

## 동슬래그 및 플라이애쉬를 혼합하여 제작한 콘크리트의 성능 향상 연구

김춘호 · 이원구 · \*김남욱\*

충부대학교 공과대학 토목공학과, \*전북대학교 공과대학 토목공학과

### A Study on the Improvement of Property of Concrete using Copper Slag and Fly ash

Chun ho Kim, Won goo Lee and \*Nam wook Kim\*

*\*Department of Civil Engineering, Joongbu University*

*\*Department of Civil Engineering, Jeonbuk National University, Corresponding author*

#### 요 약

일반적으로 동슬래그를 콘크리트에 혼입하여 사용하는 경우, 동슬래그의 높은 자중으로 인한 블리딩의 증가로 경화 콘크리트의 압축강도 및 내구성의 저하가 유발된다. 본 연구에서는 산업부산물인 동슬래그를 잔골재의 대체골재로 사용하고자 하였는데 이에 따른 단점의 해소 및 자원 재활용 측면에서 플라이애쉬와의 병용 사용을 실시하였다. 본 연구 결과, 플라이애쉬의 혼입은 동슬래그만 단독으로 사용한 경우보다, 블리딩은 50%, 건조수축은 5%, 중성화 저항성은 30% 감소 및 압축강도는 10% 정도 향상 효과가 나타났다.

**주제어** : 동슬래그, 플라이애쉬, 산업부산물, 블리딩, 내구성능

#### Abstract

Generally, when using copper slag mixed into the concrete, due to higher weight of copper slag, a reduction in the compressive strength and durability of the hardened concrete to increased bleeding is caused. In this study, hence copper slag, a kind of by-product was used as an alternative to the fine aggregate, it was carried out in combination with the use of fly ash in eliminating disadvantage and recycling aspects. As a result of this study, the mixing of fly ash is decreased in the 50% of bleeding, 5% of drying shrinkage, 30% of carbonation test and improvement of 10% of compressive strength than that of copper slag only at most.

**Key words** : Copper slag, Fly ash, Industrial byproducts, Bleeding, Durability

#### 1. 서 론

현대사회는 지속 가능한 경제적 발전을 추구하고 있

으며 이같이 되기 위해서는 순환형 사회를 구축하여 자원을 적절히 이용하는 것이 중요하다. 이러한 관점에서 건설분야에서 산업부산물인 각종 슬래그류 및 플라이

· Received : December 24, 2014 · Revised : January 30, 2015 · Accepted : February 6, 2015

\*Corresponding Author : Nam-wook Kim (E-mail : asahi00@jbnu.ac.kr)

Civil Engineering, College of Engineering, Chonbuk National University, 567 Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju city, Jeollabuk-do, 561-756 Korea

Tel : +82-63-270-4665 / Fax : +82-63-270-2421

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

애쉬 등을 사용하는 것 또한 자원의 사용을 통한 순환형 사회 구축에 커다란 역할을 하고 있다고 말할 수 있다.<sup>1)</sup> 하지만 일반적으로 사용되고 있는 산업부산물의 경우 기본적 물성이 천연골재 및 시멘트와는 다르기 때문에 사용 시 충분한 검토 및 적정량의 결정 등이 필요하다. 동제련 과정에서 발생하는 동슬래그는 이러한 산업부산물 중의 하나로서, 동슬래그를 활용한 콘크리트에 대해서는 이미 지침도 발간되었으며 콘크리트용 골재로서 KS F 2543(콘크리트용 동슬래그골재)로 지정되어 있다<sup>1)</sup>. 동슬래그는 현재 국내 생산량이 2007년 이후 매년 약 70만톤 이상 발생되지만 사용 시 발생하는 단점 및 폐골재라는 선입견으로 인해 콘크리트용 골재로서는 많은 양이 사용되지는 않고 있는데 이에 대한 용도의 다양화 및 사용량의 확대가 요구된다.<sup>2)</sup> 동슬래그가 콘크리트용 골재로서 많이 사용되지 못하는 이유는 밀도가 크고 입도가 상대적으로 불량하여 콘크리트 제작 시 블리딩의 발생량이 증가된다는 점이며 또한 갇힌 공기량이 증가되는 현상도 일부의 연구에서 보고되고 있다.<sup>1-3)</sup> 동슬래그 사용 시 발생하는 블리딩의 발생을 억제하는 여러 가지 방안이 제시되고 있으나 가장 효율적인 방안으로서 석탄을 사용하는 화력발전소에서 발생하는 산업부산물인 플라이애쉬를 이용하여 제어하는 다수의 연구가 그간 진행되고 있으나 아직 충분한 검토는 이루어지지 않은 실정이다<sup>4)</sup>. 이러한 내용을 고려하여 본 연구에서는 동슬래그를 활용한 콘크리트에 플라이애쉬를 혼입하여 블리딩, 압축강도 및 내구성 등에 미치는 영향을 검토하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 사용재료

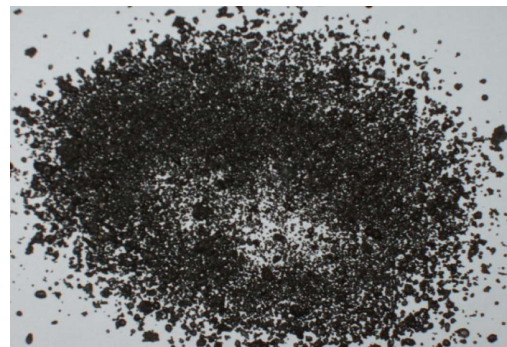
Table 1에 본 연구에서 사용한 각 종 재료들의 물리적 특성을 나타냈으며 Table 2, 3 및 Fig. 1에 동슬래그의 특성, 화학성분 및 형상을 나타냈다. 동슬래그는 일반적으로 단일 입도형태로 생산되므로 그 자체로 사용 시 KS의 입도기준을 만족하기 못하므로 이에 대한 조정이 필요하며 본 연구에서도 입도기준을 만족하도록 조정하였다.<sup>1)</sup> 또한, 본 연구에서는 동슬래그 사용에 따

**Table 1.** Physical properties of used materials

Kind	Remark
Cement	Type : OPC, Density : 3.15 g/cm <sup>3</sup> , Blaine : 3,200 cm <sup>2</sup> /g
Fine aggregate	Type : River sand, Density : 2.63 g/cm <sup>3</sup> , Absorption : 1.58%, F.M : 2.73
Coarse aggregate	Type : Crushed stone, Density : 2.65 g/cm <sup>3</sup> , Absorption : 1.13%, F.M( 조립율 ) : 6.89
Fly ash	Type : KS type 2, Density : 2.23 g/cm <sup>3</sup> , Blaine : 3,400 cm <sup>2</sup> /g
Air entraining agent	Modified rosin acid compound type
Thickener	Water soluble cellulose type
Defoamer	Polyalkylene glycol type

**Table 2.** Properties of used copper slag

Items	Remarks
Shape	Round
Density	3.7 g/cm <sup>3</sup>
Unit weight	2,400 ka/m <sup>3</sup>
Absorption rate	0.25%
Solid volume	60.2%



**Fig. 1.** Shape of used copper slag.

른 단점을 개선하기 위하여 기존 연구 등을 참고로 하여 각 종 혼화재료의 사용을 고려하였다. 블리딩의 발생에 따른 영향을 조사하기 위하여 증점제(Thickener)

**Table 3.** Chemical components of copper slag

Cu	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Free CaO
0.95%	4.63%	0.96%	4.76%	39.67%	3.74%	32.35%	under 0.02%

및 플라이애쉬를 첨가하였으며 플라이애쉬는 KS L 5405 (플라이애쉬 등급 기준)에 의거 2종 제품을 사용하였다. 갇힌 공기량을 제거하기 위하여 소포제(Defoamer)를 부분적으로 사용하였는데 이에 대한 특성은 Table 1에 나타났다.

**2.2. 콘크리트 제작**

본 연구에서 제작한 동슬래그 혼입 콘크리트 시험체 중 기본 시험체인 OPC콘크리트의 배합설계를 Table 4, 전체적인 시험체의 설명을 Table 5에 나타냈다. 물시멘트비는 55%로 일정하게 했으며 동슬래그는 잔골재의 대체재로 사용하였는데 대체율은 기존의 연구내용 등을 고려하여 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 30%로 하였다. 한편, 동슬래그 혼입 시 발생하는 블리딩의 감소를 위하여 사용된 플라이애쉬는 일반적으로 사용되는 시멘트 사용량의 10%로 일정하게 하였다. 이러한 사항을 고려하여 동슬래그 및 플라이애쉬 무혼입 시험체인 OPC를 기본으로 동슬래그 및 플라이애쉬 혼입 시험체인 C-F10 시리즈, 동슬래그 혼입, 플라이애쉬 미혼입 시험체인 C-F0 시리즈로 구분하여 제작한 후 각 종 시험을 수행하였다.

**2.3. 콘크리트 시험방법**

**2.3.1 블리딩시험**

동슬래그는 천연잔골재에 비해 비중이 커서 대체율이 클수록 비중 차로 인한 재료의 분리 현상이 커지기 때문에 이에 대한 평가수단으로 블리딩 시험을 수행하였다. 블리딩시험은 KS F 2414(콘크리트의 블리딩시험 방법)의 기준에 따라 실시한 후 다음 식(1)로부터 블리딩량( $B_q$ )을 산정하였다.

$$B_q = \frac{V}{A} \tag{1}$$

여기서,  $B_q$  : 블리딩 량 ( $cm^3/cm^2$ )  
 $V$  : 마지막까지 누계한 블리딩에 따른 물의 용적( $cm^3$ )  
 $A$  : 콘크리트 윗면의 면적 ( $cm^2$ )

**2.3.2 길이변화시험**

길이변화 시험은 KS F 2424(모르타르 및 콘크리트의 건조수축 길이변화 시험 방법)에 따라  $100 \times 100 \times 400$  mm 시험체를 제작하여 1주간의 수중양생 후 8주간에 걸쳐 길이변화율을 측정하여 다음의 식 (2)를 이용

**Table 4.** Mixing design of OPC specimen

G <sub>max</sub> (mm)	Slump (mm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				
					W	C	S	G	AE
25	80	5.5	55	42	170	309	747	1042	0.2

**Table 5.** Detail of specimens

Specimen	Usage of copper slag (%)	Usage of fly ash (%)	Defoamer	Thickener	Remark
OPC	0	0	N	N	N : unuse Y : use
C05-F00	5	0	Y	N	
C05-F10	5	10	Y	N	
C10-F00	10	0	Y	N	
C10-F10	10	10	Y	N	
C15-F00T	15	0	Y	Y	
C15-F00	15	0	Y	N	
C15-F10	15	10	Y	N	
C20-F00	20	0	Y	N	
C20-F10	20	10	Y	N	
C30-F00T	30	0	Y	Y	
C30-F00	30	0	Y	N	
C30-F10	30	10	Y	N	

하여 평가하였다.

$$\text{Variation rate}(\%) = \frac{X_i - X_0}{L_0} \times 100 \quad (2)$$

여기서,  $L_0$  : 기준길이  
 $X_0$  : 기준으로 한 시점에서의 측정치  
 $X_i$  : 계획 재령 시점에서의 측정치

2.3.3 촉진증성화시험

촉진증성화시험은 KS F 2584(콘크리트 촉진 탄산화 시험)에 의거 실시하였다. 시험체는 100×100×400 mm의 각주형 시험체이며 증성화의 촉진조건은 온도 (20±2)°C, 상대습도 (60±5)%, CO<sub>2</sub>농도 (5±0.2)%로 실시하였다.

2.3.4 동결융해 저항성 시험

본 연구에서는 동슬래그 혼입에 따라 발생된 블리딩 등이 콘크리트 시험체의 동결융해 저항성에 미치는 영향을 고찰하고자 KS F 2456(급속 동결융해에 대한 콘크리트의 저항시험 방법)에 따라 기중동결 수중융해 방법으로 시험체의 동결융해 저항성을 평가하였다. 동결융해 사이클의 온도범위는 1사이클 기준으로 약 -18°C~4°C의 범위이며 200사이클을 실시한 후 다음의 식 (3)과 같이 계산된 내구성지수를 이용하여 동결융해에 대한 저항성을 실시하였다.

$$DF = \frac{P \times N}{M} \times 100 \quad (3)$$

여기서,  $DF$  : 시험체의 내구성 지수  
 $M$  : 최종 사이클 수  
 $P$  :  $N$ 사이클에서의 상대 동탄성 계수  
 $N$  : 소정의 최소값이 된 순간의 사이클 수

3. 시험결과 및 고찰

3.1. 공기 연행성에 대한 검토

Table 6에 동슬래그 및 플라이애쉬 혼입에 따른 AE제, 증점제 및 소포제의 첨가량을 나타냈다. 본 연구의 경우 동일한 슬럼프를 얻기 위해 사용한 AE제 첨가량은 동슬래그 대체율의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있는데 이러한 결과로부터 동슬래그 혼입에 발생하는 단점중의 하나인 갇힌 공기(entrapped air)에 대한 영향을 확인하였다. 한편, 증점제를 사용하는 배합에

Table 6. Amount of chemical agent (kg/m<sup>3</sup>)

Specimen	AE agent	Defoamer	Thickener
OPC	0.15	0	0
C05-F00	0.8	0.6	0
C05-F10	1.5	0.6	0
C10-F00	0.7	0.6	0
C10-F10	1.1	0.6	0
C15-F00T	0.3	1.3	0.51
C15-F00	0.4	0.6	0
C15-F10	0.8	0.6	0
C20-F00	0.3	0.6	0
C20-F10	0.6	0.6	0
C30-F00T	0.2	1.3	0.51
C30-F00	0.2	0.6	0
C30-F10	0.3	0.6	0

서는 사용하지 않은 배합에 비해서 소포제의 첨가량이 약 2배 정도 증가하였는데 이는 증점제에 의해 갇힌 공기가 많이 연행되어져 소포제의 증량이 필요하게 된 것으로 판단된다. 또한, 플라이애쉬의 혼입도 공기량에 영향을 미쳤는데 플라이애쉬 미혼입 시험체에 비해 플라이애쉬를 10% 혼입한 시험체의 AE제의 첨가량은 약 40%~60% 정도 증가하였다. 이는 플라이애쉬 사용에 따른 일반적인 현상으로 플라이애쉬 중에 포함되어 있는 미연탄분이 AE제를 흡착하기 때문이며 결국 소정의 공기 연행성을 확보하기 위해서는 AE제 첨가량의 증가가 필요한 것으로 나타났다.

3.2. 블리딩

Fig. 2에 블리딩 시험 결과를 나타냈다. 동슬래그의 대체율이 증가함에 따라 블리딩 시험 결과는 증가하는 경향을 나타내어 혼입률 10%와 비교하여 30%에서는 블리딩률이 약 50% 정도 증가한 결과를 나타냈다. 이러한 현상은 동슬래그의 표면이 대부분 유리질로 구성되어 있는 관계로 보수성의 부족을 유발하였으며 또한 비중이 높아 타설 후 재료분리 현상이 두드러진 것 등이 원인으로 판단된다. 한편, 플라이애쉬를 사용한 경우에는 사용하지 않은 시험체와 비교할 때 블리딩의 감소가 나타나 대체적으로 약 50%~100% 정도의 저하율을 나타내어 효과적이었다. 증점제를 사용한 경우에는 더욱 효과적이어서 동슬래그를 30% 대체시킨 경우에도

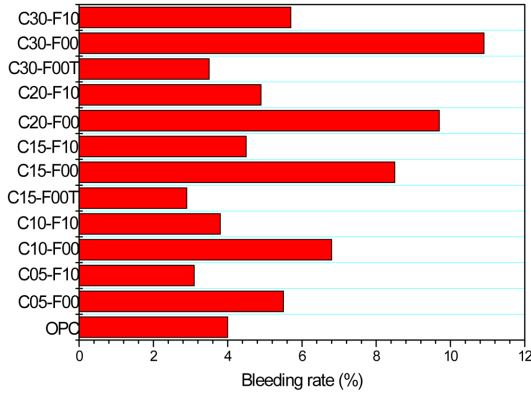


Fig. 2. Results of bleeding rate.

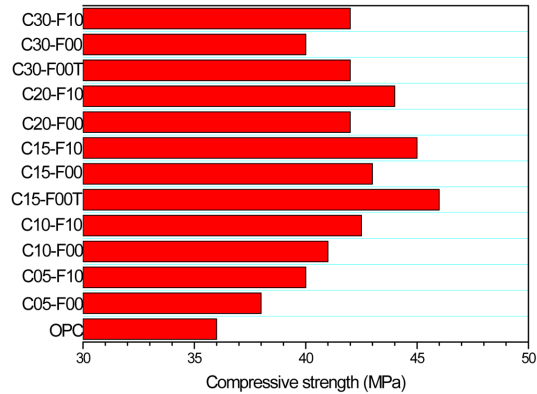


Fig. 3. Results of compressive strength.

블리딩은 거의 발생되지 않아 OPC시험체와 거의 비슷한 수준이었다. 이로부터 동슬래그 대체에 따른 블리딩의 감소에는 플라이애쉬나 증점제의 사용이 효과적 인 것으로 판단된다.

3.3. 압축강도

본 연구에서 제작한 콘크리트의 압축강도 시험 결과를 Fig. 3에 나타냈다. 결과로부터 압축강도는 증점제 및 플라이애쉬의 사용 여부, 재령 및 혼입율의 증가에 따라 변하는 것을 알 수 있다. 즉, 증점제 및 플라이애쉬를 사용하지 않은 콘크리트 시험체의 경우 동슬래그의 혼입율이 증가할수록 강도가 최대 15% 정도 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 동슬래그가 천연 잔골재에 비해 미립분의 양이 적으며 블리딩의 발생에 따라 공극의 형성이 많아져 동슬래그와 시멘트 페이스트 계면 부착이 저하되었기 때문으로 판단된다.

한편, 증점제를 사용한 경우는 블리딩의 영향이 거의 없기 때문에 사용하지 않은 시험체와 비교할 때 약 10% 정도 높았다. 플라이애쉬를 사용한 경우도 강도가 증가하였는데 이는 플라이애쉬의 충전효과 및 포졸란반응 때문으로 판단된다.

3.4. 길이변화 시험

Fig. 4에 콘크리트 시험체의 길이변화 시험 결과를 나타냈다. 결과로부터 증점제를 사용한 콘크리트는 증점제를 사용하지 않은 콘크리트에 비해 길이변화율이 약 15% 정도 증가했다. 이것은 증점제를 사용하지 않은 경우 블리딩에 의해 콘크리트 중의 수분량이 감소하여 체적 변화율이 적어진 것으로 판단된다. 기존의 연

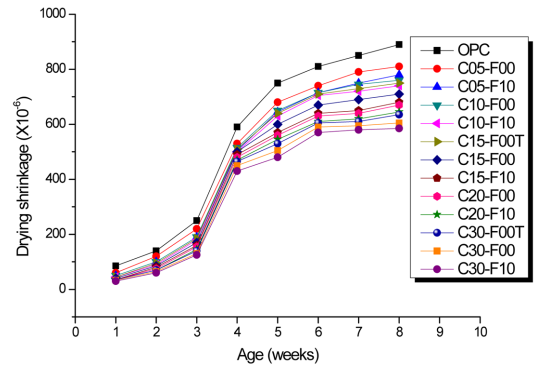


Fig. 4. Results of drying shrinkage.

구에서도 이러한 경향은 나타나고 있다.<sup>4)</sup>

한편, 결과로부터 동슬래그 및 플라이애쉬를 사용하지 않은 콘크리트가 가장 건조수축이 컸다. 동슬래그만 사용한 경우 약 10% 이상 감소한 결과를 나타냈다. 이것은 블리딩에 의한 콘크리트 중의 수분 함량이 줄어든 것 때문으로 판단된다. 또한, 플라이애쉬의 병용 사용은 길이변화율을 더욱 더 감소시키는데 본 연구의 경우 약 5% 정도로 나타났었다. 이것은 비표면적이 비교적 큰 플라이애쉬의 충전효과 및 포졸란반응에 의하여 콘크리트 조직의 밀실화에 영향을 준 것 때문으로 판단된다.

3.5. 축진중성화시험

콘크리트의 중성화(탄산화)는 외부로부터 CO<sub>2</sub>가스가 침투하여 콘크리트 내부의 pH가 알칼리성에서 점차적으로 중성으로 바뀌어지는 현상을 말한다. 중성화는 결국 콘크리트 내부 조직의 열화뿐만 아니라 나아가서 철근의 부식을 유발하므로 장기적인 콘크리트의 내구성능

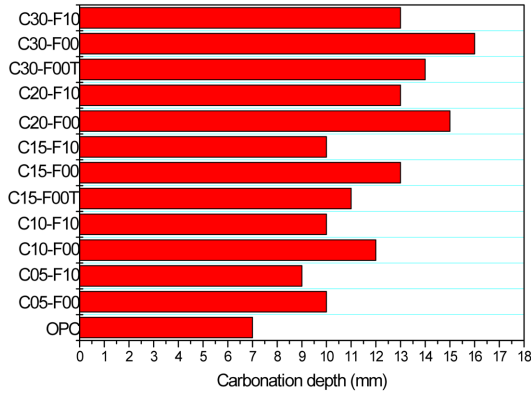


Fig. 5. Results of Carbonation test.

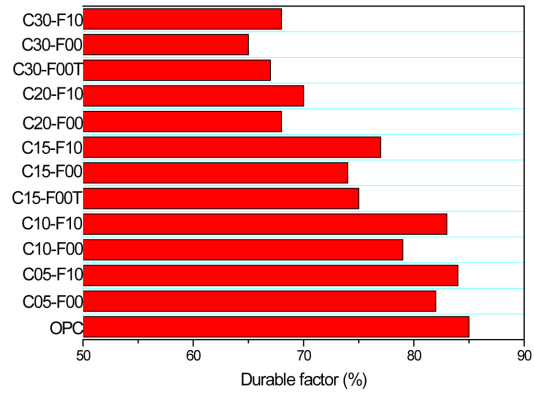


Fig. 6. Results of freeze thawing test.

평가에서 반드시 검토해야할 사항이다. 그러나 중성화 현상은 1년에 1~2mm 정도의 느린 속도로 진행되기 때문에 일반적으로 축진 시험을 통하여 저항성을 판단한다. 본 연구에도 규정에 의거 온도 (20±2)°C, 상대습도 (60±5)%, CO<sub>2</sub>농도 (5±0.2)%의 축진조건으로 13주 동안 시험을 실시하였다. 축진중성화 시험 결과는 Fig. 5에 나타내었는데 다소간의 편차는 있으나 증점제의 첨가 및 플라이애쉬를 사용 하지 않은 경우는 동슬래그의 대체율이 높을수록 중성화의 진행이 빨랐으며 증점제의 첨가 및 플라이애쉬의 사용한 경우는 동슬래그의 대체율이 15% 정도 까지는 중성화에 대한 저항성이 증가하였다. 즉, Fig. 5의 결과와 같이 중성화에 대한 저항성이 블리딩의 발생량과 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났는데 블리딩의 발생량이 많을수록 내부 조직의 공극의 형성이 많아져 CO<sub>2</sub>의 침입이 용이해진 것으로 판단된다.

3.6. 동결융해 저항성 시험

동슬래그를 혼합한 콘크리트 시험체에 대한 동결융해 시험을 실시한 후 평가한 각 시험체의 내구성지수 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 시험 결과, 동슬래그의 혼합률이 증가할수록 내구성지수는 감소하였는데 이는 블리딩 발생량의 증가에 따른 것으로 판단되며 블리딩의 발생은 내부 공극을 증가시켜 내구성지수를 감소시키며 결론적으로 동결융해에 대한 저항성을 감소시키는 것으로 판단된다. 증점제의 첨가 및 플라이애쉬의 사용은 내구성지수의 감소를 억제해 동결융해 저항성의 증진에 효과적으로 나타났다. 한편, 모든 시험체의 내구성지수는 KS 규정의 동결융해에 대한 저항성의 기준인 60% 이

상을 만족한 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 잔골재의 대체제로서 활용 되고 있는 동슬래그의 단점인 블리딩 증가 등의 문제점을 해결하기 위하여 증점제 및 플라이애쉬를 혼입 사용한 콘크리트를 제작하여 여러 가지 시험을 실시한 후 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 동슬래그 대체율의 증가에 따라 AE제의 사용량이 감소하였는데 이는 동슬래그의 단점인 간헐 공기에 대한 영향을 확인해 주는 것이며 이를 해소하기 위해서는 증점제의 사용이 효과적인 것으로 판단된다.
2. 블리딩 측정 결과, 동슬래그의 대체율이 증가할수록 블리딩 양은 증가하여 콘크리트 품질의 불량 및 재료분리의 가능성이 있으나 플라이애쉬 및 소포제의 사용시 블리딩 양이 현저히 감소하여 효과적이었다.
3. 증점제 및 플라이애쉬를 사용하지 않은 콘크리트 시험체의 경우 동슬래그의 대체율이 증가할수록 강도가 감소하는 경향을 나타내었으나 증점제 및 플라이애쉬를 사용한 경우 블리딩 감소 및 포졸란 반응 등으로 강도가 증진하였다.
4. 동슬래그 혼입 콘크리트의 경우 플라이애쉬와의 병용 사용은 길이변화율의 감소에 효과적 이었는데 이는 비표면적이 비교적 큰 플라이애쉬의 충전효과 및 포졸란반응에 의하여 콘크리트 조직의 밀실화에 영향을 준 것 때문으로 판단된다.
5. 축진중성화시험 결과, 다소간의 편차는 있으나 증점제의 첨가 및 플라이애쉬의 병용 사용은 동슬래그 혼

입 콘크리트의 중성화에 대한 저항성을 증가시켰다. 이는 중성화에 대한 저항성이 블리딩의 발생량과 밀접한 관계가 있는 것으로 보이는데 블리딩의 발생량이 많을수록 내부 조직의 공극의 형성이 많아져 CO<sub>2</sub>의 침입이 보다 용이해진 것 때문으로 판단된다.

6. 동결융해 저항성 시험 결과, 일반적으로 동슬래그의 혼입률이 증가할수록 동결융해 저항성이 감소하였는데 이는 블리딩의 증가에 기인한 것으로 판단되며 증점제 및 플라이애쉬의 혼입으로 이를 억제할 수 있을 것으로 판단된다.

### References

1. Nam-wook Kim, Hak-won Kim and Ju-seong Bae, 2010 : Properties of Mixed concrete Using Metakaolin and Copper Slag, Journal of KIRR, Vol.19, No.1, pp.13-20
2. Nam-wook Kim and Chun-ho Kim, 2012 : Mechanical Properties of Concrete using Metakaolin and Silicon Dioxide, Journal of KIRR, Vol.21, No.2, pp47-52
3. Nam-wook Kim and Young-zoo Ko, 2012 : A Research on the Manufacture of Eco-Friendly Weed-Proof Mortar using Industrial Byproducts, Journal of KIRR, Vol.21, No.6, pp.23-31
4. Ju-seong Bae, Nam-wook Kim and Ju-seong Bae, 2007 : A Study on the Properties of Concrete Substituting Copper Slag for Fine Aggregate, Journal of KSMI, Vol.11, No.3, pp.151-158
5. Tae-hyup Song, Moon-hwan Lee and Se-hyun Lee, 2003 : A Fundamental Study of Ferro Copper Slag for Concrete Aggregate, Journal of KCI, Vol.15, No.1, pp.35-42
6. Moon-hwan Lee, Se-hyun Lee and Tae-hyup Song, 2003 : A Study on the Physical and Mechanical Properties of Concrete with Ferro Copper Slag, Journal of KCI, Vol.15, No.3, pp.361-368
7. Han-young Moon, Seong-tae Lee and Hong-sam Kim, 2001 : Evaluation on the Deterioration and Resistance of Cement Matric due to Seawater Attack, Journal of KCI, Vol.13, No.2, pp.175 ~ 183
8. Moon-hwan Lee, 2008 : A Study on the Evaluation of the Durability of Concrete Using Copper Slag Aggregates, Journal of KCI, Vol.20, No.6, pp.773-784
9. Se-hyun Lee, 2002 : Technology of Copper Slag and Recycled Aggregates in Application of Concrete Material, Academic Journal of KCI, Vol.14, No.1, pp.44-48



김 춘 호

- 경희대학교 대학원 토목공학과 공학박사
- 구조기술사
- 현재 중부대학교 공과대학 토목공학과 교수



이 원 구

- 부천대학교 졸업
- 중부대학교 대학원 박사과정
- 현재 (주)강원기술단 근무



김 남 욱

- 일본 북해도대학 대학원 토목공학과 공학박사
- 청주대학교 토목환경공학과 전임강사
- 현재 전북대학교 공과대학 토목공학과 연구 부교수