

콘크리트의 단열온도 상승량의 정량화에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Evaluation of Adiabatic Temperature Rise of Concrete*

강석화* 이용호** 정한중*** 박철림****
Kang, Suck Hwa Lee, Yong Ho Jeong, Han Jung Park, Chil Lim

요 약

본 연구에서는 국내에서 생산되는 시멘트의 발열상태에 대한 정량화를 목적으로 A시멘트사에서 생산되는 보통포틀랜드시멘트를 그 대상으로 하여 단위시멘트량 및 타설온도를 주요변수로 한 단열온도 상승시험을 실시하여 각 변수가 콘크리트의 단열온도 상승량 및 발열속도에 미치는 영향을 검토하였고, 현재 시방서에 제시되어 있는 단열온도 상승시험결과에 대하여 재검토를 하였다. 또한, 이러한 시험결과가 수치해석법에서 어떠한 영향을 미치는 가를 검토하였다.

검토결과 보통포틀랜드시멘트에 대해서 시방서에 제시되어 있는 단열온도상승량은 실제보다 과대평가하고 있으며, 시방서에 제시되어 있는 2-parameter식 형태는 초기의 발열상태를 과대평가하고 있으며, 이 식 보다는 3-parameter식이 시멘트의 발열상태를 더 잘 근사하고 있음을 알았다. 또한, 단열온도상승시험을 통해 얻어진 결과와 시방서에 제시된 값을 사용한 경우를 각각 수치해석법으로 해석한 결과, 온도는 큰 차이가 없었으나, 온도응력은 외부구속이 강한 경우에는 약 20% 정도가 큰 안전측의 해석결과를 나타내 시공계획 수립시에는 주의하지 않으면 안된다는 것을 알았다.

Abstract

In this study, parameters such as unit cement weight and placing temperature which influence on temperature rise and temperature rise velocity are investigated through adiabatic tests for the domestic ordinary portland cement(OPC). Adiabatic temperature rise suggested by Korean Concrete Spec. are compared with that from this experimental results.

As a result of this study, adiabatic temperature rise of OPC suggested spec. is overestimated. Also it is shown that 2-parameter equation suggested in the spec. overestimate heat evolution at early age and reasonable prediction of heat evolution can be obtained by using 3-parameter equation.

Results of numerical analysis by using the input data from this test and the suggested values from spec. shows similar temperatures. However thermal stresses predicted using input value from spec. may result 20% more than that from this test in case of externally restricted state.

Keywords : adiabatic test, heat evolution, thermal stress, temperature rise

* 정회원, (주)대우건설기술연구소, 책임연구원,
** 정회원, (주)대우건설기술연구소, 연구원
*** 정회원, (주)대우건설기술연구소, 선임연구원
**** 정회원, (주)대우건설기술연구소 소장, 전무이사

• 본 논문에 대한 토의를 1996년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 1996년 4월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

매스콘크리트 구조물에서는 시멘트의 수화열에 기인하는 온도균열이 사용성이나 내구성의 관점에서 중요한 문제가 되고 있다. 따라서 온도균열의 발생을 예측하고 이에 따른 시공대책을 강구할 목적으로 사전에 매스콘크리트 구조물의 온도 및 온도응력을 계산하지 않으면 안된다. 현재는 온도 해석이나 온도응력해석에 있어서는 유한요소법과 같은 수치해석법이 이미 확립되어 있어 손쉽게 내부의 온도 및 응력상태를 수치적으로 계산해 낼 수가 있다.

그러나 수치해석법을 이용한 해석결과에서 가장 큰 영향을 미치는 요인은 사용콘크리트의 발열 상태에 대한 열특성치로서 이것을 적절히 입력시키지 않으면 아무리 좋은 해석프로그램이라 하더라도 좋은 해석결과를 얻을 수가 없다.

한편, 매스콘크리트와 관련된 연구는 일본을 중심으로 활발히 이루어져 어느 정도 정립이 되어 있는 상태이지만, 국내에서는 그 동안 연구가 거의 이루어지지 않다가 최근 사회적인 필요성에 의해 여러 곳에서 활발히 연구가 이루어지고 있는 상태이다^(1~3). 그러나 이러한 연구의 대부분이 수치해석법의 개발에만 치우쳐 수행되어 왔고, 해석에서 가장 큰 영향을 미치는 사용콘크리트의 발열 상태에 대한 검토는 오히려 등한시되어 온 상태이다.

현재 국내에서는 시멘트회사별로 자체적으로 많은 단열온도상승시험을 수행해 왔지만, 대외적으로 보고된 바가 그다지 많지 않다⁽⁴⁾. 따라서 매스콘크리트의 온도 및 온도응력해석시 시방서에 제시된 값을 그대로 사용하고 있는 실정이지만, 이 시험결과는 일본에서 생산되는 시멘트를 대상으로 한 것으로서 국내에서 생산되는 시멘트와는 기본적으로 C₃S나 C₃A 등 수화반응에 크게 영향을 미치는 주요성분의 함량이 다르기 때문에 발열 상태 또한 크게 다를 것으로 추측된다. 그럼에도 불구하고 국내에서 시공하는 매스콘크리트의 온도응력 예측에 이러한 시험결과를 그대로 사용하여 해석을 수행한다면 잘못된 결과가 얻어질 수도 있다.

이러한 관점에서 본 연구에서는 매스콘크리트의 온도 및 온도응력해석에서 절대적으로 요구되는 시멘트의 발열상태에 대한 자료 축적 차원에서 국내의 A시멘트사에서 생산되는 보통포틀랜드시멘트를 대상으로 단위시멘트량 및 타설온도를 주요변수로 한 단열온도상승시험을 실시하여 각 변수가 콘크리트의 단열온도 상승량 및 발열속도에 미치는 영향을 검토하였고, 현재 시방서에 제시되어 있는 단열온도 상승시험결과와 비교검토를 하였다. 또한, 이러한 시험결과를 실제로 온도 및 온도응력해석 프로그램에 사용했을 경우 온도 및 온도응력에 어느 정도의 영향을 미치는가를 검토하였다.

2. 콘크리트의 발열량 추정

콘크리트의 발열량을 구하는 방법에는 용해열법이나 전도형 미소열량계를 이용하여 시멘트의 수화열을 측정해 이것으로 부터 콘크리트의 발열량을 환산하는 방법⁽⁵⁾과 단열온도상승시험치를 이용하여 콘크리트의 발열상태를 직접 측정하는 방법이 있다. 전자는 일정 온도하에서의 시멘트 수화열을 측정하기 때문에 측정치에 대한 여러가지 보정을 통해 콘크리트의 발열상태를 추정해야 하고 단열온도상승량 및 상승속도를 과소 평가하고 있다는 문제점이 지적되고 있는 반면에, 후자는 측정이 간단하고 측정치를 그대로 매스콘크리트의 온도해석에 직접 적용할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

이와 같은 단열온도상승시험을 통해 얻어진 시험결과는 식 (1)과 같은 e함수 형태로 표현되어 온도해석등에 입력치로 사용된다.

$$Q(t) = K(1 - e^{-\alpha t}) \quad (1)$$

여기서 Q(t) : 재령 t일에서의 단열온도상승량

K : 최고단열온도상승치

α : 온도상승속도

식 (1)은 재료의 반응속도와 온도의 관계에 대해서 제안되어 있는 Arrhenius Rule에 의거한 형태이기 때문에 물리적인 의미도 가지고 있으며, 식 형태가 매우 간단하여 해석시 입력치로의 사용이

용이하다. 그러나 초기의 발열상태를 과도하게 평가하고 있어 수화현상이 천천히 일어나는 저발열성시멘트의 경우나 지연제를 첨가한 경우에는 그 적합성이 매우 떨어지는 것으로 알려져 있다⁽⁶⁾. 따라서 이와 같은 문제점 때문에 식 (1)과 같은 형태가 콘크리트의 열특성을 가장 잘 표현하는 식인가에 대한 적합성에 대해서 논란이 많이 일고 있으며, 식 (1)의 문제점을 개선시켜 가능한 한 실제의 발열상태에 근사시킬 수 있는 아래와 같은 몇 가지 식들이 제안되었다⁽⁷⁾.

$$Q(t) = K(1 - e^{-\alpha t^\beta}) \quad (2)$$

$$Q(t) = K(1 - e^{-\alpha(t-t_0)^\beta}) \quad (3)$$

$$Q(t) = K(1 - (1 + \alpha t)e^{-\alpha t}) \quad (4)$$

$$Q(t) = K_1(1 - e^{-\alpha_1 t}) + K_2(1 - e^{-\alpha_2 t}) \quad (5)$$

여기서 $K, K_1, K_2, \alpha, \alpha_1, \alpha_2, \beta, t_0$: 실험상수

본 연구에서는 기제안식들의 시험치에 대한 적합성을 검토하면서 아울러 식 (2)와 식 (4)의 형태를 복합시킨 식 (6)과 같은 근사식을 새롭게 제안하여 기제안된 식들과 적합성을 비교하였다.

$$Q(t) = K(1 - (1 + \alpha t)e^{-\alpha t^\beta}) \quad (6)$$

3. 단열온도상승시험

3.1 시험변수

콘크리트의 단열온도상승량에 영향을 미치는 요인에는 수십 가지가 있는 것으로 알려져 있지만, 그 중에서 시멘트의 종류 및 단위시멘트량 그리고 타설온도 등 세 가지 요인들이 가장 지배적인 것으로 알려져 있으며, 생산회사에 따라서도 크게 다르다.

본 연구에서는 시멘트 종류를 보통포틀랜드시멘트로 고정시킨 상태에서 단위시멘트량은 $250\text{kg}/\text{m}^3$ 부터 $550\text{kg}/\text{m}^3$ 까지 $100\text{kg}/\text{m}^3$ 씩 증가시켜 4수준으로 변화시켰고, 타설온도는 10°C 부터 30°C 까지 3수준으로 변화시켜 총 12종류의 배합 상태에 대하여 단열온도상승시험을 실시하였다.

그리고 시험시에 콘크리트의 타설온도 설정을 위해서는 물은 온수를 사용하여 적정온도에 맞추

었고, 시멘트 및 골재 등의 시료는 시험실시 3시간 전에 미리 항온항습chamber에 집어넣어 온도를 맞추었다.

3.2 단열온도상승시험기

콘크리트의 단열온도상승량을 측정하는 단열온도상승시험기에는 물순환식과 공기순환식이 있으나, 본 시험에서 사용한 시험장치는 이탈리아의 Controls사에서 제작한 직접가열식으로서 시험장치의 개요는 Fig. 1과 같다.

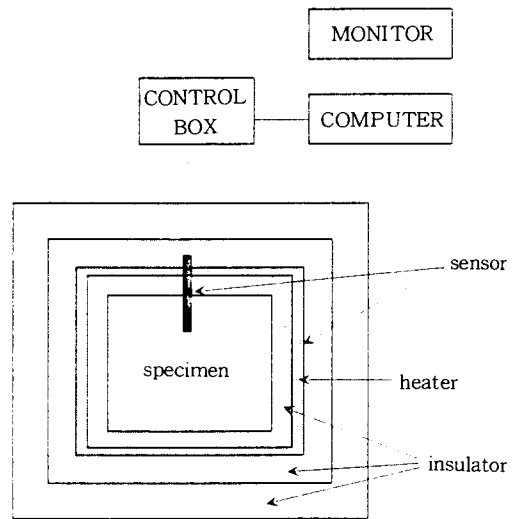


Fig. 1 Adiabatic concrete calorimeter

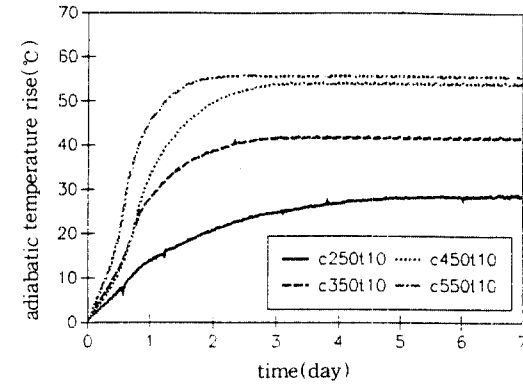
콘크리트의 단열온도상승량의 정량화를 위해서는 상기의 주요요인을 변수로 한 시험결과도 중요하지만, 측정시에 시험장치가 공시체를 완전하게 단열상태에 가깝게 유지하는가 등 시험장치 그 자체의 성능 또한 매우 중요하다. 본 시험장치는 세 종류의 시료에 대해서 동시에 단열온도상승량을 측정할 수 있으며, 측정결과는 자동적으로 컴퓨터에 저장되도록 되어 있다. 시험장치의 성능면에서는 최고단열온도상승치에 도달한 부근에서는 약간 온도가 떨어져 기존의 시험장치에 비해서 다소 성능이 떨어지는 문제점이 나타나기는 하였지만, 실용상 충분하다고 판단되었다.

시험에 사용하는 공시체는 15cm 크기의 정육면

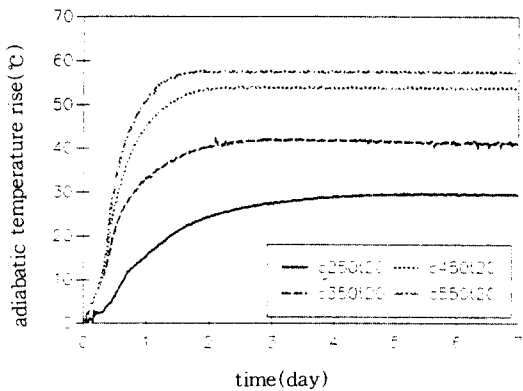
체이고, 계측은 타설직후부터 30분 간격으로 실시되었으며, 콘크리트의 발열상태는 약 3일 이후에는 거의 변화가 없었지만, 타설후 7일간 측정하였다.

3.3 단열온도상승시험결과

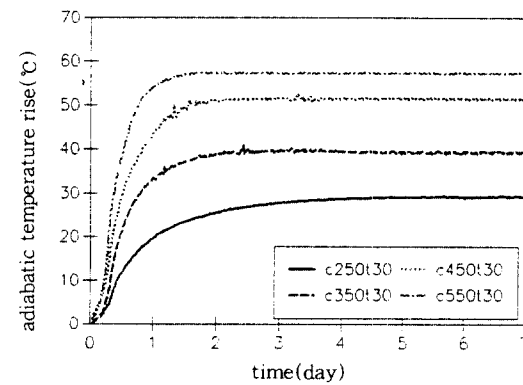
시험결과를 타설온도별로 단위시멘트량에 따라 나타내면 Fig. 2와 같다.



a) $t = 10^{\circ}\text{C}$

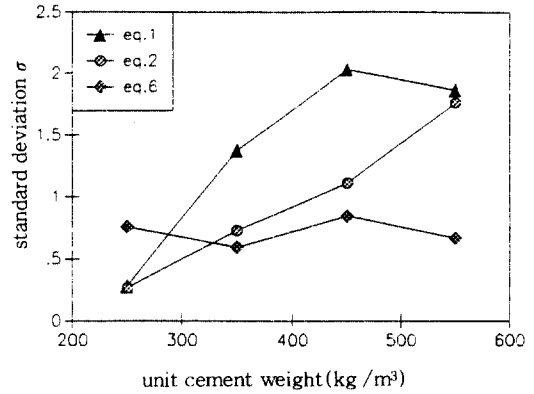


b) $t = 20^{\circ}\text{C}$

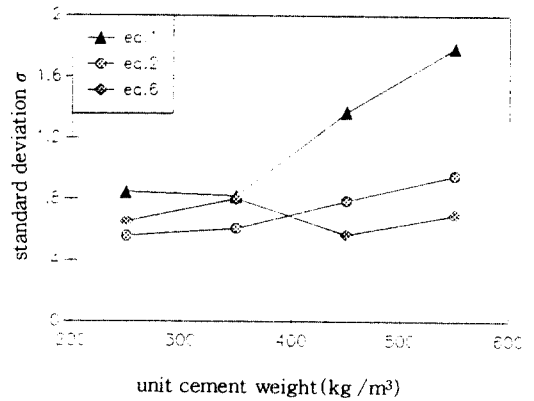


c) $t = 30^{\circ}\text{C}$

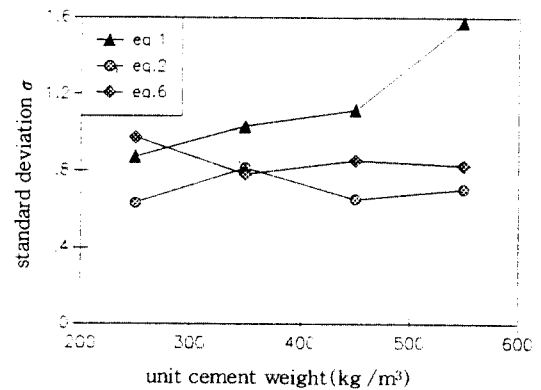
Fig. 2 Adiabatic test result



a) $t = 10^{\circ}\text{C}$



b) $t = 20^{\circ}\text{C}$



c) $t = 30^{\circ}\text{C}$

Fig. 3 Comparison of standard deviation of each equation

Table 1 Adiabatic test result

Temp. (°C)	Unit Cement weight (kg/m³)	Initial temp (°C)	Eq.(1)			Eq.(2)				Eq.(6)			
			K	α	Standard devi.	K	α	β	Standard devi.	K	α	β	Standard devi.
10	250	9.8	28.5	0.623	0.276	28.5	0.630	1.000	0.263	28.5	0.907	1.188	0.756
	350	12.7	41.6	0.970	1.372	41.6	0.887	1.492	0.725	41.6	1.536	1.319	0.593
	450	9.6	53.8	0.923	2.031	53.8	0.886	1.344	1.108	53.8	0.988	1.486	0.839
	550	9.9	55.5	1.410	1.863	55.5	1.210	1.486	1.762	55.5	1.880	1.490	0.664
20	250	19.2	29.5	0.690	0.845	29.5	0.709	1.130	0.559	29.5	1.199	1.237	0.653
	350	21.6	41.5	1.475	0.819	41.5	1.575	1.319	0.608	41.5	2.200	1.320	0.803
	450	21.7	53.7	1.573	1.371	53.7	1.635	1.510	0.788	53.7	2.281	1.459	0.567
	550	19.9	57.4	1.750	1.789	57.4	2.017	1.552	0.954	57.4	2.642	1.530	0.697
30	250	29.0	29.2	0.912	0.874	29.2	1.688	1.196	0.632	29.2	1.646	1.167	0.973
	350	28.3	39.3	1.618	1.033	39.3	1.833	1.520	0.815	39.3	2.423	1.441	0.785
	450	29.0	51.5	1.689	1.119	51.5	1.970	1.435	0.653	51.5	2.454	1.392	0.856
	550	31.4	57.3	2.130	1.578	57.3	3.020	1.577	0.706	57.3	3.616	1.330	0.827

Fig. 2를 보면 콘크리트의 단열온도상승량은 어느 일정치에 수렴되어 가기 때문에 회귀분석시에도 K값은 그 수렴치가 되어야 한다. 그러나 식 (1)과 같이 초기의 발열상태를 실제보다 과도하게 평가하는 식의 경우에는 회귀분석시 측정 데이터의 갯수에 따라 각 계수값들이 변동이 심해 데이터의 갯수가 적을 경우에는 실제의 수렴치와는 전혀 다른 값이 추출된다. 이러한 회귀분석상의 문제점 때문에 K값을 측정데이터의 숫자와 무관하게 시험시의 수렴치와 같도록 하기 위하여 상관성은 다소 떨어지더라도 K값을 측정치로 부터 미리 확인하여 나머지 변수에 대한 회귀분석을 실시하였다. Fig. 2의 발열상태를 보면 알 수 있듯이 대략 5일 정도가 경과하면 온도상승은 거의 없으므로 나타나기 때문에 회귀분석시에 K값은 7일이 경과한 시점의 도달치로 정하였다. 회귀분석한 결과는 Table 1과 같다.

또한, 각 식의 적합성을 검토하기 위하여 Table 1로 부터 타설온도별로 각 근사식들의 표준편차를 분리해서 Fig. 3과 같이 나타냈다.

Fig. 3을 보면 식 (1)은 단위시멘트량이 적을 경우에는 비교적 시험치와의 적합성이 좋지만 단위시멘트량이 증가할 수록 적합성은 점차 떨어지는 것으로 나타났다. 또한, 식 (2)의 경우는 타설온도가 낮은 경우를 제외하고는 단위시멘트량에 관계없이 전체적으로 고른 표준편차를 나타내 시

험결과를 비교적 잘 근사하는 식인 것으로 나타났다. 한편, 식 (6)의 경우는 전체적으로 시험치와의 적합성이 좋은 것으로 나타났으며, 특히 타설온도가 낮을 경우에 식 (1)이나 식 (2)의 형태보다 좋은 적합성을 나타내고 있는 것을 알았다. 그러나 각 근사식들의 표준편차는 거의 2.0 이하로서 비교적 세 식 모두 시험치와 좋은 상관성을 나타내고 있는 것을 알았다.

시험결과중에서 타설온도가 20°C이고 단위시멘트량이 450kg/m³인 경우의 시험치와 근사식을 동시에 그리면 Fig. 4와 같다.

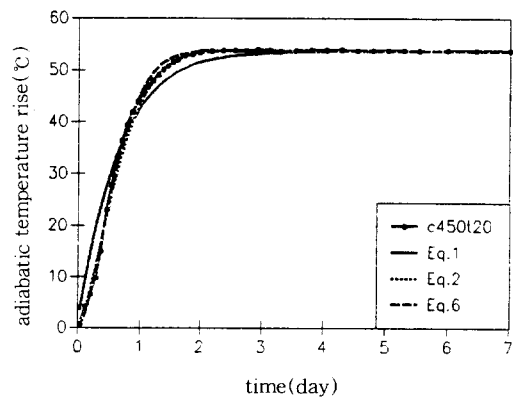


Fig. 4 Comparison between approximated and tested value

Fig. 4를 보면 식 (1)은 타설직후의 발열상태를 실제보다 크게 평가하고 있음을 알 수 있으며, 그 이후에는 실험치보다 작게 평가하고 있는데 반해 식 (2)와 식 (6)은 재령 1일 까지의 실험치는 잘 평가하고 있으나 그 이후의 값은 약간 크게 평가하고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 본 시험을 통해 실제로 측정된 단위시간당의 발열량을 근사식에 의한 발열량과 비교해 보면 알 수 있다 (Fig. 5 참조).

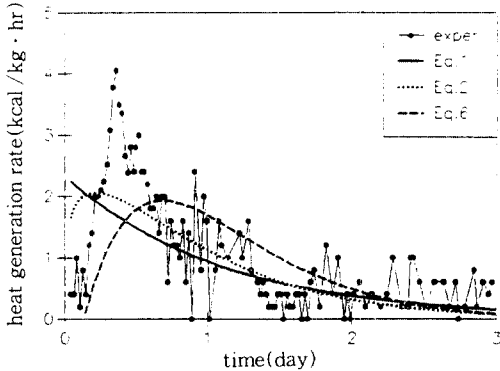


Fig. 5 Heat generation rate

일반적으로 보통포틀란드시멘트의 수화반응은 약 8~10시간이 경과한 시점에 가장 활발하게 일어나는 것으로 알려져 있으나⁽⁸⁾ Fig. 5를 보면 식 (1)은 반응이 시작하는 시점에 이미 최고의 발열상태를 나타내고 있기 때문에 초기의 발열상태를

과대평가하고 있으며, 식 (2)와 식 (6)은 이보다는 약간 시간이 경과한 시점에 최고의 발열상태를 나타내는 것으로 평가하고 있기 때문에 시험치와의 적합성이 식 (1)보다는 좋은 것으로 나타났다. 특히, 식 (6)은 최고발열상태에 도달하는 시점이 18시간 이후인 것으로 나타나 수화반응이 천천히 일어나는 시멘트에 대한 근사식으로서 매우 적합한 것으로 사료된다.

3.4 기존의 제안식과의 비교

현재 건설부 표준시방서등에서는 콘크리트의 단열온도상승량은 필요에 따라 시험을 통해 결정하는 것을 원칙으로 하고 있지만, 시험을 하지 않는 경우에는 단위시멘트량과 콘크리트 타설온도 그리고 시멘트 종류를 알면 간단하게 식 (1)에서의 K와 α 값을 결정해 사용할 수 있도록 표로 나타내고 있다. 시방서상의 보정방법에 따르면 시멘트량이 증가할 수록 K와 α 값은 증가하며, 타설온도가 증가할 수록 K는 감소하는 반면에 α 값은 증가하는 것으로 평가하고 있다.

본 연구에서는 단열온도상승량을 식 (1)의 형태로 제시되어 있는 건설부 표준시방서 규정⁽⁹⁾, 일본 콘크리트공학협회 식⁽¹⁰⁾, 일본콘크리트공학협회 온도동력위원회식⁽¹¹⁾, 그리고 塚山の 제안식⁽¹²⁾의 각 계수와 본 시험을 통해 얻어진 계수를 상호 비교하고, 각 변수의 변화에 따른 영향을 검토하였

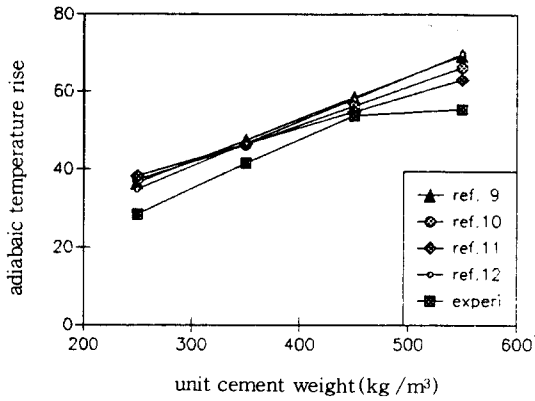
Table 2 K and α proposed by other equations

Temp. (°C)	Unit cement weight (kg/m ³)	Ref. (9)		Ref. (10)		Ref. (11)		Ref. (12)	
		K	α	K	α	K	α	K	α
10	250	36.5	0.383	37.31	0.389	38.255	0.532	34.83	0.792
	350	47.5	0.545	46.30	0.513	46.565	0.706	46.65	0.954
	450	58.5	0.703	56.30	0.620	54.875	0.880	58.15	1.116
	550	69.5	0.863	60.28	0.721	63.185	1.054	69.81	1.278
20	250	35.0	0.809	35.30	0.810	36.560	0.767	31.85	0.880
	350	45.0	0.969	45.30	0.969	47.640	1.181	42.65	1.060
	450	55.0	1.129	55.30	1.129	58.720	1.597	53.35	1.240
	550	65.0	1.289	65.30	1.289	69.800	2.012	64.05	1.420
30	250	33.5	1.198	34.63	1.203	33.935	1.061	31.31	0.964
	350	40.5	1.568	42.85	1.536	43.595	1.685	41.80	1.161
	450	47.5	1.938	51.65	1.835	53.205	2.309	52.28	1.358
	550	54.5	2.308	60.40	2.134	62.815	2.933	62.77	1.555

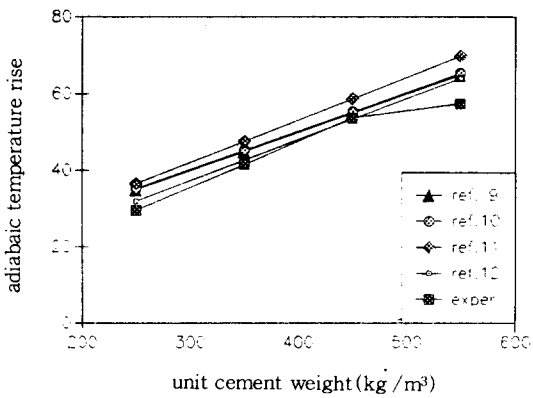
다(계수산정에 있어서 온도응력위원회 제안식은 단위시멘트량이 400kg/m^3 이상인 경우는 적용이 곤란하지만 그 이전까지의 경향을 고려하여 가정하여 계산하였다).

각 제안식에 대하여 계산한 계수값은 Table 2와 같다.

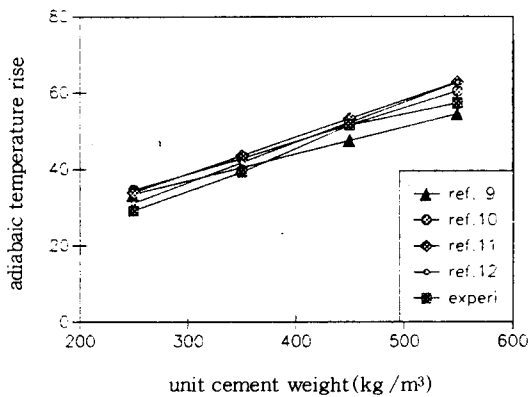
Table 3의 K , α 를 타설온도별로 나타내면 Fig. 6, Fig. 7과 같다.



a) $t=10^\circ\text{C}$

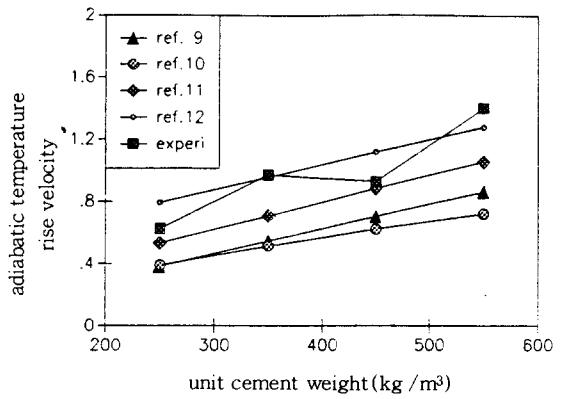


b) $t=20^\circ\text{C}$

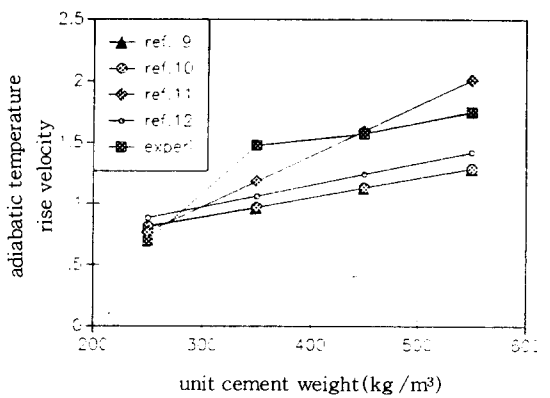


c) $t=30^\circ\text{C}$

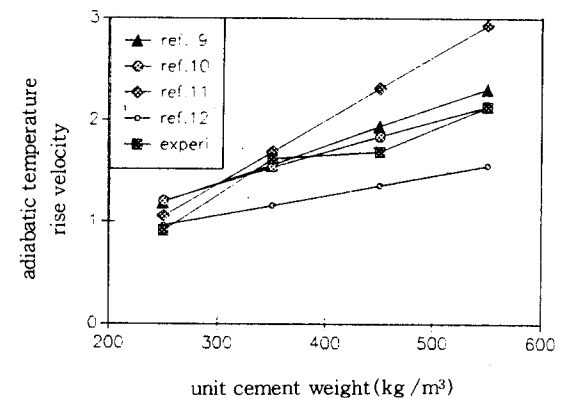
Fig. 6 Effect of unit cement weight on K



a) $t=10^\circ\text{C}$



b) $t=20^\circ\text{C}$



c) $t=30^\circ\text{C}$

Fig. 7 Effect of unit cement weight on α

이 그림을 보면 본 시험을 통해 얻어진 결과는 기존의 제안식에 의한 결과와 비교할 때 K는 약간 작은 값으로 나타났고, α 는 거의 비슷한 값이 나왔다. 이것은 국내시멘트와 일본에서 생산되는 시멘트의 성분 중에서 특히 수화발열에 큰 영향을 미치는 C_3S 와 C_3A 의 함유율이 다소 차이가 나기 때문으로 사료된다.

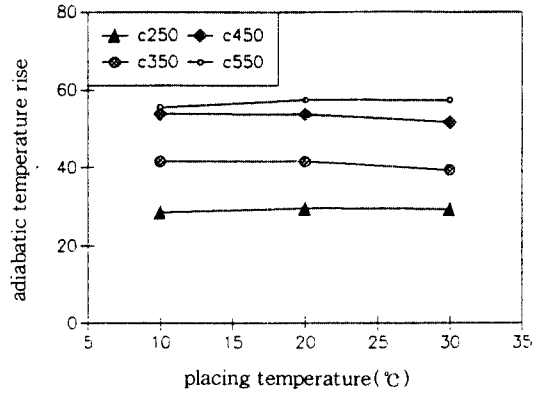
국내에서 생산되는 보통포틀랜드시멘트의 성분은 생산시기와 생산공장에 따라서도 상당한 차이를 보이고 있지만, 개략 평균치로 하여 일본에서 생산되는 보통포틀랜드시멘트와 비교하면 Table 3과 같다.

Table 3 Chemical compound of normal portland cement

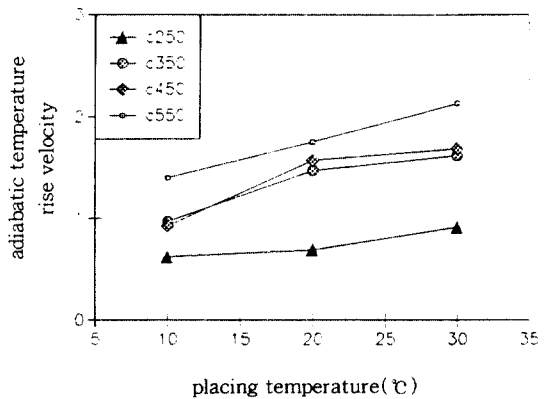
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	the others
KOREA(%)	24	44	13.8	8.4	9.8
JAPAN(%)	52	23	9	10	6

그리고 단위시멘트량에 따른 K와 α 값의 변화를 보면 단위시멘트량이 증가할 수록 K와 α 의 값은 증가하는 것으로 나타나, 기존의 제안 결과와 비슷한 경향을 나타냈고, 타설온도의 변화에 대해서는 K는 거의 변동이 없는 것으로 나타났으나, α 는 온도증가에 따라 약간씩 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 8 참조).

한편, 현행의 건설부 표준시방서에는 타설온도 별로 단위시멘트량의 증가에 따라 K, α 의 값을 1차식으로 보정할 수 있도록 되어 있다. 따라서, 본 시험을 통해 얻어진 결과도 비교를 위하여 동일한 형태로 보정식을 만들었다. 보정식에서의 계수값은 Table 4와 같다.



a) adiabatic temperature rise-K



b) adiabatic temperature rise velocity- α

Fig. 8 Effect of placing temperature on K and α

4. 단열온도상승식이 온도 및 온도응력에 미치는 영향 검토

4.1 해석모델

본 연구에서는 시험을 통해 얻어진 식 (1)에서 의 K와 α 값이 실제 구조물에 대한 해석결과에 미

Table 4 Comparison of equation between Ref.(9) and this study

Placing temp. (°C)	Ref. (9)				this study					
	K=AC+B		$\alpha=aC+b$		K			α		
	A	B	a ($\times 10^{-3}$)	b	A	B	Correlation fac. (r)	a ($\times 10^{-3}$)	b	Correlation fac. (r)
10	0.11	9.0	1.6	-0.017	0.093	7.570	0.96	2.3	0.065	0.92
20	0.10	10.0	1.6	0.409	0.097	5.725	0.98	3.7	0.097	0.90
30	0.07	16.0	3.7	0.273	0.096	7.165	0.99	3.3	0.061	0.95

치는 영향을 검토하기 위하여, 시험을 통해 얻어진 회귀분석 결과와 시방서에 제시되어 있는 계수를 자체 개발한 해석프로그램⁽¹³⁾에 입력하여 내부에서 발생하는 최대온도 및 온도응력치를 비교검토하였다.

해석모델은 높이 1m인 구조물을 대상으로 하였으며, 구조물의 크기에 관련된 L/H와 구속체 탄성계수를 다르게 입력하여 내부구속이 강한 경우와 외부구속이 강한 경우로 나누어 해석을 실시하였다. 해석조건은 타설온도를 20℃에, 단위시멘트량은 250kg/m³인 경우를 가정하였고, 기타 가정사항은 기해석예⁽¹³⁾와 동일하게 가정하였으며 해석은 30일 경과시 까지 수행하였다. 해석시의 구조물의 크기 및 구속체 탄성계수 조건은 Table 5와 같다.

Table 5 Condition of numerical analysis

	Internally restricted state	Externally restricted state
L/H	2	10
Er(kg/cm ²)	500	300,000

또한, 시방서에 제시된 결과와의 비교를 위해서는 식 (1)과 식 (2)의 근사식을 사용하였다. 식 (6)은 시험치와의 적합성이 식 (2)와 큰 차이는 없는 것으로 사료되어 제외하였다.

온도해석의 결과 비교는 가장 발열량이 큰 중앙부에 대해서 실시하였고, 온도응력의 비교는 내부구속이 강한 경우는 표면에 대해서 그리고 외부구속이 강한 경우는 중앙부에 대해서 실시하였다.

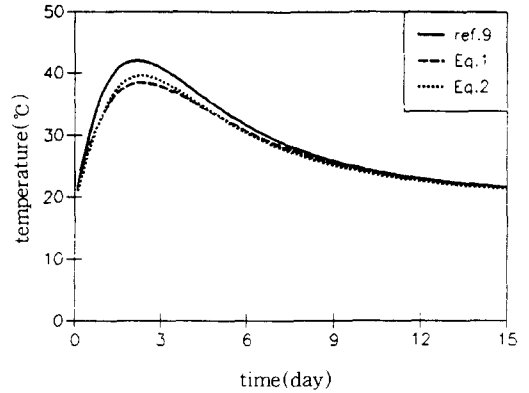
4.2 해석결과

Table 6 Results of numerical analysis

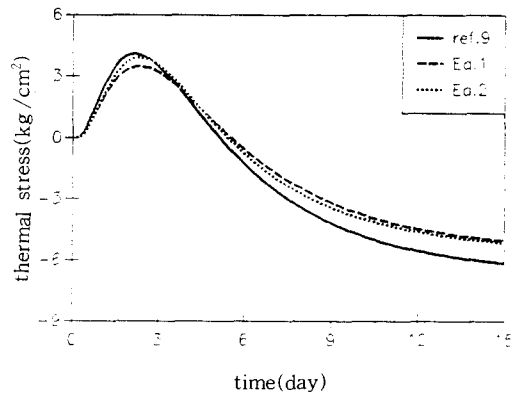
	Internally restricted state			Externally restricted state		
	Ref. (9)	Eq. (1)	Eq. (2)	Ref. (9)	Eq. (1)	Eq. (2)
Max. Temperature (°C)	42.02 (2.125)	38.39 (2.375)	39.53 (2.375)	42.39 (2.375)	38.81 (2.625)	39.92 (2.5)
Thermal stress (kg/cm ²)	4.09 (2.125)	3.49 (2.375)	3.91 (2.375)	18.01 (25)	15.00 (25)	15.12 (25)
Crack Index	4.12 (1.88)	4.81 (2.0)	4.32 (2.0)	1.42 (25)	1.69 (25)	1.68 (25)

()속의 수치는 재령을 나타냄

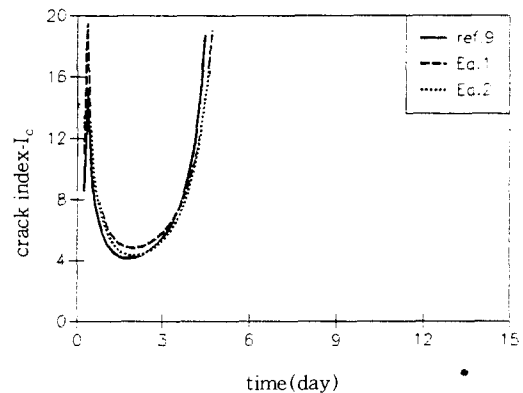
내부구속이 강한 경우와 외부구속이 강한 경우의 온도 및 온도응력, 온도균열지수의 변화는 각각 Fig. 9, Fig. 10 과 같다.



a) temperature



b) thermal stress



c) crack index

Fig. 9 Temperature, thermal stress and crack index in internally restricted state

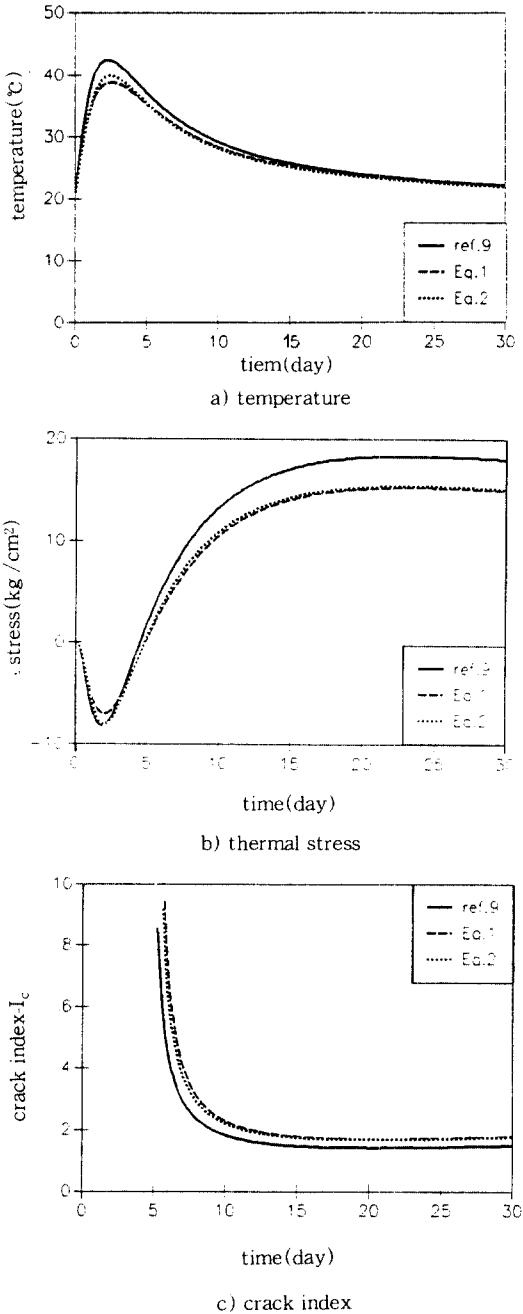


Fig. 10 Temperature, thermal stress and crack index in externally restricted state

위의 해석결과를 정리하면 Table 6과 같다.

4.3 검토내용

해석결과를 보면 온도에 대해서는 내부구속, 외

부구속 모두 시방서에 제시된 값을 사용한 경우가 본 시험결과를 이용한 해석결과 보다 약 3~4°C 정도 크게 평가하는 것으로 나타났다. 이는 입력시의 K값의 차이가 그대로 내부온도에 영향을 미친 것으로 사료된다. 그러나 식 (1)을 사용한 경우와 식 (2)를 사용한 경우를 비교해 보면 초기의 발열 상태에 대한 평가정도가 다소 차이가 나지만, 실제로 온도해석상에서는 거의 차이가 없는 것으로 나타나 단열온도상승시간의 해석상의 차이는 별로 없는 것으로 나타났다.

내부구속이 강한 경우의 온도응력이 최대가 되는 재령을 보면 중앙부의 온도가 최대에 도달하는 시점이 일치하는 것으로 나타나 온도와 온도응력 간에는 매우 밀접한 관계가 있음이 확인되었고, 온도균열지수가 최소가 되는 시점은 콘크리트의 강도 발현 때문에 약간 이른 재령에서 나타났다. 또한, 온도응력의 비교에 있어서는 식 (1)을 사용한 경우와 식 (2)를 사용한 경우는 수치상으로는 0.5kg/cm² 정도의 차이가 있는 것으로 나타났지만, 거의 동일하게 평가하고 있는 것으로 생각할 수 있으며, 시방서의 값을 사용한 경우와의 비교에 있어서도 해석결과는 약 5% 정도 큰 것으로 나타났다지만, 대수롭지 않은 차이로 생각된다. 따라서 내부구속이 강한 경우에는 식 (1), 식 (2)를 사용한 경우나 시방서의 제시값을 사용한 경우나 그다지 큰 차이가 없는 것으로 사료된다.

한편, 외부구속이 강한 경우에 대해서 온도응력을 비교해 보면 식 (1)과 식 (2)의 비교에 있어서는 내부구속인 경우와 마찬가지로 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 시방서에 제시된 값을 사용한 경우에는 식 (2)를 사용한 경우보다 약 20% 정도 크게 평가하는 것으로 나타났다. 이 해석결과는 해석조건에 따라 달라질 수도 있으므로 별로 의미있는 수치는 아니지만, 외부구속이 강한 경우에는 실제의 응력상태를 크게 평가할 수도 있으므로 주의하지 않으면 안된다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내에서 생산되는 시멘트의 발열상태에 대한 특성을 검토하기 위하여 국내의 한 회사에서 생산되는 보통포틀랜드시멘트를 대상으

로 한 단열온도상승시험을 실시하여 현행의 시방서에 제시된 값과의 비교검토를 행하였고 이 값들이 온도 및 온도응력해석시에 해석결과에 미치는 영향에 대해서 검토하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

1) 본 실험결과 보통포틀란드시멘트에 대해서 시방서에 제시되어 있는 단열온도상승량은 실제보다 과대평가하고 있는 것으로 나타났다. 이는 시멘트의 성분함유율에 기인한 것으로 사료되며, 아울러 국내에서 생산되고 있는 시멘트들의 발열특성에 대한 자료축적 및 현시방서에 제시되어 있는 계수들에 대한 재검토가 필요한 것으로 사료된다.

2) 콘크리트의 단열온도상승 특성을 나타내는 데에 시방서에 제시되어 있는 식 (1)의 형태 보다는 식 (2)가 콘크리트의 실제 발열특성을 더 잘 근사하고 있으며, 본 연구에서 제안한 식 (6)의 형태도 전체적으로 시험치와의 적합성이 좋은 것으로 나타났으며, 특히 타설온도가 낮은 경우에 식 (1)이나 식(2)에 비해 좋은 적합성을 나타내고 있는 것을 알았다

3) 본 연구에서 수행한 단열온도상승시험을 통해 얻어진 결과를 사용한 경우와 시방서에 제시된 값을 사용한 경우를 각각 수치해석법으로 온도해석을 실시하여 중앙부의 최대온도값을 비교하면, 두 경우 사이에는 입력시의 최고단열온도상승치 K값의 차이 정도가 나는 것을 알았다.

4) 초기의 발열상태에 대한 평가정도가 다른 식 (1)과 식 (2)를 이용해서 온도해석을 할 경우, 실제로 온도해석상에서는 거의 차이가 없는 것으로 나타나 단열온도상승식간의 해석상의 차이는 별로 없다는 것을 알았다.

5) 시방서에 제시된 값과 식 (1), 식 (2)를 사용한 경우를 각각 온도응력해석을 실시할 경우 내부구속이 강한 경우는 크게 차이가 나지 않았지만, 외부구속이 강한 경우는 약 20% 정도가 큰 안전측의 해석결과가 얻어졌으므로 시공계획 수립시에는 주의하지 않으면 안된다는 것을 알았다.

본 논문에서는 단위시멘트량과 타설온도 등 두 가지의 변수를 대상으로 한 제한된 실험결과만을 제시하고 있기 때문에 이 실험결과가 누구나 객관적으로 활용할 수 있는 자료라고 생각하기에는 무

리가 있다고 생각되며, 향후 시멘트의 종류 및 시멘트생산회사 등을 변수로 한 추가실험을 계속하여 국내산 시멘트의 발열현상을 평가할 수 있는 자료를 계속 축적해 나갈 예정이다.

참 고 문 헌

1. 김진근, 이종대, “크리이프를 고려한 매스콘크리트의 수화열에 대한 온도응력 해석”, 대한토목학회논문집, 제14권 제4호, 1994. 7, pp. 771-781
2. 오병환, 백신원, “대형콘크리트구조물의 수화열 예측 및 균열제어 연구”, 콘크리트학회지, 제7권 1호, 1995. 2, pp. 97-108
3. 이장화, 변근주, “매스콘크리트 수화온도의 합리적 평가를 위한 실험 및 해석연구”, 대한토목학회 논문집, 제15권 2호, 1995. 3, pp. 337-346
4. 김진근, 노재호, 박연동, 한정호, 김훈, “시멘트 및 콘크리트의 수화발열특성에 관한 연구”, 콘크리트학회지, 제7권 3호, 1995. 6, pp. 211-219
5. 内田清彦, 神原弘幸, 齊藤豊, “積算發熱量に基づくセメントの水和發熱速度の定式化と溫度上昇の豫測”, 콘크리트공학, Vol. 24, No. 4, 1986. 4, pp. 105-113
6. 宮路榮二, 梶川春樹, “コンクリートの水和熱による斷熱溫度上昇測定”, 日本建築學會大會, 1968, pp. 45-46
7. 平賀友晃, 倉林清, “コンクリートの斷熱溫度上昇特性に関する既往の研究成果について”, 第1回マスコンクリートの溫度應力發生メカニズムに関するコロキウム論文集, 日本コンクリート工學協會, 1982. 9, pp. 1-6
8. 峯岸敬一, “セメントの水和と熱”, 콘크리트공학, Vol. 22, No. 3, 1984. 3, pp. 5-12
9. 콘크리트표준시방서, 건설부제정, 1988년 12월, pp. 598-600
10. マスコンクリートのひびわれ制御指針, 日本コンクリート工學協會, 1986年 3月
11. マスコンクリートの溫度應力委員會報告書, 日本コンクリート工學協會, 1985. 11, pp. 35-39
12. 塚山隆一, “コンクリートの斷熱溫度上昇推定”, セメント技術年報, 第30號, 1976.
13. 강석화, 이용호, 정한중, 박철림, “유한요소법을 이용한 매스콘크리트 구조물의 온도 및 온도응력 해석에 관한 연구”, 콘크리트학회지, Vol. 7, No. 4, 1995. 8, pp. 137-148

(접수일자 : 1995. 9. 27)