

# 순환유동층 보일러애시를 활용한 폴리머 보수 모르타르의 역학적 특성에 대한 연구

강용학<sup>1</sup>, 임귀환<sup>2</sup>, 신동철<sup>3</sup>, 최영철<sup>4\*</sup>

## A Study on the Mechanical Properties of Polymer Repair-Mortars with CFBC Ash

Yong Hak Kang<sup>1</sup>, Gwi Hwan Lim<sup>2</sup>, Dong Cheol Shin<sup>3</sup>, Young Cheol Choi<sup>4\*</sup>

**Abstract:** The amount of generated Circulating Fluidized Bed Combustion ash (CFBC ash) is annually increasing, but most CFBC ash has been landfilled and discarded due to the limited utilization. The major chemical compositions of CFBC ash are SiO<sub>2</sub>, CaO and CaSO<sub>4</sub>, which could form hydration products by reacting with water as self-cementing property such as cement. The purpose of the this study is to derive the optimal mix proportions to improve polymer-modified mortar with the use of CFBC ash which has the self-cementing property. In order to develop polymer-modified mortar, three mix proportions were determined, and fundamental properties for the mixtures were obtained. As a result, the optimal mixture containing 10 percent of silica fume, 1.0 percent of polymer and 3.5 percent of expansive additives were proposed in this study.

**Keywords:** CFBC ash, Self-cementing property, Polymer-modified mortar for maintenance, Optimal mixture

### 1. 서 론

화력발전소에는 미분탄 연소방식과 순환유동층 연소방식이 있으며, 현재 미분탄 연소방식에 주로 사용되는 고품위석탄인 유연탄의 공급이 어려워지면서 유연탄보다 아래 단계인 아역청탄의 활용에 적합한 순환유동층 연소방식의 발전소가 증가하는 추세이다 (Kim and Mun, 2017).

순환유동층 보일러 방식의 발전소는 연소의 온도가 800~900°C로 낮게 유지되는 특성 때문에 질소산화물(NO<sub>x</sub>)의 배출 절감시킬 수 있으며, 탈황을 위해 석회석을 연소 중에 첨가시키므로 별도의 탈질설비가 필요 없는 장점이 있지만, 아역청탄의 연소 후 매년 발생하는 50만 톤 이상의 산업부산물인 콘크리트에 국한 된 규정으로 인해 활용성이 제한되어 대부분 매립·폐기되는 실정이다 (Mun and Kwon, 2014).

순환유동층 연소 방식은 노 내 탈황을 하기 위해 석회석을 첨가하면 이에 탈황반응에 참여하지 못한 석회 성분이 비산재 내에 잔재하여 CaO 화합물 형태로 존재하게 된다. 따라서

유동층 보일러 애시의 화학조성 주성분은 SiO<sub>2</sub>, free-CaO나 CaSO<sub>4</sub>에 의해 생성된 석고를 포함하고 있으며, 다량의 Free-CaO 성분은 물과 수화반응하여 Ca(OH)<sub>2</sub>를 생성하고, Ca<sup>+</sup>이온이 SiO<sub>2</sub>이나 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>과 반응하여 2차 수화생성물인 C-S-H와 C-A-H를 생성하기 때문에 유동층 보일러 애시는 시멘트와 같이 자기수경성의 성질을 가지고 있다 (Li et al, 2012; Sheng et al, 2012; Chindaprasirt and Rattanasak, 2010).

최근 이와 같은 자기수경성에 초점을 맞추어 순환유동층 보일러애시를 혼화재로 활용한 연구와 시멘트 대체재 및 비소성 시멘트 개발이 활발하게 진행 중에 있다 (Lee and Kim, 2017; Kang and Jung, 2017). 그러나, 순환유동층 보일러애시는 다량의 free-CaO 및 SO<sub>3</sub> 성분을 가지고 있어 적절한 전처리 실시하지 않고 사용할 경우, 콘크리트의 이상 응결현상과 팽창, 균열 등의 문제가 발생하여 콘크리트 물성을 크게 저하시키므로, 순환유동층 보일러애시의 활용에 대한 보다 많은 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 순환유동층 보일러애시(CFBC ash)를 결합재로 활용한 폴리머 혼입 보수 모르타르의 최적 배합을 도출하기 위해 기초물성 및 역학적 특성 분석을 수행하였다.

### 2. 실험 계획 및 방법

#### 2.1 실험계획

본 연구에서는 보수 모르타르의 최적 배합을 도출하기 위

<sup>1</sup>정회원, 한국건설생활환경시험연구원 선임연구원

<sup>2</sup>정회원, 한국건설생활환경시험연구원 연구원

<sup>3</sup>정회원, 가천대학교 건축공학과 교수

<sup>4</sup>정회원, 가천대학교 토목환경공학과 부교수, 교신저자

\*Corresponding author: zerofo@gachon.ac.kr

Department of Civil and Environmental Engineering, Gachon University, Gyeonggi-do 13120, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2018년 10월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

**Table 1** Mix proportions

Sample	Mix proportions (wt%)							
	Binder			Water	Sand	Polymer	Superplasticizer	Expansion agent
	CFBC ash	SF	GGBS					
Case 1	AS0G0	70	0	0	21			
	AS10G0	63	7	0				
	AS7G3	63	4.9	2.1		30	-	0.4
	AS5G5	63	3.5	3.5	22			
	AS3G7	63	2.1	4.9				
	AS0G10	63	0	7				
Case 2	AS10G0						0	
	AP0.2						0.5	
	AP1.0	63	7	-	22	30	1.0	0.4
	AP1.5						1.5	
	AP2.0						2.0	
Case 3	AP1.0							0
	AE1.5							1.5
	AE2.5	63	7	-	22	30	1.0	0.4
	AE3.5							3.5
	AE4.5							4.5

**Table 2** Physical properties and chemical composition of CFBC ash

Average particle size ( $\mu\text{m}$ )	Density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Blaine ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	Chemical composition(%)									
			SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	K <sub>2</sub> O	CaO	free-CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	LOI
8.60	2.93	5,057	27.2	1.23	4.55	0.76	35.3	19.3	11.0	11.1	5.57	1.99

**Table 3** Average particle size and chemical composition of SF and GGBS

	Average particle size ( $\mu\text{m}$ )	Chemical composition(%)								
		SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	LOI
SF	1.06	95.6	0.21	0.40	0.77	0.25	0.10	0.75	0.30	1.52
GGBS	10.69	36.7	0.20	2.75	0.51	41.0	0.43	13.5	3.52	0.25

**Table 4** Physical properties of agents

	Type	Color	Density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Main ingredient
Superplasticizer	Powder	White	0.8	Polycarboxylate
Expansion agent	Powder	Grey	1.12	CSA

**Table 5** Physical properties of polymer

Type	Appearance	Ash content (%)	Apparent density ( $\text{g}/\text{L}$ )	pH (-)
Ethylene-vinyl acetate	White powder	10.5 ± 1.5	510 ± 50	7.0 ~ 8.5

하여 Table 1에서와 같이 3개의 시리즈의 실험을 설정하고 순차적으로 검토하였다.

실험 순서는 실리카흙(SF)과 고로슬래그 미분말(GGBS)의 혼입율을 변수로 한 실험(Case 1) 과 폴리머의 혼입율을 변수로 한 실험(Case 2)에 대하여 압축강도, 휨강도, 부착강도 특성을 확인한 후 각각의 Case로부터 적정 배합을 선정하고, 팽창재의 혼입율을 변수로 한 실험(Case 3)을 통하여 건조수축 변화 및 내염해 특성을 확인한 후 최적 배합을 도출하였다. 각 Case 별 배합표는 Table 1에 나타내었다.

## 2.2 사용 재료

보수 모르타르의 제반 물성을 검토하기 위해 본 연구에서 사용한 각 재료의 물리·화학적 성질을 Table 2~5에 나타내었다. 시멘트 대체재로 활용된 순환유동층 보일러애시는 여수 H 발전소에서 발생한 것으로, 순환유동층 보일러애시를 전처리함에 따라 페이스트의 강도가 크게 증가한다는 기존의 연구 결과(Kang, 2018)를 참고하여 전처리를 실시하여 사용하였다. 잔골재는 인천 웅진군에서 채취된 세척사의 5호사와 6호사를 혼합하여 이용하였으며, 유동화제는 분말 형태의 I사의 PC계 유동화제, 폴리머는 분말 형태의 H사의 EVA계 폴리머, 팽창제는 D사의 CSA 팽창재를 이용하였다.

## 2.3 실험 방법

### 2.3.1 순환유동층 보일러애시의 전처리

순환유동층 보일러애시의 전처리는 우선 No.200체로 최대 입도가 75 $\mu$ m 가 되도록 하였으며, 분말도를 약 5,000 cm<sup>2</sup>/g까지 분쇄한 후, Pre-hydration 순으로 진행하였다. Pre-hydration을 하기 위해 유동층보일러 애시에 함유된 free-CaO 양을 계산하고 이에 반응이 가능한 H<sub>2</sub>O의 양을 몰비로 계산하여 해당량을 순환유동층 보일러애시에 골고루 분무한 후 약 1시간 동안 대기 중에 방열, 건조시켜 사용하였다.

### 2.3.2 시험체 제작

보수 모르타르 시험체를 제작하기 위하여 Table 1과 같이 사전 혼합된 원료에 대해 배합수를 첨가하여 KS L 5109에 따라 혼합을 실시하였다. 보수 모르타르의 작업성을 확보하기 위한 플로 목표 값을 195  $\pm$  5 mm로 설정하고, 이를 평가하기 위해 KS F 2476에 따라 플로 시험을 실시하였다.

시험체는 KS F 4042에 따라 40  $\times$  40  $\times$  160 mm의 각주형(휨강도, 압축강도, 길이변화 시험), 시멘트 모르타르 바탕체 위에 40  $\times$  40  $\times$  10 mm의 모양으로 결합재를 충전·성형한 판상형(부착강도 시험)으로 제작하여, 제작 후 48시간 뒤 탈형하고, 소정의 재령까지 20  $\pm$  2  $^{\circ}$ C의 온도 및 90 % 이상의 항온·항습

챔버에서 습윤 양생을 실시하였다.

### 2.3.3 압축 및 휨강도 시험

순환유동층 보일러애시를 활용한 보수 모르타르의 압축강도 및 휨강도 특성을 평가하기 위해 KS L ISO 679에 따라 재령 7, 14, 28, 91일에 압축 및 휨강도 시험을 실시하였다.

### 2.3.4 부착강도 시험

순환유동층 보일러애시를 활용한 보수 모르타르의 부착강도 특성을 평가하기 위해 KS F 4042에 따라 재령 28일에 부착강도시험을 실시하였다.

### 2.3.5 길이변화 시험

순환유동층 보일러애시를 활용한 보수 모르타르의 길이변화 특성을 평가하기 위해 KS F 2424에 따라 시험을 실시하였다. 시험체 길이 측정 방법은 콘택트 게이지 방법으로 하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 혼화재 혼입에 따른 기초물성 변화

Table 6에 Case 1에 대한 압축강도, 휨강도, 부착강도 및 플로 값을 나타내었다. Case 1의 압축강도 및 휨강도 시험 결과, 모든 배합에서 28일 기준 값인 20 MPa, 6 MPa를 만족하였다.

실리카흙과 고로슬래그 미분말을 혼입한 경우, 배합의 작업성을 확보하기 위하여 단위수량의 양을 증가시켰다. 물-바인더 비가 증가되었음에도 전체적으로 압축강도 값이 커지는 결과를 나타내었다. 또한, 압축강도에 대한 영향은 고로슬래그 미분말보다 실리카흙이 컸으며, 이는 높은 분말도를 가진 실리카흙의 필러 효과와 포졸란 반응에 의한 것으로 사료된다.

Case 1의 경우 부착강도는 모든 배합이 28일 기준 값인 1.0 MPa를 만족하지 못하는 것을 확인하였다. 작업성과 관련된 플로 값은 모든 배합에서 목표 값인 195  $\pm$  5mm를 만족하는 것을 확인하였다. 또한, 고로슬래그 미분말 보다 실리카흙의 혼입양이 많을수록 작업성은 좋아짐을 확인하였으며, 이는 실리카흙의 입자형태가 구형임에 따른 것이라 사료된다. 이와 같이 Case 1의 모든 배합에 대한 기초 물성을 검토한 결과, 압축강도 및 작업성에서 우수한 결과를 보인 AS10G0 배합을 Case 2의 기본 배합으로 선정하였다.

### 3.2 폴리머 혼입에 따른 기초물성 변화

Table 6에 폴리머를 혼입한 Case 2 배합에 대한 압축강도, 휨강도, 부착강도 및 플로 값을 나타내었다.

**Table 6** Mechanical properties of Case 1 and Case 2

Type		Compressive strength(MPa)				Flexural strength(MPa)				Bond strength(MPa)	Flow(mm)
		7days	14days	28days	91days	7days	14days	28days	91days	28days	
Case 1	AS0G0	20.3	25.4	28.6	33.5	5.0	6.5	8.5	9.4	0.5	200
	AS10G0	23.7	28.5	33.9	38.6	5.2	6.5	8.5	9.6	0.8	200
	AS7G3	22.5	27.4	32.5	38.4	5.2	6.7	8.3	9.5	0.8	200
	AS5G5	21.9	26.8	31.7	37.3	5.1	6.4	8.4	9.4	0.9	195
	AS3G7	21.6	26.1	30.2	36.9	5.2	6.2	8.5	9.4	0.8	195
	AS0G10	20.5	25.1	29.3	35.5	5.1	6.3	8.4	9.2	0.8	190
Case 2	AS10G0	23.7	28.5	33.9	38.6	5.2	6.4	8.4	9.6	0.8	200
	AP0.2	23.1	28.6	33.4	38.2	5.2	6.1	7.8	9.1	1.2	200
	AP1.0	22.1	26.9	32.6	37.9	5.4	6.0	7.6	9.0	1.4	195
	AP1.5	21.5	26.3	30.5	35.7	5.4	6.3	7.9	9.0	1.4	190
	AP2.0	21.2	25.8	30.4	35.8	5.2	5.9	7.4	9.1	1.5	190

압축강도 및 휨강도 시험 결과, 모든 배합에서 28일 기준 값인 20 MPa, 6 MPa를 만족하는 것을 확인하였다. 또한, 폴리머가 혼입됨에 따라 압축강도가 저하하는 경향을 보였다. 이는 폴리머 복합체가 형성되는 과정에서 폴리머 입자들이 결합재 입자와 배합수의 접근을 방해하면서 수화를 지연시키고 팽창을 유도하기 때문이라 사료된다.

부착강도의 경우, 폴리머를 혼입하지 않은 AS10G0 배합을 제외한 모든 배합이 28일 기준 값인 1.0 MPa를 만족하였으며, 폴리머를 1.0 % 이상 혼입하더라도 부착강도 값의 증진은 크지 않음을 확인하였다. 작업성과 관련된 플로 값은 모든 배합에서 목표 값인 195 ± 5mm를 만족하는 것을 확인하였으며, 폴리머의 혼입율이 높아질수록 작업성이 나빠짐을 확인할 수 있었다.

이와 같이 Case 2의 모든 배합에 대한 기초 물성을 검토한 결과, 부착강도 및 작업성에서 우수한 결과를 보인 AP1.0 배합을 Case 3의 기본 배합으로 선정하였다.

### 3.3 팽창재 혼입에 따른 기초물성 변화

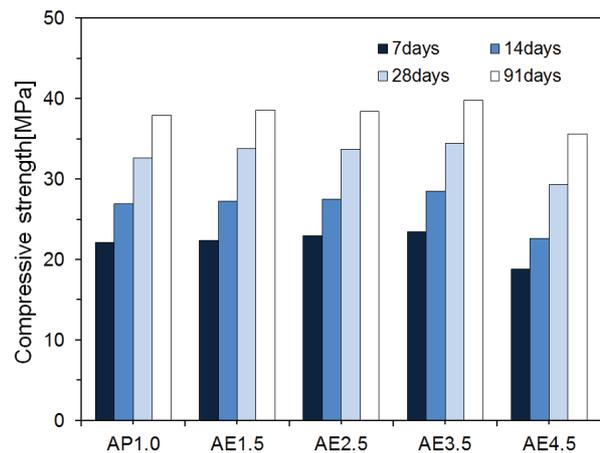
Fig. 1 ~ 4 에 Case 3 배합에 대한 압축강도, 휨강도, 부착강도 및 플로 값을 나타내었다. 압축강도, 휨강도 및 부착강도 시험 결과, 모든 배합에서 28일 기준 값인 20 MPa, 6 MPa 및 1.0 MPa를 만족하는 것을 확인하였다. 하지만, 팽창재 혼입을 4.5%를 혼입한 AE 4.5 배합의 경우 압축강도, 휨강도 및 부착강도가 다른 배합보다 상대적으로 저하하는 경향을 확인하였다. 이는 팽창재의 영향으로 시험체에 Fig. 5와 같이 미세한 균열이 발생함에 따른 것이라 판단된다.

작업성과 관련된 플로 값은 모든 배합에서 목표 값인 195 ± 5mm를 만족하였으며, 팽창재의 혼입율과의 상관 관계는 확

인할 수 없었다.

Fig. 6은 Case 3 시험체의 길이변화 시험 결과를 나타내고 있다. 건조수축에 대한 길이변화 시험 결과, 팽창재 혼입을 3.5 %에서 보수 모르타르의 28일 길이변화율이 -0.01 % 이내로 다른 배합에 비해 우수한 건조수축 성능을 나타냈으며, 팽창재 혼입을 4.5 %에서는 초기 보수 모르타르의 팽창이 많이 일어나면서 길이 방향으로 미세한 균열이 발생됨에 따라 수축이 증가하는 경향을 확인하였다.

상기의 결과를 토대로 Case 3의 모든 배합에 대한 기초 물성을 검토한 결과, 팽창재를 3.5 % 혼입한 AE3.5 배합이 압축강도, 휨강도, 부착강도에서 우수하였으며, 길이변화율 또한 낮다는 점에서 폴리머 혼입 보수 모르타르에 가장 적합한 배합으로 판단된다.



**Fig. 1** Compressive strength by mixing type

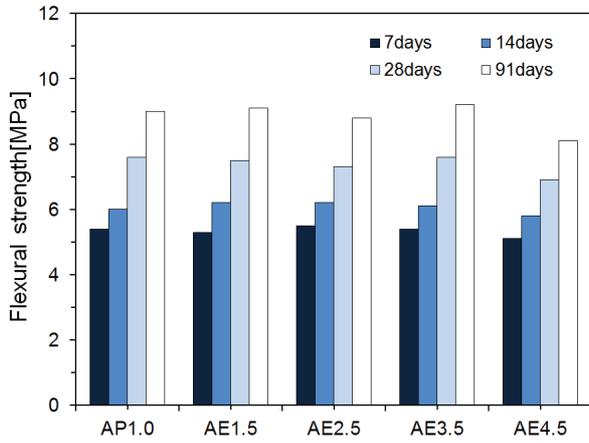


Fig. 2 Flexural strength by mixing type

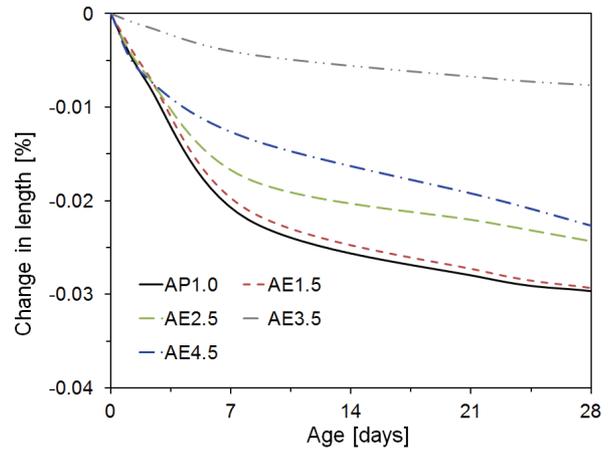


Fig. 6 Change in length of the specimens

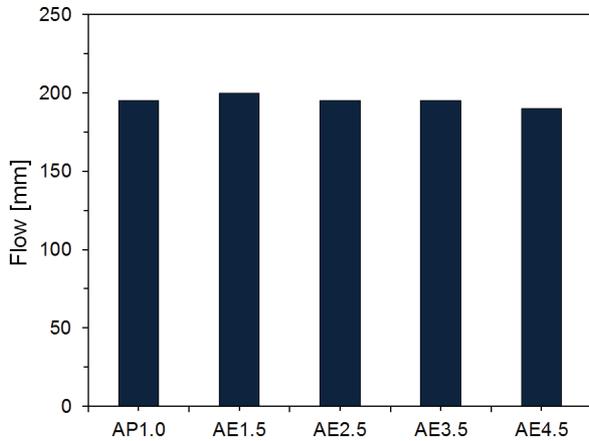


Fig. 3 Flow by mixing type

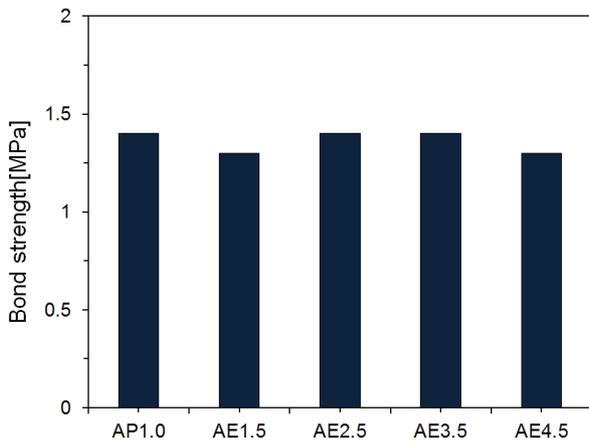


Fig. 4 Bond strength by mixing type



Fig. 5 Fine surface cracks on the specimen

#### 4. 결론

본 연구에서는 전처리를 실시한 순환유동층 보일러애시를 결합재로 활용하여 폴리머를 혼입한 보수 모르타르의 최적 배합을 얻기 위해 혼화재 혼입, 폴리머 혼입, 팽창재 혼입을 각각 변수로 한 배합을 순차적으로 설정하였다. 이후, 각각의 배합에 대해 실험을 실시하여 기초 물성을 확인한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 순환유동층 보일러애시를 결합재로 100% 활용한 시험체보다 실리카흙 및 고로슬래그 미분말을 혼입한 시험체의 압축강도, 휨강도 및 작업성이 상대적으로 우수하였다. 특히, 실리카흙의 혼입율이 높은 배합일수록 실리카흙의 높은 비표면적에 의한 필러효과와 포졸란 반응으로 압축강도 값이 높아지는 경향이 나타났으며, 구형의 입자의 영향으로 다른 배합과 비교하여 상대적으로 플로 값이 증가됨을 확인하였다.
- 2) 폴리머를 혼입한 배합의 경우, 폴리머 혼입율이 증가할수록 압축강도 및 휨강도가 저하하는 경향이 나타났으나, 부착강도 값은 증가하는 경향이 나타났다. 특히 폴리머를 1.0% 이상 혼입하더라도 부착강도 값의 증진은 크지 않음을 확인하였다. 또한 폴리머의 혼입율이 높아질수록 플로 값은 저하하는 경향이 나타났다.
- 3) 팽창재를 혼입한 배합의 경우, 팽창재 혼입율 3.5%까지 혼입율 증가에 따라 압축강도는 약간 증가하였으나, 휨강도, 부착강도 및 플로 값에 대한 뚜렷한 경향은 확인할 수 없었으며, 건조수축량은 점차 감소하는 경향을 확인하였다.
- 4) 팽창재를 4.5% 혼입한 배합에서는 팽창재의 영향으로 시험체에 미세한 균열이 발생함에 따라 휨강도 및 부착강도가 다른 배합보다 상대적으로 저하하는 경향이 나타났다.

따라서, 본 연구에서는 팽창제로 인하여 시험체에 미세 균열이 발생할 경우, 폴리머 혼입 보수 모르타르의 기초물성에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

4) 팽창제 혼입 배합에 대한 건조수축에 대한 길이변화를 검토한 결과, 팽창제 혼입을 3.5%에서 보수 모르타르의 28일 길이변화율이 -0.01% 이내로 우수한 건조수축 성능을 확인하였으나, 4.5%에서는 팽창에 따른 미세한 균열이 길이 방향으로 발생함으로써 수축이 증가하는 경향이 나타났다.

이와 같은 결과로부터, 폴리머 보수 모르타르 제조 시 시멘트 대체제로써 순환유동층 보일러애시의 활용은 충분히 가능할 것으로 예상되며, 이후, 본 연구에서 도출된 폴리머 혼입 보수 모르타르 최적 배합에 대한 중성화, 염화물 이온 침투 저항성, 동결 융해 저항성, 내알칼리성 등 내구성 항목과 관련된 평가를 실시할 계획이다.

## 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20151120100270)

## References

Chindaprasirt, P., Rattanasak, U. (2010), Utilization of blended fluidized bed combustion (FBC) ash and pulverized coal combustion (PCC) fly ash in geopolymer, *Waste Manag.*, 30(4), 667-672.

Kang, Y. H. and Jung, S. H. (2017), Material Properties Circulating Fluidized Bed Combustion Fly Ash and Utilization of Non-sintered Cement Field, *Magazine of RCR*, 12(2), 26-32. (in Korean)

Kang, Y. H., Choi, Y. C. (2018), Development of non-sintered zero-OPC binders using circulating fluidized bed combustion ash, *Constr. Build. Mater.*, 178, 562-573.

Kim, H. J. and Mun, K. J. (2017), Utilization of Circulating Fluidized Bed Combustion (CFBC) Fly Ash for Dredged Soils Construction Applications, *Magazine of RCR*, 12(2), 40-49. (in Korean)

Lee, S. H. and Kim, G. S. (2017) Self-cementitious cementing hydration of circulating fluidized bed combustion fly ash, *J. Korean Ceram. Soc.*, 54 (2), 128-136.

Li, X. G., Chen, Q. B., Huang, K. Z., Ma B. G., Wu B. (2012), Cementitious properties and hydration mechanism of circulating fluidized bed combustion (CFBC) desulfurization ashes, *Constr. Build. Mater.*, 36, 182-187.

Mun, K. J. and Kwon, S. J. (2014), Construction Materials Utilizing Byproduct from Circulating Fluidized Bed Boiler, *Magazine of RCR*, 9(3), 8-12. (in Korean)

Sheng, G., Li, Q., Zhai, J. (2012), Investigation on the hydration of CFBC fly ash, *Fuel*, 98, 61-66.

KS F 2424 (2015), Testing method for length change of mortar and concrete, Korean agency for Technology and Standard.

KS F 2476 (2017), Test method for polymer-modified mortar, Korean agency for Technology and Standard.

KS F 4042 (2012), Polymer modified cement mortar for maintenance in concrete structure, Korean agency for Technology and Standard.

KS L 5109 (2017), Testing method for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency, Korean agency for Technology and Standard.

KS L ISO 679 (2006), Methods of testing cements – Determination of strength, Korean agency for Technology and Standard.

Received : 08/03/2018

Revised : 08/20/2018

Accepted : 08/31/2018

---

**요 지** : 순환유동층 보일러애시(CFBC ash)는 매년 발생량이 증가하고 있으며, 대부분 활용성이 제한되어 매립, 폐기되고 있는 실정이다. 순환유동층 보일러애시의 화학조성 주성분은 SiO<sub>2</sub>, CaO, CaSO<sub>4</sub>로써, 물과 반응하여 시멘트와 유사한 자기수경성을 가지고 있다. 본 연구에서는 순환유동층 보일러애시의 자기수경성을 활용하여, 폴리머 혼입 보수 모르타르를 개발하기 위한 최적배합을 도출하고자 하였다. 폴리머 혼입 보수 모르타르 개발을 위해 순차적으로 3 Case의 배합을 설정하고 기초 물성을 확인하였다. 그 결과, 순환유동층 보일러애시에 실리카흙 10% 혼입과 폴리머 1.0% 혼입, 팽창제 3.5% 혼입에서 최적의 결과를 얻을 수 있었다.

**핵심용어** : 순환유동층 보일러애시, 자기수경성, 폴리머 혼입 보수 모르타르, 최적 배합

---