Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection
Vol. 19, No. 4, July 2015, pp.116-124
http://dx.doi.org/10.11112/jksmi.2015.19.4.116

pISSN 2234-6937
eISSN 2287-6979

폴리머수지 기반 보수모르타르에서 양생온도에 따른 미분쇄된 플라이애시 치환율의 영향

The Effect of the Replacement of Grinded Fly Ash according to Curing Temperature on Repair Mortar Based on Polymer Admixture

심 재 일[1)] 문 주 현[2)*] 윤 인 구[3)] 전 용 수[4)]
Jae-Il Sim Ju-Hyun Mun In-Gu Yun Young-Su Jeon

Abstract

The objective of this study is to evaluate the effects of the replacement levels of grinded fly-ash on the repaired mortar based on a polymer. The main parameters are the curing temperature and replacement levels of grinded fly-ash. The curing temperature and the replacement levels of grinded fly-ash are varied at 40℃, 20℃ and 5℃, and between 0% and 35% of the total binder by weight, respectively. The flow in fresh mortar and compressive strengths according to ages, the relationship of stress-strain, elastic modulus and modulus rupture in hardened mortar, as well as scanning the electron microscopy and the X-ray diffraction of mortar, were measured, respectively. The test results showed that the flow, elastic modulus and modulus rupture are great in mortar specimens with 20~30% of the replacement levels of grinded fly-ash. In addition, compressive strengths according to ages were affected by the replacement levels of grinded fly-ash and the curing temperature indicated that the strength development ratio of mortar with 20% of the replacement levels of grinded fly-ash was greater than others. In the prediction of the compressive strength specified by the ACI 209 code, the strength development at an early and late age can be generalized by the functions of the replacement levels of grinded fly-ash and the curing temperature. In the analysis of scanning the electron microscopy and the X-ray diffraction, the number and intensity of peaks increased and the form of CSH gels on the surface of the particle of grinded fly-ash was observed.

Keywords : Grinded fly ash, Repair mortar, Polymer, Mechanical property, Strength development factor

1. 서 론

보수모르타르는 콘크리트 보수공사에서 구조물의 내구연한을 증대시키기 위한 단면복구공법에 사용되는 재료 중의 하나이다(Lee and Song, 2007; Song et al., 2006). 일반적으로 보수모르타르는 건축물 및 교량 등의 구조적인 균열 보강에 적용되므로 기본적인 역학적 특성 및 내구성이 요구된다. 특히 외기에 노출되는 구조물에서 동절기에는 낮은 온도에서 보수모르타르의 압축강도 발현이 매우 중요하다(Lee et al., 2006). 하지만 대부분 보수모르타르의 시공은 구조물에 국부적인 부분에 시행되고 있기 때문에 품질관리를 위한 양생관리가 미흡한 실정이다(Lee et al., 2006). 이에 따라 보수모르타르는 요구되는 역학적 특성이 저하되는 문제점이 있다. 또한 보수모르타르의 저하된 역학적 특성은 구조물에서 추가적인 균열발생 및 탈락 현상으로 구조물의 내구연한을 더욱 저하시키는 원인이 되고 있다(Lee et al., 2006).

플라이애시는 산업부산물로서 혼화재, 뒷채움재 및 골재 등 건설산업에서 다양하게 활용되고 있다(Park et al., 2000; Yang et al., 2014). 일반적으로 혼화재로 이용되는 플라이애시는 콘크리트 배합에서 시멘트를 일부 대체하고 있는데 초기의 낮은 압축강도 발현율의 문제점이 지적되고 있다(Cheong et al., 2012; 2013). 이를 해결하기 위해서 기존 연구자들은

1) 정회원, 해평선(주) 기술연구소 팀장, 공학박사
2) 정회원, 지엘기술(주) 기술연구소 연구원, 공학박사, 교신저자
3) 정회원, 지엘기술(주) 대표이사
4) 정회원, 경기대학교 일반대학원 건축공학과 박사과정

* Corresponding author : mjh352002@nate.com
• 본 논문에 대한 토의를 2015년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2015년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Copyright Ⓒ 2015 by The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection. 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.

재령별 압축강도발현을 증대시키기 위한 미분쇄된 플라이애시의 적용가능성 연구를 수행하였다(Cheong et al., 2012; 2013; 2014). Cheong et al.(2013 a)는 미분쇄된 플라이애시를 결합재 대비 20~30% 첨가할 경우 초기의 콘크리트의 압축강도 발현에 우수함을 보였다. 또한 Cheong et al.(2013 b)는 결합재 대비 30%의 미분쇄된 플라이애시의 대체는 7% 수준의 일반 플라이애시에서 얻을 수 있는 고강도콘크리트의 조기강도 향상 효과를 얻을 수 있다고 보고하였다.

본 연구에서는 동절기에 초기재령에서 발생할 수 있는 강도발현율의 문제점을 해결하기 위해서 폴리머기반 보수모르타르에 미분쇄된 플라이애시의 적용가능성을 평가하였다. 주요변수는 양생온도와 미분쇄된 플라이애시의 치환율이다. 굳지 않은 모르타르에서는 초기 및 30분 후의 플로우를 측정하였다. 굳은 모르타르에서는 재령별 압축강도, 응력-변형률 관계 및 탄성계수, 파괴계수 측정과 주사전자현미경(scanning electron microscopy, SEM) 및 엑스선회절기(X-ray diffraction, XRD) 분석을 수행하였다. 재령별 압축강도는 ACI 209(1994)의 재령별 압축강도 모델과 비교하였다. 또한 미분쇄된 플라이애시 치환율에 따른 보수모르타르의 강도발현에 대한 계수를 SPSS(statistics package for social science)통계적 프로그램을 이용하여 일반화하였다. 탄성계수 및 파괴계수는 ACI 318-11(2011) 설계기준과 비교하였다.

2. 실험 계획

2.1 사용재료의 특성

결합재는 보통포틀랜드시멘트, 플라이애시 및 폴리머수지를 이용하였다. 보통포틀랜드 시멘트는 분말도 및 밀도가 각각 3,100 cm^2/g와 3.15로서 KS (2013)에서 제시하고 있는 1종을 이용하였다. 플라이애시는 100μm이상의 분말이 제거된 미분쇄된 플라이애시를 사용하였다. 미분쇄된 플라이애시는 기존 플라이애시 보다 비표면적이 약 1.3배 높고 분쇄공정에 의해서 입자의 유리질 피막이 물리적으로 개방되기 때문에 포졸란 반응성이 우수하다(Cheong et al., 2012; 2013). Table 1에는 사용된 미분쇄된 플라이애시의 물리적 특성을 나타내었다. 주요성분은 SiO_2와 Al_2O_3로서 각각 52.8%와 28.6%를 차지하고 있다. 이 성분의 비는 일반적으로 3,400 cm^2/g의 분말도를 갖는 플라이애시와 비슷한 수준이었다(Cheong et al., 2012). 보수모르타르는 방수성 및 균열저항성을 향상시키기 위해서 폴리머 수지와 섬유를 이용하였다. 폴리머 수지는 Table 2에 나타낸 바와 같이 내수성인 아크릭계(제품명 Co)와 방수성인 하이브리드 폴리머(제품명 EVA)를 이용하였다. 아크릭계 및 하이브리드 폴리머 수지의 밀도는 각각 0.54와 0.45이며, pH는 각각 6.5~8.5와 6~8이다. 사용된 섬유는 PVA 종류로서 길이와 형상비가 각각 8 mm와 727이다. 또한 PVA 섬유의 인장강도와 탄성계수는 각각 1,269 MPa와 27,640 MPa이다.

Table 1 Physical properties of grinded fly-ash

Specific gravity	Fineness (cm^2/g)	Loss ignition (%)	Activity index (%)	SiO_2 (%)
2.23	4,520	4.0	92	52.8

사용된 잔골재의 최대직경은 4 mm로서 KS기준에서 제시하고 있는 표준입도분포곡선을 만족하는 건조모래를 사용하였다(Fig. 1). 건조모래의 밀도 및 조립률은 각각 2.3과 2.88이다.

2.2 배합설계

배합설계는 보수모르타르에 미분쇄된 플라이애시의 적용가능성을 평가하기 위해 Table 3에 나타낸 바와 같이 3그룹으로 구분하였다. 또한 보수모르타르는 시공 후 계절에 따라 양생온도가 달라지기 때문에 실용적인 연구 측면에서 동절, 표준기 및 하절기의 온도를 주요변수로 하였다. 첫 번째 그룹은 하절기의 환경으로서 양생온도를 40℃로, 두 번째 그룹

Table 2 Physical properties of polymer

Type of polymer	Appearance	Solids content (%)	Bulk density (kg/l)	pH
Co	Brownish	98%	0.54	6.5~8.5
EVA	White	99%	0.45	6~8

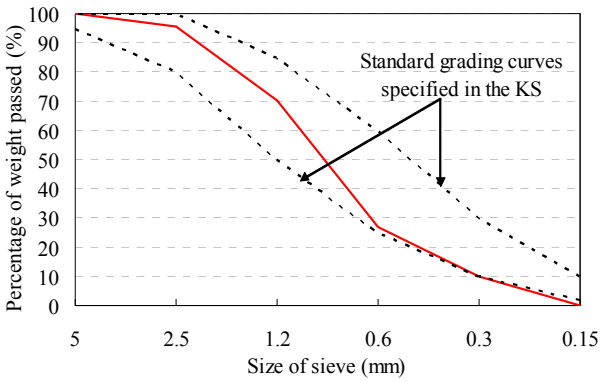


Fig. 1 Particle distribution curves of fine aggregate

Table 3 Proportions of repair mortar mixes and summary of test results

Group	Specimens	W/B (%)	S/B	B (kg/m^3)	Curing temperature (℃)	Composition of binder by weight(%)			Flow (mm)		f_{ck} (MPa)						$E_c/\sqrt{f_{ck}}$	$f_r/\sqrt{f_{ck}}$
						C	FA	Po	0 mins	30 mins	1 day	3 days	7 days	28 days	56 days	91 days	28days	28days
1	H-F0	30	2	333.3	40	95	0	5	100	100	23.8	29.9	34.9	41.7	43.5	44.8	-	-
	H-F10					85	10		110	100	22.4	29.5	39.5	44.3	45.7	46.4	-	-
	H-F20					75	20		135	105	18.0	26.6	39.2	50.4	50.2	53.0	-	-
	H-F25					70	25		135	115	13.8	23.6	37.7	49.2	50.8	53.1	-	-
	H-F30					65	30		135	110	10.2	22.4	32.2	39.4	41.8	43.8	-	-
	H-F35					60	35		135	115	8.5	20.2	34.2	38.3	38.5	39.1	-	-
2	S-F0				20	95	0		100	100	-	9.5	25.5	31.4	35.6	37.5	4409.2	0.63
	S-F10					85	10		110	100	-	14.3	26.8	32.5	37.1	41.3	4385.3	0.70
	S-F20					75	20		135	105	-	18.2	29.1	37.0	41.9	45.4	4822.8	0.74
	S-F25					70	25		135	115	-	10.1	22.9	29.8	34.2	37.2	4683.7	0.82
	S-F30					65	30		135	110	-	6.9	18.7	26.2	28.6	31.1	4298.9	0.80
	S-F35					60	35		135	115	-	11.6	21.3	26.0	27.6	30.4	4112.9	0.74
3	L-F0				5	95	0		100	100	-	7.1	13.6	28.3	32.0	34.3	-	-
	L-F10					85	10		110	100	-	10.1	20.4	28.2	32.9	35.7	-	-
	L-F20					75	20		135	105	-	14.5	22.3	34.3	44.9	47.8	-	-
	L-F25					70	25		135	115	-	5.9	23.2	37.7	41.2	45.1	-	-
	L-F30					65	30		135	110	-	7.8	21.5	33.2	43.6	48.3	-	-
	L-F35					60	35		135	115	-	7.2	18.2	32.6	37.0	40.9	-	-

W/B and S/B are the ratios of water to binder and fine aggregate to binder by weight, respectively. C, FA and Po are the cement, grinded fly-ash and polymer, respectively. f_{ck}, E_c and f_r are compressive strength, elastic modulus and modulus of rupture, of concrete, respectively.

은 표준환경으로서 20℃로, 세 번째 그룹은 동절기의 환경으로서, 5℃로 설정하였다. 모든 배합에서 물-결합재비(W/B)와 잔골재-결합재비(S/B)는 각각 30%와 2로 고정하였다. 또한 아크릭계와 하이브리드계의 폴리머 수지는 결합재 대비 각각 2.5%로 첨가하였다. 섬유의 혼입량은 800 g/m^{3}로 고정하였다. 세 그룹에서 주요변수는 미분쇄된 플라이애시의 치환율이다. 일반적으로 기존 플라이애시의 치환율은 압축강도 및 내구성 측면을 감안하여 볼 때 최대 35%로 보고되고 있다(Bae et al., 2003; Choi et al., 1998). 따라서 배합설계에서 미분쇄된 플라이애시의 치환율을 0%, 10%, 20%, 25%, 30% 및 35% 수준으로 변화하였다.

실험체명은 양생온도 및 미분쇄된 플라이애시의 치환율를 나타낼 수 있도록 두 부분으로 구분하였다. 첫 번째 부분에서 알파벳인 'H', 'S' 및 'L'은 각각 양생온도 40℃, 20℃ 및 5℃를 의미한다. 또한 두번 째 부분에서 알파벳인 'F'는 미분쇄된 플라이애시를, 숫자는 치환율을 의미한다.

2.3 배합 및 측정방법

배합은 100l용량의 강제식 믹서기를 이용하여 결합재를 투입한 후 약 1분 30초간 건비빔 하였다. 이때 PVA 섬유는 분산성을 확실히 부여하기 위해서 물에 미리 풀어 믹서기에 투입하였다. 믹서에 물이 투입된 후, 습비빔은 약 1분 30초간 수행하였다.

굳지 않은 모르타르에서는 초기 및 30분 후의 플로우를 측정하였다. 굳은 모르타르에서는 재령별 압축강도, 응력-변형률 관계 및 탄성계수, 파괴계수 및 SEM 및 XRD를 측정하였다. 재령별 압축강도는 1일, 3일, 7일, 28일, 56일 및 91일에 50 mm × 50 mm × 50 mm의 큐빅몰드를 이용하여 측정하였다. 응력-변형률 관계 및 탄성계수는 ϕ100 mm × 200 mm의 원형몰드를 이용하여 온도 20℃로 양생된 실험체에서 재령 28일에 측정하였다. 탄성계수는 측정된 응력-변형률 관계에서 ASTM C 469(2014)에서 제시하고 있는 원점과 최대응력의 40%의 점과 연결하는 직선의 길이로 산정하였다. 파괴계수도 온도 20℃로 양생된 450 mm × 450 mm × 550 mm의 몰드를 이용하여 재령 28일에 측정하였다. 이들 굳지 않은 모르타르 및 굳은 모르타르에서 평가된 실험들은 KS 기준 (2013)에 준하여 수행하였다. 수화생성물 및 미세구조 분석을 위한 SEM과 XRD는 1일, 3일 및 28일에서 온도 20℃로 양생된 페이스트를 이용하여 측정하였다.

양생은 각 그룹에 따라서 달리 하였는데, 온도 40℃인 첫 번째 그룹의 실험체들은 항온항습실에서, 20℃인 두 번째 그룹에서는 항온항습실에서, 5℃인 세 번째 그룹에서는 저온 챔버에서 양생하였다.

3. 실험 결과

3.1 즉시 및 30분 후 플로우

모든 배합에서 즉시 플로우는 100 mm ~ 135 mm 범위의 수준에 있었는데, 미분쇄된 플라이애시 첨가율에 영향을 받았다. 즉시 플로우는 미분쇄된 플라이애시 첨가율이 20%까지 증가하다가 이 이상의 첨가율에서 플로우가 더 이상 증가하지 않았다. 이는 미분쇄된 플라이애시도 기존 플라이애시와 동일하게 입자들의 볼베어링 효과(Malhotra and Mehta, 2002)로 유동성을 증가시킬 수 있음을 의미한다. 타설 후 30 분 후의 플로우는 평균적으로 약 16%의 유동성 저하율을 보였다. 30분 후의 플로우의 저하율도 미분쇄된 플라이애시 첨가율이 20%까지 증가하였다. 이와 같이 미분쇄된 플라이애시 첨가율 증가에 따른 플로우 저하율의 증가는 결합재에서 시멘트 보다 미분쇄된 플라이애시의 비표면적이 더 높기 때문이다(Jung, 2002).

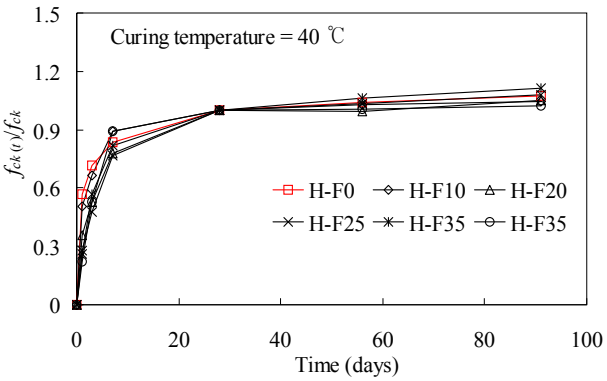
3.2 28일 압축강도

폴리머수지 기반 보수모르타르의 28일 압축강도는 양생온도와 미분쇄된 플라이애시 첨가율에 의해 현저한 영향을 받았다. 보수모르타르의 28일 압축강도는 첫 번째 그룹인 하절기 양생온도 40℃에서 38.3 MPa ~ 50.4 MPa로 표준온도 20℃인 두 번째 그룹 보다 동일한 미분쇄된 플라이이애쉬 치환율에서 약 1.3배 ~ 1.6배로 높은 강도발현을 보였다. 반면 세 번째 그룹인 동절기 양생온도 5℃의 28일 압축강도는 37 MPa ~ 32 MPa의 수준으로 첫번째 그룹인 온도 40℃로 양생된 실험체 보다 낮은 강도발현을 보였지만 미분쇄된 플라이애시 치환율이 20%까지 표준온도로 양생된 두 번째 그룹의 실험체와 비슷한 강도 발현을 보였다.

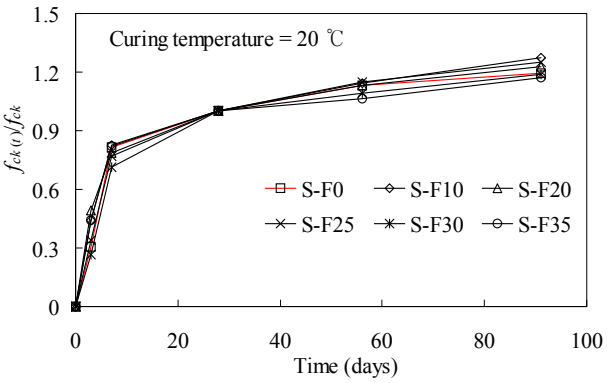
한편 보수모르타르의 28일 압축강도는 미분쇄된 플라이애시 첨가율이 20% 또는 25%까지 증가하다가 이 이상의 첨가율에서는 감소하는 경향을 보였다. 압축강도가 감소되는 시점은 양생온도에 따라 영향을 받았다. 양생온도 40℃와 20℃인 첫 번째 및 두 번째 그룹은 미분쇄된 플라이애시 첨가율이 20%를 기준으로 압축강도가 감소되지만, 양생온도가 5℃인 세 번째 그룹에서는 25%를 기준으로 감소되었다. 이와 같이 플라이애시 첨가율이 20% 또는 25%를 기준으로 증가 시점의 변화는 기존 실험결과와 비슷하였다(Lee et al., 2013).

3.3 재령별 압축강도 발현율

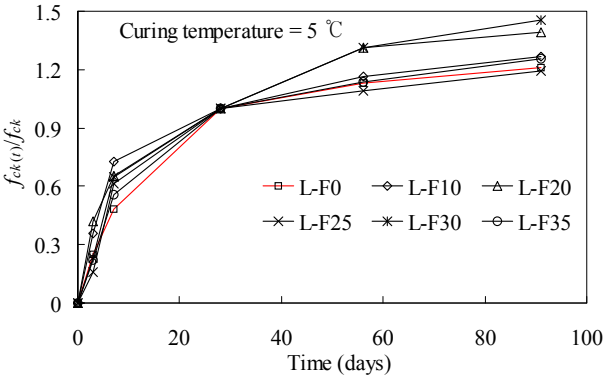
Figure 2에는 폴리머수지 기반 보수모르타르의 재령별 압축강도발현율($f_{ck}/f_{ck(t)}$)을 나타내었다. 두 번째(양생온도 20℃) 및 세 번째 그룹(양생온도 5℃)의 1일 압착강도는 발현미흡으로 측정이 불가능하였다. 반면 양생온도 40℃인 첫



(a) Curing temperature = 40℃



(b) Curing temperature = 20℃



(c) Curing temperature = 5℃

Fig. 2 The ratio of compressive development

번째 그룹에서 1일 압축강도는 8.5 MPa ~ 23.8 MPa 수준이었다. 양생온도 20℃인 두 번째 그룹에서 3일 압축강도는 10 MPa ~ 17.7 MPa 수준으로 양생온도 5℃인 세 번째 그룹 보다 평균적으로 약 1.5배 높았다. 하지만 미분쇄 플라이애시 치환율이 20% 이상 첨가된 실험체의 재령 7일의 압축강도는 두 번째 및 세 번째 그룹에서 비슷하였다. 이는 결합재 대비 20% 이상의 미분쇄 플라이애시 치환율이 초기 압축강도발현에 기여하였음을 의미한다(Cheong et al., 2012; 2013). 보수모르타르의 초기 재령 압축강도 발현율은 양생온도에 관계없이 미분쇄 플라이애시의 치환율이 증가할 수록 낮았다. 또한 28일 이후의 장기재령에서 강도 발현율은 미분쇄 플라이애시 치환율이 20~30%에서 가장 높았다.

ACI 209(1994)는 콘크리트의 재령별 압축강도($f_{ck(t)}$)를 예측하기 위해서 초기재령(A_1)과 장기재령(B_1)의 강도발현 계수를 포함하여 다음과 같이 제시하였다.

$$f_{ck(t)} = \frac{t}{A_1 + B_1 t} f_{ck} \quad (1)$$

여기서, f_{ck}는 재령 28일 압축강도를, t는 재령일을 나타낸다. 초기재령 및 장기재령의 발현계수는 값이 낮을수록 발현율이 높음을 의미한다. ACI 209(1994)는 보통포틀랜드 시멘트에서 A_1과 B_1을 각각 4.0과 0.85로 제시하고 있다. Table 4에는 SPSS(statistics package for social science)통계적 프로그램을 이용하여 보수모르타르의 강도발현에 대한 A_1과 B_1을 나타내었다. 보수모르타르의 A_1은 양생온도와 미분쇄된 플라이애시의 치환율에 의해 현저한 영향을 받았다. 온도 40℃로 양생된 첫 번째 그룹의 A_1은 1.012 ~ 3.073로서 초기의 높은 강도 발현을 보였다. 반면, 온도 5℃로 양생된 세 번째 그룹의 A_1은 5.251 ~ 9.130으로서 ACI 209(1994)에서 제시하고 있는 보통포틀랜트 시멘트의 계수보다 낮았다. 또한, 온도 20℃와 5℃로 양생된 그룹의 A_1은 미분쇄된 플라이애시 치환율이 증가함에 따라 감소하였다. 이는 표준온도와 동절기의 양생조건에서 미분쇄된 플라이애시가 초기의 강도발현에 기여함을 의미한다(Yang, 2014). 반면, 보수모르타르의 B_1은 미분쇄된 플라이애수의 치환율 보다는 양생온도에 현저한 영향을 받았다. 보수모르타르의 B_1은 양생온도 40℃에서 0.885 ~ 0.962이지만, 양생온도 5℃에서 0.615 ~ 0.754로 감소하였다. 이와 같이 양생온도 5℃에서 ACI 209(1994)에서 제시하고 있는 0.85 보다 낮은 수치는 장기재령에서 미분쇄된 플라이애시가 강도발현에 기여함을 의미한다. 위의 보수모르타르의 A_1과 B_1의 분석결과를 기반으로 다음과 같은 함수로 일반화할 수 있었다(Fig. 3).

Table 4 The evaluation of factor to strength development

Group	Specimens	Factor to strength development		Effectiveness
		A_1	B_1	r^2
1	H-F0	1.01	0.96	0.99
	H-F10	1.26	0.95	0.99
	H-F20	2.37	0.94	0.99
	H-F25	3.07	0.90	0.99
	H-F30	2.63	0.89	0.99
	H-F35	2.54	0.92	0.98
2	S-F0	4.75	0.79	0.94
	S-F10	3.82	0.79	0.95
	S-F20	3.59	0.81	0.98
	S-F25	4.97	0.77	0.96
	S-F30	5.89	0.79	0.96
	S-F35	3.50	0.85	0.96
3	L-F0	9.13	0.72	0.99
	L-F10	5.25	0.75	0.98
	L-F20	6.29	0.67	0.97
	L-F25	7.97	0.75	0.96
	L-F30	8.45	0.62	0.98
	L-F35	8.50	0.71	0.99

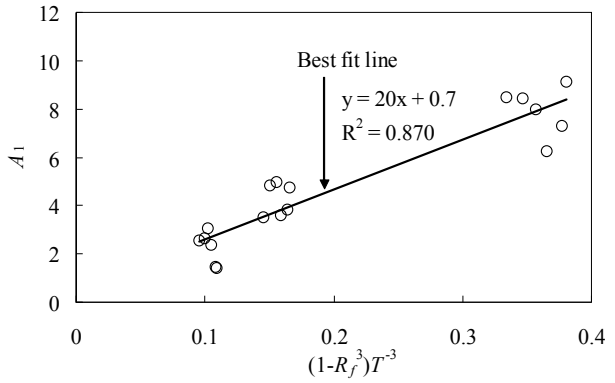
$$A_1 = 20\left[\left(1 - R_f^3\right) T^{-3}\right] + 0.7 \quad (2.a)$$

$$B_1 = 0.0035\left[\left(1 - R_f\right) T^{1.2}\right] + 0.7 \quad (2.b)$$

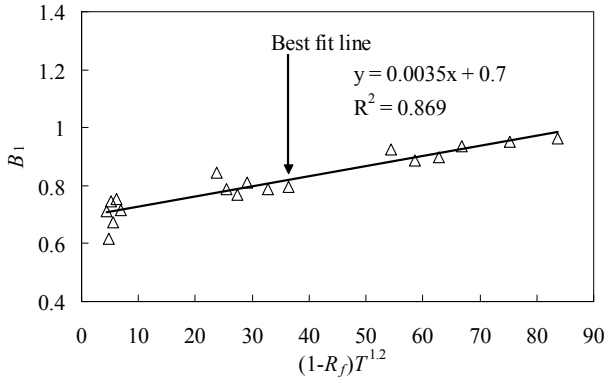
여기서, R_f는 미분쇄된 플라이애시의 치환율을, T는 양생온도를 나타낸다. 따라서 미분쇄된 플라이애쉬가 첨가된 보수모르타르에서 재령별 압축강도는 식 (1)과 (2)를 이용하여 실용적으로 예측할 수 있다.

3.4 응력-변형률의 관계

양생온도 20℃인 두 번째 그룹의 응력-변형률 관계를 Figure 4에 나타내었다. 응력-변형률 관계에서 초기강성은 최대응력의 40% 이전에서 선형적으로 거동하지만, 그 이후의 응력에서 실험종료 시점까지 비선형적인 거동을 보였다. 한편, 최대응력 시 변형률과 최대응력 이후의 거동은 미분쇄된 플라이애시 치환율에 의해 미미한 영향을 받았다.



(a) A_1



(b) B_1

Fig. 3 Generation of factor to strength development

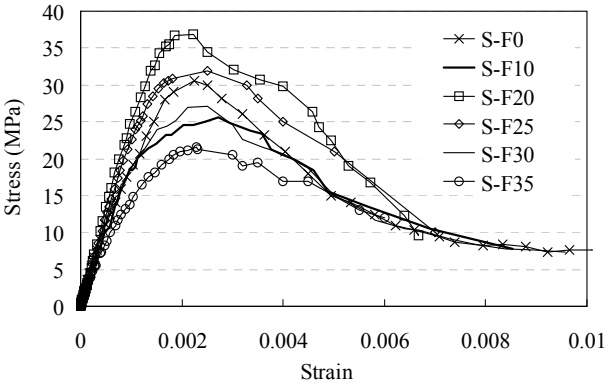


Fig. 4 The relationships of stress-strain

3.5 탄성계수 및 파괴계수

보수모르타르의 탄성계수(E_c)와 파괴계수(f_r)는 루트승 재령 28일 압축강도($\sqrt{f_{ck}}$)로 무차원화 하였다. Figure 5에 나타낸 바와 같이 온도 20℃에서 양생된 보수모르타르의 $E_c/\sqrt{f_{ck}}$는 4300 ~ 4822의 범위에 있었는데, 미분쇄된 플라이애시 치환율에 의해 다소 영향을 받았다. 미분쇄된 플라이애시가 첨가되지 않은 실험체 S-F0은 4409인 반면 미분쇄된 플라이애시 치환율이 20%인 실험체 S-F20에서는 4822로 약 10% 증가하였다. 한편, 보수모르타르의 $E_c/\sqrt{f_{ck}}$는 ACI 318-11(2011)의 설계기준인 4700 보다 낮았다. 이는 콘크리트의 실험결과를 기반하고 있는 ACI 318-11(2011)과의 비교로부터 보수모르타르가 기존 콘크리트에 비해 탄성계수의 저항성이 낮음을 의미한다(Hong et al., 2013).

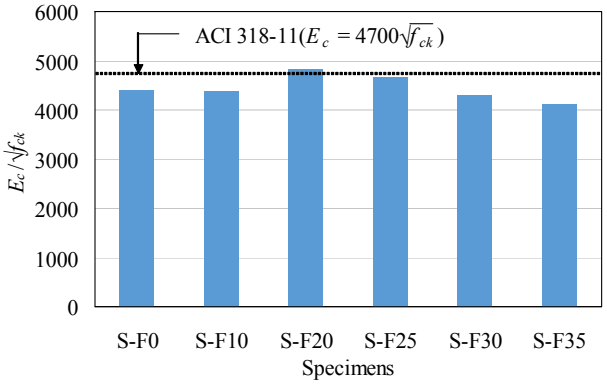


Fig. 5 Elastic modulus normalized by $\sqrt{f_{ck}}$

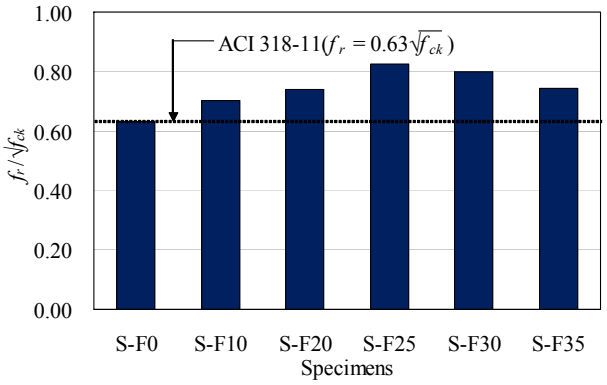
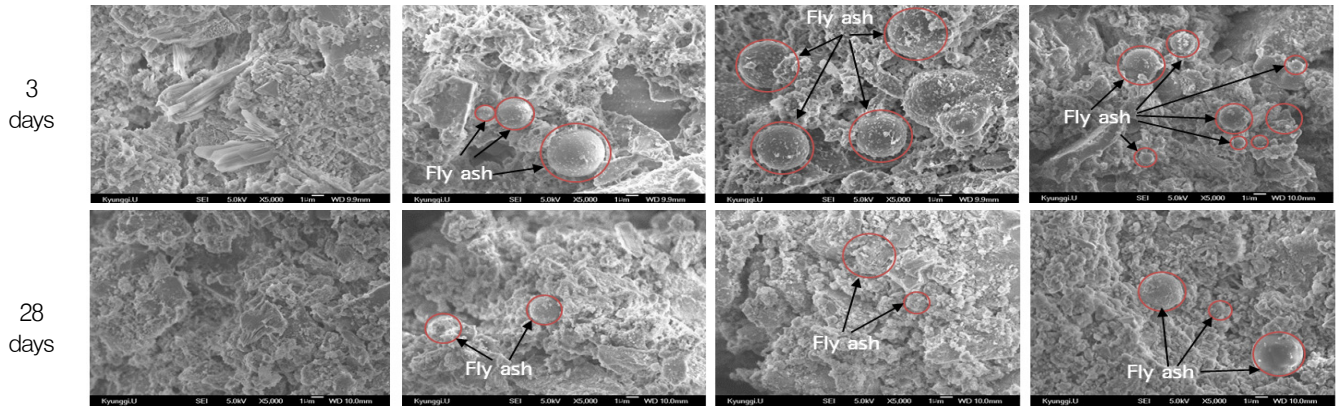


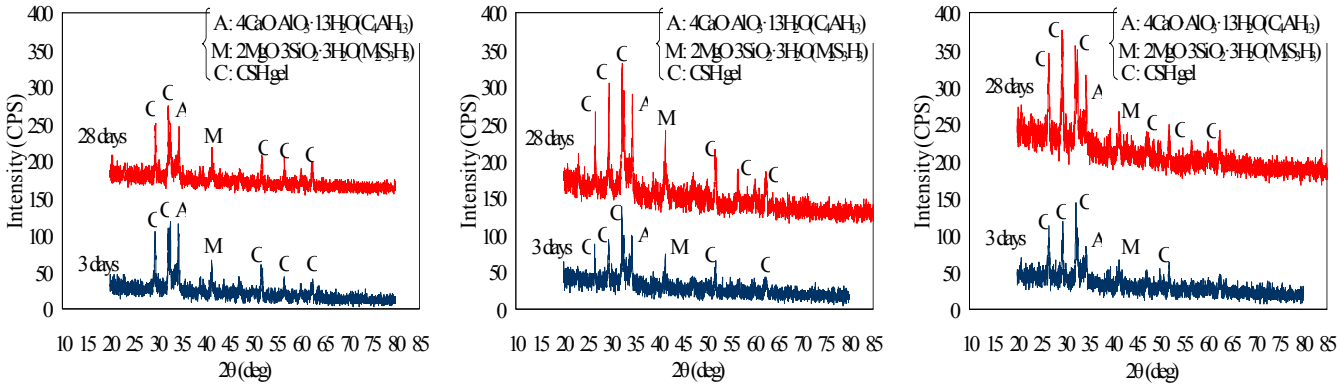
Fig. 6 Modulus of rupture normalized by $\sqrt{f_{ck}}$

Figure 6에는 미분쇄된 플라이애시 치환율에 따른 보수모르타르의 $f_r/\sqrt{f_{ck}}$를 나타내었다. 보수모르타르의 $f_r/\sqrt{f_{ck}}$는 0.63 ~ 0.82의 범위에 있었는데, 미분쇄된 플라이애시 치환율이 20% 까지는 다소 증가하였다. 한편 보수모르타르의 $f_r/\sqrt{f_{ck}}$는 ACI 318-11(2011)의 설계기준 보다 높았다. 이는 미분쇄된 플라이애시가 포졸란 반응성을 높이고, 첨가된 PVA 섬유의 가교현상으로 휨 저항성능을 향상시켰기 때문이다(Whang, 2008).



(a) R_f = 0% (b) R_f = 10% (c) R_f = 20% (d) R_f = 35%

Fig. 7 Typical SEM image according to replacement level of grinded fly-ash



(a) R_f = 0% (b) R_f = 20% (c) R_f = 35%

Fig. 8 Analysis of XRD

3.6 SEM과 XRD

Figure 7과 8에는 미분쇄된 플라이애시의 치환율에 따른 보수모르타르의 전형적인 XRD와 SEM을 나타내었다. 미분쇄된 플라이애시가 첨가되지 않은 페이스트는 초기 재령 3일에서 수화생성물을 나타내는 피크(peak)가 형성되었는데, 재령경과에 따라서 피크(peak)의 수와 피크의 강도(intensity)는 변화되지 않았다. 또한 미분쇄된 플라이애시가 첨가되지 않은 페이스트의 SEM 분석결과에서 나타낸 바와 같이 재령 1일에 침상형의 조직구조가 관찰되었지만, 재령경과에 따른 조직구조의 변화는 없었다. 미분쇄된 플라이애시의 치환율이 10%와 20%인 페이스트도 초기재령 3일에 피크가 형성되는데, 이 피크의 수와 강도는 재령이 경과할 수록 증가하였다. 또한 SEM 분석결과에서 나타낸 바와 같이 재령이 경과할 수록 플라이애시 입자들의 개수가 줄어듦과 동시에 입자주변에 CSH 겔이 형성되는 것을 관찰할 수 있었다. 반면, 미분쇄된 플라이애시의 치환율이 35%인 페이스트도 미분쇄된 플라이애시 치환율이 10%와 20%인 페이스트의 XRD와 SEM의 분석결과와 유사하게 관찰되었지만, 재령경과에 따른 강도가 다소 낮게 측정되었다. 특히 SEM 분석결과에서 나타낸 바와 같이 미분쇄된 플라이애시의 치환율이 35%인 페이스트는 재령 28일에 다량의 플라이애시 입자형상이 관찰되는데, 이는 수화생성물에 반응하고 남은 여분의 입자들임을 확인할 수 있었다. 이와 같이 미분쇄된 플라이애시는 초기의 수화생성물에 밀접한 연관성을 가지고 있기 때문에 초기 강도 발현에 효과적이다.

4. 결 론

본 연구에서는 보수모르타르에 미분쇄된 플라이애시의 적용가능성을 평가하였다. 주요변수는 미분쇄된 플라이애시의

치환율과 양생온도이다. 배합된 실험체는 역학적 특성과 수화생성물 및 내부 미세구조를 평가하였다. 위의 실험분석결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 양생온도 5℃의 28일 압축강도는 결합재 대비 미분쇄된 플라이애시의 치환율이 20%이하에서 양생온도 20℃로 양생된 실험체와 비슷하였다.

(2) 미분쇄된 플라이애시 치환율이 20% 이상 첨가된 실험체의 재령 7일의 압축강도 발현율은 양생온도 20℃와 5℃에서 비슷하였다.

(3) ACI 209에서 제시하고 있는 콘크리트 재령별 압축강도예측모델에서 초기재령(A_1)과 장기재령(B_1)의 강도발현 계수는 미분쇄된 플라이애시 치환율과 양생온도의 함수로 일반화할 수 있었다.

(4) 무차원된 탄성계수($E_c/\sqrt{f_{ck}}$)와 파괴계수($f_r/\sqrt{f_{ck}}$)는 미분쇄된 플라이애시 치환율이 20~25%에서 가장 높았다.

(5) 미분쇄된 플라이애시가 첨가된 페이스트는 XRD과 SEM분석에서 재령이 경과함에 따라 수화생성물을 나타내는 피크(peak)의 수와 강도(intensity)가 증가되었고 플라이애시 입자들의 개수가 감소함과 동시에 입자 주변에 CSH 겔이 형성되었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(과제번호:14CTAP-C078666-01)에 의해 수행되었음.

References

1. ACI 209R-92. (1994), Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures Practice Part 1: Materials and General Properties of Concrete, American Concrete Institute.
2. ACI Committee 318-11. (2011), Building Code Requirement for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute.
3. Bae, W. M., Baek, D. I., Song, H. K., and Kim, M. S. (2003), A study on the characteristics of antiwashout underwater concrete with blended ratio of ground granulated blast furnace slag and fly ash, *Proceedings of the Korea Society of Civil Engineer*, 1176-1181.
4. Cheong, S. H., Ahn, S. K., An, T. H., and Jeon, Y. S. (2013), The hydration heat characteristics of mock-up concrete by replacement of modified flyash, *Journal of the Korea Concrete Institute proceeding*, 25(2), 347-348.
5. Cheong, S. H., Ahn, S. K., Kang, H. J., An, T. H., and Jeon, Y. S. (2013), The characteristics of concrete compressive strength by replacement ratio of modified flyash, *Journal of the Korea Concrete Institute proceeding*, 25(1), 247-248.
6. Cheong, S. H., Ahn, S. K., Kang, H. J., An, T. H., and Jeon, Y. S. (2012), A study on characteristics of flyash by physical grinding, *Journal of the Korea Concrete Institute proceeding*, 24(2), 335-336.
7. Choi, Y. J., Kim, J. H., Jee, N. Y., and Kim, H. J. (1998), Study On The Rheological Properties of Cement Paste Using Fly Ash and Slag Powder, *Journal of Architectural Institute of Korea*, 14(6), 105-115.
8. Hong, S. G., Kim, D. Y., and Lee, D. S. (2013), Fundamental Properties and Hydration Characteristics of Mortar Based on MgO Added Industrial By-products, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 25(5), 565-572.
9. Jung, J. D. (2002), A Experimental study on Strength Development of Cement Mortar Using a Large Amount of Micro Grinding Fly-Ash, *Journal of Architectural Institute of Korea*, 18(9), 133-140.
10. Lee, Y. J., Shin, S. Y., and Kim, Y. S. (2013) A Study on the Compressive Strength Property of Mortar with Fly Ash using Water Eluted from Recycled Coarse Aggregates, *Journal of Architectural Institute of Korea*, 29(3), 89-96.
11. Lee, M. H., and Song, T. H. (2007), An Experimental Study on the Flexural Behavior of One-Way Concrete Slabs Using the Restorative Mortar and Crimped Wire Mesh, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 19(5), 569-575.
12. Lee, S. S., Song, H. Y., and Lee, S. M. (2009), An Experimental Study on the Influence of High Fineness Fly Ash and Water-Binder Ratio on Properties of Concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 21(1), 29-35.
13. Malhotra, V. M., and Mehta, P. K. (2002), High-Performance, High-volume Fly Ash Concrete: Materials, Mixture Proportioning, Properties, Construction Practice, and Case Histories, Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc., Ottawa, Canada. 13-30.
14. Park, I. Y., Park, M. S., Lim, N. K., and Jung, S. J. (2000), An Experimental Study on the Application & Quality Control of General Structure Concrete Intermixing Fly-ash, *Journal of Architectural Institute of Korea*, 16(8), 67-74.
15. Song, H. S., Lee, C. Y., and Min, C. S. (2006), Effects of Polymer in Properties of Pre mixed Type Mortar for Concrete Repair, *Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 10(4), 153-159.
16. Whang, M. K. (2008), A Study on the Physical Properties of High Ductile Concrete using PVA Fibers, Master's Thesis, Daejeon University, Daejeon, Korea.
17. Yang, K. H. (2014) Development of Unit System Comprising of Formwork with Height Above 4m and Low-Heat Concrete to Strengthen Export Competition of Nuclear Power Plant, Technical Report, Kyonggi University.

Received : 05/28/2015
Revised : 06/10/2015
Accepted : 06/17/2015

요 지

본 연구는 폴리머 기반 보수모르타르에 미분쇄된 플라이애시 치환율의 영향을 평가하였다. 주요변수는 양생온도와 미분쇄된 플라이애시의 치환율이다. 양생온도는 40℃, 20℃ 및 5℃로, 미분쇄된 플라이애시 치환율은 결합재 대비 0~35%로 변화하였다. 굳지 않은 모르타르에서는 플로우를, 굳은 모르타르에서는 재령별 압축강도, 응력-변형률 관계 및 탄성계수, 파괴계수를 측정하고, 주사전자현미경 및 엑스선회절기 분석을 수행하였다. 실험결과 보수모르타르의 플로우, 탄성계수 및 파괴계수는 미분쇄된 플라이애시 치환율 20~30%에서 가장 높은 성능을 발휘하였다. 또한 재령별 압축강도는 미분쇄된 플라이애시 치환율과 양생온도에 현저한 영향을 받았는데, 미분쇄된 플라이애시 치환율 20%에서 초기강도 발현율이 가장 높았다. ACI 209에서 제시하고 있는 콘크리트 재령별 압축강도예측모델에서 초기 및 장기재령 강도발현 계수는 미분쇄된 플라이애시 치환율과 양생온도의 함수로 일반화할 수 있었다. 미분쇄된 플라이애시가 첨가된 페이스트는 수화생성물을 나타내는 피크(peak)의 수와 강도(intensity)가 증가되고 플라이애시 입자주변에 CSH 겔이 형성되었다.

핵심 용어 : 미분쇄된 플라이애시, 보수모르타르, 폴리머, 역학적 특성, 강도발현계수