

高强度콘크리트의 内部溫度履歷과 硬化콘크리트의 特性에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Influence of Heat of Hydration
in High Strength Concrete during Hardening Process

윤영수* 이승훈* 박희민** 성상래** 백승준** 장일영*** 신성우****
Yoon, Y.S. Lee, S.H. Park, H.M. Sung, S.R. Baek, S.J. Jang, I.Y. Shin, S.W.

ABSTRACT

This study attempts to investigate the influence of heat of hydration occurred during hardening on the strength development of high strength concrete. The concrete design strengths of 500kg/cm^2 and 700kg/cm^2 were considered to simulate the square columns having $80 \times 80\text{cm}$ and $100 \times 100\text{cm}$, respectively.

Both standard curing and field curing specimen were prepared at the specified ages, and the cores were drilled out from the structure. The thermal sensors were installed into the specimen to measure the heat of hydration process occurred during the hardening.

This paper tries to uncover the relationship between the temperature history of the concrete and strength development. The correlation of core strength and specimen strength with curing condition is also discussed.

Further research is desired to enlight the relationship between strength and heat of hydration of high strength concrete.

1. 서론

구조체 콘크리트의 내부온도이력이 강도 발현에 미치는 영향에 관한 연구중에서 특히 고강도콘크리트의 경우는 콘크리트가 경화할 때 발생하는 높은 수화열이 구조체 콘크리트의 강도발현에 직접적인 관계를 갖는 것으로 알려져있다.^{1)~6)}

구조체 콘크리트의 내부온도는 수화열의 개념으로 해석되며 시멘트량, 물-시멘트비, 부재의 크기, 주변온도, 환경 등에 의해서 영향을 받고 타설당시의 콘크리트의 온도와 외기온도 등에 의해서 콘크리트의 강도에 영향을 미치게 된다.^{7),8)}

본 연구에서는 설계기준강도 500kg/cm^2 및 700kg/cm^2 인 고강도콘크리트를 대상으로 코아공시체의 강도특성과 표준수중양생 및 현장양생에 의한 강도관리용 공시체 강도와의 상관관계를 파악하고, 고강도 콘크리트에서 높은 수화열에 의한 내부온도의 상승이 강도에 어떠한 영향을 미치는가를 알아보려고 하였다.

실물크기의 모형기둥의 제작을 위해 실제공사와 같은 거푸집을 제작하였으며, 운반 및 타설은 레미콘트럭과 콘크리트 펌프카를 이용하여 현장상황과 같은 조건 조건하에서 실험을 수행하였다.

* 삼성건설(주) 기술연구소
** 삼성건설(주) 중앙시험실
*** 금오공과대학교 토목공학과 조교수
**** 한양대학교 건축공학과 부교수

2. 실험개요

2.1 실험인자

본 실험에서 구조체 콘크리트에 관한 실험인자는 아래의 표 1에 나타난 것과 같다.

2.2 고강도콘크리트의 제조

시멘트는 D사 제품인 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 골재는 세골재의 경우 강모래를 사용하였고, 조골재는 쇄석을 사용하였다. 표 2는 골재의 물리적 특성을 나타낸 것이다.

표 2 골재의 물리적 특성

항목 종류	산지	최대 크기 (mm)	포견 비중	흡수율 (%)	일본 함유량 (%)	표용량 (kg/l)	조립율	마모율
세골재	-	-	2.608	1.37	합격	1380	2.92	-
조골재	-	25	2.612	1.35	합격	1600	6.63	17.1

고강도콘크리트의 제조는 시멘트, 골재와 같은 기본재료와 수화열 저감 및 장기강도의 발현을 위한 플라이애쉬, 강도발현과 내구성 증진을 위한 실리카흄 및 고유동성을 얻기 위한 고유동화제를 가지고 많은 사전 실내시험을 통하여 현장에서의 시공성을 고려한 최적배합을 도출하였으며, 표 3은 플라이애쉬와 실리카흄의 기본물성을 나타낸 것이고, 표 4는 고유동화제의 물성을, 표 5는 본 실험에서 사용한 고강도콘크리트의 최적배합비를 나타낸 것이다.

표 1 구조체 콘크리트에 관한 실험인자

실험 인자	종 류		
	1	2	3
a 설계기준강도(kg/cm ²)	500(T-500)	700(T-700)	-
b 기둥 크기 (cm)	80x80	100x100	-
c 물-시멘트비 (%)	36.5	31.5	-
d 공시체의 종류	표준수중양생	현장양생	코아공시체
e 관리 재령 (日)	1, 3, 7, 28, 56	1, 3, 7, 28, 56	7, 28, 56

표 3 플라이애쉬 및 실리카흄의 물성

구 분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	강열감량	비중
플라이애쉬	55.6	26.41	5.30	0.05	4.90	2.13
실리카흄	92.3	1.70	3.20	2.00	3.20	2.35

표 4 고유동화제의 물성

품 명	규 격	주성분	기술자시방서	비 중	PH	형태	고형분 (%)	표준사용량
(*) Super-20	고유동화제	(**) N	ASTM C 494 TYPE A & D	1.202	8.12	암갈색 액체	40.7	시멘트 중량의 0.35~3%

주) (*) Super-20 : 미국 Grace사 제품
(**) N : Naphthalene 계

표 5 고강도콘크리트의 최적배합비

설계기준 강도	W/C	S/A	단위 수량	기본재료(kg/m ³)			혼화제 (kg/m ³)		고유동 화제 (%)
				C	S	G	1	2	
500	36.5	41	173.6	476	658.5	949.1	84	-	1.3
700	31.5	38	162.5	520	569.7	930.9	65	65	1.6

1 : 플라이애쉬 2 : 실리카흄

2.3 구조시험체 콘크리트의 제작

본 실험의 대상 구조체로는 고강도콘크리트의 사용이 가장 효과적인 압축부재의 기둥을 택하였다. 그림 1은 구조체 콘크리트의 형상 및 크기와 코아의 채취위치를 나타낸 것이다.

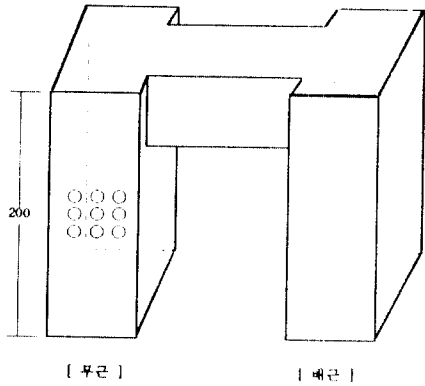


그림 1 기둥 시험체의 형상 및 코아 채취 위치 (단위: cm)

시험체의 한쪽 기둥은 배근을 하고 다른 한쪽은 무근으로 제작하여 배근을 한 기둥은 수화열을 측정하고 무근인 기둥에서는 각 재령별로 코아를 채취하였다.

기둥시험체는 지하 7층, 지상 31층 규모의 주상복합건물의 지하층에 시공될 철근 콘크리트조의 설계사양을 고려하여 단면은 80x80cm(C-80), 100x100cm(C-100)로 하였으며, 높이는 2.0m로 하였다.

2.4 구조체 콘크리트의 내부온도측정

기둥에 매립한 온도센서(thermistor)를 현장에 설치한 계측기와 연결하고, 이것을 씨리얼포트(serial port)를 이용하여 현장 사무실에 설치한 컴퓨터와 연결함으로써 콘크리트의 수화온도를 자동 계측할 수 있게 하였다. 사용한 계측기는 DataTaker의 DT 615 기종으로써 기둥 내부 및 표면의 수화온도를 측정하였다.

표 6은 본 실험에서 고강도 콘크리트의 수화온도를 측정하기 위한 계획을 나타낸 것이다.

표 6 수화온도 측정계획

부재의 종류	분류	강도 (kg/cm ²)	측정 위치		총 측정수
			길이	단면	
기둥	C-80	500	상중마	중심 1	9
			외곽 2	중심 1	
	700	상중마	중심 1	9	
		외곽 2	중심 1		
C-100	500	상중마	중심 1	9	
		외곽 2	중심 1		
700	상중마	중심 1	9		
	외곽 2	중심 1			

2.5 공시체의 제작

압축강도 시험용 공시체는 표 1에 나타난 것과 같이 표준수중양생 공시체와 현장양생공시체를 각 재령에 따라 각각 5개씩 제작하였으며, 코아공시체는 무근 기둥의 C-80 및 C-100 시험체에 대해서 7, 28 및 56일 재령에 맞추어 채취하였다. 코아의 채취는 다이아몬드 드릴을 사용하여 타설 방향에 수직으로 중앙부에서 각 재령별, 강도별 및 부재 크기별로 3개씩 채취하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 경화콘크리트의 특성

본 실험은 1,2차로 나누어 수행되었으며, 평균외기온도는 1차의 경우 약 15 °C, 2차의 경우 약 9 °C정도로써 다소 차이가 있었다.

설계기준강도가 500 kg/cm²(T-500)인 경우 타설당시의 콘크리트의 내부온도는 22 °C 정도, 타설이 완료된 후의 콘크리트 온도는 약 26~28 °C였으며, 설계기준강도가 700kg/cm² (T-700)인 경우는 타설시 콘크리트의 온도가 약 15 °C 정도, 타설이 완료된 후의 콘크리트의 온도는 약 20~22 °C를 나타내었다.

3.1.1 표준수중양생강도

표준수중양생 공시체는 표 7에 나타난 것과 같이 T-500과 T-700에 대해서 재령별로 1, 3, 7, 28, 56일인 경우에 대해서 제작 하였다.

표 7 표준수중양생 공시체의 압축강도

Type	양생방법	1日	3日	7日	28日	56日
T-500	표준수중양생	247	394	473	564	631
T-700	표준수중양생	120	398	633	819	855

위의 결과에서 나타난 바와 같이 T-700의 경우는 초기경화에 아무런 문제가 없었던 T-500의 경우와는 달리 초기강도가

상당히 낮게 발현되어 재령 1일 강도가 28일 강도의 약15% 정도로써, 이것은 타설시의 콘크리트 온도가 15 °C로 매우 낮았고 외기온도도 낮았기 때문에 초기경화가 지연되어 발생한 것으로 생각된다.

그러나 재령 7일부터는 정상적인 강도 발현을 하여 28일 강도의 약 77% 정도의 강도를 나타내었다.

또한, 각 Type에서 재령 28일에 대한 재령 56일의 강도 증가율은 T-500의 경우 약 8%, T-700의 경우 약 5% 정도로써 재령 28일이 지난 후에도 상당한 강도의 증가가 있음을 알 수 있다.

3.1.2 현장양생강도

현장양생 공시체의 제작은 표준수중양생 공시체와 같은 재령에 대해서 제작하였으며, 강도는 표 8에 나타난 것과 같다.

표 8 현장양생 공시체의 압축강도

설계강도	양생방법	1 일	3 일	7 일	28일	56일
500	현장양생	206	368	427	551	574
700	현장양생	108	354	437	583	682

표 8에 나타난 것과 같이 현장양생 공시체의 경우는 표준수중양생 공시체에 비해서 강도발현이 다소 떨어짐을 알 수 있다.

T-500의 경우는 초기강도 발현이 상당히 양호하여 현장양생 공시체의 재령 1일 및 7일의 강도는 표준수중양생 공시체의 재령 28일 강도의 약 35% 및 73% 정도를 나타내었다. 그러나 T-700의 경우는 초기강도가 상당히 낮게 발현되어 재령 1일 및 7일의 현장양생 강도는 재령 28일의 표준수중양생 강도의 13% 및 53%에 불과하여, 재령 7일의 표준수중양생 공시체의 77%에 비해서 상당한 차이가 있음을 알 수 있었다.

3.1.3 코아공시체

본 실험에서는 구조체 콘크리트의 강도를 가장 정확하게 파악하기 위해서 구조물에서 직접 코아를 채취하였으며, 코아의 채취는 재령, 부재의 크기 및 강도를 변수로 하여 구조체 콘크리트의 내부온도 특성

과 코아공시체의 강도와의 상호 관계를 규명하고자 하였다.

표 9는 기둥부재에서 채취한 코아공시체의 재령별 강도를 나타낸 것이다.

표 9 코아공시체의 압축강도

설계강도	단면의 크기	7 일	28일	56일
500	C-80	486	528	502
	C-100	464	539	516
700	C-80	515	692	684
	C-100	568	742	716

전체적인 경향으로써 코아공시체의 강도는 표준수중양생 공시체의 강도에 비하여 T-500의 경우 40~60kg/cm²(7~10%), T-700의 경우 80~120kg/cm²(10~15%)정도가 작아져서 강도가 증가할수록 저하율이 커지는 것을 알 수 있다. 따라서, 고강도 콘크리트의 경우 설계기준강도에 대한 배합강도의 할증율은 콘크리트의 강도가 증가할수록 더 커져야 할 것으로 사료되며, 이러한 경향은 재령 56일에 있어서도 비슷한 양상을 띄고 있다.

3.2 구조체 콘크리트의 내부온도특성

3.2.1 콘크리트 배합의 영향

그림 2는 T-500의 경우 C-80 및 C-100 부재에 대한 시험체 중앙부에서의 내부온도이력이며, 그림 3은 T-700의 내부온도이력을 나타낸 것이다.

그림 2에 나타난 1차 타설의 C-80 시험체의 최고온도는 60.5 °C이고 타설완료 후부터 최고온도에 도달하기 까지 걸린 시간은 17시간 30분이었으며, C-100 시험체의 최고온도는 69.4 °C이고, 최고온도 도달시간은 약 19시간 정도 소요되었다.

그리고, 그림 3에 나타난 2차 타설의 경우 C-80 시험체의 최고온도는 57.8 °C이고 타설완료 후부터 최대온도에 도달하기까지의 시간은 15시간 30분이었으며, C-100 시험체의 최고온도는 약 64 °C 정도로써 최대온도 도달시간은 약 16시간 정도로 소요되었다.

표 5의 최적배합비에 나타난 것과 같이 1차타설시의 T-500 콘크리트의 시멘트량이 2차타설시의 T-700 콘크리트의 시멘트량

보다 1m³당 44kg이 더 작고, 물-시멘트비도 2차타설의 31.3에 비해서 1차타설시에는 36.5정도로서 약 5정도가 더 높은데도 불구하고 최고온도는 C-80과 C-100의 경우 각각 2°C 및 6°C 가 더 높게 나타난 것은 위에서 설명한 것과 같이 외기온도의 영향 때문인 것으로 생각된다.

콘크리트의 온도상승률을 아래와 같이 나타낼 때

$$\text{온도상승률} = \frac{\text{최고온도} - \text{타설완료시의 콘크리트 온도}}{\text{최고온도에 이르기까지 걸린 시간}}$$

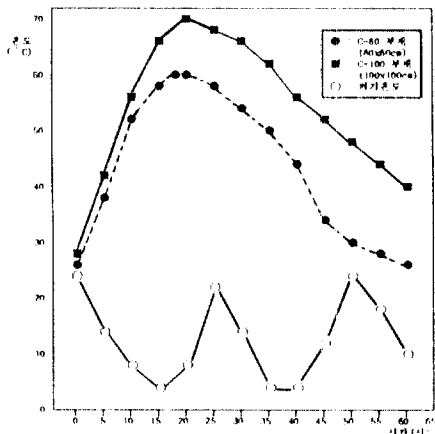


그림 2 T-500의 내부온도이력

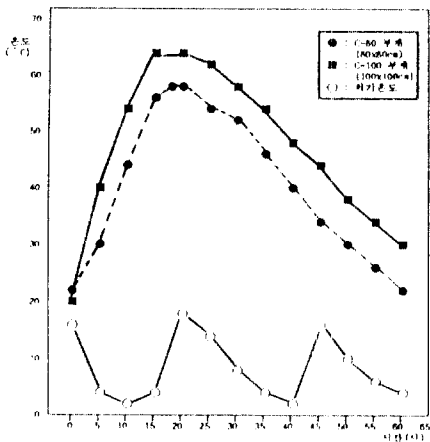


그림 3 T-700의 내부온도이력

온도상승률은 T-500의 경우 C-80 시험체는 1.94°C/h, C-100 시험체는 2.21°C/h

를 나타내었고, T-700의 경우 C-80 시험체는 2.32°C/h, C-100 시험체는 약 2.75°C/h를 나타내었다.

위의 결과로써 온도상승율은 시멘트-물비가 커질수록, 단위시멘트량이 많을수록, 부재의 크기가 클수록 높아지는 경향을 나타내고있다. 즉, 시멘트-물비가 0.1 증가함에 따라 C-80 시험체는 0.08°C/h, C-100 시험체는 0.12°C/h 증가하였다.

3.2.2 부재두께의 영향

그림 4는 부재두께에 따른 최고온도를 나타내며, 그림 5는 부재두께에 따른 온도상승률을 나타낸 것이다.

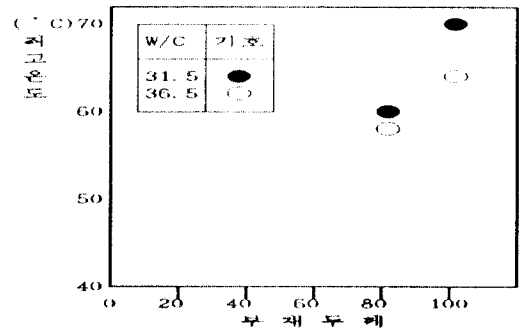


그림 4 부재두께와 최고온도와의 관계

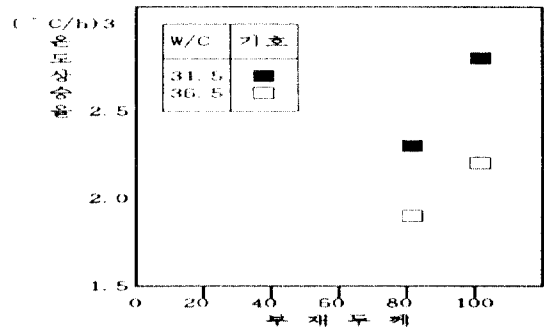


그림 5 부재두께와 온도상승률과의 관계

3.2.3 부재단면의 영향

그림 6 및 그림 7은 콘크리트 배합에 따른 최고온도 도달시의 단면방향의 온도분포를 나타낸 것이다.

콘크리트의 표층부와 중심부의 온도차는 기둥부재의 중앙에서 C-80 시험체의 경우 약 17°C, C-100 시험체의 경우 약 17~20°C의 온도차가 발생하였다. 또한,

기둥의 상부와 중앙부의 온도차는 부재 단면의 중심부에서 C-80 시험체의 경우 약 12~15 °C, C-100 시험체의 경우 약 7~11 °C의 온도차가 발생하였다.

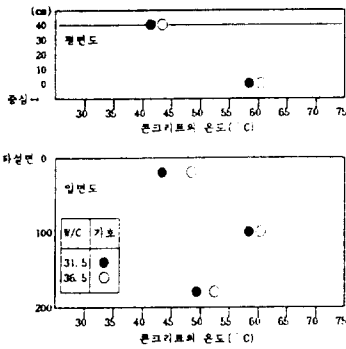


그림 6 부재단면의 온도분포(C-80)

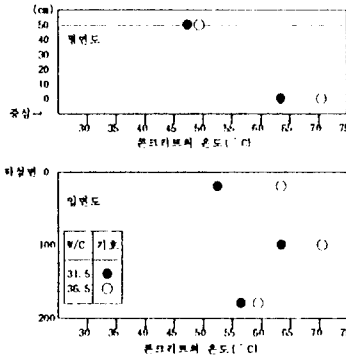


그림 7 부재단면의 온도분포(C-100)

4. 결론

이상의 결과에서 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

(1) 타설시의 콘크리트의 온도와 외기 온도가 낮을 경우 표준수중양생 공시체의 강도는 재령 3일까지는 영향을 받지만 재령 7일 이후에는 정상적인 강도발현을 하였다.

(2) 현장양생 공시체는 타설시의 콘크리트 및 외기온도의 영향을 받아 T-500의 경우 551kg/cm²으로 정상적인 강도발현을 하였으나, T-700의 경우 583kg/cm²으로 설계기준강도의 약 83%에 불과하였다.

(3) 설계기준강도에 대한 배합강도의 할증율은 강도의 증가와 함께 증가되어야 할 것으로 사료된다.

(4) 온도상승율은 단위 시멘트량이 많을수록 시멘트-물비가 클수록 최고온도와 관계없이 더 커지며, 부재의 두께가 커질수록 최고온도와 온도상승율은 같이 증가함을 알 수 있다.

(5) T-700 시험체의 코아공시체 강도가 표준수중양생 공시체 강도의 85~90% 인것에 비하여, T-500 시험체는 90~95% 정도로써, 이것은 T-700 시험체의 내부 수화온도가 T-500 시험체의 경우보다 더 낮았던 것과 관계가 있는 것으로 사료된다.

5. 참고문헌

- 1) Smeplass S., Maage M., "Heat of Hydration of High-Strength Concrete", ACI SP 121, 1990, pp.433-456
- 2) 일본건축학회, "고강도콘크리트 기술의 현황", 1991
- 3) 平賀友晃 외 1인, "구조체 콘크리트에 있어서 부재의 코아강도와 표준양생공시체 강도와의 관계", 일본건축학회 학술간연집, 1983
- 4) Mufid A. Samarai 외 2인, "Influence of Mixing Temperature on the Properties of High Strength Concrete", Proceeding on Symposium in Stavanger, Norway, 1987, pp. 433-472
- 5) Steinar Helland, "Temperature and Strength Development in Concrete with W/C Less Than 0.40", Proceedings on Symposium in Stavanger, Norway, 1987, pp. 473-486
- 6) 이승훈 외 3인, "사무실 건축물에 플라이애쉬를 사용한 500 kg/cm²이상의 고강도 콘크리트 시공", 한국콘크리트 학회지, Vol. 5, No. 2, pp.83-93, 1993.6
- 7) 신성우 외 7인, "산본 삼성 APT.에 플라이애쉬를 혼입한 500kg/cm² 이상의 고강도콘크리트의 최적배합, 시공 및 구조적 연구", 한국콘크리트학회 가을학술발표회, Vol. 3, No. 2, 1991, pp.162
- 8) 신성우 외 11인, "고강도콘크리트 시공 지침서", 삼성건설, 한양대학교, 1992. 6, pp. 25-26