

하이볼륨 플라이애시 시멘트 페이스트의 수화 및 압축강도 특성

황철성¹, 문은진^{2*}

Hydration and Compressive Strength of High-volume Fly Ash Cement Paste

Chul-Sung Hwang¹, Eun-Jin Moon^{2*}

Abstract: Recently, researches on High-Volume Fly ash Cement(HVFC), which is replacing high portion of cement to fly ash, have been actively conducted to reduce CO₂ formation. Though HVFC has various advantages, low strength development in early ages is pointed out as the biggest problem in the application of fly ash. In order to overcome such limitations, this study investigated the hydration and compressive strength characteristics of HVFC paste depending on the fly ash content with the mixing ratio varying from 0 to 80 %. Experimental results show that the HVFC paste with low water-binder ratio can overcome the limitation of low compressive strength at early ages. Also, from the result of heat flow delay, 50 % of fly ash weight ratio was the critical point of the filler effect.

Keywords: HVFC, High-Volume Fly ash Cement, Heat of hydration, Compressive strength

1. 서 론

국내 시멘트 산업은 시멘트 제조 시 발생하는 CO₂를 감축하기 위해 CO₂발생의 주요 요인인 클링커 대신 시멘트 대체 재료 사용을 확대하기 위한 다양한 기술 개발을 위해 노력하고 있다. 특히 플라이애시는 화력발전소에서 연소과정 중 발생하는 부산물 중 하나로 낮은 수화열 및 우수한 내구성능을 발휘하기 때문에 시멘트 혼합재료로 널리 사용되고 있다.

최근 CO₂ 발생의 주요 요인인 시멘트 클링커를 대체하여 플라이애시를 다량 치환한 하이볼륨 플라이애시 시멘트(High-Volume Fly Ash Cement)가 많은 연구자들에 의해 주목받고 있다. HVFC는 CO₂를 다량 배출하는 시멘트의 사용량을 줄일 수 있고, 산업부산물인 플라이애시를 효과적으로 재활용할 수 있는 장점이 있다.

이처럼 HVFC의 경우 낮은 수화열에 의한 온도 상승 억제, 우수한 내구성, 환경부하 저감 등 다양한 장점이 있음에도 불구하고 기존 시멘트 콘크리트 배합에 비해 낮은 조기강도 발현 특성이 플라이애시를 다량으로 활용한 바인더의 현장적용에 있어서 가장 큰 문제로 지적되고 있다.

Sengul et al.은 플라이애시를 시멘트 대체재료로 다량 혼입할 경우, 혼입하지 않은 경우에 비해 28일 압축강도는 낮게 발현되었으나 56일, 120일 등 장기 압축강도는 더 높게 발현되는 결과를 확인하였다(Sengul et al., 2005). 이러한 현상은 수화 초기 단계에 자체적 반응은 하지 않지만, 충전 효과(filler effect)에 의해 시멘트 클링커의 수화 반응을 촉진시키는 플라이애시의 특성에 기인하는 것으로 알려져 있다(De Weerd et al., 2011; Lawrence et al., 2003). 이러한 낮은 조기강도 문제를 해결하기 위해, Cement Kiln Dust와 gypsum의 첨가량이 HVFAC의 조기강도 증진에 기여하는 효과에 대한 연구가 진행된 바 있다(Bondar et al., 2014).

HVFC는 OPC를 사용한 일반 콘크리트에 비해 플라이애시 사용량이 많기 때문에 플라이애시의 특성 및 혼입률에 의해 HVFC 물성이 좌우된다. 따라서, HVFC의 활용 확대를 위해서는 플라이애시의 혼입률이 HVFC의 역학적 특성에 미치는 영향에 대한 이해가 필요하며, 최적 배합비에 대한 제시가 필요하다.

이에 본 연구에서는 플라이애시 혼입률에 따른 HVFC 페이스트의 수화 및 조기강도 특성을 연구하고자 한다. 이를 위해 0~80%의 플라이애시 혼입률에 대해 응결, 압축강도, 미소수화열 및 화학수축 분석을 수행하였다.

¹정회원, 가천대학교 토목환경공학과 교수

²정회원, 한국건설생활환경시험연구원 주임연구원, 교신저자

*Corresponding author: ejmoon@kcl.re.kr

High-Tech Construction Materials Center, Korea Conformity Laboratories, 199, Gasan digital 1-ro, Geumcheon-gu, Seoul, 08503, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2017년 10월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 11월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

2. 재료 및 실험변수

2.1 재료

시멘트는 KS L 5201에 적합한 국내 S사에서 시판된 1종 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)를 사용하였으며, 분말도와 밀도는 각각 3,499 cm²/g, 3.13 g/cm³이었다. 시멘트 화학성분에 기초하여 Bogue식에 의한 C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF 성분의 계산 값은 각각 51.3%, 20.1%, 8.1%, 9.2%이다. 플라이애시는 KS L 5211에 적합한 국내 S 발전소에서 생산된 정제 플라이애시를 사용하였으며 분말도는 393 m²/kg, 비중은 2.7 g/cm³이다. 플라이애시는 화학성분상 ASTM C 618에 의한 Class F에 해당한다. OPC와 플라이애시의 화학조성은 Table 1과 같다.

OPC와 플라이애시의 입자 크기는 Fig. 1에 나타내었다. 실험에 사용된 플라이애시의 입자 크기는 0.15~282.06 μm의 범위에 있으며, 평균직경이 OPC의 25.3 μm보다 큰 것으로 나

타났다. OPC는 입자크기 33.0 μm에서 피크 값을 갖는 단종분포를 보이지만, 플라이애시의 경우 약 13~19 μm와 33~44 μm에서 2개의 피크 값을 갖는 양봉 분포를 보이고 있다. 이러한 플라이애시의 입자 크기 분포의 차이는 연료탄의 종류, 연소 온도 및 연소 시 산소 농도에 따라 크게 달라진다(Zhang et al., 2006).

2.2 배합 및 실험방법

본 연구에서는 실험결과의 명확한 비교를 위해 모든 페이스트 시험체는 중량 배합을 이용하여 제작하였다. 시멘트와 플라이애시의 균일한 혼합을 위하여 페이스트 배합전에 V-믹서를 이용해 혼합한 후 바인더로 사용하였다. 압축강도 측정을 위한 페이스트 시험체의 물-바인더비(w/b)는 각각 25%, 27%, 30%, 32%이며, 플라이애시 혼입률은 시멘트를 100% 사용한 기준으로 0%~64%까지 총 4단계로 하였다. 각 재료는 중량비로 계량 후 모르타르 믹서기로 혼합하여 40×40×160 mm 크기의 시험체로 제작하였다. 페이스트 시험체의 다짐은 Zwick Roell사 jolting table을 이용하였다. 페이스트 성형 후 수분증발을 최소화하기 위하여 몰드 윗면에 유리판(glass plate)을 놓았다. 페이스트 양생은 최초 24시간동안 항온항습 챔버(Temperature: 20°C±1°C, Relative humidity: less than 90%)에서 실시하였으며, 이후 압축강도 측정일까지 온도 20°C±1°C 조건에서 수중 양생하였다.

페이스트의 응결시간은 ISO 9597 ‘비카트 침에 의한 수경성 시멘트의 응결시간 시험 방법’에 따라 ACMEI사 PA8 automatic setting time tester를 사용하여 시멘트를 100% 사용한 시험체 기준으로 플라이애시 혼입률을 총 8수준(0~80wt%)로 나누어 각각 초결과 종결 시간을 측정하였다.

페이스트의 압축강도 측정은 ISO 679 ‘시멘트 강도 시험 방법’에 따라 각 재령(3일, 7일, 28일)에 실시하였다. 재령별로 3개 시험체의 강도를 측정하고, 그 평균을 결과 값으로 사용하였다.

바인더의 미소수화열측정을 위해 사용된 등온열량계는 TAM Air isothermal calorimeter with eight-channel operating in the milliwatt range이고, 각 실험 변수별 배합비에 따라 바인더와 증류수를 혼합하여 페이스트를 제작하였다. 페이스트 혼합 후 약 4 g의 페이스트를 20 ml glass ampule에 넣고 등온열량계에 투입하였다. 등온열량계의 온도 조건은 23°C로 설정하고, 7일간 측정하였다.

화학수축은 ASTM C 1608-07 ‘Chemical shrinkage of hydraulic cement paste’에 따라 용적변화 측정방법을 사용하였다. 먼저 용적이 50 ml인 빈 삼각플라스크의 무게를 최소 눈금이 0.1 g인 저울로 측정하여 그 값을 W1로 기록한다. 다음 삼각플라스크에 시멘트 페이스트를 약 2~3 cm 두께로 넣고 잘 흔들어

Table 1 Chemical compositions and physical properties of raw materials

	Chemical Compositions(%)	
	OPC	Fly ash
SiO ₂	19.8	54.7
Al ₂ O ₃	4.5	21.7
Fe ₂ O ₃	3.57	7.83
CaO	61.6	5.8
MgO	3.01	2.13
K ₂ O	1.06	1.08
Na ₂ O	0.21	0.65
SO ₃	2.1	0.43
LOI	1.2	3.6
Sum	97.05	97.92

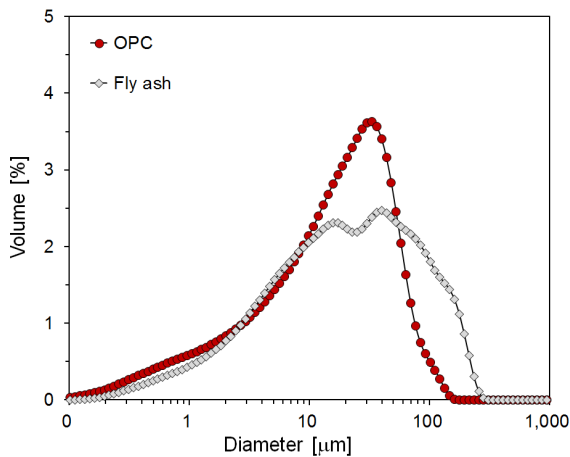


Fig. 1 Particle size distribution

서 페이스트 내의 공기를 최대한 방출하고, 그 무게를 측정하여 W2로 기록한다. 피펫을 관통한 고무마개로 삼각플라스크를 막고 삼각플라스크 입구와 피펫 및 고무마개의 접촉부를 방수성 테이프로 잘 밀봉한 다음, 주사로 피펫의 위 끝으로 물을 넣은 후 증발 방지를 위해 파라핀 오일을 기록 시작점까지 도달하게 한 다음 그 눈금을 기록한다. 삼각플라스크를 온도 $24\pm 2^\circ\text{C}$, 상대습도 $50\pm 5\%$ 인 항온 항습실에 거치하고 측정을 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 응결

Table 2에 시험체의 응결 실험 결과를 나타내었다. 플라이애시를 혼입하지 않은 시험체의 경우 초결 215분, 종결 290분으로 가장 빨랐으며, 플라이애시를 중량비 80%로 혼입한 Fly ash 80%의 경우 초결 509분, 종결 670분으로 가장 늦은 응결 시간을 보였다.

Fig. 2는 시간에 따른 침입 깊이 결과를 나타낸다. Fig. 2(a)와 같이, 플라이애시를 중량비 40%로 혼입한 Fly ash 40%까지는 모두 비슷한 경화속도를 보였다. 한편, Fig. 2(b)와 같이 중량비 50%를 혼입한 Fly ash 50%부터 점점 응결시간이 증가하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 플라이애시가 초기 수화 반응 단계에 자체적으로 반응은 하지 않지만, 충전 효과(filler effect)에 의해 시멘트클링커의 수화 반응을 촉진시키는 ‘Seeding Effect’이론과 관계가 있다고 판단된다. 하지만 플라이애시 중량비 50% 이상을 혼입한 경우 초기 수화 반응을 할 수 있는 시멘트의 절대량이 부족하여 그림에서 보는 바와 같이 초결과 종결이 크게 증가하였다.

3.2 압축강도

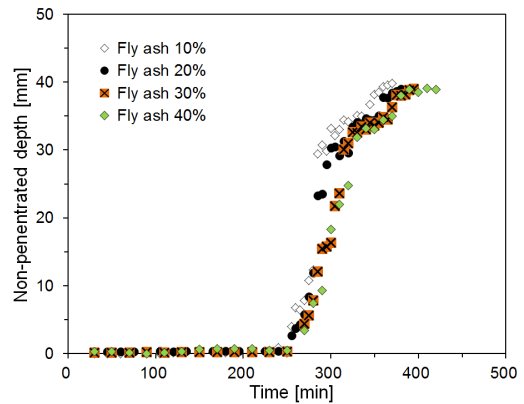
재령별(3일, 7일, 28일) 페이스트 압축강도 측정 결과는 Fig. 3과 같다. 물-바인더비 변화에 따른 압축강도 영향을 분석하였다. 플라이애시를 혼입하지 않은 시험체의 경우 물-바인더비 25%에서 3일 강도 65 MPa, 7일 강도 73 MPa, 28일 강도 89 MPa로 나타났고, 플라이애시 중량비 65%를 혼입한 시험체의 경우 3일 강도 15 MPa, 7일 강도 20 MPa, 28일 강도 30 MPa를 나타냈다. 이와 같이 낮은 조기강도 발현 특성(3일 강도 15 MPa)이 플라이애시를 다량으로 활용한 바인더의 현장 적용에 있어서 가장 큰 문제로 지적되고 있다. 또한, 플라이애시의 혼입률과 물-바인더비가 증가할수록 모든 재령에서 압축강도가 감소하는 것을 보였으며, 혼입률 35% 시험체까지 소폭 감소하다가 혼입률 50% 시험체부터 급격하게 감소하는 것을 보였다. 이와 같이 플라이애시 혼입률이 증가할수록 모

든 재령에서 강도저하가 발생하며 강도발현 속도 또한 지연되는 것으로 나타났다.

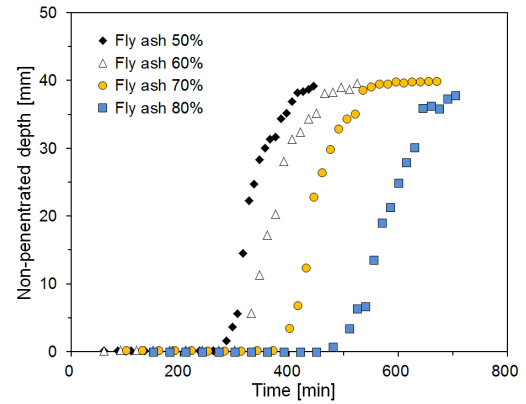
물-바인더비 25% 배합에서 혼입률 50%인 시험체의 경우, 3일 압축강도와 7일 압축강도는 각각 23 MPa, 36 MPa로 28일 압축강도인 58 MPa의 각각 39.7%, 62.0%의 발현 수준을 보였다. 이러한 결과는 초기 수화 반응에 자체적으로 반응하지

Table 2 Setting times of HVFA pastes

Replacement of Fly ash	Setting time(min)	
	Initial	Final
Plain	215	290
Fly ash 10%	254	319
Fly ash 20%	260	335
Fly ash 30%	267	363
Fly ash 40%	262	359
Fly ash 50%	285	395
Fly ash 60%	308	442
Fly ash 70%	396	537
Fly ash 80%	509	670



(a) Fly ash 10~40%



(b) Fly-ash 50~80%

Fig. 2 Non-penetrated depth of HVFC pastes

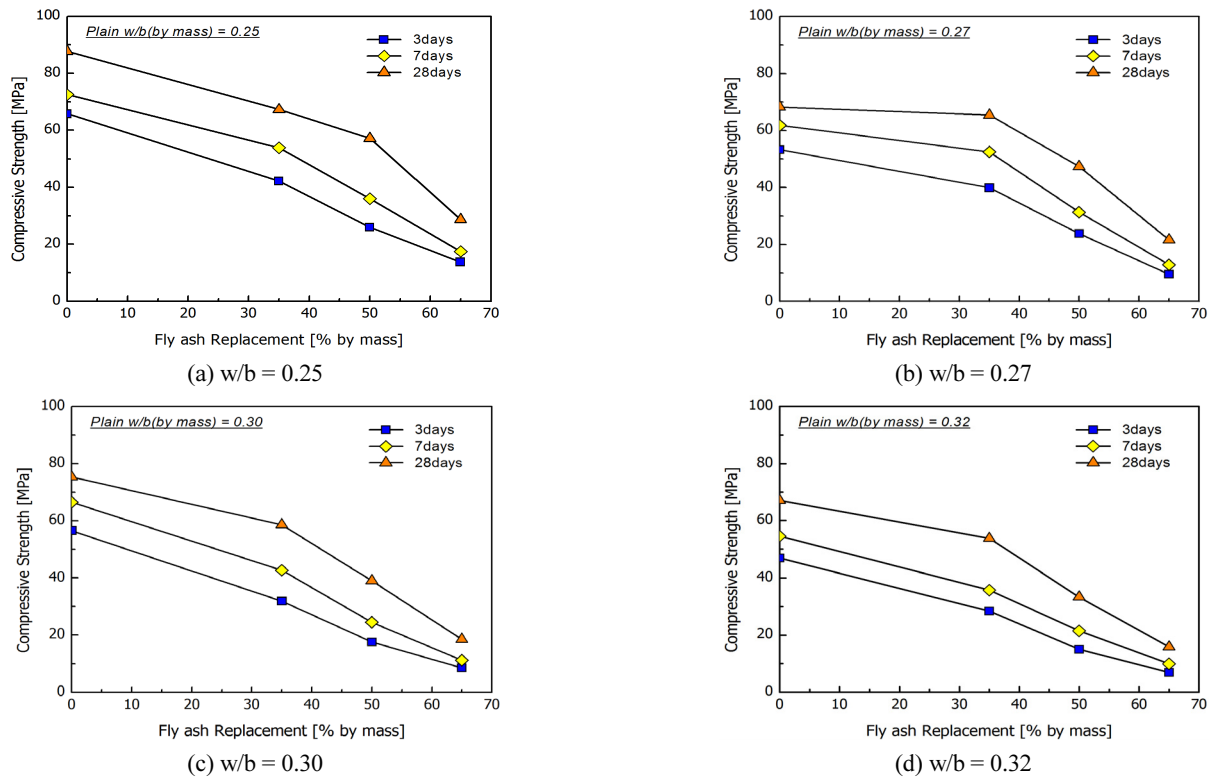


Fig. 3 Compressive strengths of HVFC pastes

않은 플라이애시가 시멘트 수화과정의 생성물인 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 플라이애시의 실리케이트(규산염)와의 반응에 의해 규산칼슘수화물(C-S-H) 및 기타시멘트질 화합물, 즉 칼슘알루미늄산염 수화물(C_4AH_{13} , C_2AH_8), 규산알루미늄산칼슘 수화물(C_2ASH , C_3AS_3 - C_3AH)을 형성하는 포졸란 반응에 의해 강도가 증진된 것으로 판단된다. 포졸란 반응에 의해 추가적으로 생성된 수화물은 콘크리트의 공극 크기를 감소시키며, 미세구조를 더욱 치밀하게 하여 콘크리트의 불투수성과 내구성을 향상시킨다(Moon et al., 2016). 모든 물-바인더비 조건에서 유사한 결과 값을 나타내며, 혼입률 65%인 시험체의 경우에는 포졸란 반응에 의한 강도 증진 효과가 미비한 결과를 보였다.

3.3 미소수화열

Fig. 4는 바인더 무게에 정규화된 페이스트의 누적 발열량을 나타내고 있다. 플라이애시의 혼입률이 증가할수록 시멘트에 비해 더욱 길어지고 증가된 유도기 때문에 발열 곡선의 기울기가 낮은 결과를 보였다. 이는 3.1절의 플라이애시 혼입에 따른 응결 지연 결과와 유사한 경향을 나타낸다. 플라이애시의 혼입률이 증가할수록 초기에 반응하는 OPC의 양이 적어 수화 반응 속도가 낮게 나타난 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 OPC 수화에 있어 플라이애시의 지연 효과를 연구한 다른 연구에서도 비슷한 경향을 살펴볼 수 있다(Baert et al.,

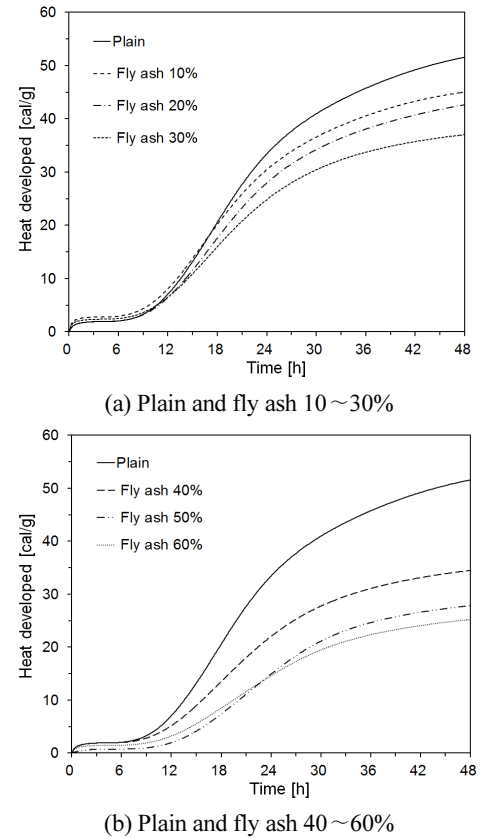
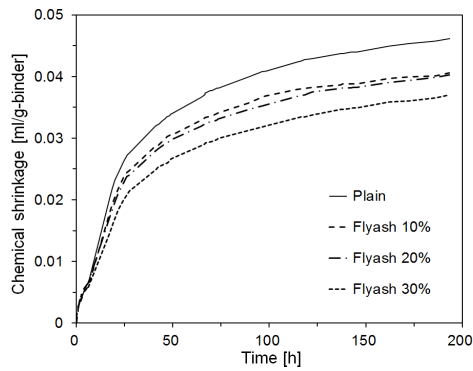
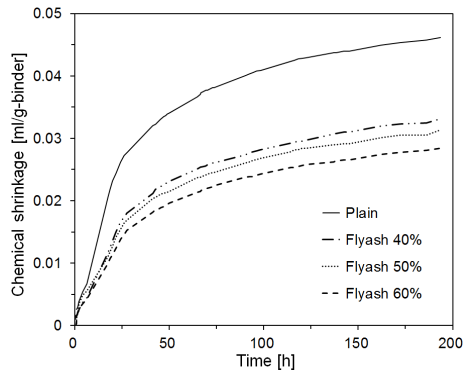


Fig. 4 Normalized cumulated heats of HVFC pastes.



(a) Plain and fly ash 10~30%



(b) Plain and fly ash 40~60%

Fig. 5 Chemical shrinkage by binder weight

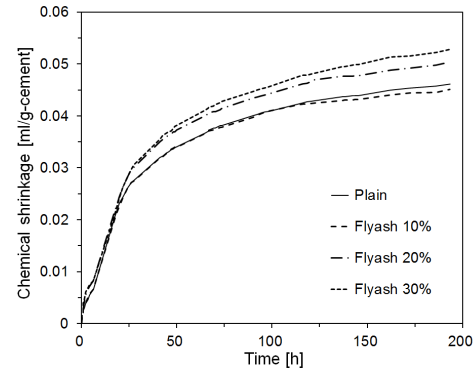
2008; Langan et al., 2002; Nocun-Wczelik, 2001; Rahhal and Talero, 2004).

Fly ash 30%의 경우, 48시간 이후 발열량이 34 cal/g으로 시멘트의 발열량인 48 cal/g의 70% 수준을 보였으며, Fly ash 60% 시험체는 20 cal/g으로 41% 수준의 발열량을 보였다.

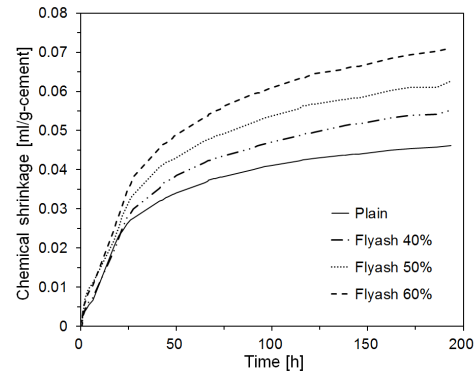
3.4 화학수축

Fig. 5는 바인더 중량에 따른 화학수축에 의한 부피 변화를 보여준다. 모든 시험체가 초기 24시간까지 급격한 부피 변화를 보이다가 72시간 후부터 완만한 곡선을 나타내며 부피 변화가 조금씩 증가하는 결과를 보였다. 시멘트를 100% 사용한 시험체가 0.045 ml/g으로 가장 큰 부피 변화를 보였으며, Fly ash 60% 시험체가 0.025 ml/g으로 가장 낮은 부피 변화를 보였다. Fly ash 60% 시험체의 부피 변화는 시멘트 시험체의 56% 수준의 변화량을 보였다. 이 결과로 플라이애시의 혼입률이 증가할수록 화학 수축량은 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 단위 시멘트 중량에 따른 화학수축에 의한 부피 변화를 나타낸 그래프이다. 이 결과는 앞서 Fig. 5 그래프와 상이한 결과를 나타내고 있다. Fly ash 60% 시험체의 부피 변화가 0.065 ml/g으로 가장 크게 나타났다. 시멘트 시험체의 경우



(a) Plain and fly ash 10~30%



(b) Plain and fly ash 40~60%

Fig. 6 Chemical shrinkage by cement weight

0.042 ml/g으로 Fly ash 60% 시험체의 65% 수준의 변화량을 보였다. 이것은 앞서 응결시간 결과에서 언급한 충전 효과 (Seeding Effect)와 관계가 있다고 판단된다. 플라이애시 자체는 초기 수화 반응에 영향을 미치지 않지만, 충전 효과로 인해 플라이애시 표면에 수화 생성물의 추가적인 핵 생성처 (nucleation site)를 제공하며, 물-바인더비가 고정되어있을 때 유효 물-시멘트비의 증가로 수화물 성장에 대한 더 많은 공간을 제공하여 시멘트 수화가 촉진된다(Baert et al., 2008; Bentz, 2006; Lam et al., 2000).

플라이애시는 초기 수화 반응에 영향을 미치지 않고 7일 이후 포졸란 반응이 생성되기 때문에(Moon et al., 2016) 바인더 중량에 따른 결과를 봤을 때는 시멘트 수화 반응을 억제하는 것과 같은 결과를 보이지만, 실제로는 플라이애시의 혼입률이 증가할수록 시멘트의 수화 반응은 촉진되는 것으로 판단된다.

Fig. 7는 바인더 중량에 따른 화학수축 및 누적발열량의 관계를 보여준다. 수화 초기를 제외한 나머지 구간에서, 화학수축에 의한 시험체의 부피 변화와 수화 반응에 의한 발열량은 선형관계가 나타났다. 이처럼, 화학수축 및 발열량의 상관관계가 수화 반응 분석의 척도가 될 수 있을 것으로 판단된다.

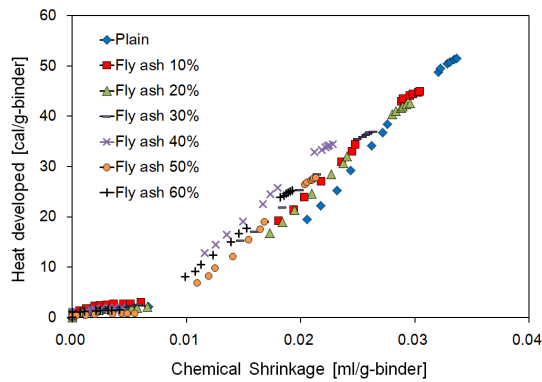


Fig. 7 Correlation of chemical shrinkage and heat release

3. 결론

본 연구에서는 플라이애시 혼입률에 따른 HVFA 페이스트의 수화 및 압축강도 특성을 파악하기 위해, 플라이애시 혼입률 0~80%의 배합을 이용하여 실험을 수행하였으며, 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 플라이애시 중량비 40%를 혼입한 Fly ash 40%까지는 모두 비슷한 경화속도를 보였으나, 중량비 50%를 혼입한 Fly ash 50%부터 응결시간이 점차 증가하는 경향을 보아 플라이애시 중량비 50%는 충전 효과의 임계점으로 판단된다.
- 2) 플라이애시 혼입률이 증가할수록 모든 재령에서 강도저하가 발생하며 강도발현 속도 또한 지연되었으며, 물-바인더비가 증가할수록 압축강도가 감소하는 것으로 나타났다.
- 3) 누적발열량의 경우 플라이애시의 혼입률이 증가할수록 시멘트에 비해 더욱 길어지고 증가된 유도기 때문에 발열곡선의 기울기가 낮은 결과를 보였다.
- 4) 바인더 중량에 따른 화학수축에 의한 부피 변화는 플라이애시의 혼입률이 증가할수록 화학 수축량은 감소하였다. 반면, 단위 시멘트 중량에 따른 화학수축에 의한 부피 변화는 플라이애시의 혼입률이 증가할수록 시멘트의 수화 반응이 촉진되고 화학 수축량이 증가하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(17CTAP-C129778-01)에 의해 수행되었습니다.

References

- Baert, G., Hoste, S., De Schutter, G., and De Belie, N. (2008), Reactivity of fly ash in cement paste studied by means of thermogravimetry and isothermal calorimetry, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 94(2), 485-492.
- Bentz, D. P. (2006), Influence of water-to-cement ratio on hydration kinetics: Simple models based on spatial considerations, *Cement and Concrete Research*, 36(2), 238-244.
- Dali Bondar and Eoin Coakley. (2014), Use of gypsum and CKD to enhance early age strength of High Volume Fly Ash (HVFA) pastes, *Construction and Building Materials*, 71, 93-108.
- De Weerd, K., Haha, M. Ben, Le Saout, G., Kjellsen, K.O., Justnes, H., and Lothenbach, B. (2011), Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash, *Cement and Concrete Research*, 41(3), 279-291.
- Fraay, A.L.A., Bijen, J.M., and Dehaan, Y.M. (1989), The reaction of fly ash in concrete - a critical examination, *Cement and Concrete Research*, 19(2), 235-246.
- Hou, P.-k., Kawashima, S., Wang, K.-j., Corr, D. J., Qian, J.-S., and Shah, S. P. (2013), Effects of colloidal nanosilica on rheological and mechanical properties of fly ash-cement mortar, *Cement and Concrete Research*, 35(1), 12-22.
- Lam, L., Wong, Y.L., and Poon, C.S. (2000), Degree of hydration and gel/space ratio of high-volume fly ash/cement systems, *Cement and Concrete Research*, 30(1), 747-756.
- Langan, B.W., Weng, K., and Ward, M. A. (2002), Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland cement, *Cement and Concrete Research*, 32(7), 1045-1051.
- Lawrence, P., Cyr, M., and Ringot, E. (2003), Mineral admixtures in mortars - Effect of inert materials on short-term hydration, *Cement and Concrete Research*, 33(12), 1939-1947.
- Moon, G.D., Oh, S., and Choi, Y.C. (2016), Effects of the physicochemical properties of fly ash on the compressive strength of high-volume fly ash mortar, *Construction and Building Materials*, 124, 1072-1080.
- Nocun-Wczelik, W. (2001), Heat evolution in hydrated cementitious systems admixed with fly ash, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 65(2), 613-619.
- Rahhal, V., and Talero, R. (2004), Influence of two different fly ashes on the hydration of portland cements. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 78(1), 191-205.
- Sengul, O., Tasdemir, C., and Tasdemir, M. A., (2005), Mechanical properties and rapid chloride permeability of concretes with Ground fly ash, *ACI Materials Journal*, 102(6), 474-482.
- Yilmaz, B. and Olgun, A. (2008), Studies on cement and mortar containing low-calcium fly ash, limestone, and dolomitic limestone, *Cement and Concrete Composites*, 30(3), 194-201.
- Zhang, L., Ninomiya, Y., and Yamashita, T. (2006), Formation of submicron particle matter (PM1) during coal combustion and influence of reaction temperature, *Fuel*, 85(10-11), 1446-1457.

Received : 07/28/2017

Revised : 08/08/2017

Accepted : 08/14/2017

요 지 : 국내 시멘트 산업은 시멘트 제조 시 발생하는 CO₂를 감축하기 위해 CO₂발생의 주요 요인인 클링커 대신 시멘트 대체재료 사용을 확대하기 위한 다양한 기술 개발을 위해 노력하고 있다. 이에, 최근 플라이애시를 다량 치환한 하이볼륨 플라이애시 시멘트(HVFC)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만, 플라이애시의 다양한 장점에도 불구하고 낮은 조기강도 발현 특성이 플라이애시를 다량으로 활용한 바인더의 현장적용에 있어서 가장 큰 문제로 지적되고 있다. 본 연구는 이러한 한계를 극복하고자 플라이애시 혼입률에 따른 HVFC 페이스트의 수화 및 압축강도 특성을 파악하기 위해, 플라이애시 혼입률 0~80%의 배합을 이용하여 실험을 수행하였다. 실험결과 낮은 물-바인더 비에 의한 HVFC 페이스트 배합은 초기 재령에서의 낮은 압축강도의 한계점을 극복할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 중량비의 50% 이상이 플라이애시로 치환된 페이스트의 응결시간이 증가하는 경향을 보아, 플라이애시 중량비 50%는 충전 효과의 임계점으로 판단된다.

핵심용어 : HVFC, 하이볼륨 플라이애시 시멘트, 미소수화열, 압축강도
