

단위수량 저감에 따른 하이볼륨 플라이애시 콘크리트의 강도 발현 특성

The Properties of Strength Development of High Volume Fly Ash Concrete with Reduction of Unit Water Content

최연왕^{1*} · 박만석¹ · 최병걸¹ · 오성록¹

Yun-Wang Choi^{1*} · Man-Seok Park¹ · Byung-Keol Choi¹ · Sung-Rok Oh¹

(Received February 28, 2014 / Revised March 20, 2014 / Accepted March 25, 2014)

In this study, strength development properties of high volume fly ash concrete was evaluated through compressive strength of concrete with reduction of unit water content. And concrete specimens were prepared according to target strength 3 level and variation of unit water content.

As a result, the improved fluidity were obtained as a result of the ball bearing action of the spherical, the electrostatic repulsion and the particle size distribution of fly ash particles in case of using more than 50% fly ash. Through this, the mixture of fly ash has been shown to reduce the amount of water required in concrete. Also, the early strength of high volume fly ash concrete with reduction of unit water content was improved more about 66% than general concrete mixture.

키워드 : 하이볼륨 플라이애시, 조기강도, 단위수량, 강도발현

Keywords : High Volume Fly Ash, Early Strength, Unit Water Content, Strength Development

1. 서론

지구 기후변화를 유발하는 대기 중의 온실가스 농도는 산업화의 진행에 따라 지속적으로 증가하는 경향이 나타나고 있으며, 최근 발표된 IPCC 5차보고서에 따르면 현재 추세로 온실가스의 배출이 지속될 경우 2100년 지구 평균 기온은 3.7도 상승되며, 해수면은 630mm 상승할 것으로 전망되고 있다(IPCC, 2013). 또한, 한반도의 경우 산간지역을 제외한 남한 대부분의 지역과 황해도 연안까지 아열대 기후구가 될 것으로 예측되고 있으며(KMA, 2012), 우리나라는 이에 대한 대책으로써 2020년까지 국가 온실가스 배출 전망치 대비 30% 감축목표를 수립하여 전 산업부문에 걸쳐 온실가스 감축을 위하여 노력하고 있는 실정이다. 특히, 이산화탄소의 대량 배출원인 시멘트를 주원료로 사용하고 있는 콘크리트 산업의 경우 시멘트 대체재로서 다양한 산업부산물의 활용을 통한 온실가스 감축 방안이 제안되고 있으며, 최근 이러한 측면에서 화력발전소에서 미분탄 연소 후 발생하는 플라이애시를 콘크리트용 혼화재

로써 대량 활용하기 위한 연구에 관심이 집중되고 있다.

국외의 경우 1980년대 Malhotra에 의하여 플라이애시를 50% 이상 혼합한 High Volume Fly Ash Concrete(이하 HVFAC로 약함)가 개발된 이후 (P.Kumar Mehta, 2004) 다양한 구조물에 HVFAC의 현장적용이 이루어졌으며, 성능 중심형 설계 개념을 도입하고 있는 유럽에서는 EN 197의 CEM IV에 플라이애시 혼합물을 36~55% 까지 규정함으로써 플라이애시의 활용범위를 넓히고 있다.

한편, 국내의 경우 HVFAC에 대한 연구는 플라이애시 혼합물 50%에 대한 연구가 수행되었지만 대부분 단열온도상승 등 매스콘크리트의 수화열 저감용으로 한정되어 있으며, HVFAC의 경우 플라이애시 혼합률이 높을수록 콘크리트의 조기강도가 감소하는 경향이 나타남에 따라 현장 적용 시 공기단축 등에 문제점이 있어 적용 실적은 전무한 상황이다. 이에 따라 HVFAC의 조기강도 확보 기술이 요구되고 있으며, 조기강도 확보를 위한 방법으로 플라이애시의 분말도 향상, 콘크리트 양생시 고온양생 및 알칼리 활성화제 첨가에 따른 반응성 향상 등의 방법이 제안되고 있지만 플라이

* Corresponding author E-mail: crete77@semyung.ac.kr

¹세명대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Semyung University, Chungcheongbuk-do, 390-711, Korea)

애시의 분말도 향상은 2차적인 가공처리를 필요로 하며, 고온양생에 의한 방법은 현장 적용에 어려움이 있다. 또한, 알칼리 활성화제의 사용은 급격한 유동성 저하 및 초기 급결 현상으로 인한 작업성 확보의 어려움, 수축발생 및 내구성 저하 등의 문제점이 발생하여 실용화가 어려운 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 온실가스 감축을 위한 시멘트 대체재로서 플라이애시를 50% 이상 대량 활용한 HVFAC를 제조하였으며, HVFAC의 초기강도 확보를 위하여 상온에서 알칼리 활성화제의 사용 없이 단위수량 저감에 따른 HVFAC의 강도발현 특성을 평가하였다.

2. 실험 개요

2.1 사용재료

2.1.1 시멘트 및 플라이애시

시멘트는 밀도 3,15g/cm³ 및 분말도 3,540cm²/g의 보통포틀랜드시멘트(이하 OPC로 약함)를 사용하였으며, 플라이애시(이하 FA로 약함)는 밀도 2,20g/cm³, 분말도 3,480cm²/g 및 미연소탄소분 3%이하의 FA를 사용하였다. OPC 및 FA의 화학성분 및 물리적 성질은 Table 1과 같다.

2.1.2 골재

잔골재는 낙동강산 강모래(이하 S로 약함)를 사용하였으며, 굵은골재는 굵은골재 최대치수(이하 Gmax로 약함) 20mm인 화강암질 부순골재(이하 G로 약함)를 사용하였다. S 및 G의 물리적 성질은 Table 2와 같다.

2.1.3 화학혼화제

화학 혼화제는 HVFAC의 유동성 확보 및 공기량 조절을 위하여

국내 H사의 폴리칼본산계 고성능 감수제(이하 SP로 약함) 및 공기연행제(이하 AE로 약함)를 사용하였다.

2.2 콘크리트 배합

단위수량 저감에 따른 HVFAC의 강도 발현 특성을 평가하기 위하여 FA를 0% 혼합한 Plain 배합(A, D 및 G)과 FA를 중량비 50% 이상 혼합한 일반적인 단위수량의 HVFAC 배합(B, E 및 H) 및 단위수량을 저감한 HVFAC 배합(C, F 및 I)을 제조하였으며, 목표 슬럼프 150±20mm 및 목표 공기량 4.5±1.5%를 만족하도록 콘크리트 배합을 실시하였다. 또한, HVFAC의 혼합방법은 1차로 잔골재와 시멘트를 투입하여 30초 동안 견비빔을 한 후 2차로 물, 감수제 및 AE제를 투입하고 1분 동안 혼합한 후, 다시 굵은골재를

Table 1. Chemical compositions and physical properties of OPC and FA

Type	OPC	FA
CaO (%)	61.60	6.49
SiO ₂ (%)	19.80	48.30
Al ₂ O ₃ (%)	4.50	25.50
MgO (%)	3.01	1.67
Fe ₂ O ₃ (%)	3.57	8.50
SO ₃ (%)	2.10	0.40
L.O.I (%)	1.20	3.80
Surface area (cm ² /g)	3,450	3,480
Density (g/cm ³)	3.15	2.20

Table 2. Physical properties of aggregates

Type	Gmax (mm)	Density (g/cm ³)	Absorption (%)	F.M.	Unit Weight (kg/m ³)
S	-	2.58	1.37	2.57	1,603
G	20	2.68	0.77	6.78	1,601

Table 3. The Mix Proportions of HVFAC

FA/(OPC+FA) (%)	Strength Level	No.	W/B (%)	Unit Mass (kg/m ³)				
				W	OPC	FA	S	G
0	40 MPa	A	35	165	471	0	681	1009
		B		165	212	259	653	968
		C	30	115	173	211	815	1035
0	30 MPa	D	50	175	350	0	710	1057
		E		175	158	193	682	1012
		F	35	120	154	189	816	1036
0	20 MPa	G	52	185	354	0	804	941
		H		185	177	177	771	896
		I	40	125	156	156	827	1050

투입하고 1분 30초간 혼합하여 콘크리트를 제조하였다. 콘크리트 배합은 Table 3과 같다.

2.3 실험방법

2.3.1 플라이애시의 품질 시험

FA 혼합이 콘크리트의 단위수량 저감에 미치는 영향을 알아보기 위하여 제타전위, 입형, 입도분석 등의 FA 품질 특성 평가를 실시하였다.

FA의 제타전위를 측정하기 위하여 Beckman Coulter사의 Delsa nano C로 측정하였으며, 이 때 사용된 시료는 Hallimond tube 실험을 위하여 FA 일부를 마노절구(agate mortar)로 미분쇄한 후, 5 μ m 이하의 입자만을 사용하였다. 또한, 모든 제타전위는 증류수(distilled water)에 NaCl을 지지전해질(supporting electrolyte)로 첨가한 1.0 \times 10⁻²M NaCl 수용액을 사용하여 측정하였으며, pH는 실험 종료 후 측정된 값을 취하였다.

또한, FA의 입도분석을 위하여 MALVERN사의 Mas -tersizer를 사용하여 입도분석을 실시하였으며, FA의 입형을 촬영하기 위하여 JEOLFE-SEM JSM-6700F를 사용하여 입형을 분석하였다.

2.3.2 굳지 않은 콘크리트 시험

HVFAC의 유동성 평가를 위하여 KS F 2402에 준하여 슬럼프 시험을 실시하였으며, 공기량 평가를 위하여 KS F 2421에 준하여 공기량 시험을 실시하였다.

2.3.3 압축강도 시험

시험용 공시체는 ϕ 100 \times 200mm 원주형 몰드를 사용하였으며, 다짐봉을 사용하여 KS F 2403 콘크리트 강도 시험용 공시체 제작 방법에 따라 다짐하여 제작하였다. 24시간 후 몰드를 탈형하여 소정의 재령까지 20 \pm 3 $^{\circ}$ C 수조에 침지하여 수중 양생하였으며, 압축 강도 시험은 재령 3, 7 및 28일에 KS F 2405에 준하여 실시하였다.

3. 실험결과에 대한 고찰

3.1 플라이애시 품질특성 평가

3.1.1 제타전위

제타전위는 입자간의 분산성을 나타낼 수 있는 지표로서, 입자 사이의 반발력은 제타전위에 의하여 측정될 수 있으며 제타전위의 절대값 증가에 따라 입자의 반발력은 증가된다. FA의 제타전위값

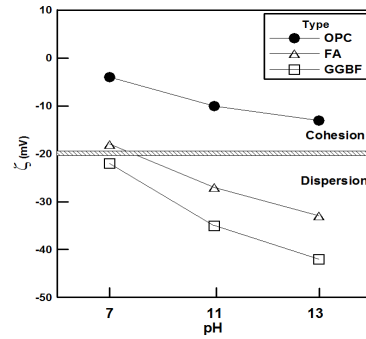


Fig. 1. The Zeta-potential of OPC and Mineral admixture

비교를 위하여 pH 변화에 따른 OPC, FA 및 고로슬래그(이하 GGBF로 약함)의 제타전위 측정값을 나타낸 것이 Fig. 1이다. Fig. 1의 결과, pH 변화에 따른 OPC, FA 및 GGBF의 제타전위 값은 pH 증가에 따라 증가하는 경향이 나타났다. 또한, pH 11에서 제타전위 값은 각각 -10mV, -27mV 및 -35mV로 측정되었으며, FA의 경우 OPC보다 제타전위가 2.7배 높게 나타났다. 이러한 결과를 통하여 FA를 콘크리트 내에 혼합함에 따라 플라이애시 입자(-)들은 반대로 대전한 시멘트 입자(+)에 흡착하고 시멘트 입자들 사이에 응집이 일어나지 않도록 함으로써 시멘트 입자들이 더욱 효과적으로 분산되어 유동성 향상에 기여하는 것으로 판단된다.

3.1.2 입도분포

OPC 및 FA의 입도 분포 곡선을 나타낸 것이 Fig. 2이다. Fig. 2의 결과, OPC에 대한 FA 혼합률 증가에 따라 입도분포 범위가 넓어지는 것으로 나타났으며, 이를 보다

정량적으로 평가하기 위하여 입자의 입도분포를 평가하는 Rosin-Rammler 분포함수에서(Lee, S.H et.al, 2003) 입도 분포 간격을 확인할 수 있는 입경지수 n값을 계산한 결과, OPC 및 FA의 입경지수 n값은 각각 1.15 및 1.08로 나타났다. 입경지수 n 값이 클수록 입도분포 간격은 좁아지며, n값이 작을수록 입도분포 간격이 넓어지는 것으로 FA 혼합률 증가에 따라 입도분포간격이 넓어지는 것과 일치하였다. 이러한 결과를 통하여 FA 혼합이 OPC의 입도를 개선하여 유동성 향상에 기여하는 것으로 판단된다.

3.1.3 입형

OPC 및 FA의 입형을 나타낸 것이 Fig. 3이다. Fig. 3의 결과, OPC의 경우 각기진 형태의 입형을 나타내었으며, FA의 경우 둥근 형태의 입형이 나타났다. 일반적으로 FA 경우 구형의 입형을 가지고 있으므로 콘크리트 내에서 볼-베어링 역할을 하기 때문에 유동

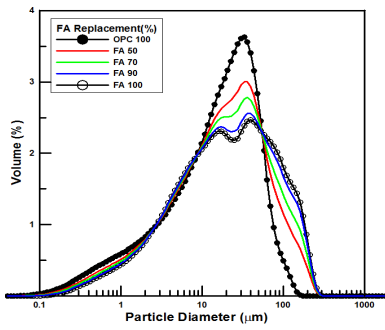


Fig. 2. The Particle size distribution with the mixing of Fly Ash

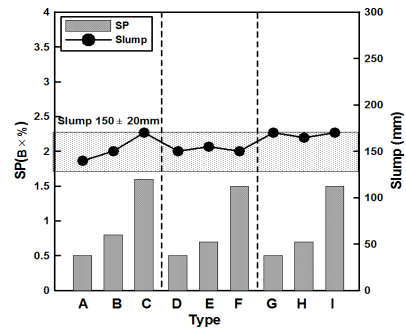
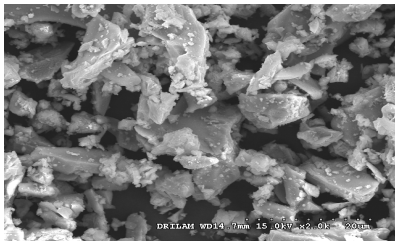
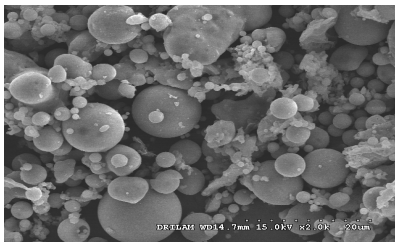


Fig. 4. The Slump of HVFAC



(a) OPC



(b) FA

Fig. 3. The grain shape of OPC and FA

성 향상에 기여하는 것으로 알려져 있다.

이상의 결과를 통하여 HVFAC의 경우 FA의 높은 제타전위값, 구형의 입형 및 입도개선 효과를 통하여 FA 혼합에 따라 유동성 개선 효과가 있을 것으로 판단되며, 이러한 효과 및 고성능 감수제의 사용으로 단위수량을 저감한 HVFAC 제조가 가능 할 것으로 판단된다.

3.2 굳지 않은 콘크리트 특성 평가

3.2.1 슬럼프

HVFAC의 목표 슬럼프 150±20mm를 만족시키기 위한 SP제 사용량을 나타낸 것이 Fig. 4이다. Fig. 4의 결과 Plain 콘크리트의 경우, SP 사용량이 0.5% 범위에서 목표 슬럼프를 만족하였으며, 일반적인 단위수량의 HVFAC의 경우, 약 0.7~0.8% 범위에서 목표 슬럼프를 만족하였다. 또한, 단위수량을 저감한 HVFAC의 경우 약 1.5~1.6% 범위에서 목표 슬럼프를 만족하였다. 동일한 물/결합

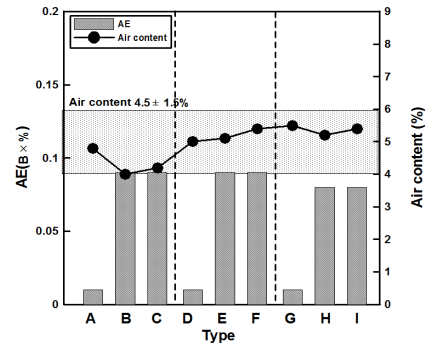


Fig. 5. The Air content of HVFAC

재비 및 단위수량에서 FA 혼합에 따라 SP제 사용량이 증가한 원인은 FA의 제타전위, 입형, 입도분포 개선 등의 효과로 인하여 유동성 향상 효과(P.Kumar Mehta, 2004)가 있는 것으로 알려져 있지만 FA를 중량비로 혼합한 HVFAC 배합의 경우 결합재의 절대용적이 약 23% 증가함에 따라 SP제 사용량이 증가한 것으로 판단된다.

3.2.2 공기량

HVFAC의 목표 공기량 4.5±1.5%를 만족시키는 AE제 사용량을 나타낸 것이 Fig. 5이다. Fig. 5의 결과, Plain 콘크리트의 경우 AE제 사용량이 0.01% 범위에서 목표 공기량을 만족하였으며, HVFAC의 경우 모든 배합에서 AE제 사용량은 Plain 배합과 비교하여 약 8~9배 증가하는 것으로 나타났다. 또한, FA의 단위량 증가에 따라 AE제 사용량은 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 원인은 AE제가 FA 단위량 증가에 따라 증가된 미연소탄소분에 보다 많이 흡착된 것으로 판단된다.

3.3 강도발현 특성 평가

3.3.1 압축강도

단위수량 변화에 따른 HVFAC의 압축강도 결과를 나타낸 것이

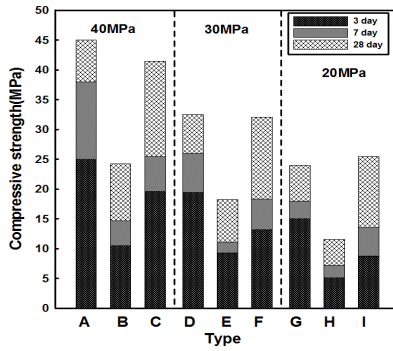


Fig. 6. The Compressive Strength of HVFAC with Age

Fig. 6이다. Fig. 6의 결과, 모든 강도 수준에서 Plain 배합(A, D 및 G)과 비교하여 일반적인 단위수량의 HVFAC 배합(B, E 및 H)의 경우 재령 3일 강도 및 재령 28일 강도에서 각각 약 59% 및 47% 감소하는 것으로 나타났으며, 단위수량을 저감한 HVFAC 배합(C, F 및 I)의 경우 일반적인 단위수량의 HVFAC(B, E 및 H)와 비교하여 재령 3일 및 28일 강도가 약 66% 및 89% 향상되는 것으로 나타났다.

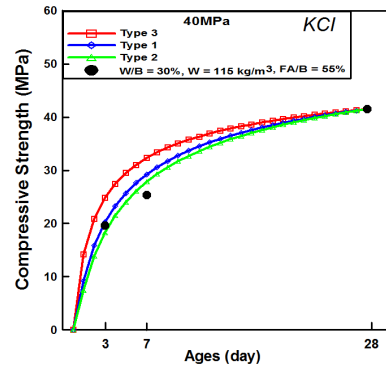
단위수량 저감에 따라 HVFAC의 압축강도가 향상되는 원인은 FA 표면이 비결정 유리질 피막으로 이루어짐에 따라 이 유리질 피막을 파괴시키고 FA 내부의 반응물질인 Si 및 Si 성분을 용출시키기 위한 강알칼리 환경이 초기에 형성되어 재령 초기에 포졸란 반응이 활성화된 것으로 판단된다.

이상의 결과를 통하여, HVFAC 제조시 문제점으로 제기된 압축 강도 저하 문제를 콘크리트내 단위수량을 저감한 배합조절을 통하여 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

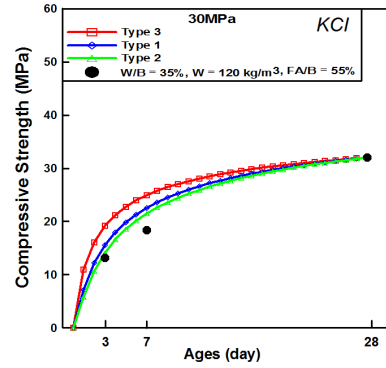
3.3.2 강도발현속도

단위수량을 저감한 HVFAC의 강도발현 속도를 KCI 콘크리트 구조설계기준에 제시된 압축강도 예측식(KCI, 2011)을 통하여 나타낸 것이 Fig. 7이다. 강도발현 속도를 구분하기 위하여 구조설계 기준에 제시된 시멘트 종류 및 양생조건에 따른 상수값 β_{sc} 를 0.25 이하(3종 습윤양생), 0.25 ~ 0.40(1종 습윤양생) 및 0.40 이상(2종) 값으로 구분하였다. Fig. 7의 결과, $\beta_{sc}(3)$ 은 40, 30 및 20 MPa 각 수준에서 0.36, 0.43, 0.52으로 나타나 고강도 영역인 40 MPa 수준의 경우 1종 습윤양생 영역에 포함되며, 보통강도 수준의 경우 2종 영역에 포함되는 것으로 나타났다. 또한, HVFAC의 재령 3일의 강도발현 속도 $\beta_{sc}(3)$ 값은 40, 30 및 20 MPa 에 대하여 0.47, 0.41 및 0.34로 나타났다.

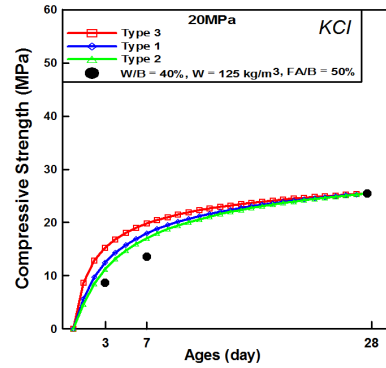
이상의 결과를 통하여 고강도 영역의 HVFAC의 경우 1종 시멘



(a) 40 MPa



(b) 30 MPa



(c) 20 MPa

Fig. 7. The Strength Develop Rate of HVFAC with Age

트 영역에 포함되는 것으로 나타나 건설 현장에서 거푸집 탈형문제로 인한 공기지연은 없을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문은 온실가스 감축을 위하여 시멘트 대체재로서 플라이 애시를 중량비 50% 이상 대량 활용한 HVFAC의 단위수량 저감에 따른 강도발현 특성을 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 플라이애시의 제타전위, 입도분포 및 입형의 품질특성과 고성능 감수제의 사용으로 단위수량을 크게 저감한 HVFAC 제조가 가능한 것으로 나타났다.
2. HVFAC의 강도발현 특성은 KCI 압축강도 예측식에 대하여 고강도 영역의 경우 강도발현속도가 1종 시멘트 영역에 포함됨에 따라 초기재령에서 거푸집 탈형이 가능한 것으로 나타났다.
3. 플라이애시를 중량비 50% 및 55%를 혼합한 HVFAC의 경우 단위수량 저감을 통하여 압축강도 발현이 크게 향상됨에 따라 HVFAC의 실용화가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(20111010100030).

References

- BS EN 1992-1-1, Eurocode 2, The British Standards Institution, 2004.
- Choi, Y.W., Chu, S.B., Park, M.S., Kim, J.H., Kim, T.H., and Kim, K.H. (2012). "The Effect of HVFA on the Reduction of Unit Water of Concrete," Proceedings of Korean Recycled Construction Resource Institute, 176-179.
- Choi, Y.W., Park, M.S., Jeong, J.G., Choi, B.G., and Kim, K.H. (2013). "A Study on Estimation Model of Strength Development of Concrete using Fly Ash and Ground Granulated Blast-Furnace Slag," Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, **17(5)**, 87-93.
- IPCC (2007). "Climate Change 2007-Synthesis Report" .
- Kim, S.S., Choi, S.J., and Jeong, Y. (2009). "An Experimental Study on the Strength Development Properties of HVFA Concrete by Fly-ash Replacement Ratio," Proceeding of Korea Concrete Institute, 279-280.
- Korea conformity laboratories (2011). "Development & Commercialization of Green Construction Materials utilizing High Volume Coal combustion Products," Korea conformity laboratories.
- Korea Meteorological Administration (2012). "The prospect report on climate change of the Korean Peninsula" .
- Korean Concrete Institute (2011). "Korea Structural Concrete Design Code" .
- Lee, S.H., Kim, H.J., Etsuo S., and Masaki D. (2003). "Effect of Particle Size Distribution of Fly ash-Cement System on the Fluidity of Cement Pastes," Cement and Concrete Research **33**, 763-768.
- Ministry of Environment (2014). "The road map for reduction of Greenhouse gases" .
- P.Kumar Mehta, (2004). "High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete for Sustainable Development," International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology.
- Park, C.K., Lee, S.H., Kim, H.J., Kim, S.J., and Lee, T.W. (2008). "The Characteristics of Strength of Development and Hydration Heat on High Volume Fly-Ash Concrete," Proceeding of Korea Concrete Institute, 417-420.
- Ryu, G.S. (2012). "A Characteristics Study of Fly Ash-based Cement Zero Concrete" .

단위수량 저감에 따른 하이볼륨 플라이애시 콘크리트의 강도 발현 특성

본 연구에서는 단위수량 저감에 따른 하이볼륨 플라이애시 콘크리트의 강도 발현 특성을 평가하였으며, 목표강도 3수준 (40, 30 및 20MPa) 및 단위수량 변화에 따라 콘크리트를 제조하였다.

실험결과, 향상된 유동성은 50%이상의 플라이애시를 사용한 경우 플라이애시 구형 입자들의 볼베어링 효과, 플라이애시의 정전기적 반발력 및 플라이애시의 입도분포의 결과로 얻어졌으며, 이를 통하여 플라이애시 혼합이 콘크리트에 요구되는 물의 양을 감소시키는 것으로 나타났다. 또한 단위수량을 저감한 하이볼륨 플라이애시 콘크리트의 초기 강도는 일반적인 단위수량의 배합보다 약 66% 이상 향상되는 것으로 나타났다.