

콘크리트 단열온도 상승 예측에 관한 연구

Estimation of Adiabatic Temperature Rise of Concrete

방기성* 정원섭** 송영철*** 조철희****
Pang, Gi-Sung Jeung, Won-Seoup Song, Young-Chul Cho, Chul-Hee

ABSTRACT

This study discusses the results of adiabatic temperature rise tests which were performed considering various parameters, such as cement type, water-cement ratio, unit cement weight, admixtures and placing temperature, which influence the temperature rise(K) and reaction velocity (α). The adiabatic temperature rise models obtained from this study are similar to those of Japan Concrete Institute. The models to calculate temperature rise and reaction velocity could be used the analysis of concrete thermal stress.

1. 서론

매스콘크리트에서 수화열에 의한 온도균열 발생은 구조물의 내구성이나 사용성 관점에서 이를 사전에 예측하고 적절한 시공대책을 수립함은 중요한 문제이다. 온도균열 예측에 수치해석법을 이용할 경우 해석 결과에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 콘크리트의 열 특성치로서 이에 대한 적절한 입력이 해석결과의 신뢰성 확보 측면에서 대단히 중요한 변수이다. 콘크리트 단열 온도 상승 시험기(Concrete Calorimeter)를 이용한 단열온도 상승 시험은 외기온과 단열 상태를 유지하며 발생하는 온도 상승량을 측정하는 방법으로 매스 콘크리트 구조물의 온도상승 예측에 널리 사용되고 있다. 콘크리트 단열온도 상승량에 영향을 미치는 인자는 여러 가지가 있으나 기존 연구결과에 따르면 시멘트 종류, 단위 시멘트량 및 타설온도가 지배적 요인으로 알려져 있다. 최근에는 이 세 가지 요인에 추가하여 혼화재료, 시멘트 분말도, 골재의 열 특성, 단열온도 시험 장치 등의 영향도 상당히 있다고 지적되고 있다. 따라서 본 연구에서는 시멘트종류, 물/시멘트비, 단위시멘트량, 플라이애쉬 대체율, 타설온도가 콘크리트의 단열온도 상승량 및 발열속도에 미치는 영향을 분석하여 새로운 모델식을 제시하였고 기존 모델식과의 비교검토를 수행하였다.

2. 시험 방법

2.1 시험변수

시험변수로서 표 1에 나타난 바와 같이 시멘트의 종류, 물/시멘트비, 단위시멘트량, 플라이애쉬 대체율, 타설온도를 취했다. 물/시멘트비 40% 경우 기준배합의 단위시멘트량 450kg/m^3 이외에 400, 500

* 한국전력공사 전력연구원 일반연구원

** 한국전력공사 전력연구원 일반연구원

*** 한국전력공사 전력연구원 책임연구원

**** 한국전력공사 중앙교육원 교수

kg/m³의 단위시멘트량을 가진 배합들을 선정하여 시험을 수행하였고 물/시멘트비 50% 경우 기준배합의 단위시멘트량 360kg/m³ 이외에 400kg/m³의 단위시멘트량을 가진 배합에 대한 시험을 추가하였다. 위의 시험변수들에 대한 시험을 1종과 5종 시멘트 각각에 대해 동일하게 수행하고 물/시멘트비가 40%인 5종 시멘트 콘크리트에 10, 15, 20, 25%의 플라이 애쉬를 대체하여 시험을 수행하였으며 타설 온도는 5종 시멘트 콘크리트를 대상으로 25℃와 35℃로 나누었다.

표 1 콘크리트 단열온도 상승 시험변수

결합재종류 (타설온도)	W/C비 (%)	단위결합재량(kg/m ³)		플라이애쉬 대체율 (%)
		시멘트	플라이애쉬	
1종시멘트 (25℃), 5종시멘트 (25℃,35℃)	40	400	-	-
		450	-	-
		500	-	-
5종+플라이 애쉬 (25℃)	50	360	-	-
		400	-	-
		405	45	10
5종+플라이 애쉬 (25℃)	40	382	68	15
		360	90	20
		337	113	25

표 2 콘크리트의 배합설계

W/C비 (%)	s/a (%)	단위사용량 (kg/m ³)					
		물	시멘트	잔골재	굵은골재	혼화재료	
						AE제	감수제
40	42	160	400	726	989	0.020	2.0
40	39	181	450	630	989	0.023	2.26
40	36	200	500	544	989	0.025	2.5
50	42	181	360	707	989	0.018	1.81
50	39	200	400	624	989	0.020	2.0

2.2 배합설계

1종과 5종 시멘트를 사용한 콘크리트의 배합 설계표는 표2에 나타난바와 같으며 플라이 애쉬를 혼합한 5종 시멘트 콘크리트는 물/시멘트비가 40%이고 단위시멘트량이 450 kg인 배합case에 10, 15, 20, 25%의 플라이 애쉬를 대체 하였다. 배합은 굵은 골재량을 고정시키고 물/시멘트비와 단위시멘트량에 따라서 배합설계 하였다.

2.3 시험장비

본 연구에 이용된 콘크리트 단열온도 상승 시험기는 일본 MARUI & co., LTD사에서 제작한 MIT-686-0 모델로서 이 장비의 특징은 측정 온도 범위가 +10℃ ~ +80℃이고 공시체 용적은 직경 400mm × 높이400mm로서 용량은 약 50 L정도이다. 특히 정도가 높은 콘크리트의 단열 온도상승치를 구하기 위해서는 공시체 내의 온도차가 시험기간중 정밀하게 유지되는게 중요하며 본 시험장치는 이를 ±0.1℃의 정도로 유지하도록 되어있다. 또한 공시체 내에서 시멘트와 물과의 수화반응이 종료된 뒤 온도의 상승 및 하강정도는 외부 온도영향을 최대한 줄여 시험상의 오차를 최소화 하도록 ±0.05℃/DAY 로 유지되도록 되어있다.

3. 시험결과

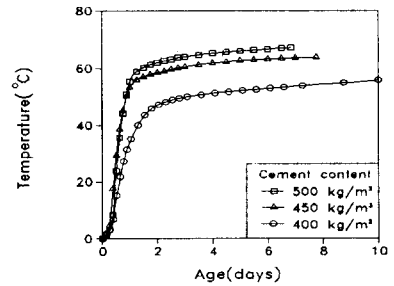
1종, 5종, 5종+플라이애쉬 콘크리트에 대한 단열온도상승곡선은 그림 1, 그림 2, 그림 3에 나타나 있으며 시험결과를 바탕으로 회귀분석을 하면 최대 단열온도상승값(K)과 반응속도(α)를 표 3에서와 같이 구할수 있다. 여기서 회귀분석에 사용된 식은 t₀항을 포함한 식이며 이는 경화 지연시간을 고려한 것으로서 1종의 경우 t₀가 0.3일(=7.2시간), 5종과 플라이애쉬 콘크리트에서는 0.5일(=12시간) 정도의 값을 갖는 것으로 나타났다. 따라서 5종과 플라이애쉬 콘크리트의 발열 특성을 적절히 모사하기 위해서는 t₀를 포함한 식을 사용하는 것이 적절하다.

3.1 단위시멘트량과 물/시멘트비의 영향

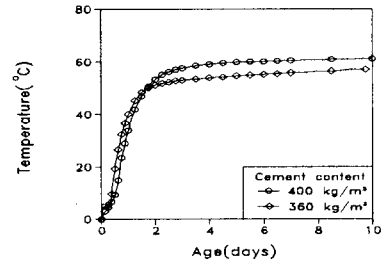
1종과 5종 시멘트 콘크리트의 단위시멘트량과 물/시멘트비에 따른 최대 단열온도상승값과 반응

표 3 최대 단열온도상승값과 반응속도

배합명	W/C비 (%)	단위 시멘트량 (kg/m ³)	$T=K[1-e^{-\alpha(t-t_0)}]$		
			최대단열온도 상승값K (°C)	반응속도 α	t_0
NC-T1	40	400	61.6	2.223	0.1826
NC-T2	40	450	52.14	1.385	0.2538
NC-T3	40	500	65.16	2.294	0.2638
NC-T4	50	360	55.23	1.516	0.1865
NC-T5	50	400	60.14	1.234	0.2538
SC-T1	40	400	57.76	1.565	0.4549
SC-T2	40	450	53.39	1.380	0.4363
SC-T3	40	500	60.52	1.793	0.5481
SC-T4	50	360	49.18	1.430	0.3549
SC-T5	50	400	53.33	1.105	0.3691
FC-T1	40	405	56.92	1.308	0.4625
FC-T2	40	382	56.11	1.205	0.4108
FC-T3	40	360	56.88	1.258	0.4715
FC-T4	40	337	55.13	1.046	0.4286
SCH-T1	40	400	56.05	3.538	0.2884
SCH-T2	40	450	51.66	2.020	0.3078
SCH-T3	40	500	62.56	2.548	0.2280
SCH-T4	50	360	51.38	2.095	0.1883
SCH-T5	50	400	48.42	2.291	0.1554



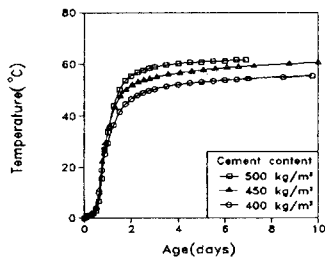
(a) 물/시멘트비 40%



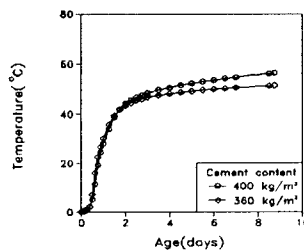
(b) 물/시멘트비 50%

그림 1 단열온도상승곡선변화(1종)

NC:1종, SC:5종(25°C), FC:5종+Flyash, SCH:5종(35°C)



(a) 물/시멘트비 40%



(b) 물/시멘트비 50%

그림 2 단열온도상승곡선 변화 (5종)

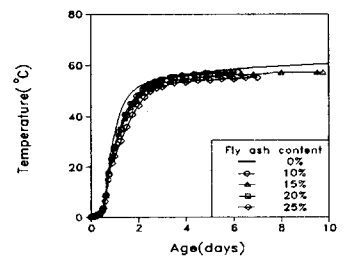


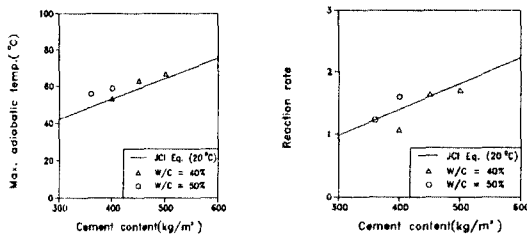
그림 3 단열온도상승곡선변화 (5종+플라이애쉬)

속도의 변화는 그림4와 그림5에 나타나 있으며 각각의 최대 단열온도상승값과 반응속도는 일본 콘크리트 공학 협회의 제안식과 비교하기 위해 보정계수를 이용하여 20°C로 수정한 값이다. 그림4와 그림5의 (a)에 나타난 바와같이 최대 단열온도상승값은 물/시멘트비에 상관없이 단위시멘트량이 증가함에 따라서 증가하고 있다. 이러한 경향은 일본 콘크리트 공학 협회가 보통포틀랜드시멘트에 적용하기 위해 제안한 식과 잘 일치하고 있다. 또한 본 시험결과에 의하면 이 제안식은 1종 시멘트 콘크리트의 최대 단열온도상승값뿐만 아니라 5종 시멘트 콘크리트의 시험결과와도 일치하고 있다. 따라서 이 모델식은 단위시멘트량에 따른 5종과 1종 시멘트 콘크리트의 최대 단열온도상승값의 변화를 잘 모사하고 있다고 볼 수 있다. 그림4와 그림5의 (b)는 단위시멘트량에 따른 반응속도의 변화 양상을 나타낸 그림이며 최대 단열온도상승값의 경우와 같이 그 경향이 일본 콘크리트 공학 협회의 제안식과 유사하나 다만 5종 시멘트 콘크리트의 반응속도가 1종 시멘트 콘크리트보다 전체적으로 작은 값을 나타내고 있다.

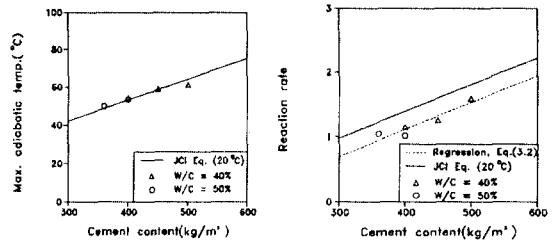
최대 단열온도상승값의 결과에 비해 반응속도의 결과의 편차가 크게 나타나는데 이것은 반응속도가 시험방법이나 측정방법에 따라 그 변화가 심하기 때문이며 기존의 연구 결과와 비교해 볼 때 1종 시멘트 콘크리트의 반응속도 예측식으로 일본 콘크리트 공학 협회의 식을 사용하는 것이 가능하다고 사료된다. 또한 5종 시멘트는 1종 시멘트에 비해 반응속도가 큰 C₃S 함유량이 작고 반응속도가 작은 C₂S의 함유량이 크다. 따라서 본 시험결과에 의한 5종 시멘트 콘크리트의 반응속도의 제안식으로 일본 콘크리트 공학 협회의 제안식과 동일한 기울기를 갖고 y절편이 -0.550인 식을 사용하는 것이 타당하다고 판단된다. 이를 요약하여 정리하면 아래 식 (1)과 (2)와 같이 시멘트 종류별로 제안할 수 있으며 그림6은 제안된 식을 검증하기 위하여 제안식과 1종, 5종 시멘트 콘크리트의 단열온도상승 시험결과를 비교한 것이다.

$$1 \text{ 종 시멘트 콘크리트 : } K = 0.1108 C + 8.86, \alpha = 0.00415 C - 0.271 \quad (1)$$

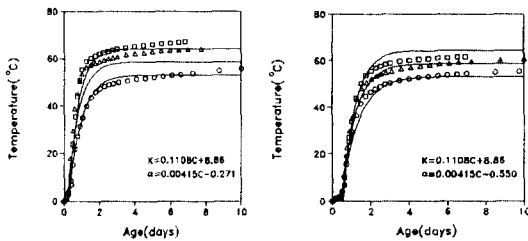
$$5 \text{ 종 시멘트 콘크리트 : } K = 0.1108 C + 8.86, \alpha = 0.00415 C - 0.550 \quad (2)$$



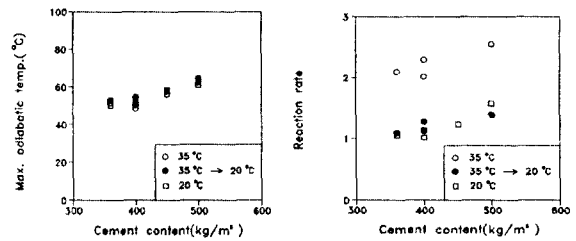
(a) 최대 단열온도상승값 (b) 반응속도
그림 4 단위시멘트량에 따른 영향 (1종)



(a) 최대 단열온도상승값 (b) 반응속도
그림 5 단위시멘트량에 따른 영향(5종)



(a) 1종 시멘트콘크리트 (b) 5종 시멘트 콘크리트
그림 6 제안식과 시험결과의 비교(물/시멘트비=40%)



(a) 최대 단열온도상승값 (b) 반응속도
그림 7 타설온도에 따른 영향 (5종)

3.2 타설온도의 영향

타설온도의 영향을 알아보기 위하여 그림7의 (a), (b)에 35℃와 25℃ 정도의 타설온도를 갖는 5종 시멘트 콘크리트의 최대 단열온도상승값과 반응속도를 비교하였다. 시험결과에 의하면 타설온도가 높아지면 최대 단열온도상승값은 감소하고 반응속도는 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 최대 단열온도상승값의 변화는 작고, 반응속도의 변화는 크다. 이러한 결과는 이론적인 예상치와 동일한 경향을 보이고 있다. 또한 타설온도 35℃인 시험결과를 보정식을 이용하여 타설온도 20℃로 보정한 값과 타설온도 20℃의 시험결과 서로 유사하다는 것을 알 수 있다. 따라서 타설온도에 따른 보정식은 아래식 (3)이 타설온도에 따른 최대 단열 온도 상승값과 반응속도의 변화를 제대로 모사하고 있다고 판단된다.

$$m_K = 0.931 e^{1.49/T} \quad m_\alpha = 0.05 T \quad (3)$$

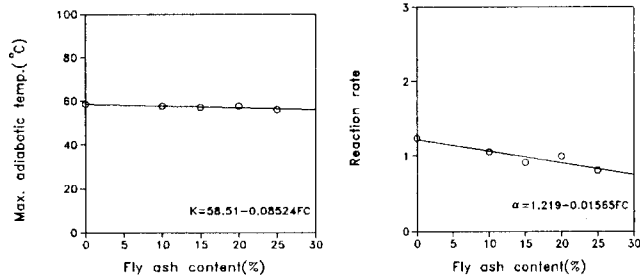
여기서 T는 콘크리트의 타설온도이다.

3.3 플라이애쉬 대체율에 따른 영향

그림8은 5종 시멘트 콘크리트에 플라이애쉬의 대체율에 따른 최대 단열온도상승값과 반응속도의 변화를 나타내고 있다. 최대 단열온도상승값과 반응속도는 단위시멘트량에 따른 영향에서와 같이 타설온도를 20℃로 보정한 값이며 그림8에서와 같이 플라이 애쉬의 대체율에 따라서 최대 단열온도상승값과 반응속도는 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 감소 경향은 최대 단열온도상승값의 변화에서보다 반응속도의 변화에서 뚜렷이 나타나고 있으며 이를 식으로 나타내면 아래 식(4)와 같다. 이를 통하여 플라이애쉬의 첨가는 반응속도에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 플라이 애쉬는 시멘트의 수화발열 속도를 감소시키고 수화발열을 낮추는 것으로 알려져 있으며 그 특성을 이용하여 저발열 혼합시멘트를 제조하기도 한다. 그러나 플라이 애쉬의 성상이 일정하지 않고 일반화되지 않은 시점에서 본 시험결과를 가지고 플라이 애쉬 콘크리트의 발열 특성에 대한 결론을 내리기는 어려울 것으로 사료된다.

$$K = 58.51 - 0.08524 FC, \quad \alpha = 1.219 - 0.01565 FC \quad (4)$$

여기서 FC 는 시멘트량에 대한 플라이애쉬량의 백분율(%)이다.



(a) 최대 단열온도상승값의 변화 (b) 반응속도의 변화
그림 8 플라이애쉬 대체율에 따른 변화 (5종+Flyash)

4. 결론

본 연구에서는 콘크리트의 수화열 해석에 필요한 콘크리트 단열온도 상승 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 단위시멘트량에 따른 1종 시멘트 콘크리트와 5종 시멘트 콘크리트의 최대 단열온도 상승값(K)은 단위 시멘트량이 증가함에 따라 증가하며 또한 반응속도(α)도 단위 시멘트량에 따라 모두 증가하나 5종 시멘트 콘크리트의 경우 전체적으로 1종의 경우보다 작은 값을 나타내고 있다.

$$1 \text{ 종 시멘트 콘크리트: } K = 0.1108 C + 8.86, \quad \alpha = 0.00415 C - 0.271$$

$$5 \text{ 종 시멘트 콘크리트: } K = 0.1108 C + 8.86, \quad \alpha = 0.00415 C - 0.550$$

- 2) 타설온도의 영향을 알아보기 위하여 35℃와 25℃의 타설온도를 갖는 5종 시멘트 콘크리트의 최대 단열온도 상승값(K)과 반응속도(α)를 비교한 결과 타설온도가 증가함에 따라 최대 단열온도 상승값은 감소하고 반응속도는 증가하는 것으로 나타났으며 또한 아래의 보정식을 이용하여 20℃로 보정한 결과 타설온도 20℃로 시험한 값과 유사한 결과를 보임을 알 수 있다.

$$m_K = 0.931 e^{1.49/T} \quad m_\alpha = 0.05 T$$

- 3) 5종 시멘트 콘크리트에 플라이 애쉬의 대체율 증가에 따른 최대 단열온도 상승값과 반응속도는 감소하는 것으로 나타났으며 이러한 감소 경향은 최대 단열온도 상승값의 변화에서보다 반응속도의

변화에서 뚜렷이 나타나고 있고 이를 식으로 나타내면 아래와 같다.

$$5\text{종+ 플라이애쉬} : K = 58.51 - 0.08524 FC, \alpha = 1.219 - 0.01565 FC$$

참고문헌

1. 塚山陸一, マツシブ 鐵筋コンクリートの溫度上昇ならびに溫度ひび割れに關する基礎研究”, 東大學位論文, 昭和 49년 3월.
2. 일본토목학회, “最新のマスコンクリート技術-14”, 콘크리트技術シリーズ, 139pp., 1996.10
3. 김진근, 양은익, “매스콘크리트의 수화열 및 온도응력에 대한 영향요인” 한국콘크리트 학회 논문집, 제9권, 제3호, pp. 15-23, 1997.6