

플라이애시 콘크리트의 수화발열 특성과 압축강도 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Hydration Heat and Strength Properties Concrete with High Volume Fly-Ash

김우상* 김광기** 백민수*** 김우재**** 정재영***** 정상진*****
Kim, Woo-Sang Kim, Kwang-Ki Paik, Min-Su Kim, Woo-Jae Jung, Jae-Young Jung, Sang-Jin

Abstract

This study is for the great quantity use of fly-ash. For the producing of high volume concrete from the use of fly-ash, the method of replacement between bonding agents and fine aggregate by fly-ash at the same time was used.

It was used that the adiabatic temperature rise of concrete about the mass member which had been produced by the method that was mentioned before, and the hydration heat of the core test pieces in concrete was measured. Also the core test pieces which were replaced with fly-ash was studied by the compressive strength's comparison between standard care test pieces and core test pieces.

In the case of mass test pieces, hydration heat and the time to reach the highest temperature were decreased by an increase in replaced fly-ash's amounts of concrete. In addition, among the test pieces having the same amounts of concrete, the test pieces having more replaced amounts of fly-ash's fine aggregate showed higher hydration heat and the increased time to reach the highest temperature. Compressive strength was also increased by hydration heat's decrease according to fly-ash replacement. Replacement of fly-ash was more effective in high temperature environment.

키워드 : 플라이애시, 다량치환, 수화열, 매스

Keywords : fly-ash, high volume, hydration heat, mass

1. 서론

급속한 경제성장과 산업의 발달 및 성장은 천연자원의 고갈 및 환경오염 등 많은 문제점을 야기하게 되었다. 이에 따라 산업부산물물의 재활용에 대한 필요성이 증가하고 건축물에 대한 경제성 및 고성능의 환경 친화적 측면이 요구되고 있어, 선진국의 경우 산업부산물이나 폐자재를 활용하는 빈도 또한 점차 높아지고 있다.

그러나 국내의 경우 이들 산업부산물에 대한 연구와 이용 실적은 선진국에 비해 아직 미비한 실정이며, 산업부산물을 자원으로 활용하기 위한 연구가 절실히 요구되고 있으나, 대부분이 산업폐기물로 처리되고 있어 환경오염을 발생시킬 뿐만 아니라 매립 또는 처리장소 등의 확보에 있어서도 많은 문제점이 제기되고 있는 실정이다.

콘크리트 혼화재료중 하나인 플라이애시는 화력발전소에서

석탄이 연소되는 과정에서 발생하는 재활용 가능성이 높은 산업부산물로서 경제성에 좋고, 콘크리트 경화체 조직의 치밀성, 시공성 개선, 장기강도 향상 등 많은 장점이 있다. 특히, 수화열에 있어서 매스콘크리트 같은 대형부재와 같이 수화열에 의한 피해를 입기 쉬운 부재에 수화열 억제제의 방안으로서 훌륭한 성능을 보인다. 매스 콘크리트 경우 현재 수화열 저감에 사용되고 있는 혼합수를 비롯한 각종 재료를 생각하는 방법, 저열 포트랜드 시멘트 사용, 파이프 쿨링(pipe-cooling) 등의 방법은 많은 비용이 소요되는 단점이 있기 때문에 콘크리트의 성능개선 및 자연환경 보전과 자원의 유효이용이라는 관점에서 플라이애시를 콘크리트에 다량으로 활용하는 방안이 요구되고 있다.

이에 본 연구에서는 플라이애시를 다량으로 사용한 고품질의 콘크리트를 제작하기 위해 플라이애시를 결합재 치환과 더불어 잔골재의 일부를 치환하는 방법을 사용하였다. 이전 연구에서 선정된 플라이애시 치환시 최적합한 배합을 이용 기동 및 매스 콘크리트를 제작하여 수화발열특성 및 수화열에 의한 강도특성을 파악하여 플라이애시 치환에 따른 개선 효과를 검토함으로써 플라이애시를 다량 사용한 콘크리트의 특성에 대한 기초 자료를 제시하는 것을 본 연구의 목적으로 하고 있다.

* 정회원, 단국대학교 대학원 석사과정

** 정회원, 단국대학교 대학원 박사과정

*** 정회원, 단국대학교 대학원 박사수료

**** 정회원, 인천시립대학 건축환경공학부 겸임교수

***** 정회원, 한남대학교 건축공학과 교수

***** 정회원, 단국대학교 건축공학과 교수, 공학박사

2. 실험

2.1 실험계획

본 실험의 콘크리트의 실험인자와 수준 및 측정항목은 표1과 같다.

표 1. 실험인자와 수준 및 측정항목

실험인자		수준	
기동 부재 실험	시험체 배합	3	00-00, 30-10, 40-20
	양생방법	1	대기양생
	양생환경	1	고온환경
	수화열	3	상단부, 중단부, 하단부
매스 부재 실험	공시체	3	현장수중양생, 봉합양생, 코어
	시험체 배합	3	00-00, 40-10, 50-20
	양생방법	1	단열양생
	양생환경	1	표준환경
	수화열	2	중심부, 표면부
공시체	3	표준수중양생, 봉합양생, 코어	

*치환율 : 00 - 00

플라이애시 총치환율
(00-0%, 10-10%, 20-20%)
플라이애시 잔골재 치환율

2.2 사용재료

본 실험에서 사용한 시멘트는 국내 S사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 플라이애시는 보령산을 사용하였으며, 잔골재의 경우 인천산 세척사를 사용하였으며, 굵은 골재는 광주석산 세척을 사용하였으며 19mm이하로 입도조정하여 사용하였다. 혼화제는 국내에서 시판사용되고 있는 J사의 혼화제를 사용하였으며, 매스 시험체의 경우 고성능AE감수제를 사용하였고 기동시험체는 AE감수제를 사용하였으며, 모든 시험체에 보조혼화제로 AE제를 사용하였다.

표 2. 시멘트의 물리적 성질

시멘트 종류	비중	분말도 (cm ² /g)	용결시간(H)		압축강도(kgf/cm ²)		
			초결	종결	3일	7일	28일
보통	3.15	3,400	4	6	198	272	389

표 3. 플라이애시의 물리·화학적 특성

	강열 감량 (%)	단위 수량비 (%)	분말도 (cm ² /g)	비중	압축 강도비 (%)	SiO ₂ (%)	습분 (%)
보령산	3.75	100	3,084	2.11	95	59.7	0.11
KS 규격	5 이하	102 이하	2,400 이상	1.95 이상	60 이상	45 이상	1 이하

표 4. 골재의 물리적 특성

구분	비중	흡수율 (%)	조립율 (%)	단위용적중량 (kg/m ³)	실적율 (%)
잔골재	2.60	0.98	2.82	1,590	61.2
굵은골재	2.62	1.8	6.52	1,596	57.8

표 5. 혼화제의 종류 및 물성

	유형	주성분	비중	색상	비고
국내 J사	고성능 AE감수제	나프탈렌계	1.22±0.05	암갈색	-
국내 J사	AE감수제	나프탈렌계	1.1	암갈색	-
국내 J사	AE제	-	-	암갈색	10배 희석

2.3 배합

본 실험에서는 플라이애시를 시멘트의 20, 30, 40, 50% 치환을 하였다. 플라이애시 치환 방법은 20% 경우는 시멘트 치환을 하였으며, 30, 40, 50% 경우는 시멘트와 잔골재를 동시 치환하는 배합을 하였다. F50계열 배합은 플라이애시 치환시 시멘트와 잔골재를 동시에 치환시킨 배합으로써 F50-S10의 경우 50% 치환 플라이애시로 40%는 시멘트, 10%는 잔골재 치환을 하였다. 배합 S00의 숫자가 10, 20으로 증가함에 따라 시멘트 치환은 10%씩 감소하고 잔골재 치환은 10%씩 증가하여, F50-S20 시험체는 플라이애시를 시멘트 30%와 잔골재 20% 치환한 배합을 하였다. 30%, 40%배합도 위와 동일한 방법으로 배합을 실시하였다. 본 실험의 배합표는 표 6과 같다.

표 6. 부재실험 배합표

시험체명	W/C (%)	W/B (%)	S/a (%)	FA 치환율 (%)		용적중량(kg/m ³)							
				C	S	W	C	FA	S	G	AD1	AD2	
매스	F00-S00	35.0	35.0	43.0	0	0	175	500	0	700	935	6.0	0.10
	F40-S10	50.0	31.8	40.5	30	10	175	350	200	612	900	4.5	0.30
	F50-S20	50.0	29.2	37.9	30	20	175	350	250	550	900	4.0	0.40
기동	F00-S00	45.0	45.0	41.0	0	0	180	400	0	696	1009	1.2	0.08
	F30-S10	56.3	40.9	39.2	20	10	180	320	120	633	990	1.0	0.32
	F40-S15	60.0	39.1	38.2	25	15	180	300	160	605	985	1.0	0.36

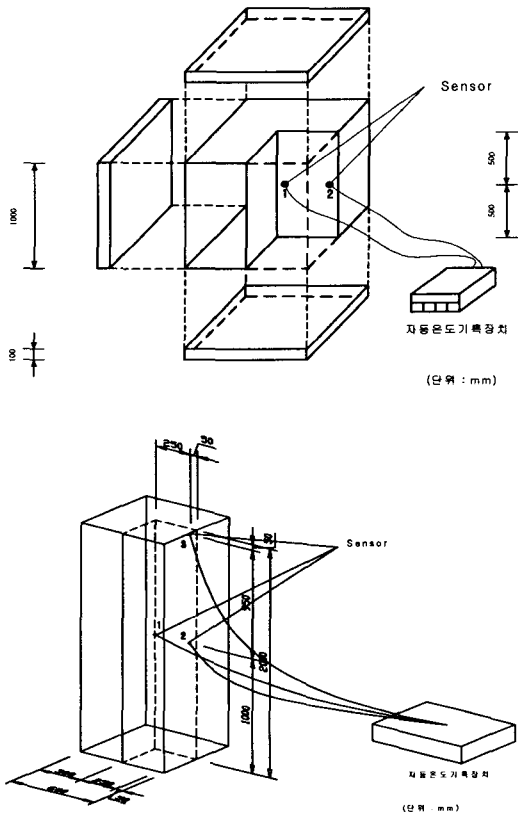


그림 1. 수화열 측정을 위한 부재 및 온도 측정위치

2.4 부재 실험

매스 부재 시험체는 가로, 세로, 높이를 1000mm×1000mm×1000mm 크기로 제작한 후 콘크리트를 타설하였고, 기둥 부재 시험체는 가로, 세로, 높이를 600mm×600mm×2000mm 크기로 제작한 후 콘크리트를 타설하였다. 수화열 측정을 위한 열전대(sensor)는 콘크리트 타설 전에 시험체의 내부에 센서를 매입하고, 매스 시험체의 경우 외부를 두께 10cm의 단열재로 전면을 감싸 외부와의 열교환을 차단하였다. 기둥 시험체의 경우 고온의 양생온도에서의 플라이애시 치환에 따른 콘크리트의 특성을 연구하기 위하여 단열을 실시하지 않았다. 수화열 측정은 타설 직후부터 자동온도 기록장치(수화열 측정기)를 이용하여 2시간 간격으로 콘크리트의 수화온도 변화를 측정하였다. 수화열 측정을 위한 부재 및 온도 측정 위치는 그림 1과 같다.

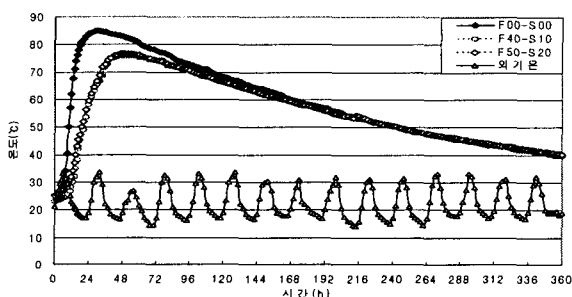


그림 2. 중심부 수화온도분포

3. 실험결과 분석 및 고찰

3.1 매스 시험체 위치에 따른 수화발열 특성

수화열 측정결과를 그림 2에 나타내고 있다. 중심부 수화열 특성은 기준 시험체 F40-S10 및 F50-S20 시험체가 각각 85℃, 75.8℃, 76.8℃의 최고온도와 38시간, 66시간, 64시간 경과한 후에 최고온도에 도달하였다. F40-S10 시험체와 F50-S20 시험체 경우 기준 시험체에 비해 최고온도 도달시간이 28, 26시간 느린 것으로 나타났다. 기준 시험체와 F40-S10, F50-S20 시험체의 최고온도 도달시간의 차이가 크게 나타난 것은 플라이애시가 다량으로 치환됨에 따라 초기에 응결이 상당히 지연되어서 최고온도 도달시간이 약 1.7배정도 지연된 것으로 판단된다. 중심부와 표면부에서 기준 시험체와 F40-S10, F50-S20 시험체의 온도차는 8.2~9.2℃로 나타나, 플라이애시를 치환한 시험체가 수화온도 저감에 효과가 있는 것으로 나타났다.

3.2 기둥 시험체 위치에 따른 수화발열 특성

기둥 부재 위치에 따른 수화열 측정결과를 그림 3에 나타내고 있다. 위치에 따른 수화열 특성은 기준 시험체 경우 중심부 최고온도가 55.2℃고, 최고온도 도달시간은 타설 후 21시간 경과한 후이며 측면부와 측면상부의 경우 각각 51.6℃와 50.6℃의 최고온도를 나타내었다. F30-S10 시험체 경우 중심부 최고온도가 50.5℃고, 타설 후 24시간 경과한 후 최고온도에 도달하여 기준 시험체에 비해 최고온도 도달시간이 3시간 지연된 것으로 나타났으며 측면부와 측면상부의 경우 각각 50℃와 44.1℃의 최고온도를 나타내었다. F40-S15 시험체 경우 중심부 최고온도가 50.5℃고, 타설 후 30시간 경과한 후 최고온도에 도달하여 기준 시험체에 비해 최고온도 도달시간이 9시간 지연된 것으로 나타났으며 측면부와 측면상부의 경우 각각 42.7℃와 37.6℃의 최고온도를 나타내었다. F40-S15 시험체의 경우 기준 시험체에 비하여 최고온도 도달시간이 약 1.4배 지연된 것으로 나타났다.

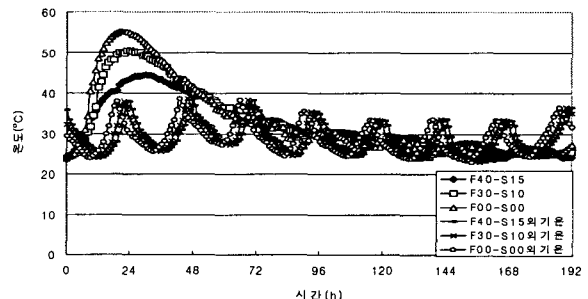


그림 3. 중심부 수화온도분포

3.3 매스 시험체 코어 및 관리용 공시체의 압축강도

코어 및 관리용 공시체의 압축강도를 그림 6, 그림 7, 그림 8에 나타내고 있다. 재령 28일에서의 코어 공시체 특성은 F00-S00 시험체 경우 코어공시체 중앙부와 표면부가 표준수 중앙생 공시체의 74%, 77.9% 강도발현을 하였고, F40-S10 시

험체는 85%, 85.8% 강도발현을 하였고, F50-S20 시험체는 89.7%, 92.2% 강도발현을 하였다. 재령 91일에서의 코어 공시체 특성은 F00-S00 시험체 경우 코어공시체 중앙부와 표면부가 표준수중양생 공시체의 76.8%, 78.2% 강도발현을 하였고, F40-S10 시험체는 83.3%, 86.1% 강도발현을 하였고, F50-S20 시험체는 87.7%, 89% 강도발현을 하였다. 이는 F00-S00 시험체 경우 양생초기의 높은 온도이력으로 인해 표준수중양생에 비해 강도저하가 크게 나타났으나, F40-S10, F50-S20 시험체는 플라이애시를 치환하여 양생초기의 수화온도를 저감시켜주고 재령이 경과할수록 플라이애시의 포졸란 반응이 활성화되기 때문에 F00-S00 시험체에 비해 더 높은 강도발현을 한 것으로 판단된다.

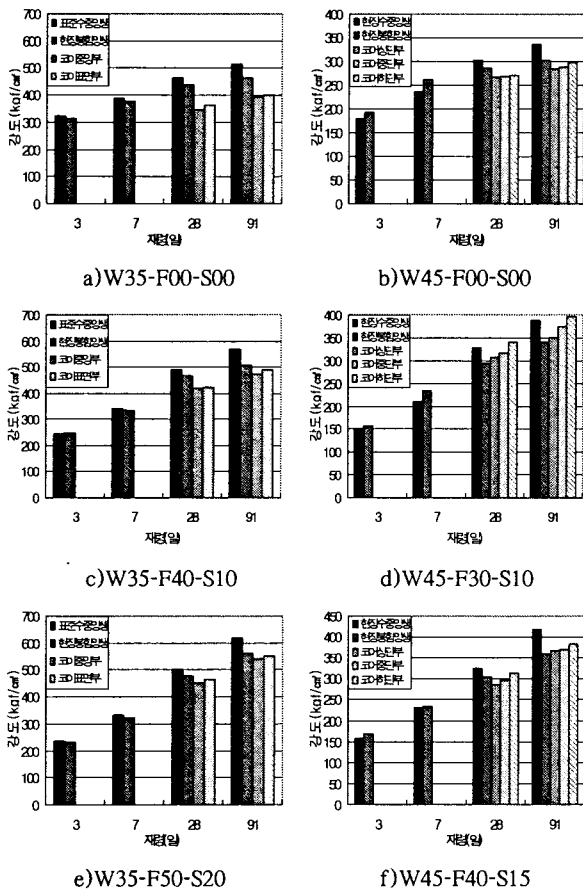


그림 8. 플라이애시 치환 시험체의 압축강도

3.4 기둥 시험체 코어 및 관리용 공시체의 압축강도

코어 및 관리용 공시체의 압축강도를 그림 6, 그림 7, 그림 8에 나타내고 있다. 기준 시험체는 재령 28일의 경우 현장수중양생 공시체가 301kgf/cm²를 나타내었으며 현장수중양생 공시체의 압축강도를 100%로 환산하였을 때 코어공시체 상, 중, 하단부는 88.7%, 89.7%, 90%의 강도발현을 하였다. F30-S00 시험체는 재령 28일의 경우 현장수중양생 공시체가 328kgf/cm²의 강도발현을 하였으며 코어공시체 상, 중, 하단부가 93.9%, 96.3%, 103.9%의 강도발현을 하였다. F40-S15 시험체는 재령 28일의 경우 현장수중양생 공시체가 324kgf/cm²를 나타냈으며 강도비는 각각 93.8%, 87.9%, 91.6%, 96.9%를 나

타내었다. 재령 91일의 장기강도의 경우 기준 시험체는 현장수중양생의 경우 337kgf/cm²의 강도 발현을 하였으며 코어 공시체는 표준양생 공시체의 84.2%~88.4%의 강도 발현을 나타내었다. F30-S10 시험체의 경우 현장수중양생의 경우 389kgf/cm²의 강도 발현을 하였으며 코어 공시체는 표준양생 공시체의 89.9%~101.7%의 강도 발현을 나타내었다. F43시험체의 경우 현장수중양생의 경우 418kgf/cm²의 강도 발현을 하였으며 코어 공시체는 표준양생 공시체의 88%~91.3%의 강도 발현을 나타내었다.

플라이애시 치환 시험체의 경우 플라이애시 치환에 따른 양생초기의 수화온도를 저감시켜주었고, 고온의 양생온도로 인하여 조기에 플라이애시의 포졸란 반응이 활성화되기 때문에 기준 시험체에 비해 더 높은 강도발현을 한 것으로 판단된다. F30-S10 시험체와 기준 시험체의 비교시 재령 28일의 경우 25.8% 재령 91일의 경우 32.8%의 강도의 증가를 나타내었고, F40-S15 시험체의 경우 재령 28일 및 91일에서 15.8%와 28.2%의 강도증가를 나타내어, 고온환경에서의 플라이애시 대량 치환시 잔골재치환 배합의 경우 우수한 강도 발현을 나타내었다.

4. 결 론

플라이애시를 다량 치환한 콘크리트의 수화열 및 강도특성에 관한 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 매스 부재 수화열측정 결과 매스 중심부와 매스 표면부에서 F00-S00 시험체와 F40-S10, F50-S20 시험체의 온도차는 8.2~9.2℃로 나타나, 플라이애시를 치환한 시험체가 수화온도 저감에 효과가 있는 것으로 나타났다.
- 2) 매스부재 실험결과 재령 28일에서의 코어 공시체 특성은 F00-S00 시험체 경우 코어공시체 중앙부와 표면부가 표준수중양생 공시체의 74%, 78% 강도발현을 하였고, F40-S10 시험체는 85%, 86% 강도발현을 하였고, F50-S20 시험체는 90%, 92% 강도발현을 하였다.
- 3) 기준 시험체와 F30-S10 및 F40-S15 시험체의 최고온도는 55.2℃, 50.5℃, 44.3℃로 최고수화온도 차이가 각각 4.7℃, 10.9℃로 나타나 플라이애시를 치환한 시험체가 수화온도 저감에 효과가 있는 것으로 나타났다.
- 4) 부재 시험체의 코어 공시체 강도 실험결과 고온환경의 경우 플라이애시를 치환한 시험체의 강도 발현성이 우수한 것으로 나타났다. F30-S10 시험체와 기준 시험체의 비교시 재령 28일의 경우 25.8% 재령 91일의 경우 32.8%의 강도의 증가를 나타내었고, F40-S15 시험체의 경우 재령 28일 및 91일에서 15.8%와 28.2%의 강도증가를 나타내어, 고온환경에서의 플라이애시 대량 치환시 플라이애시를 결합재와 잔골재의 일부분을 동시에 치환할 경우 우수한 압축강도 성능을 가진 콘크리트 제조가 가능할 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터 콘크리트 제조시 플라이애시를 다량 사용할 경우 시멘트와 잔골재의 일부를 동시에 치환하여 사용하는 것이 유효할 것으로 판단되었고, 매스부재에 적용할 경우 수화온도저감과 압축강도증진에 큰 효과를 가진 것으로 판단되며, 고온의 양생환경의 경우 플라이애시의 치환량을 더 증가 시킬 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 정상진의 “플라이애시를 다량 치환한 고강도 콘크리트에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 추계학술발표대회 2002, 10, pp.299-302