

# 결합재 종류에 따른 콘크리트의 단열온도상승특성 및 단열온도상승에 따른 압축강도특성에 관한 연구

## Properties of Adiabatic Temperature Rise of Concrete Using Different Types of Binder and Effects of Adiabatic Temperature on the Compressive Strength

하재담 \*                      김태홍 \*\*                      이종열 \*\*\*                      김진근 \*\*\*\*  
Jae-Dam Ha                      Tae-Hong Kim                      Jong-Ryul Lee                      Jin-Keun Kim

### ABSTRACT

The crack of concrete induced by a temperature rise in early age concrete due to the heat of hydration of cement is a serious problem for massive or high strength concrete structures. However, there is still no reasonable equations for the prediction of the temperature rising.

In this study, the prediction equations of the heat of hydration of different types of binder are obtained from the adiabatic temperature rise test, and compared with the results from different locations to obtain the best approximated equation.

The strengths of concrete of which specimens were placed in the same chamber for the adiabatic test were compared with those under standard curing.

### 서론

콘크리트는 시멘트와 물이 반응하여 수화열이 발생되고, 경화하면서 주위의 골재를 결합하여 견고한 구조로 형성된다. 이 수화열에 의해 콘크리트는 구조물의 크기, 외부구속조건 등에 따라 온도응력이 발생되며, 인장강도를 초과하면 온도균열이 발생되어 누수, 내하력 저하 등으로 인하여 설계 공용기간 도달하기 전 내구성이 저하하여 구조물에 치명적인 손상을 미치게 된다.

최근에는 대형 또는 초고층 콘크리트구조물이 많이 건설되어 부재단면이 커지고, 단위결합재량이 증가하여 콘크리트에 관통균열이 자주 발생되고, 강도설계 위주에서 내구성설계로 전환되는 추세여서 온도균열에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 또한 Turn-Key 설계에서는 기본적으로 온도해석을 한 온도균열에 대한 검토가 시행되고 있으나, 해석 시 사용되는 단열온도상승식이 서로 달라 콘크리트 구조물의 온도분포는 실제 현장 계측 값과 상이하여 수화열을 정확히 예측하기가 어려운 실정이다.

본 연구에서는 결합재, 타설온도 등을 인자로 하여 단열온도상승시험을 수행하고 여러 가지 근사식 사용하여 적합한 단열온도상승식을 제안하여 온도해석을 통한 온도균열 제어 대책 수립 시 콘크리트 구조물의 온도분포를 정확히 평가할 수 있는 기초 자료로 활용할 수 있도록 하고, 또한 구조물에서 실제 압축강도를 예측할 수 있게 단열온도상승시험에서와 동일한 온도이력을 지닌 콘크리트의 압축강도특성을 표준양생과 비교 평가하였다.

- \* 정희원, 쌍용중앙연구소 콘크리트연구실 선임연구원, 공학박사
- \*\* 정희원, 쌍용중앙연구소 콘크리트연구실 연구원
- \*\*\* 정희원, 쌍용중앙연구소 콘크리트연구실 수석연구원, 실장
- \*\*\*\* 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 교수, 공학박사

## 2. 시험방법 및 재료특성

### 2.1 사용재료

결합재는 포틀랜드시멘트로 1종(보통 포틀랜드) 및 4종(저열 포틀랜드)시멘트를, 혼화재로 플라이 애시 및 고로슬래그 미분말을 사용하였으며, 각 구성재료의 화학성분 및 물리성능은 다음 표 1과 표 2와 같다. 그리고 또한 사용골재의 물리적 특성은 다음 표3과 같다.

표 1 결합재별 화학성분 및 광물조성

항 목 결합재	화학성분(%)						광물조성(%)			
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
1종	21.0	5.9	3.2	62.5	2.1	0.78	49	23	10	9
4종	25.3	3.1	3.6	62.5	2.3	0.51	29	50	3	9
플라이 애시	62.4	23.6	6.1	3.9	0.4	1.5	-	-	-	-
고로슬래그 미분말	33.3	15.3	0.4	42.1	2.1	0.7	-	-	-	-

표 2 시멘트의 물리성능과 수화열

항 목 시멘트	비중	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	응결(h:m)		압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )				수화열(cal/g)		
			초결	종결	3일	7일	28일	91일	7일	28일	91일
1종	3.15	3,200	4:30	6:50	195	290	376	465	81	92	99
4종	3.22	3,500	5:50	9:20	126	175	360	550	55	67	78

표 3 골재의 물리적 특성

항 목 골 재	비중	흡수율 (%)	단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )	조립율	씻기 손실량 (%)
잔골재	2.60	1.25	1,560	2.65	1.3
굵은골재	2.67	1.18	1,550	6.75	0.8

### 2.2 단열온도상승시험 및 단열온도상승에 따른 압축강도시험

#### 2.2.1 시험인자

다음 표 4에서 보여주는 것과 같이 결합재로는 1종시멘트, 4종시멘트, 1종시멘트에 플라이 애시 시멘트 B종 및 C종에 해당하는 플라이 애시 치환율 20, 30%, 그리고 고로슬래그 시멘트 특급에 해당하는 1종시멘트에 고로슬래그 미분말 치환율 50%로 하였다. 한편, 1종시멘트는 단위시멘트량 521kg/m<sup>3</sup>에 대하여 타설온도를 10, 20, 30°C로 하여 평가하였으며, 4종시멘트는 타설온도가 30°C인 경우에 평가하였다.

단열온도상승의 온도이력에 따른 콘크리트의 역학적 특성을 평가하기 위하여 공시체를 밀봉하여 단열온도상승시험기 chamber에 두어 단열온도상승시험이 종료되는 시기인 160시간에 압축강도시험을 수행하여 단열온도상승시험체의 실제 압축강도를 측정하였다. 또한 동일한 배합에 대한 공시체를 표준양생하여 압축강도를 구하여 비교하였다.

표 4 단열온도상승시험을 수행한 결합재 종류 및 배합 특성

배합	결합재량 (kg/m <sup>3</sup> )	시멘트		혼화재		$\frac{W}{B}$ (%)	$\frac{s}{a}$ (%)	타설 온도 (°C)	압축강도 공시체		
		종류	사용량 (kg/m <sup>3</sup> )	종류	사용량 (kg/m <sup>3</sup> )				표준양생	단열양생	
N(521,33.0,41.0)-10	521	1종	521	-	-	33.0	41.0	10	유	유	
N(521,33.0,41.0)-20								20			
N(521,33.0,41.0)-30								30			
NF20(366,50.0,46.0)-20	366		293	플라이 애시	73	50.0	46.0	20	무	무	
NF20(450,42.0,42.0)-20	450		360		90	42.0	42.0				
NF30(390,39.0,37.5)-20	390		273	117	39.0	37.5					
NF30(475,35.0,34.0)-20	475		331	142	35.0	34.0	190.5	48.6	42.6	유	유
NS50(381,48.6,42.6)-20	381		190.5	190.5	48.6	42.6					
NS50(445,40.0,41.3)-20	445		222.5	미분말	222.5	40.0	41.3	30	유	유	
L(389,47.0,45.0)-30	389	389	-	47.0	45.0						
L(440,42.0,43.0)-30	440	440		42.0	43.0						

### 2.2.2 단열온도상승시험기

본 연구에서 사용된 단열온도상승시험기는 다음 그림 1에서 보여주는 것과 같이 단열방식은 공기순환식으로 50%의 콘크리트 시료로 평가하며, 모든 시험에 대하여 160시간까지 측정하였다.

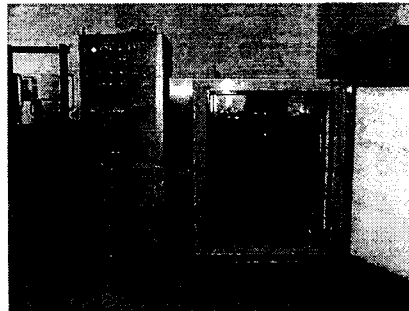


그림 1 단열온도상승시험기

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 단열온도상승 특성

단열온도상승 특성을 평가하기 위하여 기존에 사용되고 있는 식  $Q=K(1-e^{-at})$ 를 비롯하여 다음의 3가지 근사식을 사용하여 결합재별 및 타설온도에 따라 평가하였다.

$$Q=K(1-e^{-at}) \quad (\text{식 1})$$

$$Q=K(1-e^{-a(t-t_0)}) \quad (\text{식 2})$$

$$Q=K(1-e^{-a \cdot t^2}) \quad (\text{식 3})$$

### 3.1.1 플라이 애시를 치환한 경우의 단열온도상승 특성

플라이 애시 시멘트 B종 및 C종에 해당하는 플라이 애시를 20% 및 30% 치환한 콘크리트를 타설온도를 20°C로 하여 단열온도상승시험을 수행하였으며, 결과를 근사식에 의해 상관계수를 구하면 다음 그림 2에서 보여주는 것과 같이 플라이 애시의 치환율이 높을수록 초기에 수화반응이 지연되는 (식 3)에 근접함을 알 수 있다.

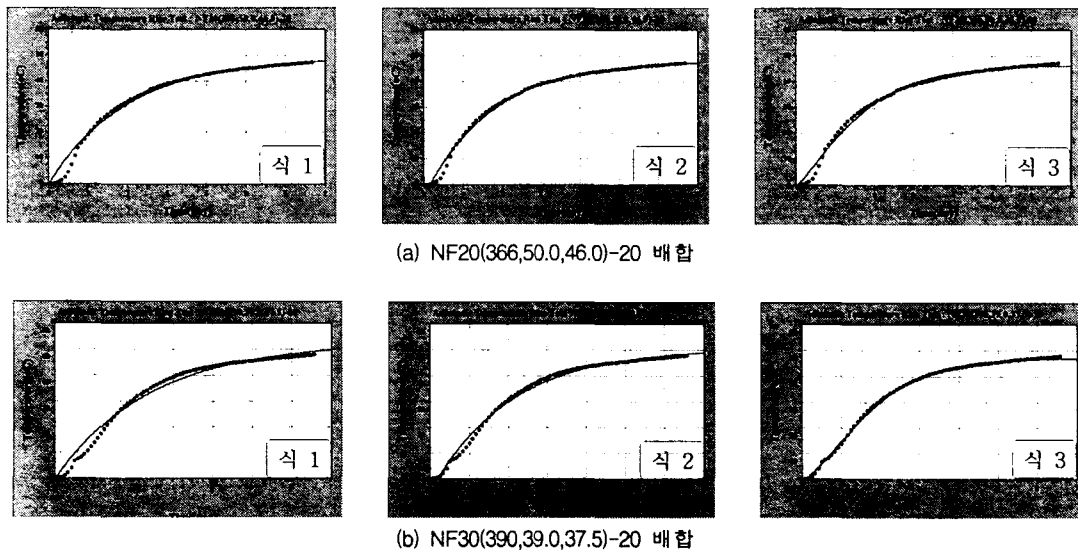


그림 2 플라이 애시 치환율에 따른 단열온도상승 특성

### 3.1.2 고로슬래그 미분말을 치환한 경우의 단열온도상승특성

고로슬래그 시멘트 특급에 해당하는 50%의 고로슬래그 미분말을 치환한 콘크리트를 타설온도를 20°C로 하여 단열온도상승시험을 수행하였으며, 결과를 근사식에 의해 상관계수를 구하면 다음 그림 3에서 보여주는 것과 같이 초기의 수화휴지기를 고려하는 (식 2)에 근접함을 알 수 있다.

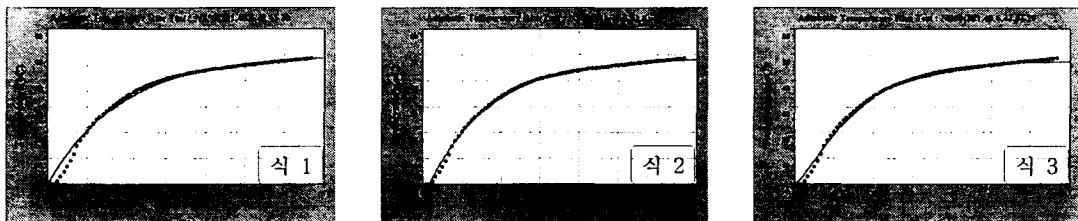


그림 3 NS50(381,48.6,42.6)-20 배합의 단열온도상승 특성

### 3.1.3 타설온도에 따른 단열온도상승 특성

타설온도에 따른 단열온도상승 특성을 평가하기 위하여 1종시멘트를 사용한 고강도콘크리트의 배합

으로 10, 20, 30°C의 타설온도로 시험을 수행하였으며, 타설온도가 낮을수록 다음 그림 4에서 보여주는 것과 같이 수화반응이 지연되어 (식 3)에 근접함을 알 수 있다. 또한 타설온도가 30°C인 경우에도 초기에 지연되는 것은 고성능 AE감수제의 사용으로 인한 것으로 설명된다.

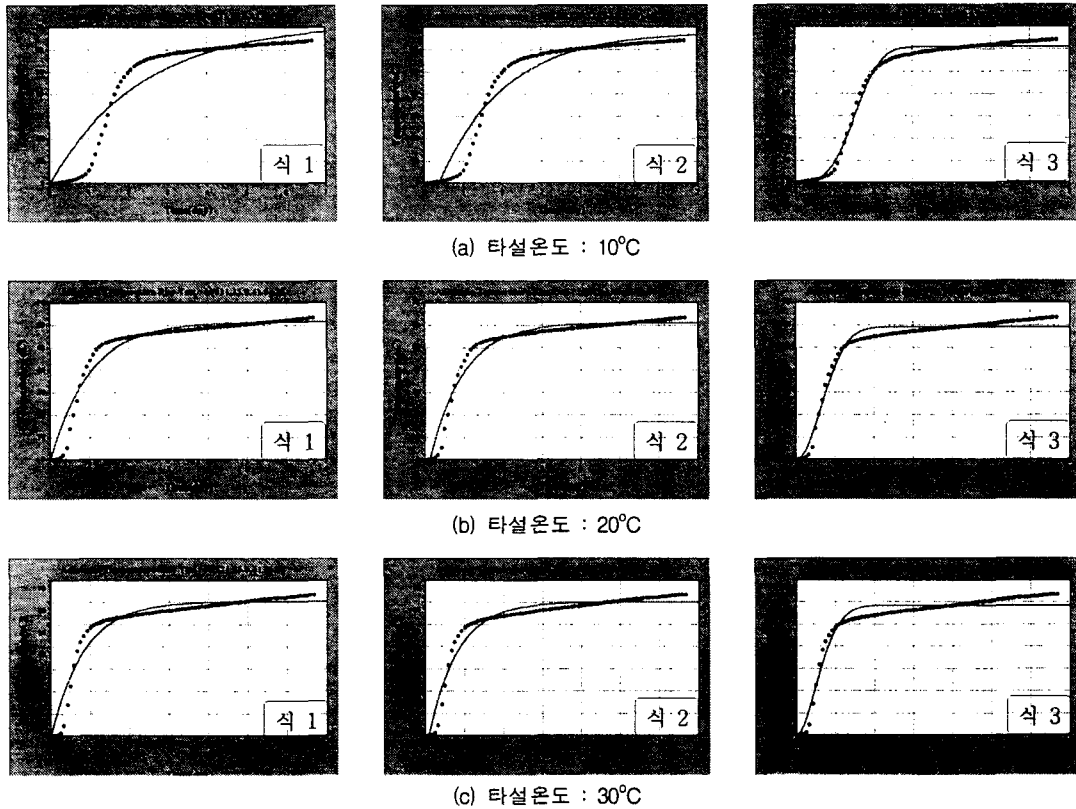


그림 4 N(521,33.0,41.0) 배합의 타설온도에 따른 단열온도상승 특성

### 3.1.4 타설온도가 높은 경우 초저발열형시멘트의 단열온도상승 특성

타설온도가 30°C인 경우 초저발열형시멘트인 4종(저열포틀랜드)시멘트를 사용한 경우에는 다음 그림 5에서 보여주는 것과 같이 모든 식에서 비슷한 상관계수 0.992가 되어 모든 식의 적용이 가능하나 상관계수가 더 높은 근사식의 사용도 바람직하다.

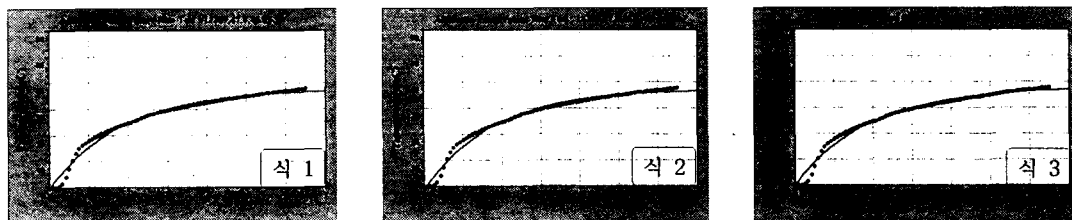


그림 5 L(389,47.0,45.0)-30 배합의 단열온도상승 특성

### 3.2 단열온도상승의 온도이력을 받은 콘크리트의 압축강도 특성

수화열해석 시 사용하는 인장강도는 일반적으로 표준양생값을 고려하나 온도이력을 받은 콘크리트의 역학적 특성은 다음 표 5에 나타난 것과 같이 단열양생 160시간에 모든 배합에서 표준양생 28일 압축강도에 근접하고 있다. 이로 미루어 볼 때 온도균열지수 산정 시 사용되는 인장강도값은 콘크리트의 성숙도 개념을 도입하여야 합리적일 것으로 판단된다. 그리고 다음 표 5에 단열온도상승 특성 및 상관계수( $r$ )를 나타내었다.

표 5 근사식에 따른 단열온도상승 특성 및 압축강도 특성

배합	$Q = K(1 - e^{-at})$			$Q = K(1 - e^{-a(t-t_0)})$				$Q = K(1 - e^{-a t^\beta})$				$f_{cu}(\text{kgf/cm}^2)$			
	K	a	r	K	a	$t_0$	r	K	a	$\beta$	r	표준			단열
												7일	28일	91일	160시간
N(521,33.0,41.0)-10	71.9	0.426	0.946	67.9	0.593	0.363	0.965	61.0	0.170	3.298	0.996	589	691	740	605
N(521,33.0,41.0)-20	61.7	1.008	0.974	61.1	1.176	0.118	0.981	59.2	1.243	2.004	0.990	540	679	-	546
N(521,33.0,41.0)-30	60.5	1.198	0.973	60.1	1.368	0.084	0.978	58.6	1.670	1.764	0.980	593	681	753	513
NF20(366,50.0,46.0)-20	49.4	0.499	0.993	48.2	0.577	0.147	0.996	46.4	0.483	1.260	0.997	225	308	416	304
NF20(450,42.0,42.0)-20	58.6	0.601	0.983	57.1	0.744	0.208	0.992	54.8	0.550	1.533	0.995	378	505	602	419
NF30(390,39.0,37.5)-20	52.7	0.417	0.992	50.8	0.495	0.179	0.995	47.0	0.380	1.447	0.999	-	-	-	-
NF30(475,35.0,34.0)-20	66.8	0.293	0.970	60.5	0.413	0.360	0.982	51.6	0.187	2.158	0.997	-	-	-	-
NS50(381,48.6,42.6)-20	49.9	0.542	0.994	48.8	0.635	0.156	0.998	47.3	0.525	1.258	0.997	258	446	-	381
NS50(445,40.0,41.3)-20	55.9	0.691	0.979	54.3	0.663	0.210	0.987	51.0	0.466	1.725	0.994	326	589	-	525
L(389,47.0,45.0)-30	37.6	0.544	0.992	37.2	0.575	0.052	0.993	38.3	0.540	0.954	0.992	124	268	510	245
L(440,42.0,43.0)-30	42.8	0.604	0.991	42.6	0.621	0.025	0.991	44.4	0.593	0.897	0.992	184	415	634	348

### 4. 결 론

결합재 종류에 따라 단열온도상승식을 콘크리트표준시방서에 제시되어 있는  $Q = K(1 - e^{-at})$  이외에 다른 근사식도 검토하여 상관계수( $r$ )가 0.990 이상이 되는 식을 얻을 수 있음을 보였다. 단열온도상승을 보다 정확히 예측할 수 있는 식을 사용할 때 정확한 수화열해석을 수행할 수 있으며, 특히 매스콘크리트에 사용되는 저발열형시멘트 및 결합재는 초기에 수화반응이 지연되고, 또한 초기의 수화휴지기를 고려한 근사식을 사용하여야 할 것으로 판단된다. 그리고 1종시멘트를 사용하더라도 일반적으로 매스콘크리트에는 단위시멘트량을 감소하기 위해 사용하는 고성능 AE감수제는 응결지연효과를 나타낼 수 있기 때문에 초기 수화반응 지연효과를 잘 반영하는 식을 사용하여 할 것이다.

매스콘크리트에서 부재 중앙부의 온도는 상승하여 콘크리트강도가 표준양생보다 빨리 발현되며, 따라서 온도균열지수 평가를 위해 사용하는 콘크리트의 인장강도는 콘크리트의 성숙도 개념을 도입하여 계산하여야 합리적인 평가가 이루어 질 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. 日本コンクリート工學協會, マスコンクリート溫度應力研究委員會報告書, 1985.
2. ACI 207.1R-87, "Mass Concrete", ACI Committee 207, 1987.
3. 김진근 외 4인, "시멘트 및 콘크리트의 수화발열특성에 관한 연구", KCI 논문집, 제7권 3호 1995.
4. 하재담 외 5인, "저열 포틀랜드(벨라이트)시멘트 콘크리트의 특성", KCI 가을 학술발표회, 1998.
5. 하재담 외 4인, "석회석미분말을 혼입한 초저발열 매스콘크리트의 특성에 관한 연구", KCI 가을 학술발표회, 2000.