

원전 콘크리트의 외기대류계수에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Coefficient of Air Convection for Concrete Mix of Nuclear Power Plant

우상균¹, 송영철¹, 김진근², 이 윤², 최명성²

¹한전전력연구원

대전광역시 유성구 문지동

²한국과학기술원

대전광역시 유성구 구성동

요 약

본 연구에서는 원전구조물 배합에 관하여 외기와 열전달을 나타내는 외기대류계수에 관한 실험을 수행하였다. 외기대류계수에 관한 기존의 모델에서 나타났던 문제점을 해결하기 위해 실험변수로 풍속과 거푸집의 종류(양생포, 양생포+비닐)를 선정하였다. 실험결과를 이용하여 외기대류계수를 산정하고자 열평형 방정식을 이용한 수치해법을 사용하였으며, 이론적인 고찰을 통해 각 거푸집별로 풍속에 따른 외기대류계수의 변화를 예측할 수 있는 기존의 모델식을 이용하여 결과를 비교·분석하였다. 실험결과, 풍속에 따라 외기대류계수가 증가하는 경향을 보였으나 거푸집의 사용여부나 거푸집 재료에 따라 기존의 모델식과 다른 양상을 보이는 것을 알 수 있었다. 이러한 양상의 차이는 기존의 원전배합에 근거한 모델식의 차이와 거푸집 재료의 열특성의 차이에 의해 나타나는 것으로 판단된다. 실제의 거푸집과 풍속을 고려한 외기대류계수는 수화열에 의한 콘크리트 구조물의 온도해석시 보다 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료되며, 향후 외기대류계수에 관한 정량적인 분석이 필요할 것으로 판단된다.

Abstract

The setting and hardening of concrete is accompanied with nonlinear temperature distribution caused by development of hydration heat of cement. Especially at early ages, this nonlinear distribution has a large influence on the crack evolution. As a result, in order to predict the exact temperature history in concrete structures it is

required to examine thermal properties of concrete.

In this study, the coefficient of air convection for concrete mix of nuclear power plant, which presents thermal transfer between surface of concrete and air, was experimentally investigated with variables such as velocity of wind and types of form. From experimental results, the coefficient of air convection was calculated using equations of thermal equilibrium. From the previous prediction model for equivalent coefficient of air convection including effects of velocity of wind and types of form was verified.

The coefficient of air convection obtained from experiment increases with velocity of wind, and its dependance on wind velocity is varied with types of form. This tendency is due to a combined heat transfer system of conduction through form and convection to air. From comparison with experimental results, the coefficient of air convection by this model was well agreed with those by experimental results.

1. 서 론

1930년대 대형 댐의 건설로 처음으로 소개되었던 콘크리트의 수화열에 의한 온도균열 문제는 그동안 수많은 연구를 통해 많은 부분이 규명되어 왔다. 그러나 해석적인 방법에서 중요한 입력변수에 대한 연구는 아직도 미진한 상태이다. 특히 콘크리트 표면에서 대기로의 열전달을 나타내는 외기대류에 대한 연구는 수화열 수치해석에 관한 연구에 비해 상당히 뒤떨어져 있는 것이 사실이다. 따라서 구조물의 특성상 바람의 영향을 크게 받는 해안가나 일부 지역에서는 외기대류에 의한 열손실이 크게 발생할 수 있으며, 이를 적절히 고려하지 않는다면 실제와는 다른 온도 해석결과를 얻을 수 있다.

외기대류계수는 콘크리트 표면과 대기 사이의 열교환을 나타내는 열물성치이다. 이러한 외기대류계수에 대한 연구는 열전도율이나 비열 등과 같은 열특성치에 비해 매우 부족하며, 다만 일부 연구자들에 의해 실시된 실험결과나 모델식이 제안되어 있다. 외기대류계수는 대기, 콘크리트 표면의 거칠기, 유동 성질 등 여러 영향인자가 작용하기 때문에 이를 결정하기는 쉽지 않다. Rastrup 등¹⁻³⁾은 전형적인 외기대류계수의 범위를 $4.3 \sim 30 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ 라고 보고하고 있다. Mendes^{4,5)}는 외기대류계수에 영향을 미치는 영향인자들을 실험방법에 따라 보정해주어야 한다고 제안했으며, 이를 경험적으로 콘크리트 표면 거칠기와 풍속의 함수로 나타내었다. 또한 일본에서는 외기대류계수와 관련된 현장 실험을 통하여 외기대류계수에 대한 모델식을 제안하였는데, Ohbayashigawa 댐의 실험⁶⁾에서는 풍속이 $2 \sim 3 \text{ m/sec}$ 인 경우 외기대류계수를 $12 \sim 13 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ 로, Yamagawa⁷⁾의 실험에서는 $8 \sim 11 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ 로 제안하였다. Ohzawa⁸⁾는 이들의 결과를 분석하여 풍속에 따른 외기대류계수 산정식을 제안하였다. 그러나 각 연구자들이 제안한 외기대류계수는 실험조건에 따라 값의 차이가 심하며, 거푸집의 다양한 영향을 고려하지 못하고

있다. 따라서 본 연구에서는 원전구조물의 정확한 수화열 해석을 위하여 원전 구조물 배합에 대한 콘크리트의 외기대류계수를 풍속과 거푸집의 영향을 고려하여 실험적으로 산정하였으며, 이를 기존의 모델식과 비교하였다.

2. 실험개요

2.1 실험재료 및 배합설계

Table 1은 본 연구에 사용된 콘크리트의 배합설계표이다. 이 배합은 기존의 5종 시멘트를 사용한 배합이 아닌 1종 시멘트를 사용하는 원전 격납구조물 배합이며, 격납이외 구조물에 관한 실험은 향후 추진할 예정이다.

Table 1 콘크리트 배합

배합강도 (kgf/cm ²)	물/결합 재비(%)	물 (kgf)	결합재		잔골재 (kgf)	굵은골재 (kgf)	혼화재료		잔골 재율 (%)
			시멘트 (kgf)	플라이 애시 (kgf)			감수제 (cm ³)	AE제 (cm ³)	
386.7 (5500psi)	44.4	169.1	305.0	75.9	745.8	959.3	620.0	34.0	44

2.2 실험변수

외기대류계수는 풍속뿐만 아니라 거푸집의 종류에 따라서도 영향을 받으므로, 본 연구에서는 풍속 외에 거푸집의 종류를 고려하기 위해 Table 2와 같이 거푸집의 재료와 두께에 대한 외기대류계수의 변화를 구하고자 하였다. 풍속은 실험기간동안 일정한 상태를 유지하였다.

Table 2 실험변수

풍속 (m/s)	거푸집 종류	외기습도(%)
0, 1	거푸집 없음	40, 70
	양생포	
	양생포+비닐	

2.3 실험방법

실험은 동일 풍속에 대해 3개의 실험체(거푸집이 없는 경우, 양생포, 양생포+비닐)에 대해 수행하였고, 바람은 송풍기를 이용하여 한 방향으로만 불어주었다. 풍속은 실험체의 개방면 바로 위의 풍속을 측정한 값이다(Fig. 1).

실험체는 Fig. 2와 같이 200×200×500 mm의 직육면체 형상이고, 대류에 의한 영향을 보다 확실히 하기 위해 두께 300 mm의 단열재(스티로폼)를 사용하여 콘크리트의 열전달을 개방면 방향으로 유도하였다. 온도는 K-type의 열전대를 실험체의 깊이 방향으로 총 7개소에 설치하여 측정하였다. 설치된 열전대는 각 깊이별로 단면(200×200 mm)내의 온도 분포가 일정함을 가정하여 중앙부에 설치하였다.



Fig. 1 실험체위의 송풍장치 장착 전경

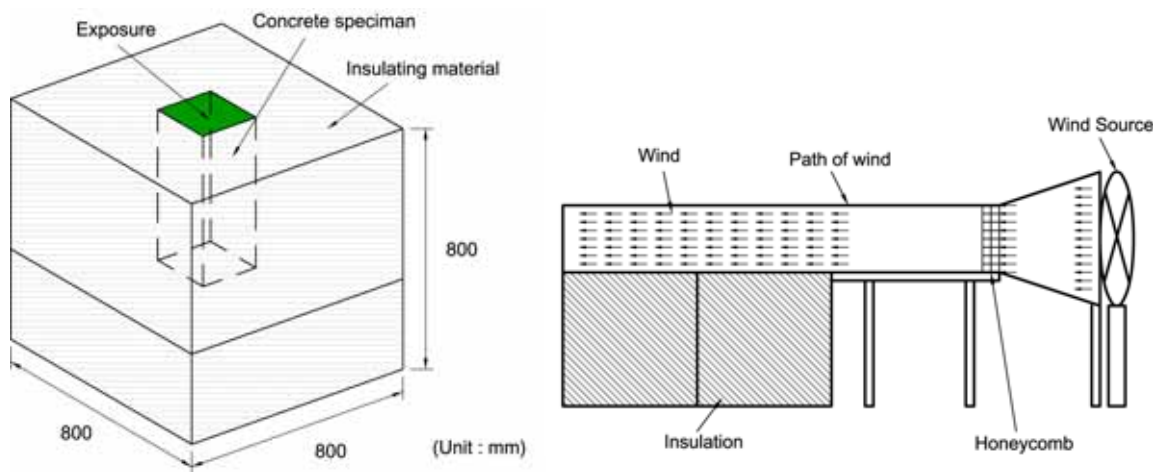
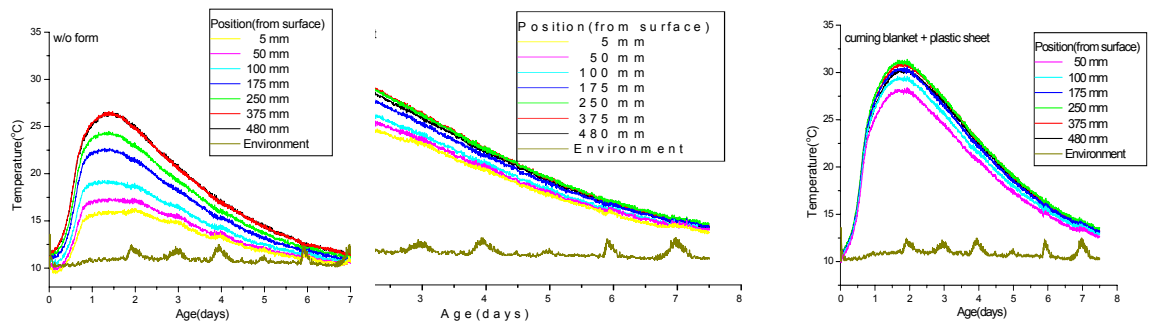


Fig. 2 외기대류계수 실험 개요

3. 실험결과

3.1 풍속에 따른 변화

Fig. 3과 Fig. 4를 보면, 거푸집의 존치여부에 관계없이 풍속이 증가할수록 심부와 표면부의 최대 온도가 낮아진다. 이것은 풍속이 빨라질수록 콘크리트 표면부에서 열의 소산율이 증가하기 때문이다. 이러한 경향은 거푸집이 있는 경우에 비해 거푸집을 사용하지 않은 경우에서 뚜렷이 나타나고 있는데, 이는 거푸집이 표면부에서 단열 효과를 나타내기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 거푸집을 사용한 경우는 거푸집이 없는 경우에 비해 심부와 표면부의 온도차이가 작아지게 된다.

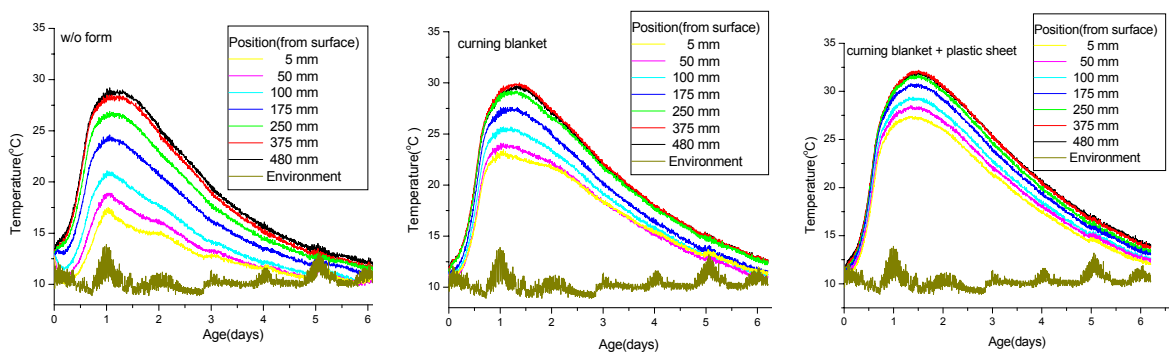


(a) 거푸집 없음

(b) 양생포

(c) 양생포+비닐

Fig. 3 각 위치에서의 온도이력(풍속 : 0 m/s)



(a) 거푸집 없음

(b) 양생포

(c) 양생포+비닐

Fig. 4 각 위치에서의 온도이력(풍속 : 1 m/s)

실험결과, 풍속이 빨라짐에 따라 최대 온도시점의 온도차이가 증가하는 것으로 나타났다. 이를 통하여 심부의 온도저감률이 표면부의 온도저감률보다 작다는 것을 알 수 있다. 즉, 콘크리트를 통하여 심부에서 표면부로 열전도가 일어나는 속도보다 표면부에서 열이 소산되는 속도가 더 빠르다. 풍속이 빨라지면 외기대류계수가 증가하므로, 외기대류계수의 증가에 따라 열소산이 증가한다고 볼 수 있다.

3.2 거푸집의 종류에 따른 변화

거푸집을 사용한 경우와 거푸집을 사용하지 않은 경우 온도분포가 확연한 차이를 보이고 있다. 즉, 거푸집을 사용함으로써 외기로의 열 소산율이 떨어지기 때문에 결과적으로 심부와 표면부의 온도차이가 작아진다.

또한 양생포 거푸집의 경우와 양생포+비닐 거푸집에 따른 온도분포를 보면, 거푸집의 종류에 따라서도 온도분포의 변화가 일어남을 알 수 있다. 양생포만 사용했을 경우는 양생포에 비닐을 추가했을 경우에 비해 심부와 표면부에 관계없이 외기로의 열소산이 더 잘 이루어진다. 따라서 수화열에 의한 균열을 방지하기 위한 보온양생시, 양생포에 비닐을 사용한 경우가 더 큰 보온 효과를 나타내게 된다.

Table 3-1 실험결과(본 연구(1종 시멘트))

1종 시멘트	거푸집 없음		양생포		양생포+비닐	
	속성도 ($^{\circ}\text{C} \cdot t$)	외기대류계수 ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}$)	속성도 ($^{\circ}\text{C} \cdot t$)	외기대류계수 ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}$)	속성도 ($^{\circ}\text{C} \cdot t$)	외기대류계수 ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}$)
0 m/s	60	11.78	60	4.93	60	2.438
	100	7.58	100	2.8	100	2.66
1 m/s	60	13.478	60	4.61	60	2.454
	100	10.141	100	3.74	100	2.47

Table 3-2 실험결과(기존의 연구⁹⁾(5종 시멘트))

5종 시멘트		W/C=40 %					W/C=50 %			
Type of form	Conductivity	Coefficient of air convection, h_a (kcal/m ² · h · °C)								
		0 m/s	1.0 m/s	2.0 m/s	3.0 m/s	5.0 m/s	0 m/s	1.2 m/s	1.9 m/s	3.5 m/s
거푸집 없음	1.9	11.9	21.0	24.7	28.6	36.0	17.4	21.7	23.0	30.1

3.3 시멘트 종류에 의한 영향

Table 3은 1종 시멘트를 사용한 실험결과와 기존의 5종 시멘트를 사용한 경우의 실험 결과를 나타내고 있다. 이를 분석해 보면 5종 시멘트를 사용했을 때의 외기대류계수가 거푸집의 유무, 풍속에 상관없이 상당히 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 따라서 1종 시멘트를 사용하는 경우가 열소산의 측면으로 볼 때, 수화열에 의한 균열을 저감할 수 있을 것으로 예상되며, 실험결과 습도(40, 70%)의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

4. 열평형 방정식을 이용한 결과 분석

4.1 열평형 방정식

외기대류계수는 외기에 접한 표면부의 경계조건에 관련된다. 경계조건에서의 열평형 방정식은 임의의 시간에서 식 (1)과 같이 일차원 모델링으로 표현할 수 있다.

$$h_a(T - T_{sur}) = \lambda \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (1)$$

여기서, h_a 는 외기대류계수, T 는 표면부의 온도, T_{sur} 는 외기온, λ 는 열전도율, dT/dx 는 표면부에서의 온도기울기이다.

식 (1)을 콘크리트에 적용하기 위해서는 아래와 같은 몇 가지 가정이 필요하다.

- ① 표면에서의 열전달은 외기로만 이루어진다.
- ② 임의의 시간에서의 수화열 발생은 무시할 정도로 작다.
- ③ 동일한 풍속에서 외기대류계수가 시간에 따라 변하지 않는다.

4.2 외기대류계수 분석

식 (1)의 일차원 모델식을 가지고 외기대류계수의 실험결과를 풍속별로 분석하였다. 임의의 시간은 동일한 열특성발현 시점으로 맞추기 위하여 숙성도 개념을 적용하였다. 즉, 식 (2)의 동일한 숙성도(M)값을 갖는 시점을 취하여 식 (1)을 적용하였다. 이 때 온도 T 는 표면부 온도를 사용하였다.

$$M = \sum (T - T_o) \Delta t \quad (2)$$

여기서 M 은 숙성도, T_o 는 기준온도로 -10°C , Δt 는 시간 간격이다.

본 연구에서는 Table 3에 나타난 바와 같이 숙성도가 60, 100($^{\circ}\text{C} \cdot t$)를 갖는 시점을 외기대류계수의 산정 시점으로 간주하였다.

동일한 숙성도를 갖는 시점에서 실험체의 온도분포를 이용하여 회귀분석을 실시하고, 회귀분석식을 이용하여 표면부에서의 온도기울기와 표면부의 온도를 결정하였다. 다양한 숙성도를 갖는 시점에서의 온도분포는 풍속 0 m/s 경우 일반적으로 Fig. 5와 같이 나타난다. 회귀분석결과를 이용하면 표면부의 온도와 온도기울기를 구할 수 있다. 동일한 풍속에서 외기대류계수가 같다고 가정하였으므로 식 (3)이 성립되며, 식 (4)를 통하여 외기대류계수를 구할 수 있다.

$$\lambda_{i+1} = \lambda_i \frac{A_i B_{i+1}}{A_{i+1} B_i} \quad (3)$$

$$h_a = \lambda \frac{A_i}{B_i} \quad (4)$$

여기서, $A_i = (dT/dx)_i$, $B_i = (T_i - T_{sur})$ 이다.

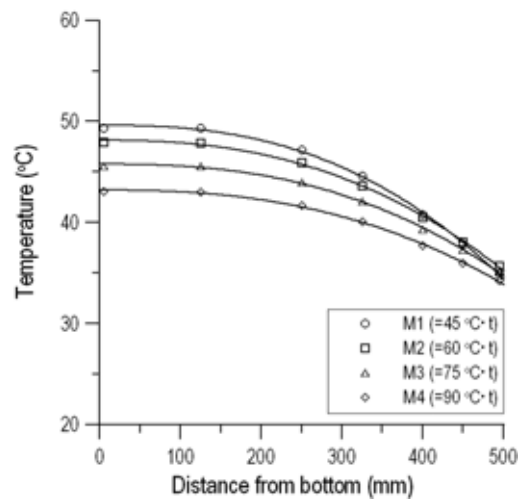


Fig. 5 다양한 숙성도에 따른 온도 분포

식 (4)를 이용하여 외기대류계수를 구하기 위해서는 식 (3)과 (4)의 열전도율을 가정하여야 한다. 여기서는 외기대류계수 일반식을 추정하기 위해 거꾸집을 고려하지 않은 결과를 계산하였다. 즉, 식 (4)에서의 열평형은 Fig. 5의 콘크리트 온도분포로부터 구한 실험체 표면부의 온도를 사용하였다.

식 (3)을 통하여 숙성도에 따른 열전도율의 변화를 구할 수 있다. Table 4는 풍속과 거꾸집 종류에 따른 열전도율의 변화와 대류계수를 나타내고 있다. 이 때의 열전도율은 기존 5종 시멘트의 열전도율 실험을 통하여 얻은 값인 1.9로 가정하였다.

Fig. 6은 본 연구에서 얻어진 거푸집이 없는 경우의 외기대류계수와 기존에 제안된 외기대류계수를 비교하고 있다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 본 연구에서 얻어진 외기대류계수는 기존의 외기대류계수 예측 모델식과 매우 잘 맞는 경향을 보이며, 5종 시멘트의 경우에는 이를 상당히 상회하는 것으로 나타났다. 추후 풍속이 더 큰 경우에 대한 연구를 진행하면 현재 원전구조물 배합에 대한 외기대류계수를 다른 모델식들과 비교하여, 보다 타당한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

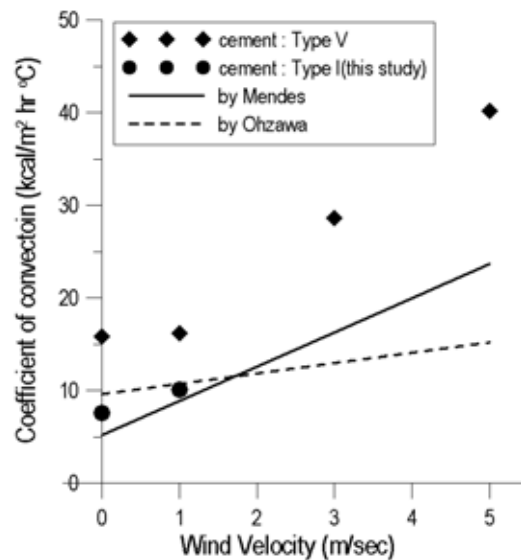


Fig. 6 기존의 모델식과 실험결과의 비교

5. 결 론

원전 격납구조물 배합에 대한 외기대류계수 실험을 수행하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 콘크리트 표면과 외기와의 열전달을 나타내는 외기대류계수는 풍속이외에도 거푸집의 종류 및 두께에 따라 영향을 받는 것으로 나타났다.
- 2) 원전 격납구조물 배합에 대한 실험결과, 외기대류계수는 거푸집 종류에 따라 풍속의 영향도가 다르게 나타났으며, 이는 기존의 모델식과 경향이 일치하는 것으로 나타났다.
- 3) 원전 구조물의 보다 정확한 수화열 해석을 위해서는 추후 외기대류계수에 관한 이론적인 분석을 통하여 앞에서 언급한 영향인자를 모두 고려할 수 있는 모델식의 개발이 필요하다고 판단된다.

- 4) 수화열 해석의 정확도를 높이기 위해서는 콘크리트의 열특성계수에 관한 연구가 필요하며, 본 연구에서 수행된 외기대류계수에 대해서 실제 현장에서 사용되고 있는 거푸집 형태(유로폼, 양생포 등)와 보다 다양한 거푸집 형상(두께 변화 등), 그리고 현장 시공조건의 다양한 풍속에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력중장기 연구개발 사업의 지원 하에 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Rastrup, E., "Heat of Hydration in Concrete," Magazine of Concrete Research, Vol. 6, No. 17, 1954, pp.79~92.
2. Hsieh, C., Qin, C., and Ryder, E., "Development of Computer Modelling for Prediction of Temperature Distribution Inside Concrete Pavements", Report FL/DOT/SO/90-374, Mechanical Engineering Dept., University of Florida, Gainesville, 1989.
3. Chapman, "Fundamental of Heat Transfer", Macmillian Inc., New York, 1982.
4. Fernando, A. B., Mendes, P. A., and Mirambell, E., "Heat of Hydration Effects in Concrete Structures", ACI Materials Journal, 1992, pp.139.
5. Mendes, P. A., "Temperature Gradients for Concrete Bridges", MSc thesis, Technical University of Lisbon, 1989.
6. 四國電力(株), "マスコンクリートの初期ひび割れとその防止対策に関する研究", 1964.
7. 山川, 笠原, 小林, "マスコンクリートの熱傳導率試驗方法の検討", 第37回土木學會年次學術講演會概要集, 第5部, 1982.
8. 小澤章三, "マスコンクリートの初期ひび割れとその防止対策に関する研究(I)", 發電水力, No. 57, 1962.
9. 우상균 외, "콘크리트 구조물에서의 수화열 저감 방안 연구" 보고서, 한전전력연구원, 1998.