

플라이애시를 大量 使用한 콘크리트의 水和熱特性 및 强度特性에 關한 研究

A Study on Hydration Heat Properties and Strength Properties of High Volume Fly-Ash Concrete

백 민 수* 이 영 도** 정 상 진***
Paik, Min-Su Lee, Young-Do 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 was used at the same time.

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. 서 론¹⁾

급속한 경제성장과 산업의 발달로 인간의 생활은 편리하고 윤택해졌다. 그러나 이러한 성장은 천연자원의 고갈 및 환경오염 등 많은 문제점을 야기하게 되었다. 이에 따라 산업부산물의 재활용에 대한 필요성이 증가하고 건축물에 대한 경제성 및 고성능의 환경 친화적 측면이 요구되고 있어, 선진국의 경우 산업부산물이나 폐자재를 활용하는 빈도 또한 점차 높아지고 있다.¹⁾

그러나 국내의 경우 이들 산업부산물에 대한 연구와 이용실적은 선진국에 비해 아직 미비한 실정이며, 산업부산물을 자원으로 활용하기 위한 연구가 절실히 요구되고 있다. 국내의 경우 석탄회분의 발생량의 총 443만톤중 54%만이 재활용되고 있어 선진국의 재활용율이 평균 80%인 것과 비교하여 매우 저조한 실정이다.

콘크리트 혼화재료중 하나인 플라이애시는 화력발전소에서 석탄이 연소되는 과정에서 발생하는 재활용 가능성이 높은 산업부산물로서 경제성에 좋고, 콘크리트 경화체 조직의 치밀

성, 시공성 개선, 장기강도 향상 등 많은 장점이 있다. 특히, 수화열에 있어서 매스콘크리트 같은 대형부재와 같이 수화열에 의한 피해를 입기 쉬운 부재에 수화열 억제 방안으로서 훌륭한 성능을 보인다.²⁾ 매스 콘크리트 경우 현재 수화열 저감에 사용되고 있는 혼합수를 비롯한 각종 재료를 냉각하는 방법, 저열 포틀랜드 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.

그러나 국내의 경우 플라이애시를 다량 치환한 콘크리트에 관한 연구와 이용실적은 선진국에 비해 아직 미비한 실정이다.³⁾⁴⁾⁵⁾

플라이애시는 콘크리트의 시멘트 결합재로 사용할 경우 초기강도 저하 및 미연탄소분에 의한 AE제 흡착 등 콘크리트의 내구성을 저하시키는 몇 가지 제한적 요소를 내포하고 있다.⁶⁾⁷⁾ 또한 플라이애시를 잔골재로 치환하여 사용할 경우 강도증진과 내구성 향상 등의 장점을 가지고 있으나, 콘크리트 제작의 원가상승이 발생하는 단점을 가지고 있다.⁸⁾

이에 본 연구에서는 플라이애시를 다량으로 사용한 고품질의 콘크리트를 제작하기 위해 플라이애시를 결합재 치환과 더불어 잔골재의 일부를 치환하는 방법을 사용하였다.⁹⁾ 본

* 정회원, 동명정보대학교 건축공학과 겸임교수, 공학박사

** 정회원, 경동대학교 건축환경공학부 교수, 공학박사

*** 정회원, 단국대학교 건축공학과 교수, 공학박사

연구에서 제시된 결합재 및 잔골재의 일부를 동시 치환시킨 배합의 단열온도특성을 검토하였으며, 이전 연구¹⁰⁾에서 선정된 배합과 본 연구의 배합중 플라이애시 치환시 최적합한 배합을 이용 기둥 및 매스 콘크리트를 제작하여 수화발열특성 및 수화열에 의한 강도특성을 파악하여 플라이애시 치환에 따른 개선효과를 검토함으로써 플라이애시를 다량 사용한 콘크리트의 특성에 대한 기초 자료를 제시하는 것을 본 연구의 목적으로 하고 있다.

2. 실험

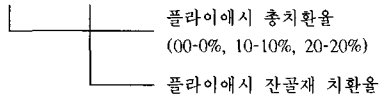
2.1 실험계획

본 실험의 콘크리트의 실험인자와 수준 및 측정항목은 표 1과 같다.

표 1. 실험인자와 수준 및 측정항목

실험인자		수준	
단열 온도 상승 실험	시험체	8	00-00, 20-00, 30-10 30-00, 40-10, 50-20. 40-00, 50-10
	수화열	2	중심부, 표면부
매스 부재 실험	시험체 배합	3	00-00, 40-10, 50-20
	양생방법	1	단열양생
	양생환경	1	표준환경 (20℃ ± 3℃)
	수화열	2	중심부, 표면부
기둥 부재 실험	공시체	3	표준수중양생, (20℃ ± 3℃) 봉합양생, 코아
	시험체 배합	3	00-00, 30-10, 40-15
	양생방법	1	대기양생
	양생환경	1	고온환경 (35℃ ± 3℃)
	수화열	3	상단부, 중단부, 하단부
공시체	3	현장수중양생, (35℃ ± 3℃) 봉합양생, 코아	

*치환율 : 00 - 00



2.2 사용재료

1) 시멘트

본 실험에서 사용한 시멘트는 국내 S사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 물리적 성질은 표 2와 같다.

표 2. 시멘트의 물리적 성질

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

2) 플라이애시

보령 화력발전소에서 생산정제 과정을 거친 유연탄 플라이애시를 사용하였고, 그 품질 특성은 표3과 같다.

표 3. 플라이애시의 물리·화학적 특성

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

3) 골재

잔골재의 경우 인천산 세척사를 사용하였으며, 최대치수 5mm이하로 입도조정하여 사용하였고, 굵은 골재는 광주석산 세척을 사용하였으며 19mm이하로 입도조정하여 사용하였다. 골재의 물리적 특성은 다음의 표 4와 같다.

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

4) 혼화제

혼화제는 국내에서 시판·사용되고 있는 J사의 혼화제를 사용하였으며, 매스 시험체의 경우 고성능AE감수제를 사용하였고 기둥시험체는 AE감수제를 사용하였으며, 모든 시험체에 보조혼화제로 AE제를 사용하였다. 혼화제의 물성은 표 5와 같다.

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 배합체계를 다음의 그림 1에 나타내었고, 배합표는 표 6 및 표 7과 같다.

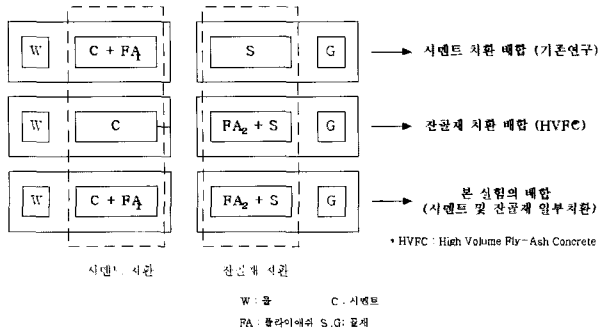


그림 1. 배합체계

표 6. 단열온도상승실험 배합표

시험체명	W/C (%)	W/B (%)	S/a (%)	FA 치환율 (%)		단위용적중량(kg/m ³)						
				C	S	W	C	FA	S	G	AD1	AD2
W35-F00-S00	35.0	35.0	43.0	0	0	175	500	0	700	935	6.0	0.10
W35-F20-S00	43.8	35.0	43.0	20	0	175	400	100	682	912	6.0	0.15
W35-F30-S00	50.0	35.0	43.0	30	0	175	350	150	673	900	4.5	0.20
W35-F30-S10	43.8	31.8	40.5	20	10	175	400	150	621	911	4.5	0.25
W35-F40-S00	58.3	35.0	43.0	40	0	175	300	200	665	889	4.5	0.25
W35-F40-S10	50.0	31.8	40.5	30	10	175	350	200	612	900	4.5	0.30
W35-F50-S10	58.3	31.8	40.5	40	10	175	300	250	604	889	4.0	0.35
W35-F50-S20	50.0	29.2	37.9	30	20	175	350	250	550	900	4.0	0.40

W00 - F00 - S00
 W35 : 기준 시험체 W/B비 35%
 플라이애시 총치환율(F00-0%, F10-10%)
 플라이애시 잔골재 치환율(S00-0%, S10-10%)

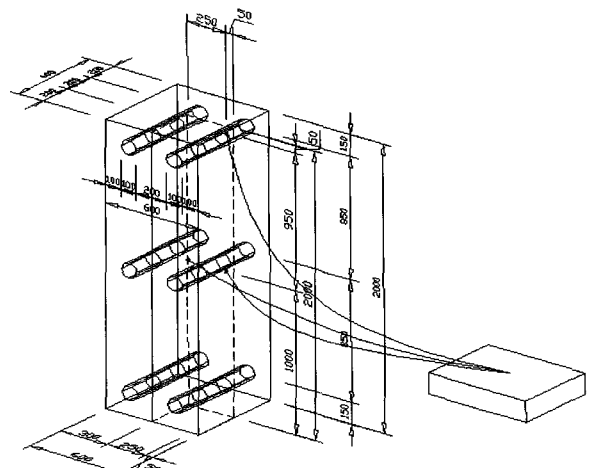
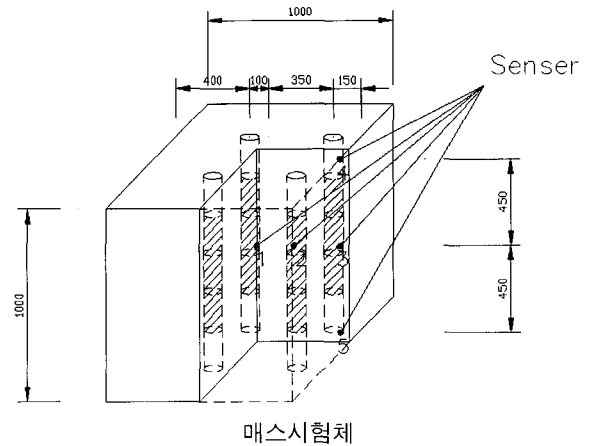
표 7. 부재실험 배합표

시험체명	W/C (%)	W/B (%)	S/a (%)	FA 치환율 (%)		단위용적중량(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

2.4 단열온도상승 실험

단열온도상승 측정시험체는 가로, 세로, 높이를 40cm × 40cm × 40cm 크기로 제작한 후 콘크리트를 타설하였다. 수화열 측정을 위한 열전대(sensor)는 콘크리트 타설 전에 시험체의

중심부와 표면부에 센서를 매입하고, 시험체 외부는 두께 10cm의 단열재로 전면을 감싸 외부와의 열교환을 차단하였다. 수화열 측정은 타설 직후부터 5일동안 자동온도 기록장치(수화열 측정기)를 이용하여 2시간 간격으로 콘크리트의 수화온도 변화를 측정하였다.



기동시험체

그림 2. 수화열 온도측정위치 및 코아채취위치

2.5 부재 실험

매스 부재 시험체는 가로, 세로, 높이를 1000mm × 1000mm × 1000mm 크기로 제작한 후 콘크리트를 타설하였고, 기동 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. 기동 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 온도측정위치는 그림 2와 같다.

3. 실험결과 분석 및 고찰

3.1 단열온도상승실험

1) 단열온도상승 예측

콘크리트의 단열온도상승량 예측의 경우 매스 콘크리트를 사용시 타설에 앞서 단열온도상승식에 의한 검토가 매우 유효하다. 본 실험의 경우 단열온도상승 모델식에 의한 플라이애시 치환콘크리트의 단열온도상승량을 예측하고 실험을 통하여 모델식에 의한 예측값과 시험체의 수화온도를 비교 검토하였다.

단열온도상승식의 경우 그 형태는 다음 산정식 (1)과 같다.

$$Q(t) = K \{ 1 - \text{EXP}(-\alpha t) \} \dots\dots\dots (1)$$

Q(t) : 재령t에서의 단열온도상승량
K : 최대상승온도
 α : 수화반응속도

1종 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트의 단열온도상승 모델식의 경우 塚山11)식 및 일본콘크리트공학협회식12), 김진근식13) 등이 있다. 고강도 콘크리트에 일반적인 혼화제로 사용되는 고성능감수제의 경우 수화열 발생을 증가시키는 효과를 가지고 있으나 단열온도상승 해석시 고성능감수제의 첨가유무에 따라 고강도 콘크리트의 수화열 해석에 상호간에 차이를 나타내고 있으며, 콘크리트의 수화열 해석시 고성능감수제의 사용에 대한 고려가 필요하다.

표 8. 모델식에 따른 최대상승온도 및 수화반응속도

단위시멘트 량 (kg/m ³)	塚山隆一 (Tsukayama)		Japan Concrete Insitiute		김진근	
	K	α	K	α	K	α
300	37.30	0.97	42.10	0.97	46.22	0.89
400	48.00	1.15	53.18	1.39	56.81	1.21
500	58.70	1.33	64.26	1.80	62.18	2.31

본 연구에서는 플라이애시 치환에 따른 단열온도상승식의 검토를 위하여 飛坂14)가 제안한 식에 사용하여 플라이애시 치환에 따른 시험체의 단열온도를 예측하였다.

최대상승온도 K의 경우 48시간 경과 후 수화발열량(H48)의 영향을 받으며, 수화반응속도 α 는 24시간 경과 후 수화발열량(H24)과 연관성을 가지고 있다. 최대상승온도 K는 콘크리트의 온도(T), 결합재량(Bw)에 영향을 받으며 콘크리트의 타설온도가 20℃인 경우 K는 아래의 산정식(2)로 나타낼 수 있다.

$$K = f(H48) + Bc \dots\dots\dots (2)$$

Bc : 결합재량(Bw)에 의해 결정되는 계수
f(H48) 및 Bc의 경우 다음의 산정식(3), (4)로 표현할 수 있으며 다음의 식은 R2 = 0.84의 신뢰도를 가지고 있다.

$$f(H48) = 28.0 \times \ln(H48) \dots\dots\dots (3)$$

$$Bc = 0.1 \times Bw - 141.5 \dots\dots\dots (4)$$

산정식(3), (4)에 의해 최대상승온도 K에 대한 식(5)를 구하였다.

$$K = 28.0 \times \ln(H48) + 0.1 \times Bw - 141.5 \dots\dots\dots (5)$$

수화반응속도 α 의 경우 K와 동일하게 콘크리트의 온도(T), 결합재량(Bw)에 영향을 받으며 콘크리트의 타설온도가 20℃인 경우 α 는 아래의 산정식(6)로 나타낼 수 있다.

$$\alpha = g(H24) + Bd \dots\dots\dots (6)$$

Bd : 결합재량(Bw)에 의해 결정되는 계수
f(H24) 및 Bc의 경우 다음의 산정식(7), (8)로 표현할 수 있으며 다음의 식은 R2 = 0.99의 신뢰도를 가지고 있다.

$$g(H24) = 0.0013 \times H24 \dots\dots\dots (7)$$

$$Bd = 0.004 \times Bw - 2.38 \dots\dots\dots (8)$$

산정식(7), (8)에 의해 수화반응속도 α 에 대한 산정식(9)를 구하였다.

$$\alpha = 0.0013 \times H24 + 0.004 \times Bw - 2.38 \dots\dots\dots (9)$$

플라이애시를 치환한 시멘트의 수화열량을 표 9에 나타내었으며 산정식 (5) 및 (9)에 시멘트의 플라이애시 치환에 따른 수화열량을 적용하여 플라이애시 치환에 따른 단열온도상승식을 구하였다.

표 9. 플라이애시 치환에 따른 시멘트의 수화발열

FA/B	수화발열량(J/g)		
	1시간경과후	24시간경과후	48시간경과후
0	13.3	191.2	257.4
10	12.4	176.9	237.1
20	11.2	160.7	214.6
30	9.9	142.6	190.1
40	8.3	119.6	165.0

플라이애시 치환에 따라 다음과 같은 단열온도상승식을 얻었다.

- 기준 시험체의 단열온도상승식
Q(t) = 63.92{ 1 - EXP(-2.106t) }
- 플라이애시 10% 치환 시험체의 단열온도상승식
Q(t) = 61.62{ 1 - EXP(-1.920t) }
- 플라이애시 20% 치환 시험체의 단열온도상승식
Q(t) = 58.83{ 1 - EXP(-1.709t) }
- 플라이애시 30% 치환 시험체의 단열온도상승식
Q(t) = 55.43{ 1 - EXP(-1.474t) }
- 플라이애시 40% 치환 시험체의 단열온도상승식
Q(t) = 52.91{ 1 - EXP(-1.296t) }

단열온도상승예측결과 기준시험체의 경우 최대상승온도가 63.92℃로 예상되며 플라이애시 치환율이 10%, 20%, 30%, 40%로 증가함에 따라 예상최고온도가 61.62℃, 58.83℃, 55.43℃, 52.91℃로 저하하는 것으로 나타났다.

2) 단열온도상승실험결과

단열온도상승실험결과를 표 10 및 그림 3에 나타내었다. 표에 의하면 기준 시험체는 30시간 후 64.2℃의 최고온도에 도달하였다. F20-S00 시험체의 경우 38시간 후 58.8℃의 최고온도에 도달하였으며, F30-S00 및 F40-S00 시험체의 경우 각각 40시간 30분 과 42시간 후 54.3℃와 50.9℃의 최고온도에 도달하였다. 단열온도상승식에 의한 최고온도의 경우 기준 시험체가 63.92℃로 예상되었으며, 플라이애시 치환율이 20%, 30%, 40%로 증가함에 따라 최고온도가 58.83℃, 55.43℃, 52.91℃로 예측되었는데 기준 시험체의 경우 예상최고온도보다 높은 온도를 나타내고 있으나 플라이애시 치환 시험체의 경우 예상최고온도와 유사하게 나타났으며 플라이애시 치환율이 증가할수록 예상온도가 낮아지는 경향을 나타내었다. 플라이애시 잔골재 치환에 따른 수화온도의 경우 동일한 단위 시멘트량을 갖는 시험체들이 서로 유사한 수화온도분포를 나타내었으며 잔골재 치환량이 증가할수록 최고온도 도달시간과 최고온도가 미세하게 증가하는 것으로 나타났다. 본 실험결과 플라이애시의 잔골재 치환의 경우 수화발열에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 사료되며 플라이애시의 잔골재 치환에 따른 수화특성의 세심한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

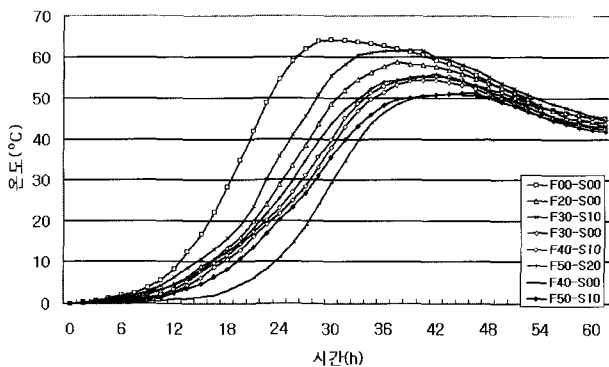


그림 3. 단열온도상승실험 콘크리트의 수화온도분포

표 10. 최고온도 및 최고온도 도달시간

시험체명	플라이애시 치환율(%)		최고온도 (°C)	최고온도도달시간 (h:m)
	시멘트	잔골재		
W35-F00-S00	0	0	64.2	30:00
W35-F20-S00	20	0	58.8	38:00
W35-F30-S10	20	10	61.7	39:00
W35-F30-S00	30	0	54.3	40:30
W35-F40-S10	30	10	55.0	42:00
W35-F50-S20	30	20	55.9	42:00
W35-F40-S00	40	0	50.9	45:00
W35-F50-S10	40	10	51.3	46:30

3.2 부재 실험

1) 매스 시험체 위치에 따른 수화발열 특성

매스 시험체 위치에 따른 수화열 측정결과를 그림 4와 그림 5에 나타내고 있다. 중심부 수화열 특성은 기준 시험체 경우 최고온도가 85℃고, 최고온도 도달시간은 타설 후 38시간 경과한 후에 도달하였다. F40-S10 시험체와 F50-S20 시험체 경우 최고온도가 75.8℃, 76.8℃ 최고온도 도달시간은 타설 후 66시간, 64시간 경과한 후에 도달하여 기준 시험체에 비해 최고온도 도달시간이 28, 26시간 느린 것으로 나타났다. 표면부의 수화열 특성은 기준 시험체 경우 최고온도가 83℃고, 최고온도 도달시간은 타설 후 36시간이 경과한 후에 도달하였다. F40-S10 시험체와 F50-S20 시험체 경우 최고온도가 73.7℃, 74.8℃ 최고온도 도달시간은 타설 후 66시간, 63시간 경과한 후에 도달하여 기준 시험체에 비해 최고온도 도달시간이 30, 27시간 느린 것으로 나타났다. 기준 시험체와 F40-S10,

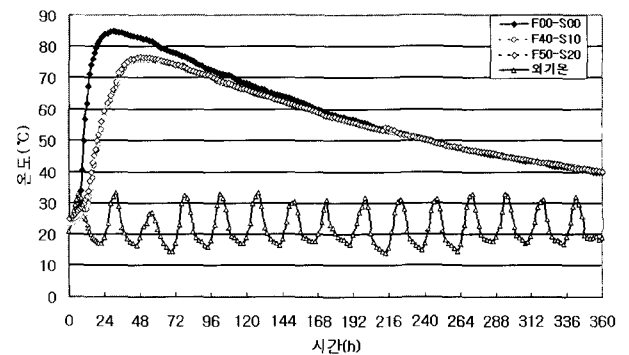


그림 4. 중심부 수화온도분포

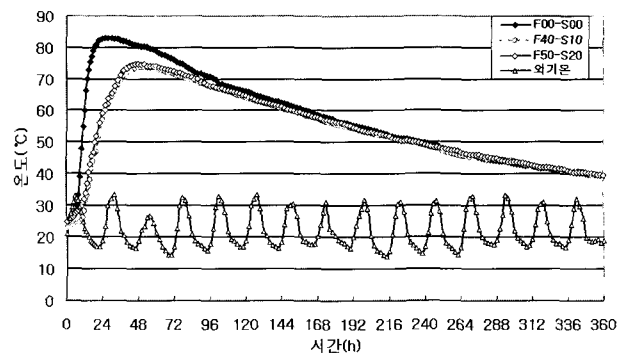


그림 5. 표면부 수화온도분포

F50-S20 시험체의 최고온도 도달시간차가 크게 나타난 것은 플라이애시가 다량으로 치환됨에 따라 초기에 응결이 상당히 지연되서 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.

2) 기동 시험체 위치에 따른 수화발열 특성

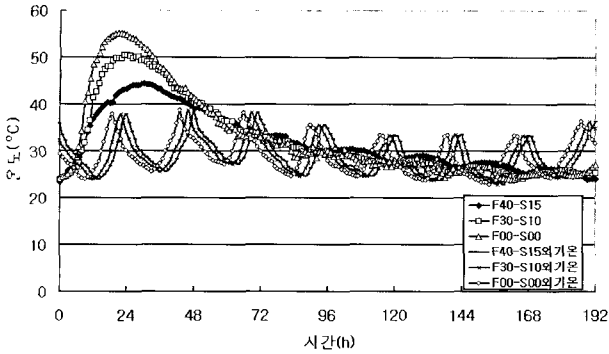


그림 6. 중심부 수화온도분포

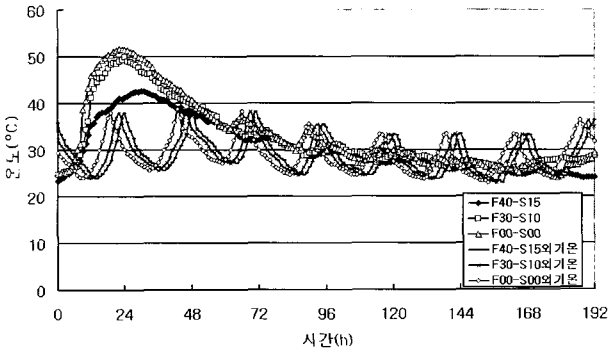


그림 7. 중심표면부 수화온도분포

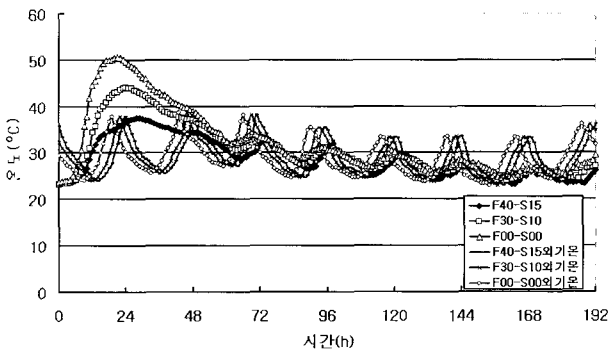


그림 8. 상단표면부 수화온도분포

기동 부재 위치에 따른 수화열 측정결과를 그림 6, 그림 7, 그림 8에 나타내고 있다. 위치에 따른 수화열 특성은 기준 시험체 경우 중심부 최고온도가 55.2°C고, 최고온도 도달시간은 타설 후 21시간 경과한 후이며 측면부와 측면상부의 경우 각각 51.6°C와 50.6°C의 최고온도를 나타내었다. F30-S10 시험체 경우 중심부 최고온도가 50.5°C고, 타설 후 24시간 경과한 후 최고온도에 도달하여 기준 시험체에 비해 최고온도 도달시간이 3시간 지연된 것으로 나타났으며 측면부와 측면상부의 경우 각각 50°C와 44.1°C의 최고온도를 나타내었다. F40-S15 시험체 경우 중심부 최고온도가 50.5°C고, 타설 후 30시간 경과한 후 최고온도에 도달하여 기준 시험체에 비해 최고온도 도달시간이 9시간 지연된 것으로 나타났으며 측면부와 측면상부의 경우 각각 42.7°C와 37.6°C의 최고온도를 나

타내었다. F40-S15 시험체의 경우 기준 시험체에 비하여 최고 온도 도달시간이 약 1.4배 지연된 것으로 나타났다.

3) 매스 시험체 코아 및 관리용 공시체의 압축강도

표 11. 매스 부재 시험체 압축강도 단위 : kgf/cm²

시험체명	시험체종류	재령			
		3일	7일	28일	91일
W35	표준수중양생	324(100)	386(100)	466(100)	514(100)
	현장봉합양생	314(96.9)	378(97.9)	439(94.2)	464(90.3)
F00	코어	중양부	-	-	345(74.0)
		표면부	-	-	363(77.89)
W35	표준수중양생	244(100)	342(100)	492(100)	568(100)
	현장봉합양생	246(100.8)	334(97.7)	467(94.9)	507(89.3)
F40	코어	중양부	-	-	418(85.0)
		표면부	-	-	422(85.8)
W35	표준수중양생	237(100)	332(100)	503(100)	619(100)
	현장봉합양생	233(98.3)	324(97.6)	477(94.8)	561(90.6)
F50	코어	중양부	-	-	451(89.7)
		표면부	-	-	464(92.2)
S20	코어	중양부	-	-	451(89.7)
		표면부	-	-	464(92.2)

코아 및 관리용 공시체의 압축강도를 그림 9, 그림 10, 그림 11에 나타내고 있다. F00-S00 시험체는 재령 28일의 경우 표준수중양생 공시체가 466kgf/cm², 현장봉합양생 공시체가 439kgf/cm², 코아공시체 중양부가 345kgf/cm², 표면부가 363kgf/cm² 강도발현을 하였다. F40-S10 시험체는 표준수중양생 공시체가 492kgf/cm², 현장봉합양생 공시체가 467kgf/cm², 코아공시체 중양부가 418kgf/cm², 표면부가 422kgf/cm² 강도발현을 하였다. F50-S20 시험체는 표준수중양생 공시체가 503kgf/cm², 현장봉합양생 공시체가 477kgf/cm², 코아공시체 중양부가 451kgf/cm², 표면부가 464kgf/cm² 강도발현을 하였다.

재령 28일에서의 코아 공시체 특성은 F00-S00 시험체 경우 코아공시체 중양부와 표면부가 표준수중양생 공시체의 74%, 77.9% 강도발현을 하였고, F40-S10 시험체는 코아공시체 중양부와 표면부가 표준수중양생 공시체의 85%, 85.8% 강도발현을 하였고, F50-S20 시험체는 코아공시체 중양부와 표면부가 표준수중양생 공시체의 89.7%, 92.2% 강도발현을 하였다. 재령 91일에서의 코아 공시체 특성은 F00-S00 시험체 경우 코아공시체 중양부와 표면부가 표준수중양생 공시체의 76.8%, 78.2% 강도발현을 하였고, F40-S10 시험체는 코아공시체 중양부와 표면부가 표준수중양생 공시체의 83.3%, 86.1% 강도발현을 하였고, F50-S20 시험체는 코아공시체 중양부와 표면부가 표준수중양생 공시체의 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.

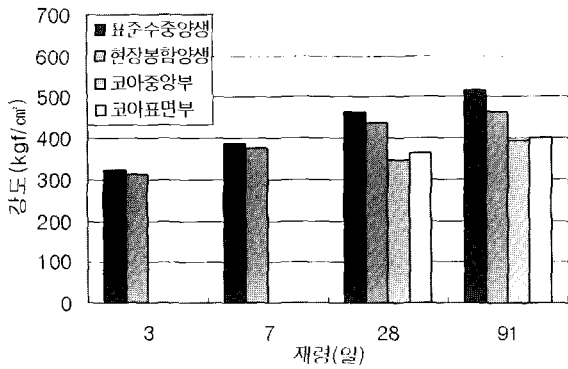


그림 9. W35-F00-S00 시험체의 압축강도

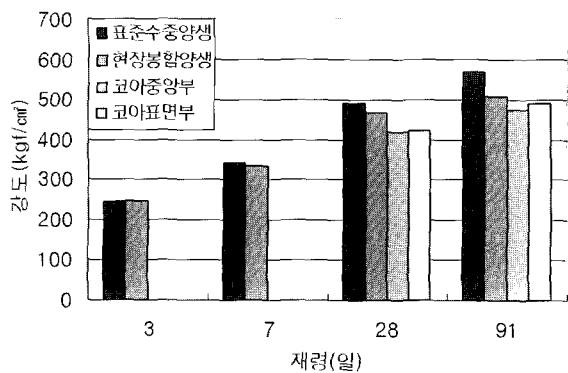


그림 10. W35-F40-S10 시험체의 압축강도

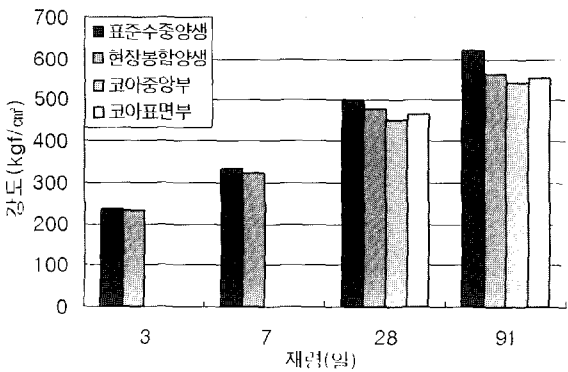


그림 11. W35-F50-S20 시험체의 압축강도

4) 기둥 시험체 코어 및 관리용 공시체의 압축강도

코어 및 관리용 공시체의 압축강도를 그림 12, 그림 13, 그림 14에 나타내고 있다. 기준 시험체는 재령 28일의 경우 현장수중양생 공시체가 301kgf/cm², 현장불함양생 공시체가 287kgf/cm², 코어공시체 상단부가 267kgf/cm², 중단부 270kgf/cm², 하단부 271kgf/cm²의 강도발현을 하였다. F30-S10 시험체는 재령 28일의 경우 현장수중양생 및 현장불함양생 공시체가 328kgf/cm², 293kgf/cm², 코어공시체 상, 중, 하단부가 308kgf/cm², 316kgf/cm², 341kgf/cm²의 강도발현을 하였다. F40-S15 시험체는 재령 28일의 경우 표준수중양생, 현장불함양생 및 코어공시체 상, 중, 하단부가 324kgf/cm², 304kgf/cm², 285kgf/cm², 297kgf/cm², 314kgf/cm²의 강도발현을 하였다. 재령 91일의 장기강도의 경우 기준 시험체는 현장수중양생의 경우 337kgf/cm²의 강도 발현을 하였으며 코어 공시체는 284kgf/cm²~298kgf/cm²의 강

도발현을 나타내었다. F30-S10 시험체의 경우 현장수중양생의 경우 389kgf/cm²의 강도 발현을 하였으며 코어 공시체는 350kgf/cm²~396kgf/cm²의 강도발현을 나타내었다.

표 12. 기둥 부재 시험체 압축강도 단위 : kgf/cm²

시험체명	시험체종류	재령(일)				
		3	7	28	91	
W45 F00	현장수중양생	178(100)	237(100)	301(100)	337(100)	
	현장불함양생	193(108.4)	262(110.5)	287(95.3)	301(89.3)	
S00	코어	상단부	-	-	267(88.7)	284(84.2)
		중단부	-	-	270(89.7)	289(85.7)
		하단부	-	-	271(90.0)	298(88.4)
	현장수중양생	150(100)	211(100)	328(100)	389(100)	
W45 F30	현장수중양생	150(100)	211(100)	328(100)	389(100)	
	현장불함양생	157(104.6)	233(110.4)	293(89.3)	341(87.7)	
S10	코어	상단부	-	-	308(93.9)	350(89.9)
		중단부	-	-	316(96.3)	375(96.4)
		하단부	-	-	341(103.9)	396(101.7)
	현장수중양생	158(100)	231(100)	324(100)	418(100)	
W45 F40	현장수중양생	158(100)	231(100)	324(100)	418(100)	
	현장불함양생	169(106.9)	234(101.2)	304(93.8)	359(85.8)	
S15	코어	상단부	-	-	285(87.9)	368(88.0)
		중단부	-	-	297(91.6)	370(88.5)
		하단부	-	-	314(96.9)	382(91.3)
	현장수중양생	158(100)	231(100)	324(100)	418(100)	

F40-S15 시험체의 경우 현장수중양생의 경우 418kgf/cm²의 강도 발현을 하였으며 코어 공시체는 368kgf/cm²~382kgf/cm²의 강도발현을 나타내었다. 코어 공시체는 기준 시험체의 경우 재령 28일 및 91일의 경우 현장수중양생 공시체의 267kgf/cm²~298kgf/cm²의 강도발현을 한 반면에, F30-S10 및 F40-S15 시험체의 경우 308kgf/cm²~396kgf/cm² 및 285kgf/cm²~382kgf/cm²의 강도발현을 하였다. 이는 플라이애시 치환 시험체의 경우 플라이애시 치환에 따른 양생초기의 수화온도를 저감시켜주었고, 고온의 양생온도로 인하여 조기에 플라이애시의 포졸란 반응이 활성화되기 때문에 기준 시험체에 비해 더 높은 강도 발현을 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.

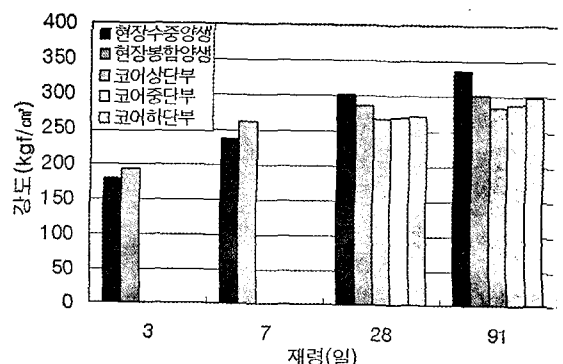


그림 12. W45-F00-S00 시험체의 압축강도

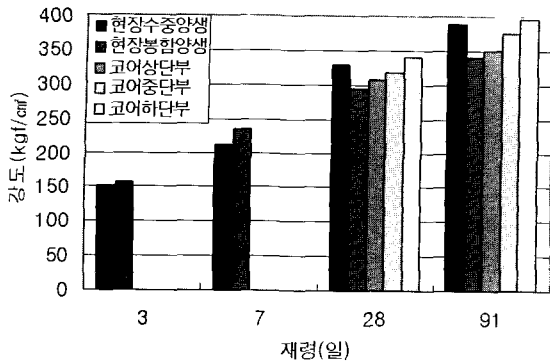


그림 13. W45-F30-S10 시험체의 압축강도

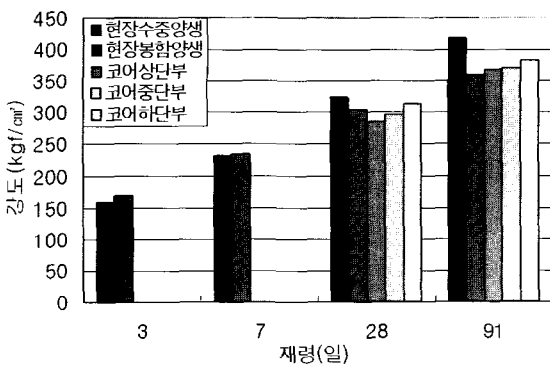


그림 14 W45-F40-S15 시험체의 압축강도

4. 결 론

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

- 1) 단열온도상승식을 최고온도 예측결과 기준시험체의 경우 최대상승온도가 63.92℃로 예상되었으며 플라이애시 치환율이 10%, 20%, 30%, 40%로 증가함에 따라 예상최고온도가 61.62℃, 58.83℃, 55.43℃, 52.91℃로 저하하는 것으로 예측할 수 있었다.
- 2) 단열온도상승실험결과 기준 시험체의 경우 타설 24시간 후 69.1℃의 최고온도에 도달하였으며 플라이애시의 결합재 치환량이 증가함에 따라 최고온도는 저하하고 최고온도도달 시간은 증가하여 F40-S00 시험체의 경우 34시간30분 후 51℃의 최고 온도에 도달하였다. 플라이애시 잔골재 치환에 따라 최고온도는 및 최고온도 도달시간이 증가하였으나 그 증가량은 미약하였다.
- 3) 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.
- 4) 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.

- 5) 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.
- 6) 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 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. P. K. Mehta, P. J. M. Monteiro, Concrete-Structure, Properties, and Materials, Prentice Hall, 1993
2. 한천구의 “혼화재 치환 및 시공법 변화에 따른 고유동 콘크리트의 수화열 및 강도특성”, 대한건축학회논문집 구조계, 2002.9
3. A. Bilodeau, V. M. Malhotra, and D. M. Golden, Mechanical Properties of Structural Lightweight Concrete Incorporating High-Volume of Fly Ash, ACI International SP 172, Supplementary Papers, 1999.10, pp.43-64
4. 椎葉大和ほかフライッシュを大量使用したコンクリートの諸性狀に関する研究,日本建築學會大會學術講演梗概集, 2000.9. pp.581-584
5. 江口清ほかフライッシュを用いたマスコンクリートの諸性狀に関する検討,日本建築學會大會學術講演梗概集, 1998.9 pp.621-624
6. 정상진의 “플라이애시를 사용한 일반구조체 콘크리트의 적용성 및 품질관리에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집 구조계, 2000. 8
7. 대한주택공사, “플라이애시 콘크리트의 특성 및 적용성에 관한 연구”, 1994
8. 김무환의 “플라이애시의 치환방법 및 치환율에 따른 플라이애시를 대량 사용한 콘크리트 특성에 관한 연구”, 대한건축학회논문집 구조계, 2002. 2
9. 정상진의 “플라이애시를 다량 치환한 고강도 콘크리트에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 추계 학술발표대회 2002, 10, pp.299-302
10. 정상진의 “플라이애시를 다량 치환한 콘크리트의 초기 특성에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집, 2002. 11
11. 塚山隆一, “マツシブな鐵筋コンクリートの溫度上昇ならびに溫度ひび割れに関する基礎研究”, 東大學位論文, 昭和 49.3
12. 日本コンクリート工學協會, マスコンクリートの溫度應力研究委員會報告書, 1985. 11
13. 김진근, “시멘트 및 콘크리트의 수화열발열특성에 관한 연구”, 한국콘크리트학회논문집, 1995. 6
14. 飛坂基夫, “フライッシュを用いたマスコンクリートの諸性狀に関する検討”, 日本建築學會大會學術講演梗概集, 1998. 9