

## 無시멘트 알칼리 활성 모르타르의 收縮 및 耐久性 評價<sup>†</sup>

<sup>†</sup>高京澤 · 劉金星 · 李章和 · 姜賢眞\*

韓國建設技術研究院 構造橋梁研究實, \*(株)三票 混和劑 事業部

## Evaluation on the Shrinkage and Durability of Cementless Alkali-Activated Mortar<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Kyungtaek Koh, Gumsung Ryu, Janghwa Lee and Hyunjin Kang\*

Structural Engineering & Bridges Research Division, Korea Institute of Construction Technology

\*Admixture Division, SAMPYO Corporation

### 요 약

본 논문에서는 시멘트를 전혀 사용하지 않고 결합재로서 고로슬래그를 단독으로 사용한 배합과 고로슬래그와 플라이애쉬를 혼합한 배합의 강도, 수축 및 내구성에 대해 검토하였다. 그리고 비교를 위해 보통포틀랜드시멘트를 사용한 일반 모르타르에 대해서도 동일한 실험을 수행하였다. 그 결과, 알칼리 활성 모르타르는 일반 시멘트 모르타르에 비해 강도발현, 수축 및 동결융해 저항성 측면에서 우수한 것으로 나타났다. 특히 고로슬래그와 플라이애쉬를 혼합사용한 경우에는 압축강도 60 MPa 이상 달성이 가능하고, 일반 시멘트 모르타르에 비하여 수축량은 40% 정도 감소하고 동결융해 저항성은 20% 정도 향상되나, 탄산화 속도는 2~3배 촉진되는 것으로 나타났다.

**주제어** : 플라이애쉬, 고로슬래그, 무시멘트 알칼리 활성 모르타르, 수축, 내구성

### Abstract

In this study, we investigated the strength, shrinkage and durability of alkali-activated mortar using blast furnace slag only, and admixed with blast-furnace slag and fly ash as cementitious materials in order to develop cementless alkali-activated concrete. In order to compare with the alkali-activated mortar, the normal mortar using ordinary portland cement was also test. In view of the results, we found out that strength development, the resistance to shrinkage and freezing-thawing of the cementless alkali-activated mortar have better than the mortar using ordinary portland cement. Especially, using the combined with blast furnace slag and fly ash develop high strength of above 60 MPa, reduce shrinkage of about 40% and improve freezing-thawing durability of approximately 20%, but promote the velocity of carbonation of 2~3 times.

**Key words** : Fly Ash, Blast furnace slag, Cementless Alkali-activated Mortar, Shrinkage, Durability

### 1. 서 론

국내의 제철소에서 발생하는 고로슬래그 미분말은 연간 약 800만 톤 이상으로 2000년대 초까지도 재활용이 낮아 상당한 양의 재고가 쌓여 있었으나, 최근 보통포

틀랜드 시멘트 생산 시 중량재, 혼합시멘트 및 레미콘 혼화재 등으로 사용량이 급증함에 따라 재활용율이 100%에 근접하게 되었다<sup>1)</sup>. 그러나 2010년부터 제철소가 추가로 가동되면서 향후 고로슬래그 미분말의 발생량은 1,000만 톤 이상이 될 것으로 예측되고 있다.

그리고 국내의 화력발전소에서 연간 발생하는 플라이애쉬를 포함한 석탄회(coal ash)의 양은 2000년에 약 436만 톤으로 1990년의 189만 톤에 비해 2배 이상 증

<sup>†</sup> 2011년 3월 4일 접수, 2011년 5월 2일 1차수정  
2011년 5월 20일 수리  
<sup>\*</sup> E-mail: ktgo@kict.re.kr

가하였으며, 2010년에는 약 736만 톤 정도로 추정하고 있다<sup>2)</sup>. 현재 발생하는 석탄회 중 58% 정도를 시멘트 제조용 원료(점토 대체제), 콘크리트용 혼화제 등으로 재활용하고 있으나, 나머지는 해안 및 육상 매립에 의해 처리되고 있어 매립지 확보를 위한 경제적 부담뿐만 아니라 매립 시 발생하는 침출수와 미세 분말로 구성된 석탄회의 분진 침출에 의해 많은 환경문제를 유발하고 있다.

한편, 최근 환경문제가 사회적으로 이슈화됨에 따라 전 세계적으로 콘크리트 제조 할 때 시멘트를 전혀 사용하지 않고 플라이애쉬와 고로슬래그 등 산업부산물을 이용한 무시멘트 콘크리트 개발에 관한 연구가 주목을 받고 있다.<sup>3-8)</sup> 이 무시멘트 콘크리트의 제조방법 및 특성은 사용하는 결합재, 활성화제 그리고 양생방법 등에 따라 차이가 있고, 주로 알칼리 활성 콘크리트(alkali-activated concrete) 및 지오폴리머 콘크리트(geopolymer concrete)로 불리고 있다.

이 무시멘트 콘크리트에 대한 연구는 주로 사용재료, 배합 등을 강도측면에서 주로 검토<sup>9-12)</sup>되고, 수축이나 내구성에 관한 연구<sup>13)</sup>는 부족한 실정이다. 한편, 저자들은 플라이애쉬와 고로슬래그를 혼합 사용한 무시멘트 알칼리 활성 모르타르의 유동성과 강도 특성에 대한 연구에서, 플라이애쉬와 고로슬래그를 혼합사용한 경우에는 제조 후 2시간이 경과하더라도 플로우가 170 mm 정도로 충분한 작업성과 상온에서도 재령 28일에서 60 MPa 이상의 강도가 확보된다고 보고한 바 있다<sup>14)</sup>.

따라서 본 연구에서는 보통포틀랜드 시멘트를 전혀 사용하지 않고 알칼리 활성 콘크리트를 개발하는 일환으로 고로슬래그 또는 고로슬래그와 플라이애쉬를 혼합 사용한 무시멘트 알칼리 활성 모르타르의 수축과 내구 특성에 대해 검토하였다.

## 2. 실험개요

### 2.1. 사용재료

본 연구에서 사용된 시멘트 대체 결합재로는 경남 하

동 화력발전소에서 생산되는 플라이애쉬와 포항제철소에서 발생하는 고로슬래그 미분말 그리고 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 화학성분 및 물리적 성질은 Table 1과 같다. 플라이애쉬는 산화규소(SiO<sub>2</sub>)와 산화알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)의 함유량이 81.1%로 반응성 산화물이 다량 포함되어 있다. 이 성분들은 알칼리 활성제 사용과 고온양생으로 Al-Si 중합반응이 발생하여 콘크리트의 강도를 발현시킨다.<sup>4)</sup> 그리고 고로슬래그 미분말은 산화규소와 산화알루미늄의 함유량이 48.6%로 비교적 높아 플라이애쉬와 같이 어느 정도 중합반응을 기대할 수 있고, 특히 산화칼슘(CaO) 성분이 42.1%로 풍부하여 일반 시멘트와 같은 수화반응도 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 1은 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말의 SEM 사진을 나타낸 것으로, 이들 입자 표면에는 치밀한 불투수성 피막인 유리질 피막(glassy chain)으로 쌓여있는 것으로 알려져 있다. 이런 플라이애쉬 및 고로슬래그 미분말은 그 자체적으로 반응성이 없기 때문에 이 유리질 피막을 깨고 내부의 반응 물질을 활성화시킬 필요가 있는데, 이 때 가장 유효한 방법은 강알칼리성을 가진 알칼리 활성화제를 사용하고 경우에 따라 고온양생을 실시하는 것이다.

저자들은 기존 연구를 통하여 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말의 알칼리 활성화제로 반응성, 시공성 및 안정성 등을 고려하여 9M의 NaOH와 소듐실리케이트(sodium silicate)의 적정 혼합비로 1:1를 제안한 바 있다<sup>7)</sup>. 실험에 사용된 NaOH는 시약용으로 순도 98% 이상인 것을 사용하였으며, 소듐실리케이트는 Na<sub>2</sub>O=10%, SiO<sub>2</sub>=30%, 고형분=38.5%를 사용하였다. 잔골재는 6호 규사(SiO<sub>2</sub>=95%, 밀도=2.62 g/cm<sup>3</sup>)를 사용하였다.

### 2.2. 배합

본 연구에서 사용한 무시멘트 알칼리 활성 콘크리트 배합비는 Table 2와 같이 고로슬래그를 단독으로 사용한 무시멘트 알칼리 활성 배합(BS), 플라이애쉬와 고로슬래그를 50%씩 혼합한 배합(BS+FA) 2종류이고, 비교

Table 1. Properties of Cementitious Materials

Types	Items	Chemical Composition (wt.%)						Surface area (cm <sup>2</sup> /g)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>		
	Fly ash	55.3	25.8	5.5	2.9	0.8	0.3	3.2	2.18
	Blast furnace slag	33.33	15.34	0.44	42.12	5.70	2.08	0.03	2.90
	OPC	21.01	6.40	3.12	61.33	3.02	2.3	1.40	3.15

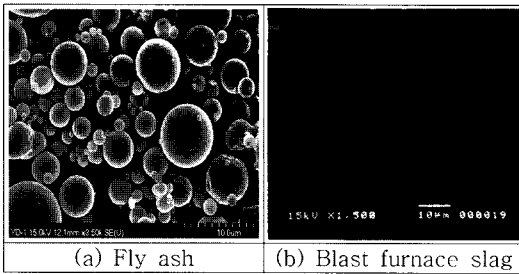


Fig. 1. Microstructure of the fly ash and Blast furnace slag by SEM.

Table 2. Mixture proportions of concrete

Mixture	Unit mass (kg/m <sup>3</sup> )						
	W	C	FA	BS	Alkaline activator	S	G
BS	104	-	-	500	184	581	710
BS+FA		-	250	250			
OPC	175	350	-	-	-	728	1118

를 위해 보통 포트랜드 시멘트를 사용하고 W/B 50%를 가진 일반 콘크리트 배합(OPC)에 대해서도 동일한 실험을 실시하였다. 그리고 플라이애쉬를 단독으로 사용한 무시멘트 콘크리트에 대해서 검토하지 않았는데, 플라이애쉬를 단독으로 사용한 무시멘트 콘크리트는 상온에서 강도가 거의 발현되지 않아 수축이나 내구성 검토가 되지 않고, 고온양생을 실시할 경우에는 고온양생이 이들 특성에 영향을 주기 때문에 비교분석이 어렵기 때문이다.<sup>7,14)</sup> 본 연구에서 사용된 배합은 Table 2에 나타낸 콘크리트 배합에서 굵은골재를 제외시킨 모르타르 배합을 대상으로 하였다. 양질의 골재를 사용한 경우에는 일반 강도범위에서 콘크리트와 모르타르 모두 골재가 강도발현에 미치는 영향은 크지 않고, 콘크리트의 강도를 포함한 품질에 지배적인 영향을 미치는 것은 시멘트 결합체로 판단되어 기초연구로서 모르타르를 대상으로 하였다. 본 실험에 사용된 알칼리 활성화 모르타르는 10리터 믹서에 먼저 플라이애쉬와 잔골재를 넣어 30~40 rpm 속도로 2분간 건비빔을 실시한 다음, 1일 전에 제조된 알칼리 활성화제 및 배합수를 넣어 다시 70~80 rpm 속도로 3분간 믹싱하여 제조하였다.

2.3. 실험방법

2.3.1 압축강도

제작된 모르타르를 KS L 5105에 준하여 시간이 경과

함에 따른 플로우의 변화를 측정하였고, 50×50×50 mm의 모르타르 공시체를 제작하여 23±2°C의 상온에서 기건양생(습도 60±5% R.H.)을 걸쳐 소정의 재령에서 압축강도를 측정하였으며, 압축강도 값은 공시체 5개의 평균값이다.

2.3.2 수축

100×100×400 mm의 모르타르 각주 공시체를 제작하였고, 몰드의 바닥과 양단에는 1 mm 두께의 테프론 시트(teflon sheet)를 깔아 시료의 자유로운 변형이 구속되지 않도록 하였고, 모르타르를 타설한 후 표면에서의 수분 증발 및 흡수를 막기 위해 폴리에스테르필름(polyester film)으로 외기와 격리시켰다. 이렇게 제작된 모르타르는 재령 7일 동안 온도 23±2°C, 습도 60±5%의 항온항습에서 실시하였으며, 매립게이지에 의해 길이변화율을 측정하였다. 그 이후 몰드에서 탈형하여 다시 동일한 온습도 조건에서 건조수축을 측정하였으며, 측정모습은 Fig. 2에 나타내었다. 그리고 건조수축은 콘크리트의 물의 증발과 관련되어 있으며, 물의 증발은 콘크리트의 내부의 습도변화 및 중량변화로 연관되어 있어 시험체 중량변화를 측정하여 수축결과와 비교하였다.

2.3.3 탄산화

탄산화 시험에 이용한 시험체는  $\phi 100 \times 200$  mm 원주 공시체를 이용하였으며, 14일간 기건양생을 실시한 다음 이산화탄소 농도 5±1%, 온도 30±3°C, 습도 60±5%를 조건으로 실시하였다. 탄산화 촉진시험을 수행한 후 일정기간 마다 시험체를 이등분으로 할렬하고, 그 면에 페놀프탈레인 1% 용액을 분무하여 탄산화 깊이를 측정하였으며, Fig. 3에 탄산화 깊이를 측정한 모습을 나타내었다. 또한 무시멘트 모르타르의 탄산화 결과를 고찰하기 위해 강도를 측정된 모르타르를 분쇄하여 분말화시켜 증류수와 10:90의 비율로 혼합한 다음 pH 메타를 이용하여 pH 변화를 측정하였다.

2.3.4 동결융해 저항성

동결융해 저항성 시험은 100×100×400 mm의 직사각



Fig. 2. Shrinkage test.

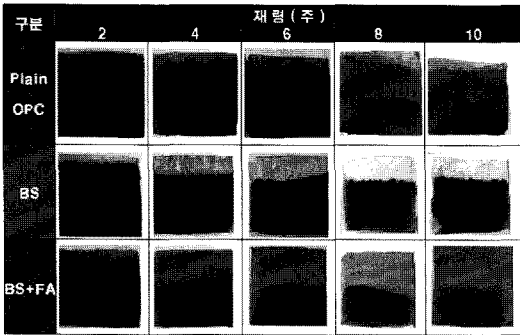


Fig. 3. Depth of carbonation according to the type of mortar.

형 단면의 공시체를 제작하여 14일 동안 기건양생을 실시한 다음 KS F 2456의 기중동결 수중융해 시험법으로 실시하였다. 동결융해 시험조건은 온도범위를 -18~+4.5°C로 하고 1사이클의 기간을 2시간 40분으로 하였다. 동결융해의 일정 사이클마다 가로진동에 의한 공명진동을 300 사이클까지 측정하여 다음과 같이 상대동탄성계수를 계산하였다.

$$P_n = \frac{f_n^2}{f_0^2} \times 100$$

여기서,

$P_n$  : 동결융해 n사이클 후의 상대동탄성계수(%)

$f_0^2$  : 동결융해 0사이클에서의 가로진동 주파수

$f_n^2$  : 동결융해 n사이클에서의 가로진동 주파수

### 2.3.5 공극분포

공극분포용 시료는 14일간 기건양생을 실시한 다음 강도시험체로부터 다이아몬드 절단기를 사용하여 5~10 mm 정도의 크기로 채취하였다. 채취된 시료는 1일 정도 아세톤에 침지시켜 시멘트 경화체의 수화를 정지시킨 다음 40°C에서 1일 정도 건조시켜 수은압입식 포로시메타(porosimeter)를 이용하여 총공극량과 공극분포를 측정하였다. 이 때 모세관 공극을 원통형으로 가정하였고, 수은의 표면장력을 48 dyne/cm, 접촉각을 130°C로 하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1. 압축강도

Fig. 4는 모르타르 종류에 따른 압축강도 결과이다. 무시멘트 알칼리 활성 모르타르는 결합재의 종류에 상

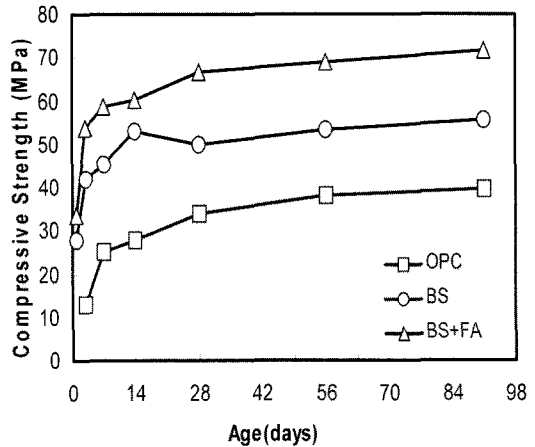


Fig. 4. Results of compressive strength according to the type of mortar.

관없이 일반 시멘트 모르타르에 비해 강도발현이 우수한 것으로 나타났다. 장기강도는 물론 초기강도도 우수한 것으로 나타났는데, 일반적으로 시멘트의 수화반응에 의한 강도발현보다는 중합반응에 의한 강도발현이 훨씬 빠르다는 것을 알 수 있다<sup>6)</sup>. 이처럼 결합재를 적절히 사용하면 무시멘트 콘크리트는 상온에서도 강도발현이 우수하여 공사기간 단축 등에 유리한 것으로 판단된다.

BS 경우, 재령 1일에서도 27 MPa로 매우 높고 그 이후 재령 14일까지 강도가 증진되어 50 MPa 정도로 고강도가 발현되나, 그 이후 재령에서 강도증진이 거의 없는 것으로 나타났다. 그리고 BS+FA 경우, 재령 1일에 30 MPa 이상, 재령 28일에는 65 MPa 정도 그리고 재령 91일에는 70 MPa 이상으로 고강도를 나타내고 있다. 저자들의 기존 연구에서는 FA를 단독으로 사용한 경우에는 상온양생 조건에서 거의 강도발현이 되지 않고 BS와 50% 씩 혼합한 경우에는 강도증진에 가장 양호한 것으로 분석한 바 있다.

### 3.2 수축특성

Fig. 5는 모르타르 종류에 따른 수축에 의한 길이변화율을 재령 180일까지 측정된 결과이다. 무시멘트 모르타르는 사용한 결합재 종류에 관계없이 일반 시멘트 모르타르에 비해 수축이 작게 나타났으며, 특히 BS+FA의 모르타르가 가장 수축이 작은 것으로 나타났다. 이 연구에서 재령 7일 동안 폴리에스테르 필름 등을 이용하여 밀봉양생을 하였기 때문에 이 기간에는 건조수축

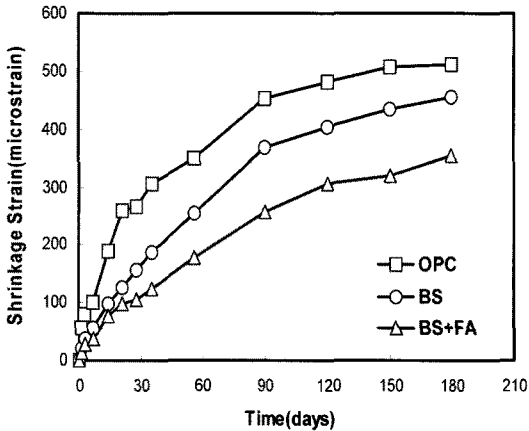


Fig. 5. Results of drying shrinkage according to the type of mortar.

보다는 수화반응에 의한 자기수축(autogenous shrinkage)이 주로 발생하는데, 이 기간의 수축도 OPC가  $100 \times 10^{-6}$ 로 가장 크고, BS와 BS+FA는 각각  $56 \times 10^{-6}$ 와  $37 \times 10^{-6}$ 로 상당히 작은 것으로 나타났다. 그리고 7일 이후에는 주로 건조수축에 해당되며, 이 수축량을 계산해 보면, 재령 180일에서 OPC는  $412 \times 10^{-6}$ , BS는  $400 \times 10^{-6}$ , BS+FA는  $319 \times 10^{-6}$ 으로 건조수축은 OPC와 BS가 유사한 것으로 나타났다. 그리고 BS의 수축량은 계속 증가하는 추세에 있으므로 건조재령이 증가할수록 OPC에 비해 건조수축이 증가할 것으로 예상되며, 계속 데이터를 추적할 필요가 있다.

Fig. 6은 재령에 따라 시험체의 중량변화율을 나타낸 것으로 재령 7일까지는 밀봉양생을 실시하였기 때문에 중량변화가 거의 없고 그 이후부터 건조에 의한 시험체

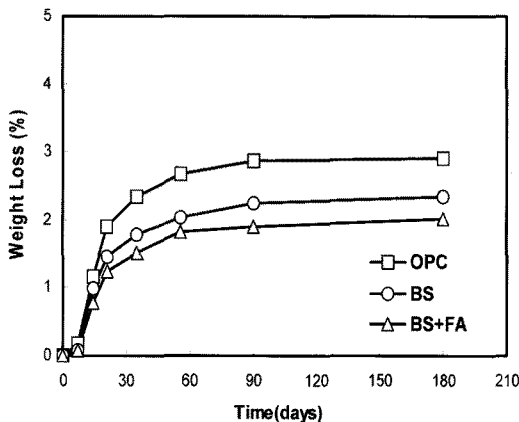


Fig. 6. Weight loss of mortar during drying shrinkage test.

의 중량변화가 커지고, 거의 건조수축 결과와 유사한 결과를 보이고 있다.

무시멘트 콘크리트의 수축에 대해 검토된 연구는 충분하지 않지만, 주로 결합재로 고로슬래그를 사용한 경우가 대부분이다. Coolins & Sanjayan<sup>16)</sup>은 알칼리 활성 콘크리트의 수축은 상대습도 50%에 노출된 경우에는 57% 정도 증가하는 것으로 나타났으나, RH 70% 조건에서 OPC와 거의 동일한 수축특성을 가지는 것으로 보고하고 있다. 그리고 사용한 감수제 종류에 따라 강도와 수축에 미치는 영향이 다르고, AE제, 수축저감제 그리고 석고의 사용은 알칼리 활성 콘크리트의 수축 저감에 유효한 것을 확인한 바 있다.<sup>15,17)</sup>

### 3.3 탄산화

Fig. 7은 모르타르 종류에 따른 탄산화 촉진 시험결과이다. 일반 시멘트 모르타르는 촉진 탄산화 시험재령이 증가하더라도 탄산화 깊이가 빨리 진행되지 않으나, 알칼리 활성 모르타르인 경우에는 탄산화가 빨리 진행되고 있으며, 특히 BS+FA가 더욱 빨리 진행되고 있음을 알 수 있다.

Byfors *et al.*<sup>18)</sup>은 본 연구의 결과와 마찬가지로 고로슬래그계 알칼리 활성 콘크리트가 OPC에 비해 탄산화가 촉진되는 것으로 보고하고 있다. 그리고 Puertas *et al.*<sup>19)</sup>은 알칼리 활성화제로 쇼트실리케이트를 사용한 경우에는 CSH gel에서 칼슘이 소실되어 탄산화 촉진의 원인이 되고, NaOH를 사용한 경우에는 공극내에 칼슘이 증가되어 오히려 탄산화 진행을 억제하는 것으로 보고하고 있다. 본 연구에서는 알칼리 활성화제로 쇼트실리

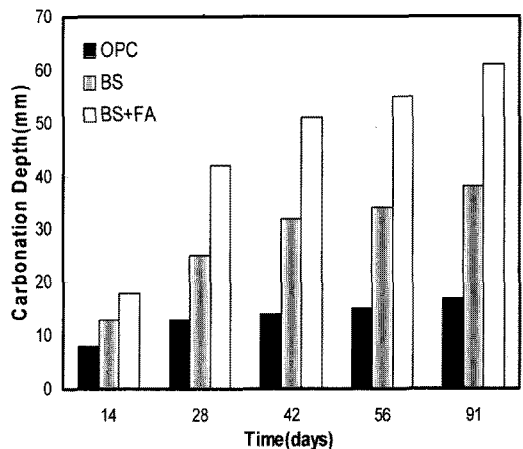


Fig. 7. Carbonation depth according to the type of mortar.

케이트와 NaOH를 혼합하여 사용하고 있기 때문에 탄산화에 대해 복합적으로 작용하고 있을 것으로 사료되며, 향후 이에 대해 상세히 검토할 필요가 있다. 그리고 Barkharev *et al.*<sup>20)</sup>의 연구결과에 의하면, 고로슬래그계 알칼리 활성 콘크리트가 이산화탄소 농도가 높은 환경에 노출된 경우, 콘크리트 표면에서 pH 감소가 되고 CSH gel에서 칼슘이 소실되는 현상이 발생하는 것으로 분석한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 탄산화 진행 속도를 pH와 관련하여 설명하고자 Fig. 8에 재령에 따른 pH의 변화를 나타내었다. 일반적으로 시멘트 콘크리트의 수화물인 Ca(OH)<sub>2</sub>로 인해 pH가 약 13 정도로 강알칼리성을 가지고 있으며, 이로 인해 탄산화에 대해 저항성이 큰 것으로 보고되고 있다. 그러나 알칼리 활성 모르타르의 pH가 12 이하로 일반 시멘트 콘크리트에 비해 상당히 낮음을 알 수 있다. 이처럼 알칼리 활성 모르타르의 pH가 낮아지는 것은 중합반응 시 Na<sup>+</sup> 및 Ca<sup>+</sup> 이온이 소모되기 때문으로 판단된다. 따라서 알칼리 활성 모르타르의 pH가 더욱 낮아지는 결과로부터 탄산화 촉진시험 결과를 설명할 수 있을 것으로 사료된다. 이상과 같이 알칼리 활성 콘크리트는 탄산화 저항성이 저하되기 때문에 이에 대한 대책 강구 및 사용용도가 한정되어야 할 것으로 판단된다.

3.4 동결융해 저항성

Fig. 9는 모르타르 종류에 따른 동결융해 시험 결과이다. 동결융해 시험결과는 주로 상대동탄성계수와 중량변화로 평가하는데, 본 연구에서 중량변화는 1% 이하로 모르타르 종류에 따라 거의 차이가 없었기 때문에

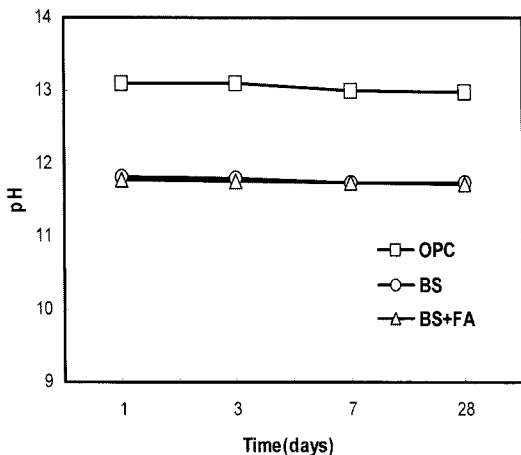


Fig. 8. Changes of pH according to the type of mortar.

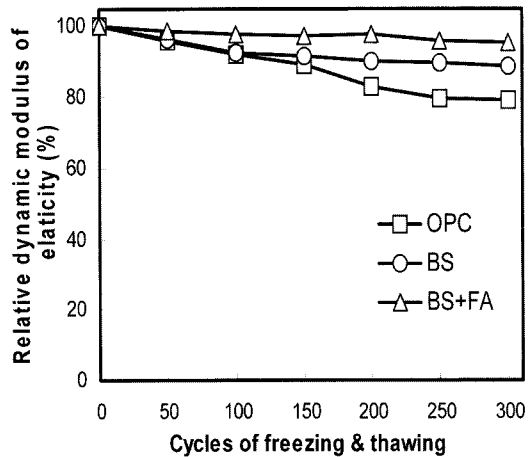


Fig. 9. Results of resistance to freezing & thawing according to the type of mortar.

상대동탄성계수로 평가하였다.

일반시멘트 모르타르의 OPC는 동결융해 300사이클 종료시점에서 상대동탄성계수가 80% 이하로 일반적으로 고내구성 콘크리트로 평가되는 내구성 지수 (durability factor) 80 이하로 떨어지고 있으나, 무시멘트 알칼리 활성 모르타르는 종류에 관계없이 상대동탄성계수 80% 이상으로 동결융해 저항성이 우수하고, 특히 BS+FA의 내구성 지수가 90 이상으로 매우 우수한 것으로 평가된다.

일반적으로 콘크리트의 동결융해 저항성은 공기량, 공극분포, 강도 등이 영향을 많이 받는다. 이 연구에서 OPC는 AE제를 사용하여 공기량 4.5% 정도를 연행하였으나, 무시멘트 모르타르는 AE제를 사용하지 않았다. 콘크리트가 동결이 되면, 팽창압이 발생하고 이 팽창압이 콘크리트의 인장강도를 초과하면 콘크리트가 파괴되는데, 이 과정에서 연행된 공극은 완충 역할을 하여 동결융해 저항성을 향상시키게 된다.<sup>22,24)</sup> 그러나 이 연구에서는 무시멘트 모르타르에 공기량을 연행하지 않았음에도 불구하고 동결융해 저항성이 우수한 것으로 나타났다.

Fig. 10은 모르타르 종류에 따른 공극분포를 측정 한 결과이다. 모르타르 종류에 따라 총 공극량은 거의 차이가 없으나, 공극분포는 많은 차이가 있는 것으로 나타났다. OPC는 0.05 μm 부근의 공극에서 피크점이 보이고 있으나, 무시멘트 모르타르는 그 보다 작은 쪽으로 이동하여 BS는 0.02 μm 부근의 공극과 0.005 μm 부근의 공극에서 피크점이 보이고, BS+FA는 0.005 μm 부근의 공극에서 피크점이 보이고 있다. 여기서 0.05 μm 부근

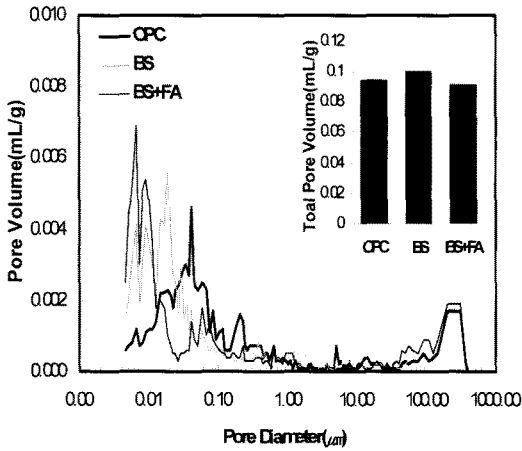


Fig. 10. Pore distribution according to the type of mortar.

의 공극은 모세관 공극(capillary pore)에 해당되며,<sup>23,25)</sup> 이런 공극이 많을수록 강도와 내구성이 저하된다. 따라서 본 연구에서 OPC의 강도와 동결융해 저항성이 무시멘트 모르타르에 비해 저하되는 이유를 설명할 수 있다. 그리고 0.005  $\mu\text{m}$  부근의 공극은 겔 공극 또는 CSH 층간의 결정내 공극<sup>23)</sup>으로서 이런 공극이 많을수록 강도와 내구성 향상이 되며, 마찬가지로 무시멘트 모르타르가 강도와 동결융해 저항성이 향상되는 이유를 설명할 수 있다.

그리고 50~200  $\mu\text{m}$  부근의 공극은 AE제 사용에 의한 연행공기(entrained air)에 해당<sup>23,25)</sup> 하며, 앞에서 설명한 바와 같이 동결융해 저항성과 밀접한 관계가 있다. 무시멘트 모르타르는 공기량을 연행하지 않았는데, 이에 해당하는 공극이 OPC보다 많이 생성되고 있다. 이것은 중합반응 시 가수분해에 의해 미세한 공극이 발생하는데, 이 때 일부 이 공극이 생성되는 것으로 추정된다. 따라서 이런 공극에 의해 무시멘트 모르타르의 동결융해 저항성 우수한 이유 중 하나라고 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 시멘트를 전혀 사용하지 않은 무시멘트 알칼리 활성화 콘크리트를 개발할 목적으로 시멘트 대신에 결합재로 고로슬래그 또는 고로슬래그와 플라이애쉬를 혼합 사용한 알칼리 활성화 모르타르의 강도, 수축 및 내구성에 대해 검토하였다. 그 결과, 알칼리 활성화 모르타르는 일반 시멘트 모르타르에 비해 강도발현, 수축 및 동결융해 저항성 측면에서 우수한 것으로 나타났다.

특히 고로슬래그와 플라이애쉬를 혼합사용한 경우에는 압축강도 60 MPa 이상 달성이 가능하고, 일반 시멘트 모르타르에 비하여 수축량은 40% 정도 감소하고, 동결융해 저항성은 20% 정도 향상되는 것으로 나타났다. 그러나 탄산화 진행속도는 일반 시멘트 모르타르에 비해 2~3배 촉진되는 것으로 나타났으며, 이에 대책이 필요할 것으로 분석되었다. 향후 수밀성, 염해 저항성, 황산염, 화학적 저항성 그리고 철근부식 등에 대해서도 상세히 검토할 예정이다.

#### 감사의 글

이 연구는 지식경제부, 한국에너지기술평가원의 전력 산업원천기술개발사업 지원으로 이루어졌으며, 이에 대해 깊은 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

1. POSCO 홈페이지(www.posco.co.kr).
2. 지식경제부 보도자료, 2007: *화력발전소 석탄재 재활용 길 활짝 열려*.
3. Davidovits J., 1989: *Geopolymers and geopolymeric materials*, Thermal Analysis and Calorimetry, **35**(2).
4. Palomo A. et al., 1991: *Alkali-activated fly ashes, a cement for the future*, Cement and Concrete Research, **29**, pp. 1323-1329.
5. Fernandez-Jimenez et al., 1999: *Alkali-activated slag mortars, mechanical strength behaviour*, Cement and Concrete Research, **29**, pp.594-604.
6. 양근혁, 송진규, 2007: *알칼리 활성화를 이용한 무시멘트 콘크리트의 구조 성능 및 적용*, 한국콘크리트학회, Vol. **19**, No. 2, pp.42-48.
7. 강현진, 고경택 외 5인, 2009: *시멘트를 사용하지 않은 플라이애쉬 알칼리 활성화 모르타르의 압축강도에 미치는 알칼리 활성화제 및 양생조건에의 영향*, 자원리사이클링 제 18권 제2호, pp. 39-50.
8. Hardjito, D and Rangan, B.V, 2005: *Development and Properties of Low-calcium Fly Ash-based Geopolymer Concrete*, Research Report CC-1, Faculty of Engineering, Curtin Univ of Technology.
9. 조병완, 박석민, 박승국, 2006: *알칼리 활성화에 의한 플라이애쉬 모르타르의 강도 발현 및 경화 메커니즘*, 한국콘크리트학회지, Vol. **18**, No.4, pp. 499-458.
10. 고경택, 류금성, 이장화, 2010: *플라이애쉬와 고로슬래그 미분말의 혼합 사용한 무시멘트 알칼리 활성화 모르타르의 유동성 및 강도 특성*, 한국건설순환자원학회 논문집, Vol. **5**, No.4, pp. 114-121.

11. Bakharev T., 2004: *Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing*, Cement and Concrete Research, **35**, pp. 1224-1232.
12. Sanjay Kumar, Ralesh Kumar and Mehrotra S.P. 2010 : *Influence of granulated blast furnace slag on the reaction, structure and properties of fly ash based geopolymer*, J Mater Sci, **45**, pp. 607-615.
13. 문영범, 이승현, 2007: *알칼리 활성화 슬래그 시멘트 모르타르의 내황산성*, 한국세라믹학회지, Vol.44 No.11, pp. 633-638.
14. 고경택, 강수태, 박정준 외 3인, 2010: *결합재로 플라이애시와 고로슬래그의 혼합사용이 알칼리 활성 모르타르의 특성에 미치는 영향*, 자원리싸이클링 제19권 제4호, pp. 19-28.
15. Palacios, M, Puertas F., 2007: *Effect of shrinkage-reducing admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars and pastes*, Cement and Concrete Research, **37**, pp. 691-702.
16. Collins, F.G., Sanjayan, 1999: *Workability and mechanical properties of alkali-activated slag concrete*, Cement and Concrete Research, **29**, pp. 455-458.17.
17. Bakharev T. et al., 2000: *Effects of admixtures on properties of alkali-activated slag concrete*, Cement and Concrete Research, **30**, pp. 1367-1374.
18. Byfors K. et al., 1989: *Durability of concrete made with alkali-activated slag*, Proceedings 3rd CANMET/ACI Inter. Conf., **ACI SP-114**, pp. 1429-1466.
19. Puertas F. et al., 2006: *Carbonation process of alkali-activated mortars*, J Mater Sci **41**, pp. 3071-3082.
20. Bakharev T. et al., 2001: *Resistance of alkali-activated slag concrete to carbonation*, Cement and Concrete Research, **31**, pp. 1277-1283.
21. Antonio A. Meolo Neto, et al., 2008: *Drying and autogenous shrinkage of pastes and mortars with activated slag cement*, Cement and Concrete Research, **38**, pp. 565-574.
22. Neville A.M., 1995: *Properties of Concrete*, Fourth and Final Edition, Longman.
23. Metha, P.K. , 1986: *Concrete, Structures, Properties, and Materials*, Prentice-Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics.
24. Powers T.C., 1945: *A Working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete*, Proc. of ACI, **41**.
25. 鎌田英治, 1991 : *セメント・コンクリート化学とその應用, 凍結融解抵抗性/凍結作用を受けたコンクリートの挙動と細孔構造*, セメント協會.

---

**高 京 澤**

- 현재 한국건설기술연구원 구조교량연구실 연구위원
  - 당 학회지 제18권 2호 참조
- 

---

**劉 金 星**

- 현재 한국건설기술연구원 구조교량연구실 전임연구위원
  - 당 학회지 제18권 2호 참조
- 

---

**李 章 和**

- 현재 한국건설기술연구원 구조교량연구실 선임연구위원
  - 당 학회지 제18권 2호 참조
- 

---

**姜 賢 眞**

- 현재 (주)삼표 혼화제사업부
  - 당 학회지 제18권 2호 참조
-