

# 콘크리트용 동슬래그 골재의 활용 기술

## The Application of Copper Smelting Slag as Concrete aggregate

(2006년 8월 17일 원고접수, 2006년 12월2일 심사완료 / Received August 7, 2006, Accepted December 2, 2006)

지석원\* 서치호

건국대학교 건축공학과

Seok-Won Ji,\* Chee-Ho Seo

Dept. of Architectural Engineering, Kunkuk University, Seoul, 143-701, Korea

### Abstract

The total production of the smelted copper reaches 450,000 tons per year, and the production of copper-related goods grows year by year owing to the extension of facilities and the development of production techniques. On the other hand, the volume of slag discharges by-produced at the time of copper smelting process is also on trend of increase. The by-produced copper smelting slag amounts to 700,000 tons a year, which is one and half times of the total smelted copper production.

Accordingly nobody disagrees that comprehensive researches on how to deal with and how to reuse the accumulated smelting copper slag have to be encouraged. Even though the possible uses of the copper smelting slag have being made on various levels at present as materials for iron powder cement, sand-blasting and fire-proofing rock wool, but a considerable volume of the slag is abandoned as unnecessary by burying or piling up in careless in the open ground.

키워드 : 동슬래그, 동제련, 잔골재, 콘크리트, 중금속

Keywords : Copper Slag, Copper Smelting, Fine Aggregate, A Heavy Metal

## 1. 서론

현대화 과정에서 지속적인 경제성장과 산업화 위주의 발전을 우선으로 한 성장 지향주의로 인한 환경문제 봉착하고 있다. 이에 선진국에서는 경제적, 환경적 문제에 대한 산업부산물 처리 방안 다각적 연구 진행하고 있으며, 국내의 경우에도 최근 천연 자원 고갈, 환경오염 문제가 부각되면서 그 처리문제 활용방안 연구가 추진되고 있다.

또한 천연골재 고갈에 따른 대체재료의 확보가 필요하며, 현재까지 산업부산물로 취급되던 고품위의 이용가능 재료들에 대한 다각적 활용방안과 주로 매립하는 것에 의존하던 방식에서 탈피하여 2차제품 및 신소재로의 적극적인 활용 모색하게 되었다.

이중에서도 고품질의 효율적인 재료로 평가되는 동슬래그는 국내에서 연간 70만톤이 발생되고 있으며, 동제련 과정에서 발생하는 동슬래그를 건설용 소재로서 활용하기 위해서는 기술적 검토가 필요하며, 이는 곧 환경보전과 산

업부산물의 재활용이라는 측면에서 사회적, 경제적으로 상당한 의미가 있다 할 것이다.

특히, 콘크리트 분야는 사용량이 많고 다양한 제품과 공법을 바탕으로 응용할 수 있는 기술적 가능성이 내재되어 있으며, 플라이애쉬, 고로슬래그 등 콘크리트의 혼화제로서의 꾸준한 기술개발에도 불구하고, 활용범위가 좁아 고부가가치의 재활용 난이한 데 비해 동슬래그는 현재 시멘트용 가철재(加鐵材)나 녹제거용 샌드블라스트팅(sand blasting)재, 내화용 암면재 등으로 사용되고 있으며, 콘크리트용 골재 활용에 대하여 그 적용성 및 타당성을 검토하여 향후 동슬래그의 활발한 이용 및 고부가가치 제품 생산에 대한 점진적 개발이 가능하리라 판단된다.

## 2. 동슬래그의 발생 및 이용

### 2.1 동슬래그의 발생

동제련공법은 현재 세계적으로 2가지 주요한 공법으로 분류되어 있는데, 그 2가지 공법이 자용로 공법(Outokumpu Flash Smelting Process)과 연속동제련 공법

\*Corresponding author

E-mail : swji@dreamwiz.com

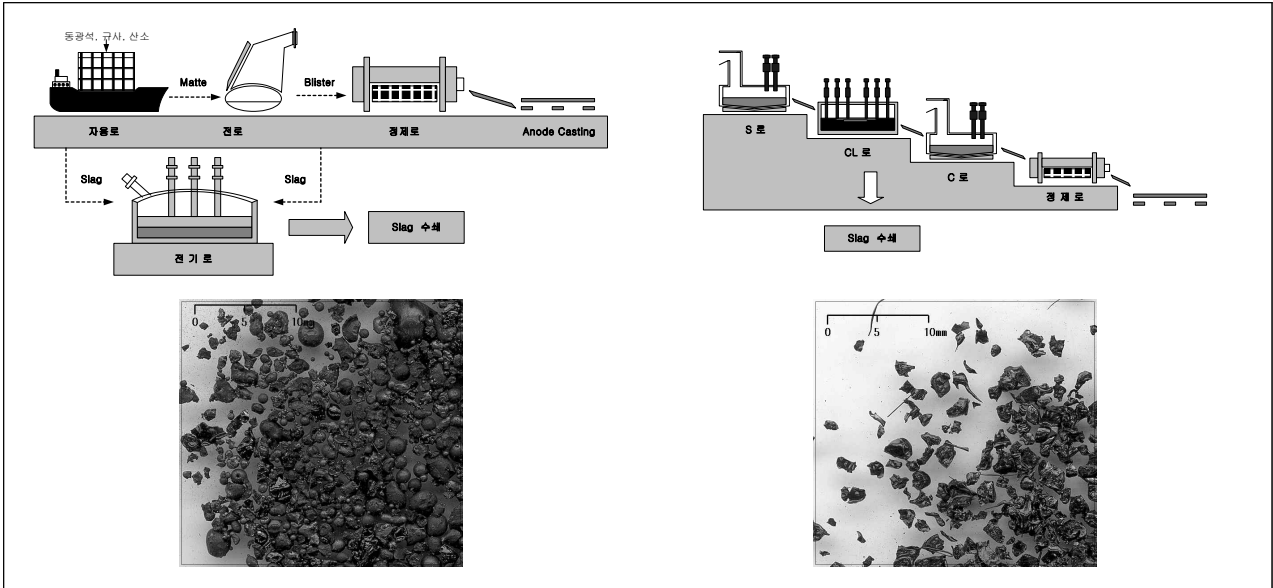


Fig. 1 Idea of Outokumpu Flash Smelting Process(left) and Continuous copper smelting Process(right) and shape of slag

(Mitsubishi Continuous Copper Smelting process) 이다.

자용로 공법은 핀란드 Outokumpu사에서 개발한 공법으로 건조한 정광을 산소부화 공기와 함께 반사로형의 자용로에 분사시켜 황화정광이 산화성 분위기와 급격한 반응을 일으켜 Matte와 Slag로 분리시킨다.

연속 동제련 공법은 일본 Mitsubishi사에서 개발한 공법으로 건조한 정광과 산소부화 공기를 Top Blow Lance로 투입하는 방식을 적용하였으며, Launder를 통한 용탕의 연속 이동과 자용로 공법의 P-S Converter(전로)를 제거함으로써 환경 문제 해결과 간단한 물류 이송을 가능하게 했다. 자용로 공법과 차이점 중에 하나는 동광석과 규사 외에 석회석을 투입한다는 점이다.

이러한 공법을 통해 배출된 동슬래그는 각기 다른 성상과 물성을 가지고 있으며, 화학적 성분 역시 다소 차이가 있다. 이렇게 생산된 동슬래그는 검은색 유리질의 광택이 있는 형상을 지니고 있으며, 자용로공법의 경우 1~3mm의 불규칙한 미립, 또는 괴상형태를 가지고 있고, 연속동제련 공법의 경우는 날카로운 형태의 괴상조각과 미립이 침상조각이 혼재되어 있는 형상을 가지고 있다.

## 2.2 동슬래그의 특징 및 이용분야

### 2.2.1 동슬래그의 특성

동슬래그의 일반적인 특징을 요약하면 다음과 같다.

- 화학적으로 안정된 유리질의 비정질상(非晶質狀,

amorphous)이며 환경오염이 거의 없다.

- 입자가 균일하고 취급이 용이하다.
- 염분을 함유하고 있지 않아 시멘트 원료와 콘크리트용 잔골재에 적합하다.
- 철분(43~47%), 규산질(25~30%)을 함유하고 있어 시멘트 원료로 적합하다.
- 모스경도가 6~7로서 강도가 뛰어나므로 연마재로 적합하다.

동슬래그는 상기한 특징과 같이 유리질의 안정된 물질로 평가되며 용출특성이나 반응성 등이 희박해 골재 활용에 유리한 것으로 평가되고 있다.

### 2.2.2 동슬래그의 물리, 화학적 특성

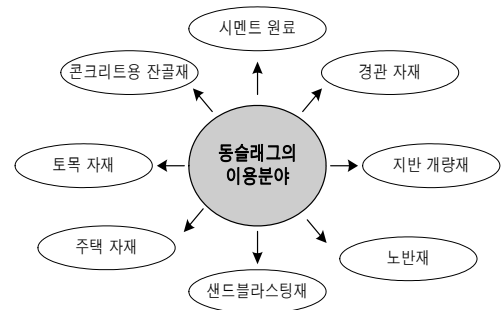
#### (1) 용출 특성

동슬래그를 용출 속도에 따라 각각 서냉, 공냉, 수냉에 따라 환경오염공정 시험법상의 기준항목인 구리(Cu), 비소(As), 납(Pb), 아연(Zn), 철(Fe)을 분석한 결과, 모든 시험항목에서 기준치를 만족하는 것으로 나타났다.

구리(Cu)의 유해 판정기준은 3mg/l 이하로 한국과 일본의 기준은 같다. 국내 동슬래그의 수냉 및 공냉 시료는 모두 시험 전 pH 영역에서 유해성 판정기준을 만족시키고 있다. 그 외에도 비소(As), 납(Pb) 및 아연(Zn), 철(Fe)성분 역시 전 영역에서 국내 동슬래그는 이와 같은 규제치를 만족하고 있다.

Table 1. Overview and use of division by Japanese copper slag plant

기호	종류	입도구분	제조소
A	연속제동로 수채사	CUS 2.5 CUS 5-0.3	미쓰비시(三菱) Material(주), 나오시마(直島)제련소
B	반사로 수채사	CUS 2.5 CUS 5-0.3	오나하마(小名浜)제련(주), 오나하마(小名浜) 제련소
C	자용로 수채사	CUS 5 등 4종	닛코(日鉱)제련(주), 사가노세키(佐賀關) 제련소
D	자용로 수채사	CUS 2.5 등 3종	고사카(小坂)제련(주), 고사카(小坂) 제련소
E	자용로 수채사	CUS 2.5 등 3종	히비(日比)공동제련(주), 다마노(玉野) 제련소
F	자용로 수채사	CUS 2.5 등 3종	스미토모(住友)금속광산(주), 도요(東豫) 공장



(2) 알칼리실리카 반응성

동슬래그 골재의 알칼리실리카 반응성 시험결과는 0.1% 이하의 규정치에 대해서 0.020-0.024%의 낮은 수치를 보여 모두 무해하다고 판정되고 있다.

(3) 동슬래그의 기능성

항균성 시험 및 항곰팡이성 시험 결과 동슬래그의 혼입 시료에서 균주의 서식이 급격히 감소하는 것으로 나타났으며 곰팡이 역시 곰팡이의 성장을 인지할 수 없는 정도의 우수한 결과를 보였다.

방오성능에 있어서는 해양폭로시험 결과 부착생물의 수가 적은 것으로 나타나 상당한 효과를 기대할 수 있을 것으로 나타났으며 원적외선 방사율의 경우도 다른 금속산화물과 비교하여 방사율의 수치가 매우 높게 나타나 원적외선 분야에 응용할 수 있는 기초재료로 가능하다고 판단된다.

따라서 동슬래그의 기능성을 활용한 제품의 개발 및 응용이 가능하며, 단순골재 및 첨가제로 사용하더라도 기능성을 부여할 수 있는 장점이 있다.

2.3 국내외 동슬래그의 이용사례

독일을 제외한 대부분의 동제련소들은 수채에 의해 동슬래그를 과립상(Granule)으로 생산하고 있으며, 현재 많은 양을 시멘트용과 선박 수리용 샌드블라스팅재로 사용하고 있다. 특히 독일 및 일본의 동제련소에서는 이를 건축토목용 잔골재로 사용하고 있으며, 많은 연구를 통하여 동슬래그가 환경에 무해하고, 기존의 건축, 토목 공사에 사용되는 콘크리트 제조의 요소기술과도 잘 부합되고 있다는 연구결과를 보여주고 있다.

2.3.1 일본의 경우

일본의 경우 6개의 동제련 공장에서 연간 185만톤(1996년 기준)이 생산되며, 동의 연간 생산량인 135만톤과 비교하면 약 1.4배 정도의 슬래그가 발생된다.

일본은 1997년에 JIS A 5011-3 “콘크리트용 동슬래그 골재” 규격이 제정되었으며, 건축 토목용 잔골재로 사용하였으며, 이 규격 내에는 일본 내 6개 제련소의 동슬래그를 포함하고 있다.

일본의 동제련소들은 자용로공법, 반사로공법 및 연속제련 공법 등을 적용하고 있는데 이 중 전세계적으로 가장 큰 자용로를 가동하고 있는 닛코(日鉱)제련(주)의 사가노세키(佐賀關) 제련소는 동슬래그를 건설용으로 개발하여 시판하고 있다.

(1) 콘크리트용 골재

동슬래그는 단독 또는 자연사 및 해사와 혼합하여 사용할 수 있고 그 적용 용도로서는 도로 기층재나 건축, 토목용 콘크리트 잔골재로 활용되고 있다. 특히 모래에 비해 약 40% 높은 동슬래그의 비중을 이용하여 방파제 등의 해안 구조물을 제작하는데 적합한 것으로 알려져 있다.

또한 천연골재의 고갈로 인한 지구환경 보호 차원에서 동슬래그의 활용은 그 가치를 높이고 있으며 기존 골재에 비하여 매우 저렴한 가격을 형성하고 있어 경제적으로도 유리하다고 할 수 있다.

(2) 지반개량재

일반적으로 연약지반의 개량시 가장 널리 사용되는 샌드 드레인(sand drain)공법에서는 연약지반층에 주입하는 수직재와 그 위에 하중을 실어주는 역할을 하는 수평재로



Fig. 2 Use present condition of Japanese copper slag(Tetrapod for seashore, bed plate works of harbor, Sand file works from left)

사용하고 있다. 동슬래그가 이처럼 수직재 및 수평재로 쓰이기 위해 가지고 있는 기본적인 성질은 투수성이 좋고 시공 후 경화 현상을 일으키거나 투수도가 저하되지 않으며 환경에 악영향이 없어야 한다는 수직·수평재의 기본조건을 만족하고 있기 때문이며 특히 투수도가 일반적으로 약  $5.0 \times 10^{-3}$  cm/sec 이상으로써 양호한 상태를 나타내고, 용출시험 결과 유해성분의 용출량이 국제기준을 만족하고 있으며 자체경화성이 없는 특성에 의해 많은 양의 동슬래그를 지반개량재로 사용하고 있다.

### (3) 매립용 골재

동슬래그는 위에서 언급한 바와 같이 투수성이 우수하여 배수가 좋지 않은 점토질 토양의 배수재로 활용할 수 있다.

### (4) 케이슨 충전재

동슬래그의 비중은 3.5 이상으로 일반 골재에 비하여 중량이 크고 유해물질의 용출이 없기 때문에 해안의 케이슨 충전재로 사용하기에 적당하다.

### (5) 실용제품

동슬래그는 입자의 형상 및 입도의 분포가 잔골재와 비슷하여 건축재료의 잔골재 대체로 사용이 가능하다. 보도블럭 제조용 골재, 조경용 미장재료 및 소성벽돌의 첨가재료 등 다양하게 적용되고 있다.

### (6) 시멘트 원료

시멘트 클링커의 제조시에 가철(加鐵) 원료로 사용된다.

## 2.3.2 독일의 경우

독일의 경우는 공업표준규격인 DIN-4301 “Ferrous and Non-ferrous Matallurgical slag for Civil Engineering and Building Construction Use” 에 동슬래그의 토건용 활용에 대한 규정이 제정되어 있다.

이 규격에는 수쇄에 의해 생산되는 Fine-grained granulated non-ferrous slag와 서냉, 파쇄로 생산되는 Non-ferrous lump slag 즉, Slag Stone에 대한 규격이 포함되어 있다.

특히 독일에서는 엘베강 유역 정비사업에 동슬래그를 적용하여 수십년에 걸친 장기적인 환경생태조사를 통해



Fig. 3 Germanic copper slag practical use present condition.(Block for walk place, base materials of railroad, block for landscape architecture, Elbe River canal basin of attraction riverside construction from left)

환경에 무해하다는 근거를 제시한 바 있다.

### 2.3.3 국내의 동슬래그 이용분야

현재 국내의 동제련 공장은 1개 회사가 있으며 (LG-Nikko 동제련) 연간 동슬래그의 발생량은 약 70만톤 정도이다(2000년 기준). 이중 25만톤이 자용로 공정에서 산출되는 것이며 45만톤 정도가 연속동제련 공정에서 발생된다.



Fig. 4 Slag block produced in JangHang plant

과거 장항공장시절에는 생산된 슬래그를 서냉하여 블록으로 사용하였던 경우가 있었으나 공장이 폐쇄된 후 현재까지는 울산공장에서 생산된 동슬래그는 주로 시멘트의 가철재(可鐵材)와 샌드 블라스팅(Sand Blasting)재, 콘크리트 및 시멘트 제품용 잔골재, 지반 개량재 등으로 사용되어 왔다. 그러나 시멘트 가철재로서의 이용량은 국내의 건설경기 침체와 시멘트 사용량의 감소로 생산 가동율이 저하하고 동슬래그 이외의 다른 첨가재들의 출현으로 인하여 1999년을 기점으로 사용량이 급격히 줄어들고 있는 실정이지만 각종 골재로서의 이용이 증대됨에 따라 현재는 재고량이 점차 안정적인 수준으로 자리잡고 있다.

Table 2. Domestic copper slag outturn and use change

(단위 : 만톤)

년 도		1997	1998*	1999	2000
생산량		34.2	52.6	65.2	69.0
소비량	시멘트 원료	19.6	28.0	39.3	23.0
	샌드블라스팅재	12.0	11.3	12.3	8.0
	토목·건축용 골재	-	-	0.3	31.3
	기타(수출 포함)	-	0.3	14.9	10.4
소비량 계		31.6	39.6	66.8	72.7
재고량		2.6	15.6	14.0	10.2

\* 전기동 25만톤규모 증설

Table 3. Practical use and plan of copper slag of each nation

국 가	활용분야 및 전망
한 국	시멘트 가철재료, 샌드블라스팅재, 콘크리트용 잔골재, 벽돌, 방오(防汚) 모르타, 원적외선 방사 세라믹.
일 본	시멘트 가철재료, 샌드블라스팅재, 경관자재, 노반재, 지반개량재, 주택자재, 토목자재, 콘크리트 잔골재.
독 일	포장용 스톤(stone), 시멘트 및 유리 첨가재, 내마모재, 연마재, 도로용 골재, 폐광 채움재, 방음벽.

### 3. 콘크리트용 골재로서의 국내산 동슬래그의 특성

국내에서 생산된 동슬래그의 물리적 성질을 KS F 2543 콘크리트용 동슬래그 골재 기준과 KS F 2526 콘크리트용 골재 규정에 따라 시험한 결과 다음과 같은 시험 결과를 나타내었다. 전체적으로 일반 잔골재에 비해 비중, 조립율 및 단위용적중량은 크게 나타나고 있으나 기준을 만족하는 것으로 나타났으며 흡수율과 실적율은 월등히 우수한 값을 나타내고 있다. 입도에서의 문제점만 해결된다면 기타의 물성에 있어서는 두가지 KS 규격의 물성기준을 대부분 충족시키고 있는 것으로 나타났다.

#### 3.1 굳지 않은 콘크리트에 미치는 영향

슬럼프의 경우 고슬럼프영역에서는 동슬래그 혼입에 따른 영향은 뚜렷하지 않으나, 저슬럼프영역의 경우 혼입량의 증가에 따라 증가하는 추세를 보인다. 이는 동슬래그의 혼입율이 변화됨에 따라 콘시스턴스나 점성 등 전반적인 레올로지 특성에는 다소 영향을 미치나 슬럼프값 자체에는 큰 영향을 미치지 않는 것에 기인하는 것으로 보이며, 또한 동슬래그의 높은 비중이 콘크리트 내부의 운동성을 증대시키는데에도 영향이 있는 것으로 판단된다.

공기량은 전체적으로 동슬래그의 혼입량 증가에 따라 다소 증가하는 추세를 보이는 것을 알 수 있다. 이는 특히 슬럼프가 낮은 콘크리트에서 더욱 뚜렷이 나타나게 되는데 골재 내부의 공극구조가 공기량의 증가로 이어지는 것으로 분석된다.

Table 4. Aggregate properties of copper slag that buy domestic

시험 내용	단위	동슬래그 잔골재 품질기준 <sup>1)</sup> (KS F 2453)	일반 잔골재 품질기준 <sup>2)</sup> (KS F 2526)	시험 결과		비고
				자용로 공법	연속동제련 공법	
단위용적중량	t/m <sup>3</sup>	2.0~2.5		2.40	2.24	KS F 2505
공극율	%	30~50		33.5	40	
실적율	%	50~70		66.5	60	
비중	절대건조비중	3.40~3.80		3.74	3.40	KS F 2504
	표면건조비중	3.40~3.90	2.5 이상	3.81	3.46	
흡수율	%	0.05~1.80	3.0 이하	0.52	0.2	
점토덩어리량	%	0.3~0.8	3.0 이하	0.6	0.1	KS F 2512
No. 200체 통과량	%	0.2~0.7	3.0 이하 <sup>3)</sup>	0.4	0.3	KS F 2511
조립율		3.0~3.5	2.3~3.1	3.4	3.51	KS F 2502
골재안정성 (손실무게 %)	%	2.0~5.0	10 이하 <sup>4)</sup>	7.3	1.2	KS F 2507

- 1) KS F 2543 콘크리트용 동(銅)슬래그 골재 해설서 기준
- 2) KS F 2526 콘크리트용 골재 기준
- 3) 콘크리트 표면이 마모 작용을 받는 경우 기준(기타 5% 이하)
- 4) 황산염 시험의 경우(황산 마그네슘 15% 이하)

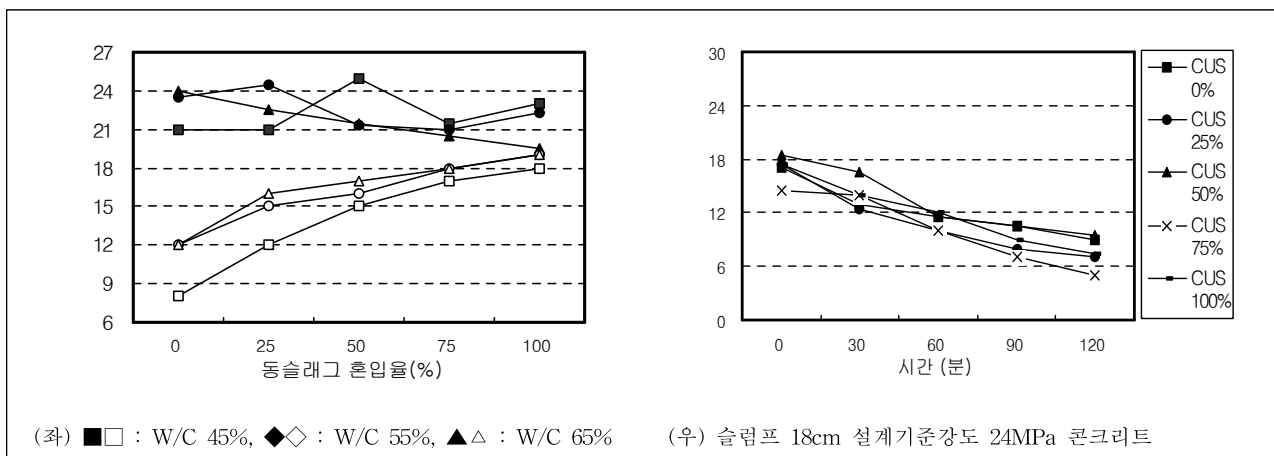


Fig. 5 Change of slump by the copper slag mixing rate

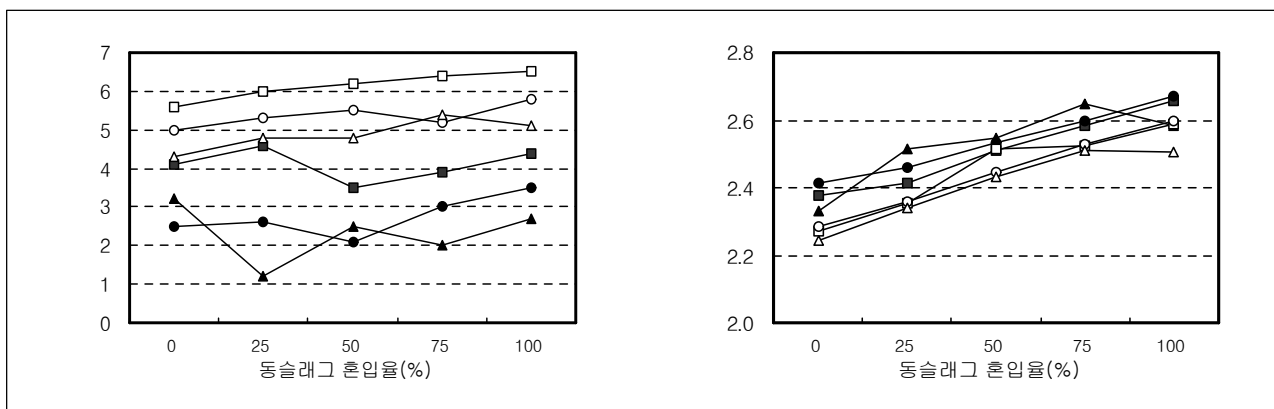


Fig. 6 Air content and weight of unit volume by the copper slag mixing rate

### 3.2 굳은 콘크리트에 미치는 영향

#### 3.2.1 단위용적중량

동슬래그 혼입시의 단위용적중량 범위는 2.33~2.66kg/m<sup>3</sup> 이고 비중이 큰 동슬래그의 혼입에 따라 혼입량 증가에 따라 높아지는 경향이 있다, 이러한 특성에 따라 동슬래그 콘크리트의 이용분야 중 중량구조물 구축에 활용시 효과적으로 이용될 수 있음을 알 수 있다.

#### 3.2.2 강도특성

동슬래그를 혼입한 콘크리트의 강도특성은 보통콘크리트의 강도에 비해 큰 변화가 없는 것으로 나타난다. 특히 상당히 많은 배합에서 50~75% 사이의 혼입율에서는 오히려 15% 정도의 강도 상승을 보이는 것으로 나타나 일본의 연구결과와도 대부분 부합하는 것으로 나타나고 있다.

이에 따라 동슬래그를 사용하게 되면서 우려할 수 있는 강도상의 저하에 대해서는 슬럼프가 급격히 낮거나 물시멘트비가 높은 저강도의 콘크리트가 아닌 경우 대부분 만족할 수 있는 것으로 분석된다.

그 밖에도 인장강도, 휨강도, 탄성계수 등도 압축강도와 비교하여 동등한 결과를 보이는 것으로 나타났다.

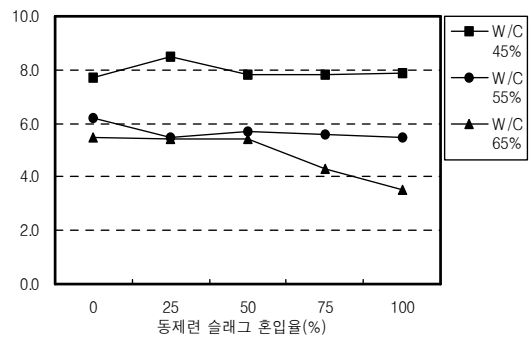


Fig. 8 Change of static modulus coefficient by mixing rate of copper slag

#### 3.2.3 내구특성

중성화시험의 경우는 일반적인 경우 보통콘크리트와 비교하여 중성화저항성이 동등하거나 일부 배합에서는 우수

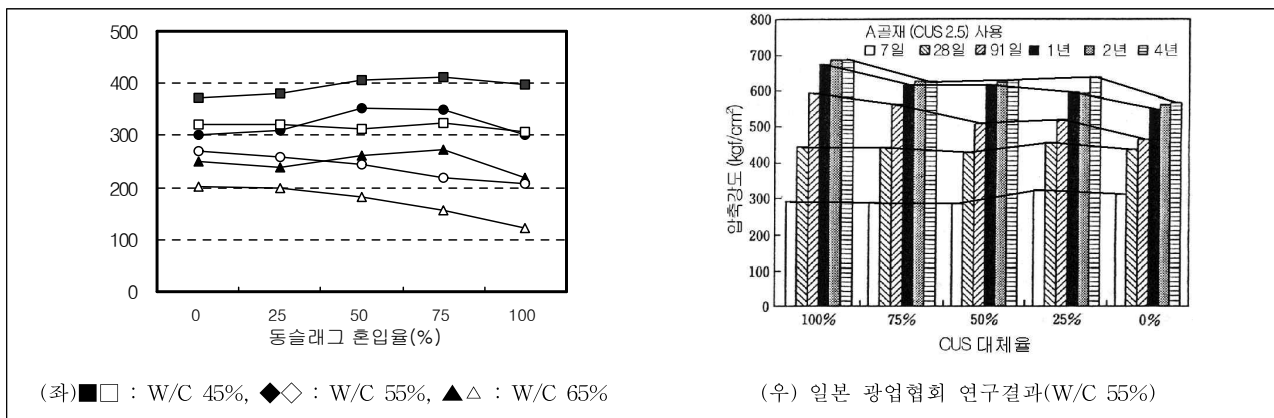


Fig. 7 Domestic of compressive strength effect and comparison of Japan study finding by the copper slag mixing rate

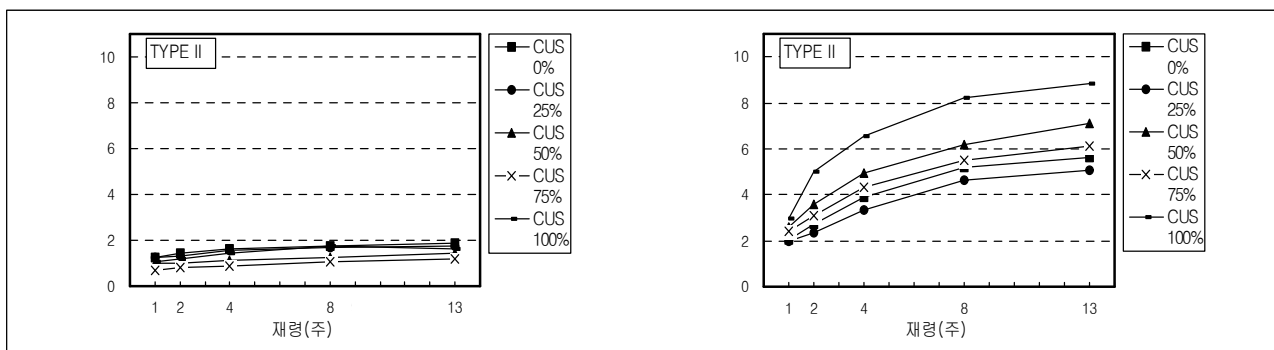


Fig. 9 Durability test result (left : W/C 45%, left : W/C 65%) by promote carbonation

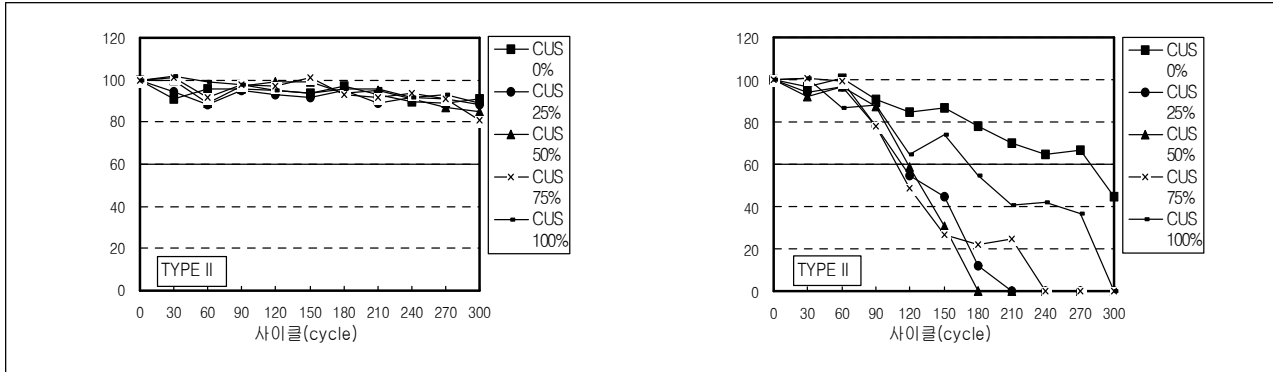


Fig. 10 Companion dynamic elastic modulus (left : W/C 45%, left : W/C 65%) by cycle passage

한 결과를 보임을 알 수 있다. 그러나 물시멘트비가 높은 배합의 경우 혼입율 50% 이상에서는 중성화 저항성이 떨어지는 것으로 나타나 동슬래그 내부의 공극이 중성화에 미미하게나마 영향을 미치는 것으로 판단된다. 그러나 이는 물시멘트비가 60%를 넘을 경우에 해당되는 사항으로 현실적으로는 사용상의 큰 문제는 없을 것으로 판단된다.

동결융해저항성 역시 중성화저항성과 마찬가지로 적정 물시멘트비 영역에서의 우수성과 고물시멘트비의 저품질 콘크리트에서의 성능저하를 보이거나 실제 적용 가능한 레미콘배합에서의 문제점은 미미할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

일반적인 골재의 기준으로 큰 손색이 없는 우수한 골재로 판명된 동슬래그 골재는 특유의 중량과 높은 경도 등으로 많은 기능성 재료로 활용되고 있다. 특히 콘크리트용 골재로서의 고부가가치 활용은 친환경적인 측면과 골재수급안정의 측면에서도 기여할 것으로 기대된다.

이에 현재까지 연구된 동슬래그의 적용기술을 기초로 하여 콘크리트용 골재로 사용하기 위해서는 보다 넓은 범위의 역학적 특성, 내구성, 중금속 용출시험 등에 대한 연구가 지속되어야 할 것이며, 산업부산물의 적극 활용을 위하여 운송에 따른 경제성 문제에 대한 고려가 이루어진다면 동슬래그의 콘크리트용 골재 적용에 큰 문제는 없을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. LG-Nikko동제련(주) 제련기술연구소, 동슬래그의 물성과 개선을 통한 용도개발 : 청정생산기술개발사

업 진행결과, LG-Nikko동제련(주), 1999.

2. 지석원, 동슬래그 잔골재를 사용한 콘크리트의 특성에 관한 연구, 건국대학교 박사학위 청구논문, 2001. 8.
3. 서치호 외, 동제련 슬래그를 사용한 콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 논문집, 2000. 12.
4. 이형우 외, 폐Copper Slag의 시멘트 모르타 잔골재 재활용, 한국폐기물학회지 제 15권 제 6호, 1998.
5. 조만형 외, 비철금속제련공학, 한양대학교 출판부, 1995.
6. 환경부, 『녹색환경의 나라』 건설을 위한 국가폐기물관리종합계획, 환경부, 1996.
7. H. J. Engell, 반봉찬 외 譯, 금속공학에서의 슬래그, 대광문화사, 1991.
8. KS F 2543, 콘크리트용 동 슬래그 골재, 2000. 11. 28 제정 고시
9. LG-Nikko 동제련(주), 건설용 소재 LG-Ferro, LG-Nikko 동제련(주) 제련기술연구소
10. DIN 4301, Ferrous and Non ferrous Metallurgical Slag for Civil Engineer- ing and Building Construction Use.
11. 梶原 敏孝 外, 「JIS A 5011 콘크리트용슬래그 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.
12. 梶原 敏孝, 横山 昌寛 外, 銅슬래그細骨材, 콘크리트工学 - 特輯 : 骨材問題を考える, Vol. 34, No. 7, 1996. 7.
13. 日本規格協會, 콘크리트용 슬래그骨材 - 第 3 部 : 銅슬래그骨材, 1997.
14. 콘크리트용銅슬래그細骨材品質基準(案)同解説, 日本鑛業協會 銅슬래그委員會, 1996. 6.