용하여 분석하였으며, 특히 냉각 조건에 따른 결정의 변화를 관찰하기 위하여 동슬래그의 냉각속도에 따른 상분석과 성분분석을 실시하였다. 또한, 모르타르 제조시 잔골재를 25, 50, 75, 100% 치환하였을 경우의 유동특성 및 단위용적중량 변화 그리고 압축강도, 휨강도, 인장강도의 발현특성을 분석하였다.

3.1 물리적 특성 시험

3.1.1 시험방법

- 1) 비중 및 흡수율 : KS F 2504(잔골재의 비중 및 흡수율 시험)에 준하여 절대건조상태 비중과 흡수율을 측정하였다.
- 2) 단위용적중량 : KS F 2505(골재의 단위용적중량 및 공극률 시험)를 적용하였다.
- 3) 점토덩어리량 : KS F 2512(골재 중에 함유되는 점토덩어리량의 시험방법)에 의거 측정하였다.
- 4) No. 200체 통과량(0.08 mm체 통과량) : KS F 2511(골재에 포함된 잔 입자(0.08 mm체를 통과하는) 시험방법)를 적용하였다.
- 5) 조립률 및 실적률 : KS F 2502(골재의 체가름 시험방법)에 따라 측정하였다.

3.1.2 시험결과 및 고찰

1) 비중 및 흡수율

천연모래의 절대건조 비중은 2.59 정도인데 비해 FCS는 3.74, CCS는 3.40으로 일반 천연모래에 비하여 44 %, 31 % 정도 높게 나타났으며, 흡수율은 일반 천연모래 0.90에 비하여 훨씬 낮은 0.52, 0.20으로 나타나 혼합수량 관리상의 안정성이 매우 우수한 것으로 나타났다.

이러한 결과는 KS F 2526(콘크리트용 골재)에서 규정하는 잔골재의 비중(2.50 이상) 및 흡수율(3.0 % 이하)을 만족하는 수준이다.

2) 단위용적중량

FCS의 단위용적중량은 2,400 kg/m³, CCS의 단위용적중량은 2,238 kg/m³로 천연모래의 단위용적중량 1,816 kg/m³에 비하여 각각 32 %, 23 % 정도 높게 나타났다. KS F 2526에서는 골재의 단위용적중량에 대한 기준이 설정되어 있지 않으나, JIS A 5011-3(콘크리트용 동슬래그 골재)에서 규정하고 있는 단위용적중량 1,800 kg/m³ 이상의 규정을 모두 만족하고 있다.

3) 점토덩어리량

FCS는 0.6 %, CCS는 0.1 %로 매우 안정적으로 나타났다. 이러한 결과는 KS F 2526에서 규정한 잔골재의 점토덩어리량 1.0 %를 만족하는 것으로서 사용성에 문제가 없는 것으로 분석되었다.

4) No. 200체 통과량

골재에 대한 미립자 전체의 양을 검토할 목적으로 시행된 No. 200체 통과량 시험결과, FCS는 0.4 %, CCS는 0.3 %로 매우 낮게 나타나 콘크리트용 골재로서 한국산업규격(KS F 2526)의 잔골재 규정 3.0~5.0 % 이하를 만족하

고 있으며, 미세 입자에 의한 성능의 저하는 없는 것으로 나타났다.

5) 조립률 및 실적률

FCS의 F.M은 3.31, CCS의 F.M은 3.75로 천연모래 2.62에 비하여 다소 높게 나타났으며, KS F 2526에서 규정하는 입도범위를 벗어난다. 이와 같이 동슬래그가 저입도 비율이 부족한 것은 생산공정에서 발생하는 특징이며, 오랜기간 풍화와 침식을 통해 자연적으로 형성된 천연모래와 크게 다른 점이다.

새로이 제정된 KS F 2543(콘크리트용 동슬래그 골재)에서는 동슬래그의 이러한 특성을 고려하여 Fig. 2와 같이 입도범위를 정하고 있으며, 본 시험에 사용한 L사의 동슬래그 2종은 모두 이 규정 범위에 속해있다.

한편, FCS의 실적률은 66.5 %로 천연모래 63.6 %에 비하여 충전상태가 좋으나 CCS는 60 %로 천연골재에 비하여 실적률이 낮게 나타났다. 이는 골재의 입형이 FCS의 경우 원형의 형태로 제조되지만, CCS의 경우 각형의 입자가 많기 때문인 것으로 판단된다.

3.2 화학적 조성 분석

동슬래그의 습식 분석에 의한 화학분석결과는 Table 2와 같다. 동슬래그는 철분이 36~48 %, 규사 27~34 % 정도 함유되어 있어 이들 2가지 성분이 대부분을 차지하고 있다. 또한, 다량 함유된 철분으로 인하여 검은색을 띠고 있으며, 이로 인하여 내화성능도 우수한 것으로 보고되고 있다. 그 외에 소량의 산화물로 Al₂O₃, CaO, MgO 등이 포함되어 있다. FCS 및 CCS는 성분간의 함량 차이는 있으나 기본적인 조성에서는 유사하다고 볼 수 있다⁶⁾.

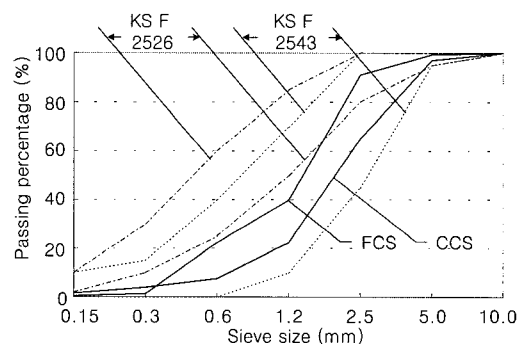


Fig. 2 Results of sieve test

Table 2. Chemical components of copper slag

	Fe	Fe ₃ O ₄	SiO ₂	Cu	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Basicity
CCS	38.13	4.17	33.46	0.91	4.67	0.98	4.74	0.31
FCS	46.39	6.93	30.65	0.97	0.95	1.04	4.10	0.20

동슬래그의 미세조직 양상을 주사전자현미경(SEM) 관찰한 결과, 자용로 슬래그의 경우 기지조직(基地組織)에 있어서 Fayalite($2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$) 선상조직이 잘 발달되어 있고, 냉각속도의 감소에 따라 조직이 성장하는 것으로 나타났다. FCS 내에 약 1% 정도 함유되어 있는 구리성분은 냉각속도 감소에 따라 입자의 형상이 커지고 있으며, 특이한 점은 주로 Magnetite(마그네타이트)상과 인접한 곳에 위치하고 있거나, Magnetite상 내부에 존재하는 것이다.

또한, FCS 내에 미량 존재하는 중금속들은 별도의 상을 형성하지 않으며, 기지조직에 완전히 용해되어 있는 것으로 나타났다. 이러한 이유로 인하여 동슬래그가 안정한 상으로 존재하며 중금속 용출이 어려워지게 된다고 판단된다. 한편, 수냉 슬래그의 경우 매우 치밀한 조직구조를 보여주고 있는 반면, 냉각속도 감소에 따라 약간의 기공도 조직 내에 있는 것으로 나타났다.

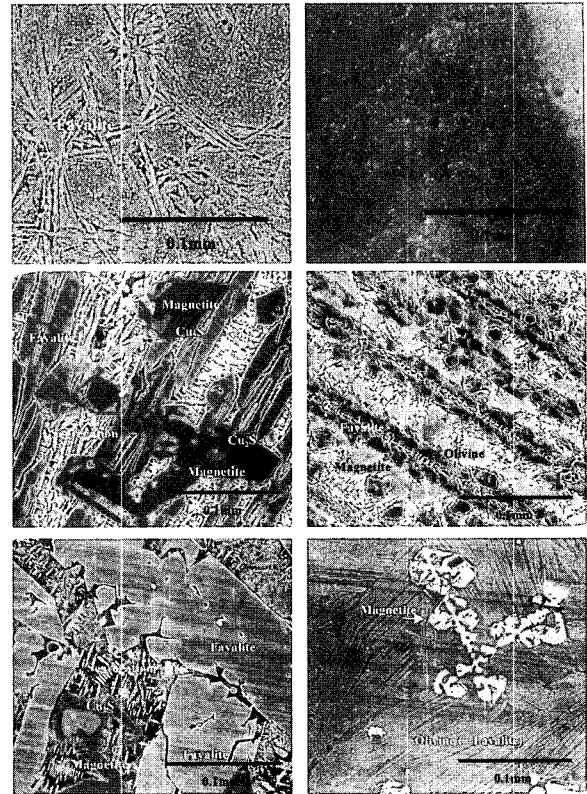
CCS의 경우, 수냉조직은 특별한 미세조직을 형성하지 않는 것으로 나타났는데, 이는 CCS가 비정질 상태로 존재하기 때문인 것으로 추정된다. 그러나 냉각속도 감소에 따라 뚜렷한 미세조직이 관찰되며, 특이한 점은 로냉의 경우 FCS와 달리 Olivine(올리비네, $\text{FeO}-\text{SiO}_2-\text{CaO}$)상이 기지조직을 형성하는 것이다. 이는 CCS가 FCS에 비하여 CaO 함량이 5~6% 정도로 다소 높으며, 냉각속도가 감소함에 따라 3성분의 평형상인 Olivine상이 형성되기 때문인 것으로 판단된다.

냉각속도 변화에 따른 동슬래그의 X-선 회절 분석결과, 현미경 분석에서 설명하였던 것처럼 FCS는 Fayalite상이 전체적으로 주를 이루고 있음을 알 수 있으며, 일부 Fe는 Magnetite 형태로 존재함이 관찰되었다. FCS는 수냉상태에서부터 결정화되어 있어 결정질의 peak 형태를 보이고 있으나, 냉각속도 감소에 따라 점차 peak 형태가 더욱 뚜렷해지고 peak 강도 역시 증가되는 양상을 나타내었다.

CCS는 수냉상태에서 비정질(amorphous) 특유의 peak 형태를 보이나, 냉각속도 감소에 따라 점차 결정화가 진행되어 공냉 및 로냉에 있어서 뚜렷한 화합물 상을 나타내었다. 공냉상태의 조직에서는 Fayalite가 주를 이루고 있고, 일부 Olivine상이 관찰되었으나 로냉상태에서는 Olivine상이 더욱 성장하여 Fayalite와 혼재되어 있는 양상이다. Magnetite상도 냉각속도의 감소에 따라 성장하여 peak 강도도 증가되었는데, 이는 냉각속도가 감소함에 따라 조직 중의 FeO 성분이 대기 중의 산소와 반응하여 Magnetite로 산화되기 때문인 것으로 판단된다.

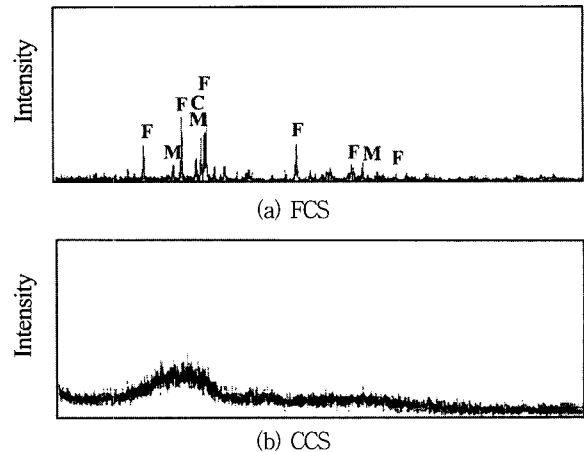
3.3 환경 유해성 평가

산업부산물에 함유되어 있는 유해물질이 사람의 건강에 영향을 미치는 것은 최종적으로 음용수나 음식을 통하여 나타나기 때문에 그 폐기물의 유해성 여부는 폐기물로



(a) FCS (b) CCS
From the top Water cooling($100^\circ\text{C}/\text{sec}$),
Air cooling($0.25^\circ\text{C}/\text{sec}$), Furnace cooling($0.05^\circ\text{C}/\text{sec}$)
(F : Fayalite, M : Magnetite, C : $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$)

Fig. 3 SEM analysis of ferro copper slag



(F : Fayalite, M : Magnetite, C : $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$)
Fig. 4 X-ray diffraction of ferro copper slag

부터 용출되는 유해물질의 농도에 따라 결정된다. 용출시험(Leaching Test)은 산업부산물 중에 함유되어 있는 유해물질이 우수침투로 인해 산업부산물로부터 침출되어 지하수 등을 오염시키는 것을 미연에 방지하기 위한 하나의 검정방법으로, 산업부산물의 유해성과 비유해성을 판별하

는데 이용된다. 또한, 용출시험은 침출수의 성분, 용출되어 나오는 물질들의 양, 유해한 침출수가 발생하는 조건 등을 평가하는 방법으로 산업부산물 주위환경에 미치는 영향을 예측하는 데에 활용된다. 따라서 본 연구에서는 폐기물공정시험법에 의한 용출시험을 실시하여 동슬래그의 환경 유해성을 평가하였다.

3.3.1 시험방법

용출시험은 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 정밀하게 계량한 동슬래그 100 g과 미네랄 성분을 제거시킨 증류수 (0.1N HCl 용액을 가하여 pH 5.8~6.3으로 조정) 1000 ml를 2000 ml 삼각플라스크에 넣고 상온, 상압에서 매분당 진탕회수 약 200회(진폭 4~5 cm)로 6시간 연속 진탕한 다음, 1.0 μm의 유리섬유 여과지로 여과액을 추출하여 용출시험을 실시하였다⁷⁾.

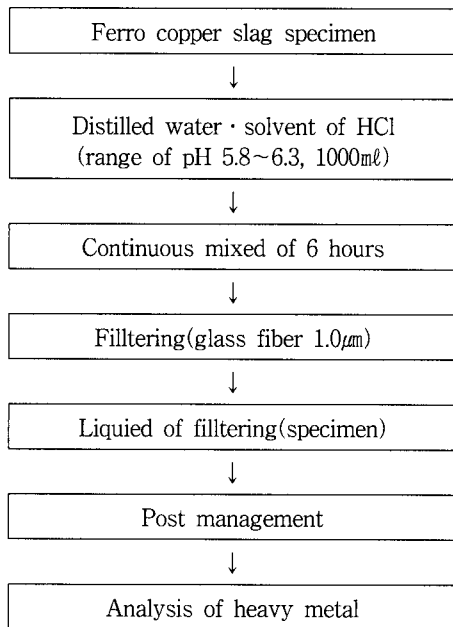


Fig. 5 Test method for elution of ferro copper slag

Table 3 Test result of elution for ferro copper slag

Control material	Unit	Limit (under)	Ferro copper slag	
			CCS	FCS
Pb	mg/ℓ	3.0	0.08	0.09
Cu	mg/ℓ	3.0	0.40	0.68
As	mg/ℓ	1.5	ND	ND
Hg	mg/ℓ	0.005	ND	ND
Cd	mg/ℓ	0.3	0.01	ND
Cr	mg/ℓ	1.5	ND	ND
CN	mg/ℓ	1.0	ND	ND
P	mg/ℓ	1.0	ND	ND

* ND : Not Detect

3.3.2 시험결과 및 고찰

폐기물공정시험법에 의한 용출시험 결과, 규제물질로 정하고 있는 As, Hg, Cr, CN, 트리클로로에틸렌, 테트라클로로에틸렌, 유기인 등의 용출은 전혀 없는 것으로 나타났다. Pb, Cu, Cd 등은 미량 검출되었으나 허용기준보다 아주 낮게 나타났다(폐기물관리법 시행규칙 별표 1(지정폐기물에 함유된 유해물질) 참조).

3.4 pH 측정

3.4.1 시험방법

동슬래그를 콘크리트용 골재로 활용시 내구성에 관계되는 노화나 잠재부식에 미치는 영향을 파악하기 위하여 pH 측정이 요구된다.

본 시험에 사용한 pH meter는 H사에서 생산되는 장비를 사용하여 250 ml 비이커에 동슬래그 50 g을 넣은 다음, 미리 준비한 증류수 200 ml를 섞어 유리막대로 약 3분간 저은 후, 3시간 동안 방치하여 동슬래그+증류수 혼합물의 pH를 측정하였다. 측정은 5회 측정하였을 때, 그 재현성이 ± 0.1 이내의 것을 사용하였으며, 30일까지 측정하여 시간에 따른 pH의 변화를 파악하였다.

3.4.2 시험결과 및 고찰

측정된 동슬래그의 pH 결과는 2종의 동슬래그 모두 Table 4와 같이 6.91~7.04의 범위로 중성기준인 7에 근접하게 측정되었다. 오염물질 배출허용기준을 살펴보면, 일반적으로 pH 값은 5.8에서 8.6의 범위로 규정하고 있다. 따라서 상기의 결과로부터 동슬래그는 구조물의 내구성에 관계되는 콘크리트의 노화나 강재의 부식 등에 직접적인 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

3.5 동슬래그의 모르타르 배합실험

3.5.1 실험방법

2종의 동슬래그를 콘크리트용 골재로 활용하기 위한 기본연구로서 천연골재를 소정량 동슬래그로 치환하여 모르타르를 제작하고, 그 물리·역학적 특성분석을 실시하였다. 실험체 제작에 사용된 시멘트는 일반 포틀랜드 시멘트이며, 잔골재인 천연모래 및 동슬래그의 물리적 특성은 Table 5와 같다.

모르타르 제작을 위한 시멘트와 잔골재의 배합비율(용적비)은 1 : 3으로 하고, 목표 플로우는 18 cm를 기준으로 배합계획을 수립하였다.

천연모래에 대한 동슬래그의 치환비율(용적비)을 0, 25, 50, 75, 100 %로 25 %씩 단계적으로 증가시켜 모르타르를 제작하고, 실험체의 플로우, 단위용적중량 및 압축강도, 휨강도, 인장강도를 측정하였다.

Table 4 Variation of pH for ferro copper slag with time

Time (day)	1	2	3	5	10	15	20	25	30
pH	6.94	6.91	6.92	6.98	6.94	7.01	6.98	6.97	7.04

Table 5 Physical properties of fine aggregate

Fine aggregate	Specific gravity	Absorption (%)	Fineness modulus	Unit weight (kg/m ³)	Void ratio (%)
Sea sand (inchon)	2.59	0.90	2.62	1.796	30.5
FCS	3.74	0.52	3.31	2,140	42.7
CCS	3.40	0.20	3.75	2,049	39.6

Table 6 Mixing design of mortar

Type	Slag/ (sand+ slag) (vol%)	W/C (wt%)	Unit weight(kg/m ³)			
			Cement	Sand	Ferro copper slag	Water
FCS	0	45	576	1,420	0	259
	25		576	1,065	513	259
	50		576	709	1,025	259
	75		576	355	1,538	259
	100		576	0	2,050	259
CCS	0	45	576	1,420	0	259
	25		576	1,065	466	259
	50		576	709	932	259
	75		576	355	1,398	259
	100		576	0	1,864	259

Table 7 Test set up & appearance of specimens

Test item	Referenced document	Testing size & shape	Note
Flow	KS L 5111	∅254mm	Flow table method
Unit Weight	KS F 2409	50×50×50mm	-
Compressive strength	KS L 5105	50×50×50mm	-
Tensile strength	KS L 5104	76.2mm Bracket type	Direct tensile method
Flexural strength	KS F 2325	40×40×160mm	3 point span : 140mm

3.5.2 실험결과 및 고찰

1) 플로우

천연모래 만을 사용한 경우에 비해 굵은 입자 비율이 상대적으로 큰 동슬래그로 치환한 경우에 유동성이 상대

적으로 향상되었다. Fig. 6은 동슬래그 치환비율에 따른 플로우값의 변동경향을 나타낸 것으로, 세립자 함유량이 적은 CCS로 천연모래를 치환하였을 때 유동성이 다소 증가되는 경향을 보인다.

다만, 치환비율 50 %선까지는 상대적으로 높은 입형의 FCS가 높은 플로우값을 나타내었다. 그 이후 2종의 동슬래그 모두 치환비율이 증가함에 따라 플로우값은 천연모래 만을 사용한 당초의 수준으로 근접하는데, 이는 동슬래그의 굵은입자 함유율 및 비중이 크고, 다공질의 형태를 가지고 있기 때문에 점성이 저하되어 플로우값이 감소되는 현상으로 판단된다.

2) 단위용적중량

동슬래그로 치환하지 않은 모르타르의 경우는 모든 배합에서 단위용적중량이 2.17 t/m³ 수준의 값을 나타내었으나, 단계적으로 동슬래그의 치환비율을 25%씩 높여 갔을 때 단위용적중량은 천연모래 만을 사용한 모르타르에 비하여 평균 5.5 %씩 증가하며, 100 % 치환시에는 2.83~2.89 t/m³의 값을 나타내었다.

이는 동슬래그가 비중이 높은 철분(Fe)과 규사(SiO₂)를 각각 46 %, 31 % 주성분으로 함유하고 있어, 골재의 비중이 3.40(CCS), 3.74(FCS)로 천연모래의 2.59보다 높으며, 이에 따라 단위용적중량 역시 천연모래보다 높게 형성된 것으로 사료된다.

따라서, 동슬래그 100 % 치환시의 단위용적중량이 무혼입 배합에 비하여 22 %나 높아, 향후 모르타르나 콘크리트용 골재에 적용할 경우 중량 문제에 대한 대책이 강구되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 동슬래그의 화학성분과 물리적인 성질이 중량콘크리트의 골재 규준에 적합하여 중량콘크리트용 골재로서의 적용 등에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3) 압축강도

콘크리트 및 모르타르의 강도는 시멘트 페이스트의 강도, 페이스트와 골재간의 부착강도, 물-시멘트비 이외에도

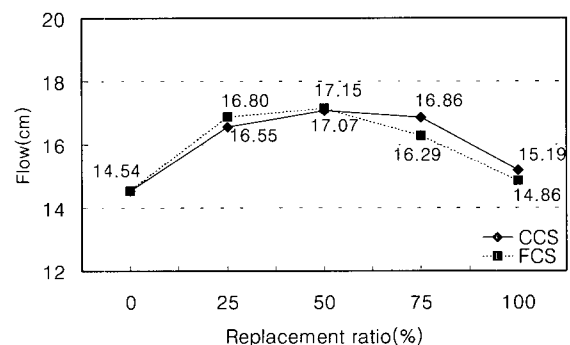


Fig. 6 Flow on replacement of ferro copper slag

골재의 강도, 종류, 공극률, 사용량 등에 따라 영향을 받을 수 있다.

28일 압축강도 측정결과, 2종의 동슬래그 모두 치환비율 25%까지는 천연모래 만을 사용한 경우와 동등 이상의 강도수준을 나타내었으나, 치환비율의 증가에 따라 직선적인 관계로 압축강도가 감소되었다.

100% 치환할 경우에는 CCS가 458 kgf/cm², FCS가 435 kgf/cm²으로 천연모래 만을 사용한 경우에 비하여 각각 14.7%, 19.0% 정도 강도저하가 있었다. 이는 동슬래그 자체의 강도가 천연모래에 비해 작은 것을 입증하는 것이나, 소정의 치환 수준까지는 오히려 강도증가의 요인이 존재하는 것을 알 수 있었다.

즉, 보다 다양하고 세분화된 실험을 통해 검증되어야 하겠으나 Fig. 8의 경향을 통해 추정해 볼 때, 30% 수준 정도까지는 천연모래와 동일한 강도설계가 이루어져도 무방한 것으로 판단된다. 한편, 동슬래그를 사용한 경우에 강도의 상승이 일부 있는 것은 골재의 표면조직이 시멘트 페이스트와의 부착을 용이하게 할 수 있는 거친 형상이기 때문이며, CCS가 FCS에 비해 각형 및 큐빅형이 많아 그 영향이 더욱 확연하였다고 생각된다.

4) 인장강도

동슬래그의 치환비율에 따른 인장강도 측정결과, 동슬래그로 치환하지 않고 천연모래 만을 사용한 경우 평균 33.3 kgf/cm²이며, 치환비율 25%에서 다소의 강도 증진 및 동등 수준이 발현되는 것으로 나타났다. 그러나 치환비율 50% 이상에서는 치환비율 증가에 따라 천연모래 만을 사용한 실험체에 비해 점차 강도가 저하되는 현상을 발현하였다.

2종의 동슬래그 모두 동일한 양상을 보이나 CCS의 경우에 25%의 치환비율에서 약간의 강도 증진이 있다는 것이 특징이다. 이는 치환비율에 따른 압축강도의 변동경향과 같은 현상으로 설명되지만, 치환비율의 증가에도 불구하고 동슬래그 유형에 따른 차이가 크지 않아 동슬래그의 종류에 따른 인장강도의 변화가 무시할 수 있는 수준이다.

5) 휨강도

동슬래그 치환비율에 따른 휨강도 측정 결과, 압축강도 및 인장강도의 실험결과와 그 상관관계가 근사하다. 다만, Fig. 9에 나타난 바와 같이 CCS로 치환한 계열의 평균 휨강도가 FCS로 치환한 실험체의 평균 휨강도에 비해 다소 높게 나타났다. 이는 FCS의 입형은 구형으로 형성되어 있어 휨응력에 대한 저항력이 약한 반면, CCS의 경우 입형이 각형 및 큐빅형상으로 되어 있고 슬래그 내에 섬유상의 물질이 다량 존재하여 이러한 물질이 휨응력을 증가시키는 원인이 되었던 것으로 판단된다.

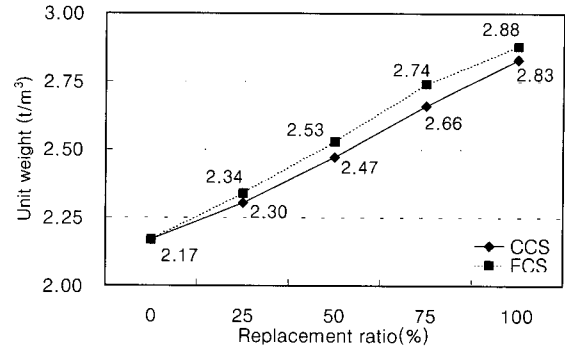


Fig. 7 Unit weight on replacement of ferro copper slag

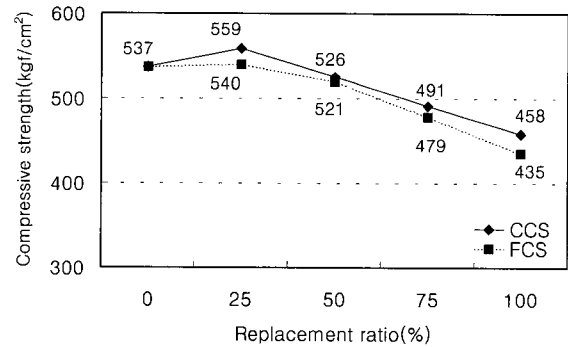


Fig. 8 Compressive strength on replacement of ferro copper slag

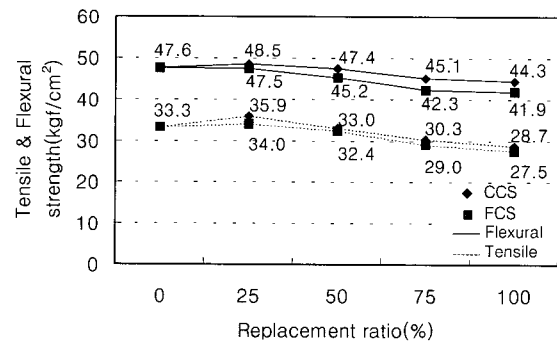


Fig. 9 Tensile & Flexural strength on replacement of ferro copper slag

4. 결 론

- 1) 국내에서 생산되고 있는 FCS 및 CCS의 기본적 특성 시험 결과, KS F 2543(콘크리트용 동슬래그 골재)에서 규정하고 있는 기준치를 모두 만족하였으며, 국내 폐기물 공정시험법에 의한 동슬래그의 용출실험결과, 2종의 동슬래그는 규제물질 허용 기준치를 넘지 않았고, pH 역시 오염물질 배출허용 기준 이내로 나타나 동슬래그는 환경적으로 안정한 것으로 평가된다.
- 2) 동슬래그 골재의 화학성분 측정 결과, 대부분이 Fe 및 SiO₂로 구성되어 있으며, 이외에 Al₂O₃, CaO 등이 미량 존재하는 것으로 나타났다. 또한 X-ray 회절분석

결과, 수쇄에 의한 자용로 슬래그는 상이 결정화되어 있으며, 연속로 슬래그의 경우 유리질 형태를 보이고 있다.

- 3) 동일한 물-시멘트비를 적용할 경우, 치환비율 50%를 경계로 낮은 치환비율에서 상대적으로 높은 입형의 자용로 슬래그가 연속로 슬래그보다 큰 플로우값을 나타내었으며, 50% 이상에서 치환비율의 증가에 따라 굵은 입자의 함유율이 높은 연속로 슬래그가 플로우 발현 측면에서 우세하였다. 단위용적중량은 비중이 3.40 정도인 연속로 슬래그 혼입 모르타르가 3.74 정도의 비중을 가진 자용로 슬래그 혼입의 경우보다 2~3% 낮게 나타났다.
- 4) 물-시멘트비 45%에서 연속로 슬래그로 치환한 모르타르 실험체의 최대 압축강도는 치환비율 25%에서 559 kgf/cm²로 가장 큰 피크를 이루며, 동슬래그를 전혀 사용하지 않은 실험체의 압축강도 537 kgf/cm²에 비하여 약 4%의 강도증진이 있었고, 30% 정도의 치환비율에서 천연모래만을 사용한 것과 대등한 수준을 발현하였다. 한편, 2종의 동슬래그 모두 천연모래에 대한 치환비율이 50% 이상 증가됨에 따라 압축강도가 점차적으로 소폭 감소되었다. 인장강도 및 휨강도에 있어서도 압축강도와 유사한 양상이며, 연속로 슬래그를 사용한 경우가 자용로 슬래그에 비하여 강도감소가 적은 것으로 나타났다.
- 5) 본 실험 결과를 통해 국내에서 생산되는 동슬래그는 골재원으로서의 관련 기준을 충족하고, 환경유해물질의 배출이 허용한도 범위 이내에 있으며, 모르타르 시험에 의한 물리·역학적 성상에도 큰 영향이 없는 것으로 분석되어 콘크리트용 골재로서의 활용 가능성이 매

우 높음을 알 수 있었다. 다만, 동슬래그의 입도분포가 KS F 2526에서 제시하고 있는 천연잔골재 보다 입형이 굵은 상태이고 이에따라 조립률이 3.31 및 3.75로 높은 수준이며, 치환비율이 높아짐에 따라 관리수준의 변동이 있으므로 콘크리트용 잔골재로 사용할 경우에는 이를 고려하여 천연골재와 일정량 혼합하여 사용함이 바람직하다고 판단된다.

참고 문헌

1. 김명환, 이박식, "전로슬래그의 이용현황," 포항종합제철(주), 1997. 8.
2. 한국건설자재시험연구원, "Blasting 연소재 Slag의 잔골재로서 활용화 방안 연구," 1998.
3. Collins, R. J. and Ciesielski, S. K., "Recycling and Use of Waste Materials and By-Products in Highway Construction," Transportation Research Board National Research Council, NCHRP Synthesis 199, 1994.
4. LG-Nikko 동제련(주), "동제련 슬래그의 물성 파악 및 개선을 통한 용도개발," 1999.
5. 梶原敏孝, 竹田重三, "JIS A 5011 콘크리트용 슬래그骨材の改正にかかわる主要點について," 月刊生コンクリート, Vol.16, No.7, 1997.
6. Masayasu Kawahara, "Chystallization and Dissolution of metallic Components for Copper Slag," Department of Materials Science and Resource Engineering, 1994, pp.26~37.
7. 환경부, "폐기물공정시험법," 1999.

요 약

동슬래그를 콘크리트용 골재로 활용하기 위하여 국내에서 생산되고 있는 2종의 동슬래그에 대해 골재의 기초적인 물리·역학적 특성과, 화학성분, 환경 유해성 평가를 실시하였다. 실험결과, 2종의 동슬래그는 KS F 2526에서 규정하고 있는 골재의 물리·역학적 특성을 만족하고 있으며, 폐기물공정시험법에 의한 유해 중금속 용출시험 결과, 유해 중금속의 용출이 전혀 없거나 기준치를 크게 하회하는 것으로 나타났다. 또한, 천연모래를 25, 50, 75, 100%를 치환하여 모르타르 실험을 실시하고, 슬래그의 치환비율에 따른 유동특성 및 단위용적중량의 변동양상을 검토하여 그 성능수준을 제시하였다. 슬래그의 치환비율에 따른 강도의 증가는 동슬래그를 사용하지 않은 실험체와 비교하였을 경우, 동슬래그의 치환비율이 증가함에 따라 전체적으로 감소하는 경향이거나, 25% 수준까지는 동등 이상의 수준이었다.

따라서 국내에서 생산되고 있는 2종의 자용로 및 연속로 슬래그는 천연모래와의 혼합사용을 전제로, 콘크리트용 골재로 사용하기에 충분한 물성을 지니는 것으로 나타났으며, 특히 중량이 요구되는 콘크리트 및 모르타르의 제작에 유리한 것으로 검토되었다.

핵심용어 : 동슬래그, 산업부산물, 중량콘크리트