

# 진동분쇄를 사용한 개질 플라이애시 콘크리트의 유동성 및 압축강도 발현 평가

## Evaluation on Workability and Compressive Strength Development of Concrete Using Modified Fly-Ash by Vibration Grinding

안태호<sup>1</sup> · 양근혁<sup>2\*</sup> · 전용수<sup>3</sup>Tae-Ho Ahn<sup>1</sup> · Keun-Hyeok Yang<sup>2\*</sup> · Young-Su Jeon<sup>3</sup>

(Received February 10, 2021 / Revised March 22, 2021 / Accepted March 26, 2021)

The objective of this study is to evaluate the practical application potential and limitations of the modified fly ash(MFA) by vibration grinding as a partial replacement of ordinary portland cement(OPC). The test parameters investigated were the replacement level of fly ash(FA) and FA for OPC, varying from 10% to 40%, and curing temperatures of 5, 20, and 40°C. The various characteristics(including slump, air content, bleeding, setting time, compressive strength development, and hydration products) of MFA concrete were measured and then compared with those of the concrete with conventional FA. Test results showed that the MFA prefers to FA in reducing the bleeding of fresh concrete and enhancing the compressive strength gain at an early age. The compressive strength ratios between MFA and FA concrete specimens at an age of 1 day were 135%, 146%, and 111% at the curing temperatures of 5, 20, and 40°C, respectively. The corresponding ratios at an age of 28 days were approximately 110%, regardless of the curing temperatures. The X-ray diffraction analysis also revealed less calcium hydroxide products in MFA pastes than in FA pastes.

**키워드 :** 개질 플라이애시, 유동성, 압축강도, 수화생성물

**Keywords :** Modified fly-ash, Workability, Compressive strength, Hydration products

## 1. 서론

석탄 화력발전소의 부산물로서 발생하는 플라이애시의 재활용은 에너지절감 및 산업부산물의 재활용 등 많은 이점이 있다. 또한 플라이애시는 콘크리트에서 시멘트 치환을 통한 온실가스 방출 저감 효과를 기대할 수 있기 때문에 지속가능한 건설핵심요소 중의 하나로 부각되고 있다(Ryu 2012). 그러나 국내 콘크리트 산업에서 플라이애시는 낮은 초기 강도발현 및 품질의 불균질성 문제로 인해 수급자의 부정적 인식으로 활용율이 낮은 실정이다(Cho 2011).

플라이애시는 콘크리트용 혼화재로 사용하면 콘크리트의 시공성이 개선되고, 단위수량을 줄일 수 있다. 이로 인해 플라이애시를 혼입한 콘크리트는 수화열의 발생이 낮아지고, 장기강도가 증진되

며, 수밀성과 화학저항성이 향상되는 등의 장점이 있다(Oh 2011). 하지만, 플라이애시를 혼입한 콘크리트는 플라이애시의 품질상태에 따라 콘크리트 특성에 미치는 영향이 크고 응결지연으로 인한 콘크리트 조기강도의 저하가 심각하다. 이러한 단점에 대한 보완책은 플라이애시의 분말도를 높여 시멘트 성분 중의 알카리성분과의 반응성을 높이는 것이다(Lee et al. 2009; Han et al. 2015). 플라이애시의 포졸란반응은 시멘트 수화 반응시 수산화칼슘[Ca(OH)<sub>2</sub>]이 일정량 생성되고 콘크리트 내부의 pH 환경을 강알칼리(pH 13.80 이상)로 변화시킨다(Nguyen et al. 2020; Sahoo et al. 2013). 그리고 유리질 피막 제거는 강알칼리로 인해 제거되며 재령 3일 이후 포졸란 반응을 빠르게 유도하므로 플라이애시의 반응성을 높일 수 있다. 따라서 최근에는 플라이애시의 유리질 피막을 밀링과정을 거쳐 제거하고 분말도를 높이는 물리적 개질기술이 제시되고 있다

\* Corresponding author E-mail: yangkh@kgu.ac.kr

<sup>1</sup>경기대학교 일반대학원 건축공학과 박사과정 (Department of Architectural Engineering, Graduate School, Kyonggi University, Suwon, 16227, Korea)

<sup>2</sup>경기대학교 건축공학과 교수 (Department of Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon, 16227, Korea)

<sup>3</sup>삼표피앤씨(주) 상무 (Sampyo P&C, Jongno-Gu Susong-Dong, Seoul, 03152, Korea)

Copyright © 2021 by Korean Recycled Construction Resources Institute

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

(Krishnaraj and Ravichandran 2019; Rajak et al. 2017). 하지만 플라이애시의 개질에 따른 품질 및 시멘트와의 반응성은 밀링방법 및 밀링시간 등에 의해 중요한 영향을 받으나 이에 대한 실험자료는 매우 미흡하다. 또한 개질 플라이애시를 혼입한 콘크리트의 응결특성 및 조기강도 발현에 대한 연구는 현재 초기단계로서 실험 결과들에 대한 검증이 필요하다.

본 연구의 목적은 플라이애시의 물리적 입도개선을 통하여 포졸란 반응을 향상시킨 개질 플라이애시의 실용성 평가이다. 이를 위해 개질 플라이애시를 혼입한 콘크리트는 유동성, 블리딩, 응결 특성, 압축강도 발현 및 수화생성물 등을 평가하였으며, 콘크리트의 압축강도 발현은 양생온도 5°C, 20°C 및 40°C에서 평가하였다. 그리고 측정된 개질 플라이애시 콘크리트의 물리적 특성은 동일 조건의 일반 플라이애시 콘크리트와 비교하였다.

## 2. 실험개요

### 2.1 사용재료

#### 2.1.1 기초특성

시멘트는 밀도 3.15g/cm<sup>3</sup>, 분말도 3,560cm<sup>2</sup>/g의 보통 포틀랜드시멘트(Ordinary portland cement, OPC)를 사용하였으며, 플라이애시(Fly ash, FA)는 밀도 2.22g/cm<sup>3</sup>, 분말도 3,410cm<sup>2</sup>/g 및 개질 플라이애시(Modified fly ash, MFA)는 밀도 2.23g/cm<sup>3</sup>, 분말도 4,166cm<sup>2</sup>/g를 사용하였다. FA의 비표면적 분말도는 3,410cm<sup>2</sup>/g 인데 비해 밀링과정을 거친 MFA 분말도는 4,166cm<sup>2</sup>/g로 약 122% 높았다(Table 1). OPC, FA 및 MFA의 화학성분은 Table 2에 나타내었다. OPC의 화학적 주성분은 석회(CaO, 61%), 실리카

Table 1. Physical properties of cementitious materials

Type	OPC	FA	MFA
L.O.I.	1.20	3.20	3.20
Density(g/cm <sup>3</sup> )	3.15	2.22	2.23
Specific surface area(cm <sup>2</sup> /g)	3,560	3,410	4,166

Table 2. Chemical compositions of cementitious materials

Type	OPC	FA	MFA
SiO <sub>2</sub> (%)	21.60	58.20	58.20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	6.00	26.28	26.28
FeO <sub>3</sub> (%)	3.10	7.43	7.43
CaO(%)	61.40	6.51	6.51
MgO(%)	3.40	1.10	1.10
SO <sub>3</sub> (%)	2.50	0.30	0.30

(SiO<sub>2</sub>, 21%), 알루미나(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 6%)이었으며, FA의 화학적 주성분은 실리카(SiO<sub>2</sub>, 58%), 알루미나(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 26%), 산화철(FeO<sub>3</sub>, 7%), 생석회(CaO, 6%)이었다. MFA의 화학적 조성은 일반 FA와 동일하였다.

#### 2.1.2 개질 플라이애시

개질 플라이애시는 진동밀을 사용하여 3, 5, 10 및 15분으로 분쇄하였다. 분쇄된 플라이애시의 분말도는 비례적으로 증가하여 3분, 5분, 10분 및 15분 경과 시 각각 3,566cm<sup>2</sup>/g, 3,778cm<sup>2</sup>/g, 4,166cm<sup>2</sup>/g 및 4,526cm<sup>2</sup>/g으로 1분당 분쇄효율은 74.4cm<sup>2</sup>/g으로 나타내었다. Fig. 1에는 Mastersizer 2000으로 분석된 진동밀의 분쇄시간에 따른 입도 분포 곡선을 나타내었다. 10분이상 분쇄 시 100µm이상의 미분말이 소멸되어 포졸란 반응에 기여하지 못하는 큰 입자는 모두 제거된 것으로 판단된다. Fig. 2에는 FA 및 MFA의 입도 분포 곡선을 나타내었다. MFA의 평균 입경은 11.06µm로서 FA의 평균 입경 14.89µm에 비해 약 26% 감소하였다. FA 및 MFA의 입형은 Fig. 3에 나타내었다. MFA는 FA의 유리질 피막의 입자들을 파쇄하여 포졸란 반응성을 향상시키며, 이러한 형상 변화는 콘크리트의 작업에 불리한 영향을 미칠 것으로 판단되나 폴리카보나이트 고성능 감수제의 사용으로 이를 보완 할 수 있을 것으로 판단된다.

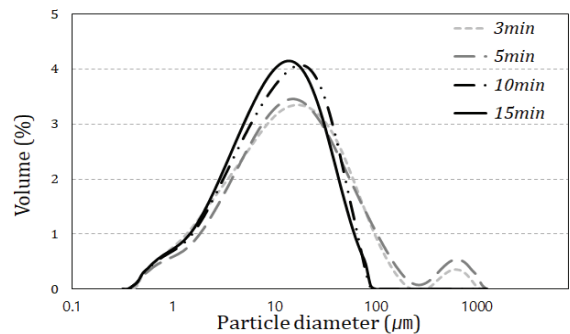


Fig. 1. Particle size distribution by Vibration Grinding Time

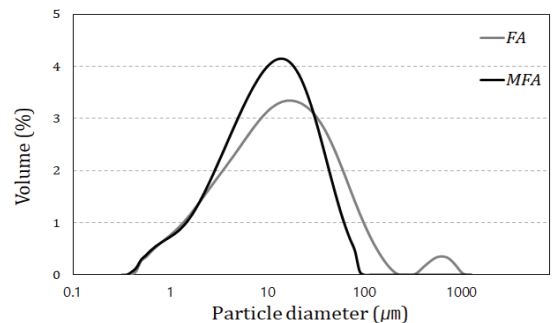
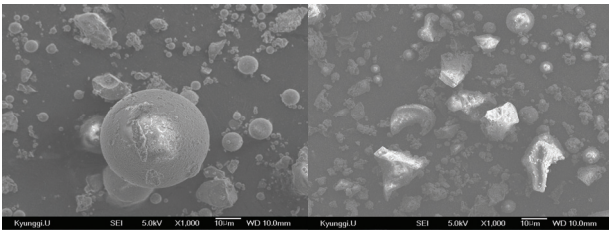


Fig. 2. Particle size distribution of FA and MFA



(a) FA (b) MFA  
**Fig. 3. Micro-structure images of FA and MFA**

**2.1.3 골재**

잔골재는 화성산 부순사(Crushed sand, CS)를 사용하였으며, 굵은골재는 최대치수( $G_{max}$ ) 25mm인 화성석산 부순골재(Gravel, G)를 사용하였다. 사용된 CS의 흡수율 및 조립률(Fineness modulus, FM)은 각각 0.95% 및 2.81이었으며, G의 흡수율 및 FM은 각각 0.62% 및 6.68이었다(Table 3).

**2.1.4 화학 혼화제**

화학 혼화제는 MFA의 압축강도, 작업성 및 공기량 조절을 위하여 S사의 폴리카르보산계 고성능 감수제(Water reducing admixture, AD) 및 공기연행제(Air entraining agent, AE)를 사용하였다. 폴리카르보산계의 기본 구조는 주쇄와 측쇄로 나누어진다. 주쇄의 카르복실 관능기가 시멘트 입자에 매몰되면 측쇄의 분산 능력으로 장시간 작업성을 유지하는 특징을 갖고 있으며, 이는 계면 활성 작용에 의해 콘크리트의 작업성 개선 및 강도 발현 등을 향상시키는데 효과적이다.

**Table 3. Physical properties of aggregates used**

Type	$G_{max}$ (mm)	Density ( $g/cm^3$ )	Absorption (%)	FM
CS	-	2.61	0.95	2.81
G	25	2.63	0.62	6.68

**Table 4. Mixture proportions of concrete specimens**

Specimens	W/B (%)	S/a (%)	Unit content( $kg/m^3$ )							AD (%)	AE (%)
			Binder	W	OPC	FA	MFA	CS	G		
FA 10	50.3	48.0	350	176	315	35	-	850	928	0.7	0.12
FA 20	49.7			174	280	70	-	846	924		0.21
FA 30	48.9			171	245	105	-	844	922		0.29
FA 40	48.0			168	210	140	-	842	919		0.43
MFA 10	50.3			176	315	-	35	850	928		0.19
MFA 20	50.0			175	280	-	70	845	923		0.32
MFA 30	48.9			171	245	-	105	845	922		0.45
MFA 40	47.7			167	210	-	140	844	921		0.61

**2.2 콘크리트 배합**

콘크리트 배합의 주요 변수는 FA와 MFA의 치환율(10%, 20%, 30% 및 40%)이다. 모든 콘크리트의 목표 슬럼프는  $190 \pm 10$ mm이며, 목표 공기량은  $4.5 \pm 1.5\%$ 로 설정하였다. 목표 성능에 대한 콘크리트의 배합상세는 Table 4에 나타내었다. 모든 배합에서 단위 결합재량 및 잔골재율( $S/a$ )은 각각  $350 kg/m^3$  및 48%로 일정하게 하였다. 단위 수량 및 물-결합재비( $W/B$ )는 소요반죽질기를 얻기 위해 플라이애시 치환율의 증가에 따라 다소 감소시켰다. 또한 미연소탄분이 증가에 따라 공기량 감소와 함께 미연소탄소에 AE제가 흡착이 발생되어 AE제의 농도가 감소되기 때문에 FA 혼입 콘크리트에서는 소요의 공기량을 얻기 위해서 AE제의 사용량을 증가시켜주어야 한다.

**2.3 실험 방법**

굳지 않은 콘크리트의 슬럼프와 공기량은 각각 KS F 2402 (2017) 및 KS F 2421(2016)에 따라 측정하였다. 블리딩 시험은 KS F 2414(2020)에 따라 블리딩 용기 가장자리에서 3mm 낮게 채워 넣어 60분간은 10분마다, 그 후는 30분마다 측정을 하였다. 응결 시간은 KS F2436(2017)에 따라  $\phi 150 \times 150$ mm 원주형 몰드를 제작하여 관입저항값으로 측정하였다. 압축강도 시험용 공시체는  $\phi 100 \times 200$ mm 원주형 몰드를 사용하여 KS F 2403(2019)에 따라 2층 8회 다짐을 하여 제작하였다. 제작된 압축강도 시험용 공시체는 24시간 후 몰드를 탈형 한 후 5°C, 20°C 및 40°C에서 양생을 실시하였으며, KS F 2405(2017) 콘크리트 압축강도 시험방법에 의해 재령 1, 3, 7, 28일 및 91일 측정하였다. 그리고 수화생성물 평가 및 내부 미세구조를 분석하기 위하여 물-결합재비 30%의 페이스트를 만들어 항온·항습 환경에서 양생 후 각재령일에 시료 ( $5 \times 5 \times 2$ mm)를 채취하여 X선 회절분석(XRD), 주사전자현미경(SEM)을 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 굳지 않은 콘크리트 특성 평가

##### 3.1.1 작업성

Fig. 4와 같이 단위수량을 변화시켜 슬럼프 190±10mm를 만족시켰다. 일반적으로 FA 및 MFA 사용량이 증가함에 따라 단위수량은 감소하였다. 콘크리트의 단위수량 감소시 FA 밀링에 의한 입도 감소의 영향은 나타나지 않았다. FA 밀도는 시멘트보다 낮기 때문에 FA로 치환한 경우 OPC 단독 사용한 경우보다 체적이 증가되어 결합재량이 증가함에 따라 콘크리트 점성 증가 및 성형성이 개선된다. 또한, FA의 미세한 구형입자의 증가에 따라 OPC 페이스트와 골재사이의 마찰저항을 줄여주는 볼베어링 작용으로 인해 단위수량이 감소한 것으로 판단된다. 즉, MFA는 FA와 유사하게 콘크리트의 유동성 향상에 기여하였다.

Fig. 5에는 공기량 4.5±1.5%를 만족시키기 위한 AE제 사용량을 나타내었다. 일반적으로 FA 사용량이 증가함에 따라 플라이애시 내에 미연탄소분이 존재하여 공기량이 감소한다(Ravina and Meththa 1986). MFA는 FA보다 AE제 사용량이 약 2배정도 증가하

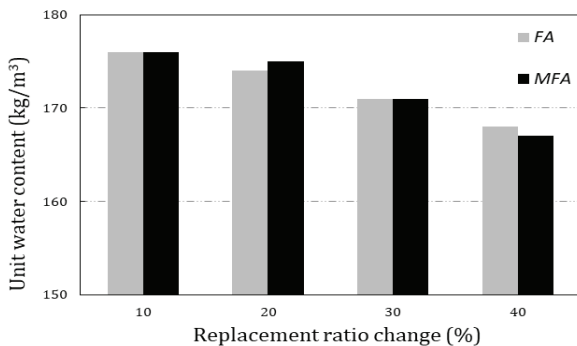


Fig. 4. Unit water content used in concrete specimens

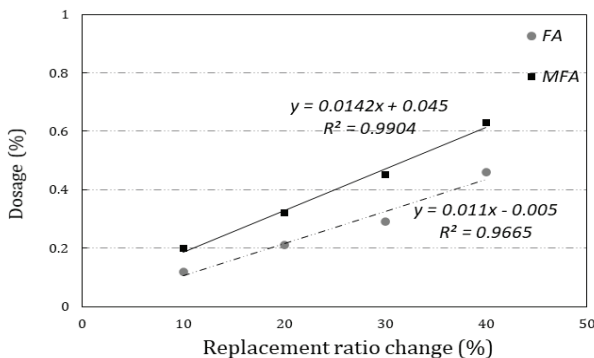


Fig. 5. AE dosage used in concrete specimens

였다. 이는 MFA 개질에 따른 미연탄소분의 비표면적 및 흡착량 증가로 인해 공기량이 감소한 것으로 판단된다.

##### 3.1.2 블리딩

플라이애시 및 개질 플라이애시의 치환율별 변화에 따른 블리딩량은 Fig. 6에 나타내었다. 콘크리트의 블리딩량은 FA 치환율이 증가할수록 감소하였다. 이러한 이유는 FA 치환율이 증가될수록 단위수량이 감소하기 때문이다. 한편, 동일 단위수량에서는 FA 치환율이 증가될수록 단위 시멘트량의 감소로 OPC의 흡착수량 및 수화반응량 저하에 따라 블리딩량이 증가한다(Hwang 2003). MFA의 블리딩량은 치환율 10%, 20%, 30% 및 40%에서 FA보다 각각 19%, 22%, 22% 및 13% 감소하였다(Table 5). 이러한 이유는 MFA가 FA보다 평균입경이 작아 잔골재사이의 공극을 미립분으로 채워주어 상승수의 통로를 차단하므로 콘크리트 블리딩량을 감소시키는 것으로 판단된다(Kokubu 1969).

##### 3.1.3 응결특성

Fig. 7에는 FA 및 MFA의 치환율 변화에 따른 응결시간을 나타

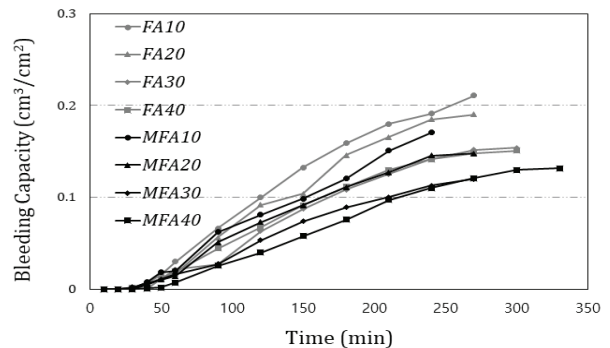


Fig. 6. Bleeding capacity of concrete specimens

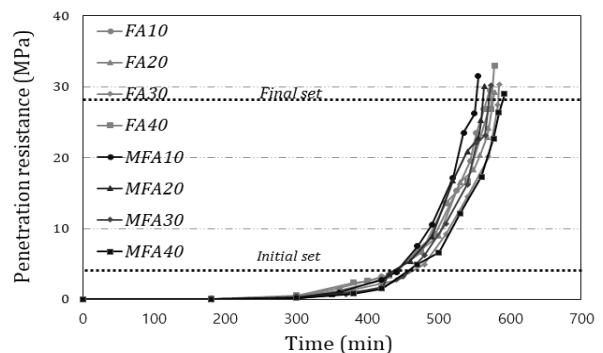


Fig. 7. Penetration resistance of concrete specimens

Table 5. Summary of test results

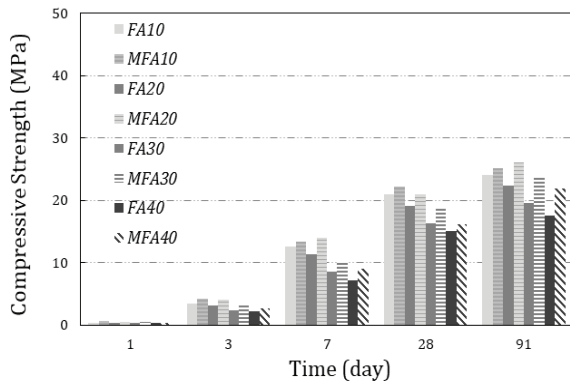
Specimens	Slump (mm)	Air content (%)	Penetration resistance(min)		Bleeding (cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> )	Curing temperature (°C)	Compressive strength(MPa)				
			Initial setting	Final setting			1 days	3 days	7 days	28 days	91 days
FA 10	185	3.9	440	572	0.2108	5	0.4	3.4	12.5	20.9	24.0
						20	5.2	12.4	21.6	30.3	34.4
						40	14.2	22.3	26.4	28.1	31.5
FA 20	190	3.8	440	578	0.1901	5	0.4	3.1	11.4	19.1	22.4
						20	4.0	9.4	19.9	26.6	30.1
						40	14.1	21.6	25.5	27.2	29.9
FA 30	190	3.6	460	585	0.1538	5	0.3	2.4	8.5	16.3	19.6
						20	2.4	7.3	17.8	25.3	29.8
						40	12.8	21.0	25.0	26.5	28.5
FA 40	185	4.1	430	578	0.1507	5	0.3	2.2	7.2	15.0	17.6
						20	1.1	5.7	17.6	24.8	27.7
						40	10.6	20.1	24.6	26.8	30.0
MFA 10	185	4.2	440	555	0.1707	5	0.6	4.2	13.3	22.2	25.1
						20	6.3	13.3	24.1	31.8	36.1
						40	15.4	23.5	27.8	30.4	34.0
MFA 20	185	4.4	430	564	0.1478	5	0.5	4.0	13.9	20.9	26.0
						20	5.1	11.7	21.6	28.5	32.3
						40	15.1	23.1	27.0	29.1	32.1
MFA 30	190	3.3	450	573	0.1197	5	0.5	3.1	10.1	18.9	23.9
						20	3.7	9.1	19.7	28.0	31.3
						40	14.3	21.9	26.1	29.1	33.6
MFA 40	190	3.7	450	592	0.1317	5	0.3	2.6	9.0	16.1	21.9
						20	2.0	7.1	16.8	26.0	28.5
						40	12.5	21.3	25.3	28.1	32.5

내었다. 콘크리트의 응결 시간은 FA 치환율이 낮은 배합일수록 다소 빠르게 진행되었다. 이러한 원인은 초기 수화반응이 발생하는 시멘트와 다른 FA 치환율 증가로 인한 응결시간이 지연되었다. FA 치환율별 초결 시간은 FA의 치환율 10%, 20%, 30% 및 40%에서 각각 440분, 440분, 460분, 및 430분이었으며, 종결시간은 각각 572분, 578분, 585분 및 578분이었다. 그리고 MFA 치환율별 초결시간은 MFA의 치환율 10%, 20%, 30% 및 40%에서 각각 440분, 430분, 450분, 및 450분이었으며, 종결시간은 각각 555분, 564분, 573분 및 592분이었다. MFA 콘크리트의 종결시간은 FA 콘크리트보다 약 3% 정도 빨랐다. 이러한 이유는 분쇄에 따른 MFA의 비표면적이 증가함에 따라 포졸란 반응 속도가 향상되어 종결시간이 촉진된 것으로 판단된다.

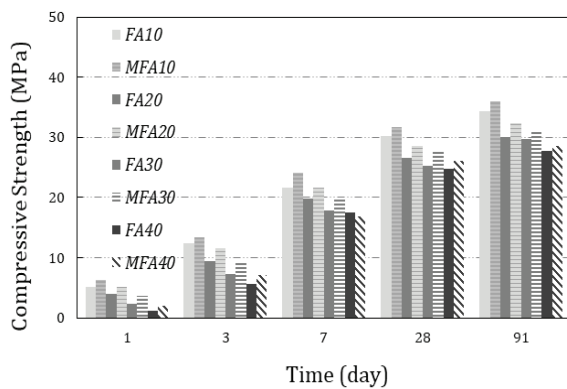
### 3.2 콘크리트 역학적 특성

#### 3.2.1 압축강도 발현

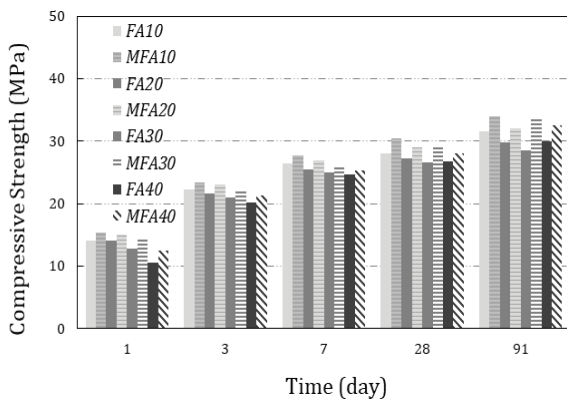
재령 및 양생온도에 따른 콘크리트 압축강도 발현은 Table 5 및 Fig. 8에 나타내었다. 일반적으로 MFA 콘크리트의 압축강도 발현은 FA 콘크리트에 비해 높다. 양생온도 5°C의 경우FA를 10% 치환 시 7일 압축강도는 12.5MPa 재령 91일은 24MPa로 압축강도 증가율이 192%이었다. 또한, FA를 40% 치환한 경우 7일 압축강도는 7.2MPa, 재령 91일은 17.6MPa로 246% 증가되어 FA 사용량이 증가함에 따라 포졸란 반응에 기인하여 강도증진이 높아지는 것으로 나타났다. MFA를 10% 치환한 경우 FA에 비해 7일 이전 평균 126%, 7일 이후 105% 높았다. MFA를 40% 치환한 경우 FA비해 7일 이전 평균 74%, 7일 이후 약 84%수준으로 나타났다.



(a) Curing temperature of 5°C



(b) Curing temperature of 20°C



(c) Curing temperature of 40°C

Fig. 8. Compressive strength of concrete specimens under different curing temperature

양생온도 20°C의 경우 FA를 10% 치환 시 7일 압축강도는 21.6MPa, 재령 91일은 34.4MPa로 압축강도 증가율이 159%이었으며, FA를 40% 치환한 경우 7일 압축강도는 17.6MPa, 재령 91일은 27.7MPa로 압축강도 증가율이 157%이었다. MFA를 10% 치환

한 경우 FA보다 7일 이전 평균 113%, 7일 이후 105% 수준으로 나타났다. MFA를 40% 치환한 경우 FA보다 7일 이전 평균 134%, 7일 이후 약 104% 높았다.

양생온도 40°C의 경우 FA를 10% 치환한 경우 7일 압축강도는 26.4MPa, 재령 91일은 31.5MPa로 압축강도 증가율이 119%이었으며, FA를 40% 치환한 경우 7일 압축강도는 24.6MPa, 재령 91일은 30MPa로 122% 높았다. 이러한 이유는 초기재령온도가 높아 미수화 시멘트 입자 수화반응을 더욱 활성화 시키며 포졸란 반응 또한 빠르게 진행되어 나타난 것으로 판단된다. MFA 10% 치환한 경우의 압축강도는 FA보다 7일 이전 평균 106%, 7일 이후 108% 높았다. MFA 40% 치환한의 압축강도는 경우 FA보다 7일 이전 평균 109%, 7일 이후 약 107% 높았다. MFA는 유리질 피막제거로 인하여 포졸란 반응이 가능한 플라이애시의 SiO<sub>2</sub>가 유리피막 해리 없이 직접 반응하고, 비표면적 증가 및 조기강도 개선형 화학혼화제 첨가에 따라 압축강도가 증가된 것으로 판단된다.

### 3.2.2 압축강도 예측 Model

콘크리트 구조설계기준(2017)에서 콘크리트의 압축강도 발현 ( $f_{cu}(t)$ )은 다음과 같이 제시하고 있다.

$$f_{cu}(t) = \beta_{cc}(t)f_{cu} \quad (1)$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp(\beta_{sc}(1 - \sqrt{\frac{28}{t}})) \quad (2)$$

여기서,  $\beta_{cc}(t)$ 는 시간( $t$ )에 따른 강도발현속도이고,  $\beta_{sc}$ 는 시멘트 종류에 따른 상수이다. 콘크리트 구조설계 기준에 제시된 예측식은 단순히 시멘트 종류에 따른 상수 값이므로 MFA 콘크리트의 압축강도 예측 모델을 위해서는 새로운  $\beta_{sc}$  상수가 주어져야 한다. 이에 따라  $\beta_{sc}$ 는 MFA 혼입 콘크리트의 실험 결과값을 기반으로 Fig. 9와 같이 결정하였다.  $\beta_{sc}$ 는 양생온도, 혼화제 종류, 치환율에 대하여 영향을 받았으며, 특히 성숙도 값에 의해 변화가 크게 나타났다.

$$\beta_{sc} = 0.0005X + 0.8366 \quad (3)$$

$$X = [1 - (R_{FA} + R_{MFA})] - M \quad (4)$$

여기서,  $R_{FA}$ ,  $R_{MFA}$  및  $M$ 은 FA, MFA의 치환율 그리고 재령( $t$ )에서의 성숙도를 나타낸 것이다.



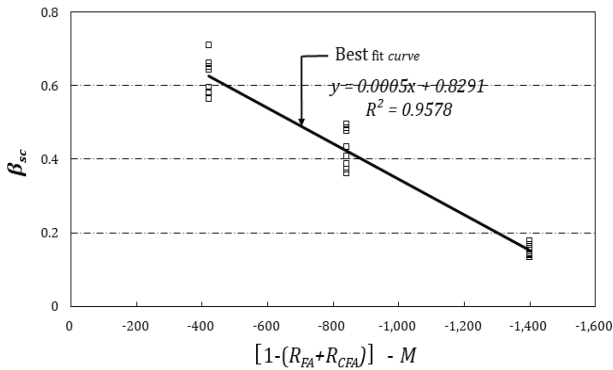


Fig. 9. Determination of experimental constant in Eq.(2)

### 3.3 수화생성물 분석(SEM 및 XRD)

Fig. 10에는 FA 및 MFA를 30% 치환한 페이스트에서 재령 28일 SEM 이미지를 나타내었다. 재령 7일 FA는 수화작용 지연으로 미세구조가 크게 발달하지 못하고 FA 자체 입자 모양이 관찰되었다. MFA가 FA에 비해 빠른 수화특성을 SEM 사진 분석으로 확인할 수 있었다. 재령일이 경과할수록 활성화된 경화체는 FA 표면에 반응생성물이 달라붙기 쉬워진 경향으로 판단된다. 즉, MFA는 7일 이후의 경우 더욱 확실히 나타나는 데 시멘트가 물과 반응하여 생성된 수화생성물인 수경성 실리케이트 수화물(C-S-H)이 개질된 플라이애시 표면에 달라붙어 플라이애시가 함유한 SiO<sub>2</sub>의 성분과의 반응으로 재령이 지남에 따라 더욱 활발하여지는 것으로 관찰되었다. 재령 28일 이후에는 C-S-H상이 보이는데 C-S-H상은 섬유상, 판상 등의 여러 가지 모양으로 존재한다. 재령 7일, 28일 및 91일에서 FA 및 MFA 페이스트의 X선 회절 분석결과를 Fig. 11에 나타내었다. 재령에 관계없이 회절피크가 가장 잘 나타나는 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>)이 약 18°에서 관찰되었으며, 약 29°에서 탄산칼슘(CaCO<sub>3</sub>)과 C-S-H이 관찰되었다. 이는 시멘트 수화반응으로 용출된 수산화칼슘 수화물의 강도 피크가 강하게 나타나고 있는데 CaO와 H<sub>2</sub>O가 효과적으로 결합하여 충분한 수화활성이 이루어지기 때문인 것으로 판단된다. 재령이 경과할수록 생성된 수산

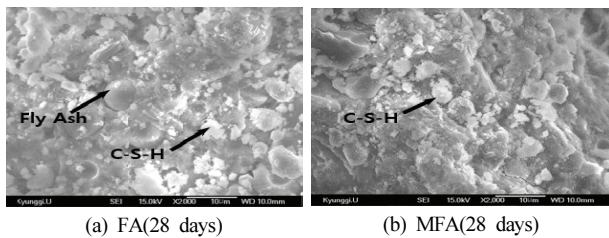
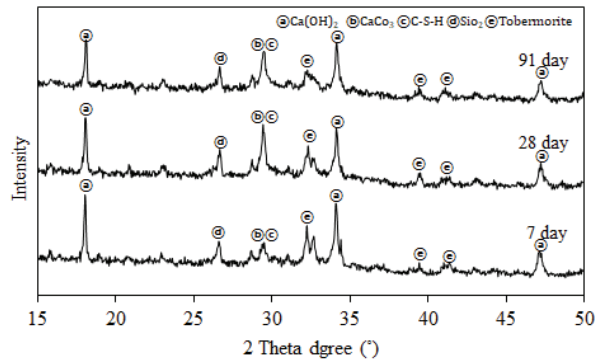
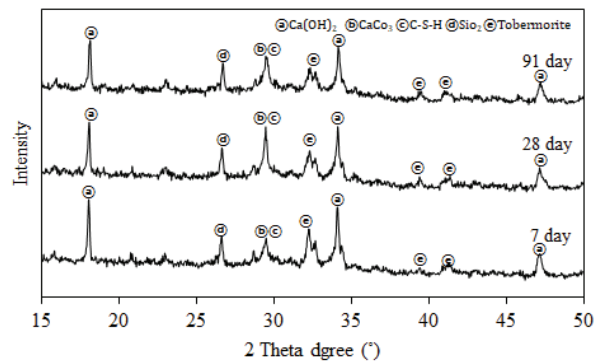


Fig. 10. SEM images of MFA or FA pastes at different ages



(a) FA pastes



(b) MFA pastes

Fig. 11. XRD patterns at different ages

화칼슘이 감소하는 것으로 관측되었는데 수산화칼슘 생성물은 FA가 함유한 SiO<sub>2</sub>의 성분과의 반응으로 인한 칼슘실리케이트 수화물의 생성이 증가하며 수산화칼슘 생성물은 반응하여 소비되었기 때문에 결정성이 낮아진 것으로 판단된다(Helmuth 1987). 또한 MFA가 FA에 비해 미세하게 수산화칼슘 생성량이 줄어든 것으로 관측되어 빠른 수화 반응 특성을 보이는 것으로 사료된다.

### 4. 결론

본 연구에서는 물리적 입도개선 기술로 개질된 플라이애시 사용에 따른 굳지 않은 콘크리트 특성 및 굳은 콘크리트의 압축강도 발현과 수화생성물을 평가하였다. 개질 플라이애시 콘크리트의 기초 실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 개질 플라이애시(MFA)는 일반 플라이애시(FA)와 유사하게 콘크리트의 유동성 향상에 기여하였다. 하지만 MFA 콘크리트에서의 AE제 사용량은 동일 공기량을 갖는 FA 콘크리트에

- 비해 약 140% 증가하였다.
2. 플라이애시 치환율이 증가될수록 단위수량 저감으로 인한 블리딩량이 감소하였다. 또한, MFA는 FA보다 평균 입경이 작아 콘크리트 블리딩량을 감소시켰다.
  3. MFA 콘크리트의 종결 시간은 FA 콘크리트에 비해 약 3% 감소하였다.
  4. 재령 1일에서 MFA 콘크리트의 압축강도는 FA 콘크리트에 비해 양생온도 5°C에서는 평균 135%, 양생온도 20°C에서는 약 146%, 양생온도 40°C에서는 약 111% 증가하였다.
  5. 재령 28일에서 MFA 콘크리트의 압축강도는 FA 콘크리트에 비해 양생온도 5°C에서는 평균 110%, 양생온도 20, 40°C에서는 약 107% 증가하였다.
  6. MFA는 FA에 비해 표면이 반응생성물이 달라붙기 쉬워 포졸란 반응이 빠르게 발현되었으며, 수화반응에서 용출된 수산화칼슘 생성물은 MFA의 SiO<sub>2</sub>성분과 반응하여 소비됨으로서 결정성이 낮아졌다.

## Conflicts of interest

None.

## 감사의 글

본 연구는 한국남동발전 2019년 현장기술연구개발과제의 지원으로 수행되었습니다.

## References

Cho, H.B. (2011). Prediction Model of Cementing Efficiency for Strength Estimation of Concrete Containing Fly Ash, Ph.D Thesis, Hanyang University, Korea [in Korean].

Han, F., Wang, Q., Feng, J. (2015). The differences among the roles of ground fly ash in the paste, mortar and concrete, *Construction and Building Materials*, **93**, 172–179.

Helmuth, R. (1987). Fly Ash in Cement and Concrete, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 101–123.

Hwang, I.S. (2003). A Study on the Properties of Bleeding and Development of Bleeding Reduction Agent for Concrete, Ph.D Thesis, Cheongju University, Korea [in Korean].

KCI. (2017). KCI Model Code Korea Concrete Institute(KCI), Korea [in Korean].

Kokubu, M. (1969). “Fly ash and fly ash cement,” Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium on the Chemistry of Cement, Tokyo, Japan.

Krishnaraj, L., Ravichandran, P.T. (2019). Investigation on grinding impact of fly ash particles and its characterization analysis in cement mortar composites, *Ain Shams Engineering Journal*, **10(2)**, 267–274.

KS F 2402. (2017). Standard Test Method for Concrete Slump. Korea Standard Association, Korea [in Korean].

KS F 2403. (2019). Standard Test Method for Making and Curing Concrete Specimens, Korea Standard Association, Korea [in Korean].

KS F 2405. (2017). Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete, Korea Standard Association, Korea [in Korean].

KS F 2414. (2020). Standard Test Method for Bleeding of Concrete, Korea Standard Association, Korea [in Korean].

KS F 2421. (2016). Standard Test Method for Air Content of Fresh Concrete by the Pressure Method(Air Receiver Method), Korea Standard Association, Korea [in Korean].

KS F 2436. (2017). Standard Test Method for Setting Times of Concrete Mixture by Penetration Resistance, Korea Standard Association, Korea [in Korean].

Lee, S.S., Song, H.Y., Lee, S.M. (2009). An experimental study on the influence of high fineness fly ash and water–binder ratio on properties of concrete, *Korea Concrete Institute*, **21(1)**, 29–35 [in Korean].

Nguyen, T.C., Tran, T.D.M., Dao, V.B., Vu, Q.T., Nguyen, T.D., Thai, H. (2020) Using modified fly ash for removal of heavy metal ions from aqueous solution, *Journal of Chemistry*, **2020(9)**, 1–11.

Oh, S.G. (2011). An evaluation of chloride attack resistibility of concrete mixed with fly ash, *Journal of the Architectural Institute of Korea: Structure & Construction*, **31(4)**, 79–86 [in Korean].

Rajak, D.K., Raj, A., Guria, C., Pathak, A.K. (2017). Grinding of class-F fly ash using planetary ball mill: a simulation study to determine the breakage kinetics by direct- and back-calculation method, *South African Journal of Chemical Engineering*, **24**, 135–147.

Ravina, D., Meththa, P.K. (1986). Properties of fresh concrete containing large amount of fly ash, *Cement and Concrete Research*, **16**, 227–238.

Ryu, G.S. (2012). A Characteristics Study of Fly Ash-based Cement Zero Concrete, Ph.D Thesis, Chung-Ang University, Korea [in Korean].

Sahoo, P.K., Tripathy, S., Panigrahi, M.K., Equeenuddin, S.D.



(2013). Evaluation of the use of an alkali modified fly ash as a potential adsorbent for the removal of metals from acid mine drainage, Applied Water Science, **3(3)**, 567-576.

### 진동분쇄를 사용한 개질 플라이애시 콘크리트의 유동성 및 압축강도 발현 평가

본 연구의 목적은 보통 포틀랜드 시멘트의 치환재로서 개질 플라이애시의 적용 가능성을 평가하는 것이다. 실험변수는 시멘트 대비 플라이애시와 개질 플라이애시의 치환율 10%, 20%, 30% 및 40%와 양생온도 5, 20 및 40°C이다. 개질 플라이애시를 혼입한 콘크리트의 굳지 않은 콘크리트 특성(유동성, 공기량, 블리딩, 응결특성), 역학적 특성(압축강도) 및 수화생성물을 측정하고 일반 플라이애시 혼입 콘크리트와 비교하였다. 실험결과, 개질 플라이애시는 일반 플라이애시보다 콘크리트의 블리딩량 감소 및 조기 압축강도 향상에 유리하였다. 일반 플라이애시를 이용한 콘크리트의 압축강도 대비 개질 플라이애시 콘크리트의 압축강도 증가율은 재령 1일에서 양생온도 5°C인 경우 평균 128%, 양생온도 20°C인 경우 약 153%, 양생온도 40°C에서는 약 113%이었다. 이들 증가율은 재령 28일에서는 양생온도에 관계없이 약 108% 수준이었다. X선 회전 분석결과, 개질 플라이애시 페이스트에서 측정된 수산화칼슘 생성량은 플라이애시 페이스트에서 보다 적었다.