

## 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 혼합 사용한 지오폴리머 모르타르의 강도발현 및 내구성

# Strength Development and Durability of Geopolymer Mortar Using the Combined Fly ash and Blast-Furnace Slag

류금성<sup>1</sup> · 고경택<sup>1\*</sup> · 이장화<sup>1</sup>

Gum-Sung Ryu<sup>1</sup> · Kyung-Taek Koh<sup>1\*</sup> · Jang-Hwa Lee<sup>1</sup>

(Received May 13, 2013 / Revised June 7, 2013 / Accepted June 21, 2013)

In this study, we investigated the strength development and durability of geopolymer mortar using blast furnace slag only, and admixed with blast-furnace slag and fly ash as cementitious materials in order to develop cementless geopolymer concrete. In order to compare with the geopolymer mortar, the normal mortar using ordinary portland cement was also tested. In view of the results, we found out that strength development, the resistance to freezing-thawing of the geopolymer 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, and improve the resistance of freezing-thawing of approximately 20%, but promote the velocity of carbonation of 2.2~3.5 times.

**키워드** : 지오폴리머 모르타르, 고로슬래그 미분말, 플라이애시, 강도발현, 내구성

**Keywords** : Geopolymer mortar, Blast-Furnace Slag, Fly Ash, Strength Development, Durability

## 1. 서론

최근 환경문제가 대두되면서 콘크리트 산업에서도 다양한 친환경 기술이 개발되고 있다. 그 중에서도 콘크리트를 제조할 때 시멘트를 전혀 사용하지 않고 결합재로 플라이애시와 고로슬래그 미분말 등 산업부산물만을 사용한 지오폴리머 콘크리트 개발에 관한 연구가 주목을 받고 있다(Davidovits 1989; Palomo et al. 1999; Fernandez-Jimenez et al. 1999; Yang and Song 2007; Kang et al. 2009; Hardjito and Rangan 2005).

1978년 프랑스의 Davidovits가 세계최초로 광물질 카올리나이트(Kaolinite:  $Al_2Si_2O_5(OH)_2$ )와 알칼리 활성화제(alkaline activator)를 사용하여 중합반응(polymerization)에 의해 제올라이트와 유사한 구조를 가진 지오폴리머 콘크리트를 개발하였다(Davidovits 1989). 그 후 여러 연구자에 의해 다양한 연구가 수행되었으며, 일부 실용화 단계에 이르고 있다. 국내에서도 최근 지오폴리머 콘크리트에 대해서 많은 연구가 수행되고 있으나, 아직까지 해명되

지 않은 부분이 많다.

고로슬래그 미분말을 사용한 지오폴리머 콘크리트는 시공성 및 수축 등의 문제(Palacios and Puertas 2007; Koh et al. 2011)가 있는 것으로 지적되고 있으나, 상온에서도 강도발현이 우수하여 압축강도 40~70MPa 범위의 고강도 콘크리트 제조가 가능한 것으로 보고되고 있다(Koh et al. 2010; Shi et al. 2006; Collins and Sanjayan 2000). 플라이애시를 사용한 지오폴리머 콘크리트는 시공성 확보가 비교적 용이하나, 상온에서는 강도발현이 어렵고, 중합반응의 활성화를 위해 고온양생이 필요하다(Palomo et al. 1999; Kang et al. 2009).

한편 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 혼합 사용한 지오폴리머 콘크리트 및 모르타르에 대한 연구가 진행되고 있다. Smith & Osbrone, Bijen & Waltje는 결합재로 고로슬래그와 플라이애시를 혼합하고 활성화제로 NaOH를 사용한 경우, 초기강도는 향상되나 장기강도 증진에는 효과가 없는 것으로 보고하고 있다(Smith and Osbrone 1977; Bijen and Waltje 1989). Puertas 등은 플라이애시

\* Corresponding author E-mail: ktgo@kict.re.kr

<sup>1</sup>한국건설기술연구원 (Korea Institute of Construction Technology, Goyang, 411-712, Korea)

와 고로슬래그를 50%씩 혼합한 결합재에 대해 알칼리 활성화제로 10M NaOH를 사용하고 25℃에서 양생을 실시한 결과, 재령 28일에서 50MPa 정도의 강도가 발현되고, 플라이애시와 고로슬래그의 혼합비가 강도발현에 중요한 인자로 작용한다는 것을 확인하였다(Puertas et al, 2000). Zhao 등은 C급 플라이애시와 고로슬래그를 혼합하고, 탈황석고, 수산화칼슘 등으로 구성된 활성화제를 사용한 결과, 결합재는 고로슬래그 70%, C급 플라이애시 18% 그리고 활성화제 2%로 구성된 것을 적정 혼합비로 선정하였다(Zhao et al, 2007). 이 때 압축강도는 재령 28일에서 49MPa 정도를 얻었고 주요 생성물은 고로슬래그의 수화반응으로 인한 C-S-H 겔과 에트링자이트(ettringite)라고 분석하였다. 저자들은 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 혼합 사용한 지오폐리머 모르타르에 대한 연구에서 제조 후 2시간이 경과하더라도 플로우를 170mm 정도로 유지할 수 있는 충분한 작업성과 20℃의 상온에서도 재령 28일에서 60MPa 이상의 고강도 모르타르를 제조할 수 있다고 보고한 바 있다(Koh et al 2010). 이상과 같이 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 혼합 사용한 지오폐리머 콘크리트는 사용재료, 배합 등에 대해서 강도 측면에서 많이 검토되고 있으나, 내구성에 관한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 혼합 사용한 지오폐리머 모르타르의 강도발현과 내구성에 대해 검토하였다. 비교를 위해 결합재로 고로슬래그를 100% 사용한 지오폐리머 모르타르 그리고 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 모르타르에 대해서도 동일한 시험을 수행하였다.

## 2. 실험

### 2.1 사용 재료

본 연구에서 사용된 시멘트 대체 결합재로는 경남 하동 화력발전소에서 생산되는 플라이애시(FA)와 포항제철소에서 발생하는 고로슬래그 미분말(BFS)을 사용하였으며, 지오폐리머 모르타르와

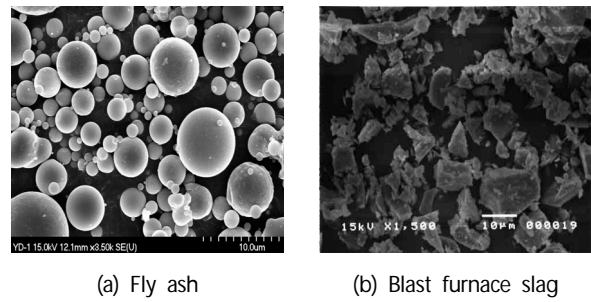


Fig. 1. Microstructure of the fly ash and Blast furnace slag by SEM

비교를 위해 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)도 사용하였다. 이들 결합재의 화학성분 및 물리적 성질은 Table 1과 같다. 플라이애시는 산화규소(SiO<sub>2</sub>)와 산화알루미나(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)의 함유량이 81.1%로 반응성 산화물이 다량 포함되어 있다. 이 성분들은 알칼리 활성화제 사용과 고온양생으로 Al-Si 중합반응이 발생하여 강도가 발현된다. 그리고 고로슬래그 미분말은 산화규소와 산화알루미나의 함유량이 48.6%로 비교적 높아 플라이애시와 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 플라이애시와 고로슬래그 미분말의 SEM 사진을 나타낸 것으로, 이들 입자 표면에는 치밀한 불투수성 피막인 유리질 피막(glassy film)으로 싸여있는 것으로 알려져 있다(Palomo et al, 1999). 이런 플라이애시 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 플라이애시와 고로슬래그 미분말의 알칼리 활성화제로 반응성, 시공성 및 안정성 등을 고려하여 9몰(mole, M)의 NaOH와 소듐실리케이트(sodium silicate)의 적정 혼합비로 1:1를 제안한 바 있다(Kang et al, 2009). 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.

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>			L.O.I
Fly ash		55.3	25.8	5.5	2.9	0.8	0.3	3.2	3,550	2.18
Blast furnace slag		33.33	15.34	0.44	42.12	5.70	2.08	0.03	4,159	2.90
OPC		21.01	6.40	3.12	61.33	3.02	2.3	1.40	3,413	3.15

잔골재는 평균입경 0.35~0.7mm 이하의 규사(SiO<sub>2</sub>=95%, 밀도 =2.62g/cm<sup>3</sup>)를 사용하였다.

## 2.2 모르타르 배합

Table 2. Mixture proportions of mortar

Mixture	Mix proportion by mass(Unit: g)					
	W	C	FA	BFS	Alkaline activator	S
BFS	320	-	-	1,600	600	2,400
BFS+FA		-	800	800		
OPC	277	554	-	-	-	2,400

본 연구에서 사용한 지오폐리머 모르타르 배합비는 Table 2와 같이 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 50%씩 혼합한 배합(BFS+FA)(Koh et al. 2010), 고로슬래그를 단독으로 사용한 지오폐리머 배합(BFS)(Koh et al. 2011) 2종류이고, 비교를 위해 보통 포트랜드 시멘트를 사용하고 W/B 0.5를 가진 일반 모르타르 배합(OPC)에 대해서도 동일한 실험을 실시하였다. 그리고 플라이애시를 단독으로 사용한 지오폐리머 콘크리트에 대해서 검토하지 않았는데, 플라이애시를 단독으로 사용한 지오폐리머 모르타르는 상온에서 강도가 거의 발현되지 않아(Koh et al 2010; 2011) 내구성 검토가 되지 않고, 고온양생을 실시할 경우에는 고온양생이 이들 특성에 영향을 주기 때문에 비교분석이 어렵기 때문이다.

## 2.3 실험 방법

### 2.3.1 모르타르 제조

본 실험에 사용된 지오폐리머 모르타르는 10리터 믹서에 먼저 결합재와 잔골재를 넣어 30~40rpm 속도로 2분간 건비빔을 실시한 다음, 1일 전에 제조된 알칼리 활성화제 및 배합수를 넣어 다시 70~80rpm 속도로 3분간 믹싱하여 제조하였다.

### 2.3.2 압축강도

제작된 지오폐리머 모르타르를 KS L 5105에 준하여 시간이 경과함에 따른 플로우의 변화를 측정하였고, 50×50×50mm의 모르타르 공시체를 제작하여 23±2℃의 상온에서 기건양생(습도 60±5% R.H.)을 걸쳐 소정의 재령에서 압축강도를 측정하였으며, 압축강도 값은 공시체 5개의 평균값이다. 단, OPC 시험체는 23±2℃에서 수중양생을 실시하였다.

### 2.3.3 탄산화 시험

탄산화 시험에 이용한 시험체는 ϕ100×200mm 원주 공시체를 이용하였으며, 14일간 기건양생을 실시한 다음 이산화탄소 농도 5±1%, 온도 30±3℃, 습도 60±5%를 조건으로 실시하였다. 탄산화 촉진시험을 수행한 후 일정기간 마다 시험체를 이등분으로 할렬하고, 그 면에 페놀프탈레인 1% 용액을 분무하여 탄산화 깊이를 측정하였다. 또한 지오폐리머 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 시험

동결융해 저항성 시험은 100×100×400mm의 직사각형 단면의 공시체를 제작하여 14일간 기건양생을 실시한 다음 KS F 2456의 기중동결 수중융해 시험법으로 실시하였다. 동결융해 시험조건은 온도범위를 -18~+4.5℃로 하고 1사이클의 기간을 2시간 40분으로 하였다. 동결융해의 일정 사이클마다 가로진동에 의한 공명진동을 300 사이클까지 측정하여 다음과 같이 상대동탄성계수를 계산하였다.

$$P_n = \frac{f_n^2}{f_0^2} \times 100 \quad (1)$$

여기서,  $P_n$ 는 동결융해 n사이클 후의 상대동탄성계수(%),  $f_0$ 는 동결융해 0사이클에서의 가로진동 주파수,  $f_n$ : 동결융해 n사이클에서의 가로진동 주파수이다.

### 2.3.5 공극분포

공극분포용 시료는 14일간 기건양생을 실시한 다음 강도 시험체로부터 다이아몬드 절단기를 사용하여 5~10mm 정도의 크기로 채취하였다. 채취된 시료는 1일 정도 아세톤에 침지시켜 시멘트 경화체의 수화 및 지오폐리머의 중합반응을 정지시킨 다음 40℃에서 1일 정도 건조시켜 수은압입식 포로시메타(porosimeter)를 이용하여 총공극량과 공극분포를 측정하였다. 이 때 모세관 공극을 원통형으로 가정하였고, 수은의 표면장력을 485dyne/cm, 접촉각을 130°로 하였다.

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 압축강도

Fig. 2는 모르타르 종류에 따른 압축강도 결과이다. 지오폐리머 모르타르는 결합재의 종류에 상관없이 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. BFS 경우, 재령 1일에서도 27MPa로 매우 높고 그 이후 재령 14일까지 강도가 증진되어 50MPa 정도로 고강도가 발현되나, 그 이후 재령에서 강도증진이 거의 없는 것으로 나타났다. 그리고 BFS+FA 경우, 재령 1일에 30MPa 이상, 재령 28일에는 65MPa 정도 그리고 재령 91일에는 70MPa 이상으로 고강도를 나타내고 있다. 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 혼합 사용한 지오폐리머의 반응 메커니즘은 재령 초기에는 고로슬래그 미분말의 수화반응에 의해 C-S-H 겔과 Ca(OH)<sub>2</sub>를 생성시켜 강도발현을 주도하고, 재령이 증가함에 따라 중합반응에 의해 Si-O-Al-O 결합을 구성함으로써 플라이애시가 강도발현을 좌우하는 것으로 알려져 있다(Wang et al, 1995; Puertas and Fernandez-Jimenez 2003). 저자들의 기존 연구(Koh et al, 2010)에서 플라이애시를 단독으로 사용하는 경우에는 상온양생 조건에서 거의 강도발현이 되지 않고 BFS와 50% 씩 혼합한 경우에는 강도증진에 가장 양호한 것으로 분석한 바 있다.

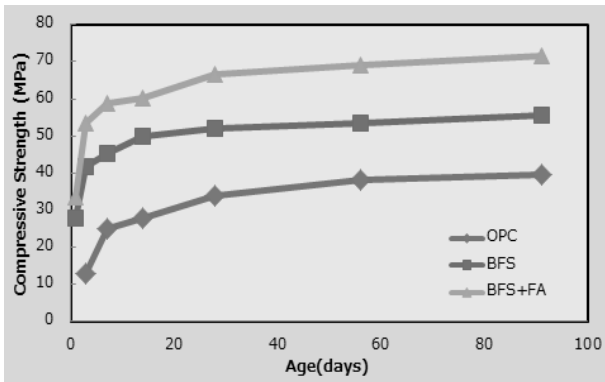


Fig. 2. Compressive strength development according to the type of mortar

#### 3.2 탄산화

Fig. 3은 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 BFS+FA가 더욱 빨리 진행되고 있음을 알 수 있다. Fig. 4는 탄산화 촉진 시험결과를 토대로 탄산화 계수를 구한 결과이다. 여기서, 탄산화 계수는 탄산화 깊이와 재령의 평방근에 대한 비로 정의된 것으로 탄산화 속도를 비교하는 데 많이 사용된다. 탄산화 계수의 결과에 의하면 지오폐리머 모르타르는 OPC에 비해 BFS+FA의 경우 3.5배 정도, BFS의 경우 2.2배 정도가 탄산화가 빨리 진행되는 것으로 나타났다.

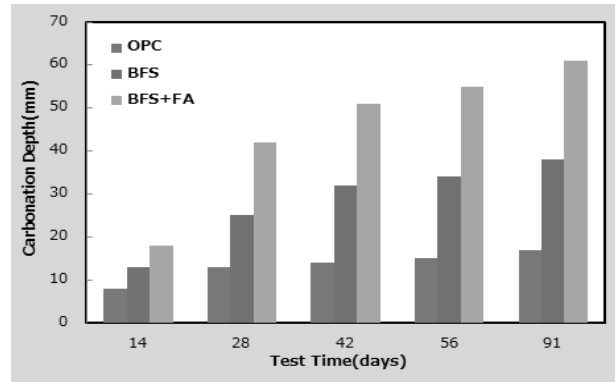


Fig. 3. Carbonation depth according to the type of mortar

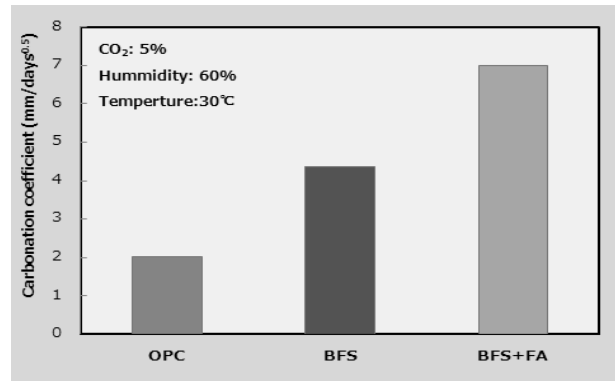


Fig. 4. Carbonation coefficient according to the type of mortar

Byfors 등은 본 연구의 결과와 마찬가지로 고로슬래그계 알칼리 활성 콘크리트가 OPC에 비해 탄산화가 촉진되는 것으로 보고하고 있다(Byfors et al, 1989), 그리고 Puertas 등은 알칼리 활성화제로 소듐실리케이트를 사용한 경우에는 C-S-H 겔에서 칼슘이 소실되어 탄산화 촉진 원인이 되고, NaOH를 사용한 경우에는 공극내에 칼슘이 증가되어 오히려 탄산화 진행을 억제하는 것으로 보고하고 있다(Puertas et al, 2006). 본 연구에서는 알칼리 활성화제로 소듐실리케이트와 NaOH를 혼합하여 사용하고 있기 때문에

탄산화에 대해 복합적으로 작용하고 있을 것으로 사료되며, 향후 이에 대해 상세히 검토할 필요가 있다. 그리고 Barkharev 등의 연구결과에 의하면, 고로슬래그계 알칼리 활성 콘크리트가 이산화탄소 농도가 높은 환경에 노출된 경우, 콘크리트 표면에서 pH 감소가 되고 C-S-H 겔에서 칼슘이 소실되는 현상이 발생하는 것으로 분석한 바 있다(Bakharev et al, 2001). Fig. 5에 나타난 바와 같이 보통포틀랜드 시멘트를 사용한 OPC 모르타르는 시멘트의 수화물인  $\text{Ca(OH)}_2$  생성으로 인해 pH가 약 13 정도로 강알칼리성을 가지고 있으며, 이로 인해 탄산화에 대해 저항성이 큰 것으로 보고되고 있다. 그러나 지오폐리머 모르타르인 BFS, BFS+FA의 pH는 모든 12 이하로 OPC에 비해 상당히 낮음을 알 수 있다. 이처럼 지오폐리머 모르타르의 pH가 낮아지는 것은 중합반응 시  $\text{Na}^+$  및  $\text{Ca}^+$  이온이 소모되기 때문으로 판단된다. 이처럼 지오폐리머 모르타르의 낮은 pH 결과로부터 탄산화 촉진시험 결과를 설명 할 수 있다.

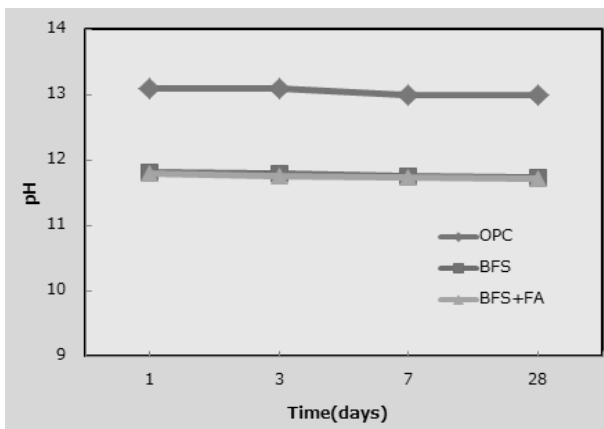


Fig. 5. Changes of pH according to the type of mortar

### 3.3 동결융해 저항성

Fig. 6은 모르타르 종류에 따른 동결융해 시험 결과이다. 동결융해 시험결과는 주로 상대동탄성계수와 중량변화로 평가하는데, 본 연구에서 중량변화는 1% 이하로 모르타르 종류에 따라 거의 차이가 없었기 때문에 상대동탄성계수로 평가하였다.

일반시멘트 모르타르 OPC는 동결융해 300사이클 종료시점에서 상대동탄성계수가 80% 이하로 떨어지고 있다. 그러나 지오폐리머 모르타르는 종류에 관계없이 상대동탄성계수 80% 이상으로 동결융해 저항성이 우수하고, 특히 BFS+FA의 내구성 지수가 90 이상으로 매우 우수한 것으로 평가된다.

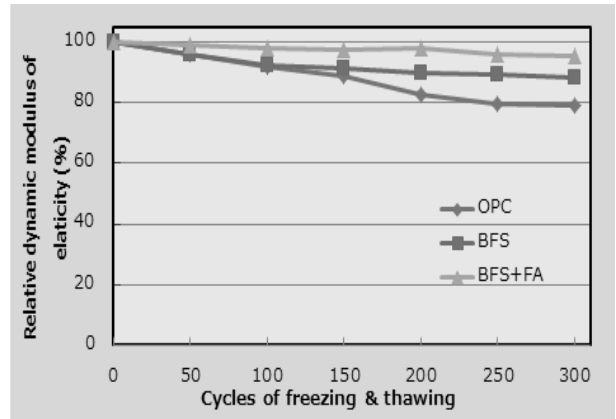


Fig. 6. Resistance to freezing and thawing according to the type of mortar

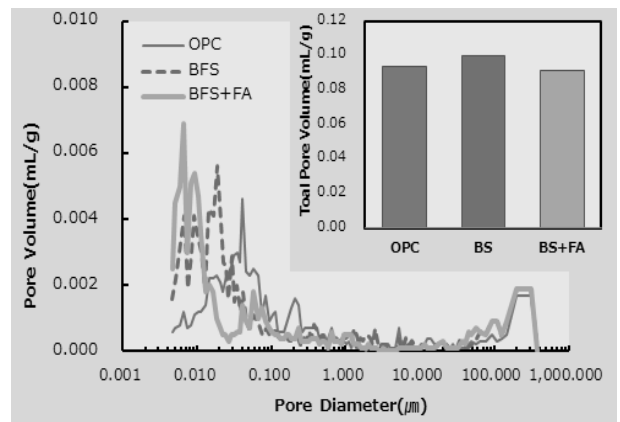


Fig. 7. Pore distribution according to the type of mortar

일반적으로 콘크리트의 동결융해 저항성은 공기량, 공극분포, 강도 등이 영향을 많이 받는다. 이 연구에서 OPC는 AE제를 사용하여 공기량 4.5% 정도를 연행하였으나, 지오폐리머 모르타르는 AE제를 사용하지 않았다. 콘크리트가 동결이 되면, 팽창압이 발생하고 이 팽창압이 콘크리트의 인장강도를 초과하면 콘크리트가 균열 또는 파괴되는데, 이 과정에서 연행된 공극은 완충 역할을 하여 동결융해 저항성을 향상시키게 된다.<sup>22,23)</sup> 그러나 지오폐리머 모르타르는 공기량을 연행하지 않았음에도 불구하고 동결융해 저항성이 우수한 것으로 나타났다.

Fig. 7은 모르타르 종류에 따른 공극분포를 측정된 결과이다. 모르타르 종류에 따라 총 공극량은 거의 차이가 없으나, 공극분포는 많은 차이가 있는 것으로 나타났다. OPC는 0.05 $\mu\text{m}$  부근의 공극에서 피크점이 보이고 있으나, 지오폐리머 모르타르는 그 보다 작은 쪽으로 이동하여 BFS는 0.02 $\mu\text{m}$  부근의 공극과 0.005 $\mu\text{m}$  부근의

공극에서 피크점이 보이고, BFS+FA는 0.005 $\mu\text{m}$  부근의 공극에서 피크점이 보이고 있다. 여기서 0.05 $\mu\text{m}$  부근의 공극은 모세관 공극 (capillary pore)에 해당되며, 이런 공극이 많을수록 강도와 내구성 이 저하된다(Metha 1986; 鎌田英治 1991). 따라서 본 연구에서 OPC의 강도와 동결융해 저항성이 지오폐리머 모르타르에 비해 저하되는 이유를 설명할 수 있다. 그리고 0.005 $\mu\text{m}$  부근의 공극은 겔 공극 또는 C-S-H 층간의 결정내 공극으로서 이런 공극이 많을 수록 강도와 내구성 향상(Metha 1986)이 되며, 마찬가지로 지오폐 리머 모르타르가 강도와 동결융해 저항성이 향상되는 이유를 설명 할 수 있다.

그리고 50~200 $\mu\text{m}$  부근의 공극은 AE제 사용에 의한 연행공기 (entrained air)에 해당(Metha 1986; 鎌田英治 1991)하며, 앞에서 설명한 바와 같이 동결융해 저항성과 밀접한 관계가 있다. 지오폐 리머 모르타르는 공기량을 연행하지 않았는데, 이에 해당하는 공 극이 OPC보다 많이 생성되고 있다. 이것은 중합반응 시 가수분해 에 의해 미세한 공극이 발생하는데, 이 때 일부 이 공극이 생성되는 것으로 추정된다(Koh et al. 2011). 따라서 이런 공극에 의해 지오폐 리머 모르타르의 동결융해 저항성 우수한 이유 중 하나라고 판 단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 시멘트를 전혀 사용하지 않은 지오폐리머 콘크 리트를 개발할 목적으로 시멘트 대신에 결합재로 고로슬래그 미분 말 또는 고로슬래그 미분말과 플라이애시를 혼합 사용한 지오폐리 머 모르타르의 강도발현과 탄산화 및 동결융해 저항성에 대해 검 토하였다. 그 결과, 지오폐리머 모르타르는 일반 시멘트 모르타르 에 비해 강도발현, 동결융해 저항성 측면에서 우수한 것으로 나타 났다. 특히 고로슬래그 미분말과 플라이애시를 50%씩 혼합 사용 한 경우에는 압축강도 60MPa 이상 달성이 가능하고, 일반 시멘트 모르타르에 비하여 동결융해 저항성은 20% 정도 향상되는 것으로 나타났다. 그러나 탄산화 진행속도는 일반 시멘트 모르타르에 비 해 2.2~3.5배 촉진되는 것으로 나타났으며, 이에 대한 대책이 필 요할 것으로 분석되었다. 향후 수밀성, 염해 저항성, 황산염, 화학 적 저항성 그리고 철근부식 등에 대해서도 상세히 검토할 예정 이다.

#### 감사의 글

본 연구는 “HVCCPs 활용 그린 건설재료 및 실용화 기술”(과제 번호: 2011T100200271)의 일환으로 한국에너지기술평가원 전력 산업융합원천기술개발사업의 재정적 지원을 받아 연구되었으며 이에 감사드립니다.

#### References

Bakharev, T., Sanjayan, J.G., and Cheng, Y.B. (2001). “Resistance of alkali-activated slag concrete to carbonation,” *Cement and Concrete Research*, **31**, 1277–1283.

Bijen, J., and Waltje, H. (1989). “Alkali activated slag-fly ash cement, Fly ash, Silica fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete,” *Proc. 3rd Int. Conf. Trondheim*, SP114–76, 1566–1578.

Byfors, K., Klingstedt, G., Lehtonen, V., Pyy, H., and Romben, L. (1989). “Durability of concrete made with alkali- activated slag,” *Proceedings 3rd CANMET/ACI Inter. Conf.*, ACI SP-114, 1429–1466.

Collins, F.G., and Sanjayan, J.G. (2000). “Effect of pore size distribution on drying shrinkage if alkali-activated slag concrete,” *Cement and Concrete Research*, **30(9)**, 1401–1406.

Davidovits, J. (1989). “Geopolymers and geopolymeric materials,” *Thermal Analysis and Calorimetry*, **35(2)**, 429–441.

Fernandez-Jimenez, A., Palomob, J.G., and Puertas, F. (1999). “Alkali-activated slag mortars: mechanical strength behaviour,” *Cement and Concrete Research*, **29**, 1313–1321.

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.

Kang, H.J., Ryu, G.S., Koh, K.T., kang, S.T., Park, J.J., Kim, S.W., and Lee, J.H. (2009). “Effect of alkaline activator and curing condition on the compressive strength of cementless fly ash based alkali-activated mortar,” *Journal of Korea Institute of Resources Recycling*, **18(2)**, 39–50 [in Korean].

Koh, K.T., Ryu, G.S., and Lee, J.H. (2010). “Properties of the flowability and strength of Cementless Alkali-Activated Mortar Using the Mixed Fly Ash and Ground Granulated Blast-Furnace Slag,” *Journal of Korea Recycled Construction Resources Institute*, **5(4)**, 114–121 [in Korean].

- Koh, K.T., Ryu, G.S., Lee, J.H., Kang, H.J., and Jeon, Y.S. (2011). "Flowability and compressive strength of cementless alkali-activated mortar using blast furnace slag," *Journal of Korea Recycled Construction Resources Institute*, **6(1)**, 63–71. [in Korea]
- Koh, K.T., Ryu, G.S., Lee, J.H., and kang, H.J. (2011). "Evaluation on the shrinkage and durability of cementless alkali-activated mortar," *Journal of Korea Institute of Resources Recycling*, **20(3)**, 40–47 [in Korean].
- Metha, P.K. (1986). "Concrete, Structures, Properties, and Materials," Prentice-Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics.
- Nevill, A.M. (1995). "Properties of Concrete," Fourth and Final Edition, Longman.
- Palacios, M., and Puertas, F. (2007). "Effect of shrinkage-reducing admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars and pastes," *Cement and Concrete Research*, **37**, 691–702.
- Palomo, A., Grutzeck, M.W., and Blanco, M.T. (1999). "Alkali-activated fly ashes a cement for the future," *Cement and Concrete Research*, **29**, 1323–1329.
- Powers, T.C. (1945). "A Working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete," *Proc. of ACI*, 41
- Puertas, F., Palacios, M., and Vazquez, T. (2006). "Carbonation process of alkali-activated mortars," *J Mater SCI* **41**, 3071–3082.
- Puertas, F., and Fernandez-Jimenez, A. (2003). "Mineralogical and microstructural characterisation of alkali-activated fly ash/slag pastes," *Cement and Concrete Composites*, **25(3)**, 287–292.
- Puertas, F., Martínez-Ramírez, S., Alonso, S., and Vázquez, T. (2000). "Alkali-activated fly ash/slag cement: strength behaviour and hydration products," *Cement and Concrete Research*, **30**, 1625–1632.
- Shi, C., Krivenko, P.V., and Roy, D. (2006). "Alkali-activated cements and concretes," Taylor & Francis.
- Smith, M.A., and Osbrone, G.J. (1977). "Slag/fly ash cement," *J. World Cement Technol*, **6**, 223–233.
- Wang, S.D., Pu, X.C., Scrivener, K.L., and Pratt, P.L. (1995). "Alkali-activated slag cement and concrete: A review of properties and problems," *Advances in Cement Research*, **7(27)**, 93–102.
- Yang, K.H., and Song, J.G., (2007). "The properties and application of alkali-activated concrete with no cement," *Journal of the Korea Concrete Institute*, **19(2)**, 42–48 [in Korean].
- Zhao, F.Q., Ni, W., Wang, H.J., and Liu, H.J. (2007). "Activated fly ash/slag blended cement," *Resources Conservation and Recycling*, **52**, 303–313.
- 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," セメント協会.

### 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 혼합 사용한 지오폴리머 모르타르의 강도발현 및 내구성

본 논문에서는 시멘트를 전혀 사용하지 않은 지오폴리머 콘크리트를 개발할 목적으로 시멘트 대신에 결합재로 고로슬래그 미분말 또는 고로슬래그 미분말과 플라이애시를 혼합 사용한 지오폴리머 모르타르의 강도발현과 탄산화 및 동결융해 저항성에 대해 검토하였다. 그리고 비교를 위해 보통포틀랜드 시멘트를 사용한 일반 모르타르에 대해서도 동일한 실험을 수행하였다. 그 결과, 지오폴리머 모르타르는 일반 시멘트 모르타르에 비해 강도발현, 동결융해 저항성 측면에서 우수한 것으로 나타났다. 특히 고로슬래그와 플라이애시를 혼합사용한 지오폴리머 모르타르는 압축강도 60MPa 이상 달성이 가능하고, 일반 시멘트 모르타르에 비하여 동결융해 저항성은 20% 정도 향상되나, 탄산화 속도는 2.2~3.5배 촉진되는 것으로 나타났다.