

양생조건 · 외기온도 · 비등효과를 고려한 콘크리트 외기대류계수의 결정

최명성¹⁾·김윤용²⁾·우상균³⁾·김진근^{2)*}

¹⁾ 대우건설기술연구소 ²⁾ 한국과학기술원 ³⁾ 전력연구원

(2005년 1월 31일 원고접수, 2005년 6월 30일 심사완료)

Determination of Convection Heat Transfer Coefficient Considering Curing Condition, Ambient Temperature and Boiling Effect

Myoung-Sung Choi¹⁾, Yun-Yong Kim²⁾, Sang-Kyun Woo³⁾, and Jin-Keun Kim^{2)*}

¹⁾ Daewoo Institute of Construction and Technology, Suwon, 440-210, Korea

²⁾ Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, 305-701, Korea

³⁾ Korea Electric Power Research Institute, Daejeon, 305-380, Korea

(Received January 31, 2005, Accepted June 30, 2005)

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 convection heat transfer coefficient which presents thermal transfer between surface of concrete and air, was experimentally investigated with variables such as velocity of wind, curing condition and ambient temperature. At initial stage, the convection heat transfer coefficient is overestimated by the evaporation quantity. So it is essential to modify the thermal equilibrium considered with the boiling effect. From experimental results, the convection heat transfer coefficient was calculated using equations of thermal equilibrium. Finally, the prediction model for equivalent convection heat transfer coefficient including effects of velocity of wind, curing condition, ambient temperature and boiling effects was theoretically proposed. The convection heat transfer coefficient in the proposed model increases with velocity of wind, and its dependance on wind velocity is varied with curing condition. This tendency is due to a combined heat transfer system of conduction through form and convection to air. From comparison with experimental results, the convection heat transfer coefficient by this model was well agreed with those by experimental results.

Keywords : thermal property, convection heat transfer coefficient, velocity of wind, ambient temperature, boiling effect

1. 서 론

1930년대 대형 댐의 건설로 처음 소개되었던 콘크리트의 수화열에 의한 온도균열 문제는 그동안 수많은 연구를 통해 많은 부분 해결되었다. 그러나 해석적인 방법에서 중요한 입력변수에 대한 연구는 아직 미진한 상태로, 특히 콘크리트 표면에서 대기로의 열전달을 나타내는 외기대류에 대한 연구는 국내·외에 거의 소개되어 있지 않다. 그러나 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 중요한 열물성치이다. 이러한 외기대류계수에 대한 연구는 열전도율이나 비열 등과 같은 열특성치에 비해 매우 부족하며, 다만 일부 연구자들에 의해 실시된 실험 결과나 모델식이 제안되어 있다. 외기대류계수는 대기, 콘크리트 표면의 거칠기, 유동 성질 등 여러 영향인자가 작용하기 때문에 이를 결정하기는 쉽지 않다. Rastrup 등은 일반적인 외기대류계수의 범위를 $5\sim 34 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 라고 보고하고 있다. Mendes는 외기대류계수에 영향을 미치는 영향인자들을 실험 방법에 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 실험에서는 풍속이 $2\sim 3 \text{ m/s}$ 인 경우 외기대류계수를 $14\sim 15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

* Corresponding author

E-mail : kimjinkeun@kaist.ac.kr

©2005 by Korea Concrete Institute

로, Yamagawa의 실험에서는 $9\sim 13 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 로 제안하였다. Ohzawa는 이들의 결과를 분석하여 풍속에 따른 외기대류계수 산정식을 제안하였다. 그러나 각 연구자들이 제안한 외기대류계수는 실험 조건에 따라 값의 차이가 심하며, 특히 양생조건에의 영향과 외기온도 그리고 비등효과를 고려하지 못하고 있다.

따라서 이 연구에서는 고안된 콘크리트의 외기대류계수 실험방법을 통해 풍속뿐만 아니라 양생조건, 외기온도, 비등효과를 고려한 외기대류계수의 변화를 예측할 수 있는 모델식을 제안하고자 한다.

2. 실험 개요

2.1 실험 배합 설계

이 실험에 사용된 콘크리트 배합은 Table 1과 같다. 현재 원전 격납구조물에 사용되는 배합을 사용하였다.

2.2 실험 변수

외기대류계수는 풍속뿐만 아니라 양생조건, 외기온도, 비등효과에 따라서 상당한 영향을 받으므로, 이 연구에서는 풍속 외에 Table 2와 같이 양생조건과 외기온도에 의한 외기대류계수의 변화를 구하고자 하였다. 그리고 초기 외기대류계수 값에 대한 보정을 위해 비등효과 실험을 실시하여 외기대류계수의 변화를 알아보았다.

2.3 실험 방법

실험은 동일 풍속에 대해 3개의 실험체(양생 재료가 없는 경우, 양생포, 양생포 + 비닐)에 대해 수행하였고, 바람은 설치된 풍동내의 송풍장치를 이용하여 한 방향으로만 불어주었다. 송풍장치 내에 Honeycomb과 철망장치를 설치하였고, 풍속은 실험체의 개방면 바로 위의 풍속을 측정하였다(Fig. 1).

Table 1 Mix proportion of concrete

W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m^3)					
		W	C	S	G	Admixture (cm^3)	
						AE	WR
44.4	44	169	380	745	959	34	620

Table 2 Test parameters

Wind velocity (m/s)	Curing condition	Temperature (K)	Boiling effect
0~5	w/o Curing form	283, 293, 303	Dial scale
	Curing blanket		
	Curing blanket + Plastic sheet		

실험체는 Fig. 2와 같이 $0.2 \times 0.2 \times 0.5 \text{ m}$ 의 직육면체이고, 1차원 대류 열전달을 모사하기 위해 두께 0.3m의 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($0.2 \times 0.2 \text{ m}$)내의 온도 분포가 일정함을 가정하여 중앙부에 설치하였다. 비등효과 실험을 위해서는 Fig. 2의 거푸집 아래에 시간에 따른 무게를 측정할 수 있는 전자저울을 사용하였다.

3. 실험 결과

3.1 풍속에 따른 변화

Fig. 3을 보면, 양생조건에 관계없이 풍속이 증가할수록 외기대류계수는 증가한다. 이것은 풍속이 빨라질수록 콘크리트 표면부에서 열의 소산율이 증가하기 때문이다. 이러한 경향은 양생 재료가 있는 경우에 비해 양생 재료를 사용하지 않은 경우에서 뚜렷이 나타나고 있는데, 이는 양생 재료가 표면부의 대류에 의한 열소산을 감소시키기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 양생 재료를 사용한 경우는 양생 재료가 없는 경우에 비해 심부와 표면부의 온도차이가 작아지게 된다.

실험 결과를 통해 심부의 온도저감률이 표면부의 온도저감률보다 작음을 알 수 있고, 이는 풍속이 빨라짐에 따라 콘크리트를 통하여 심부에서 표면부로 열전도가 일어나는

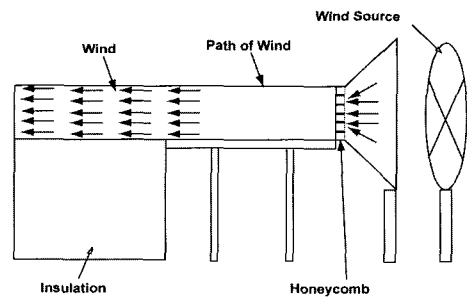


Fig. 1 Overall apparatus

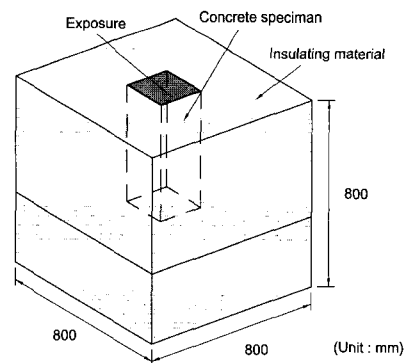
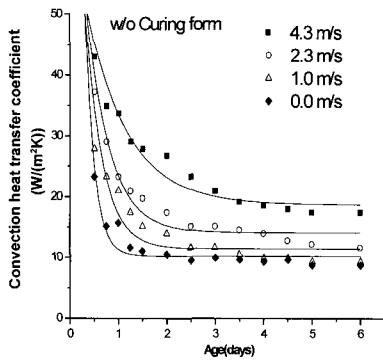
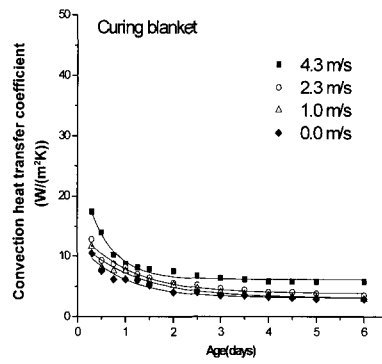


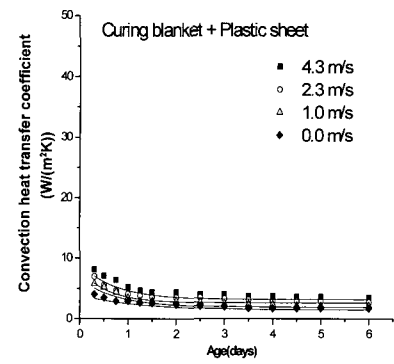
Fig. 2 Shape of concrete specimen and insulating form



(a) w/o Curing form

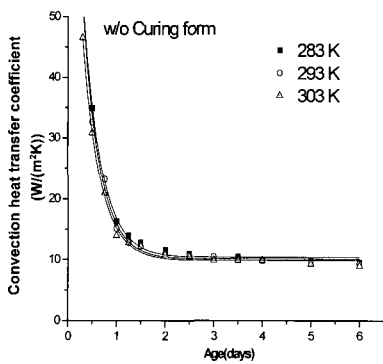


(b) Curing blanket

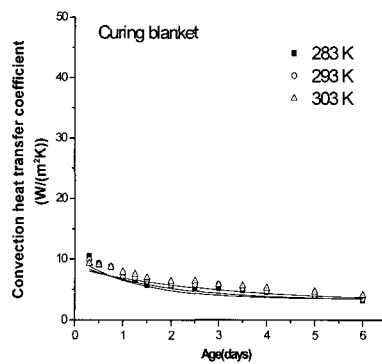


(c) Curing blanket + Plastic sheet

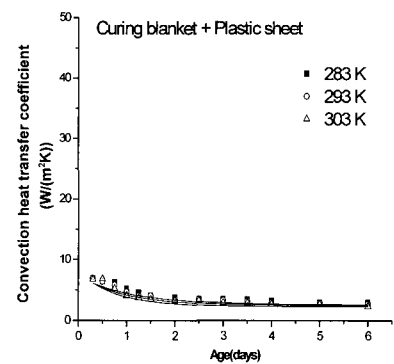
Fig. 3 Convection heat transfer coefficient considering the velocity of wind and curing condition



(a) w/o Curing form



(b) Curing blanket



(c) Curing blanket + Plastic sheet

Fig. 4 Convection heat transfer coefficient considering the ambient temperature and curing condition

속도보다 표면부에서 열이 소산되는 속도가 더 빠른 것을 나타낸다. 즉, 풍속이 빨라지면 외기대류계수가 증가하므로, 이에 따른 표면부의 열소산이 증가함을 알 수 있다.

3.2 양생 조건에 따른 변화

Fig. 3의 실험 결과는 양생 재료를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우의 외기대류계수 차이를 나타낸다. 즉, 양생 재료를 사용함으로써 외기로의 열소산율이 떨어지기 때문에 결과적으로 심부와 표면부의 온도차이가 작아진다.

또한 양생 재료를 사용한 경우 사용 재료(양생포, 양생포 + 비닐)에 따른 외기대류계수를 비교해 보면, 양생 재료의 종류에 따라서도 온도 분포의 변화가 생김을 알 수 있다. 양생포+비닐에 비해 양생포만 사용하면 상대적으로, 심부와 표면부에 관계없이 외기로의 열소산이 더 잘 이루어진다. 따라서, 양생포를 사용한 경우가 양생포 + 비닐을 사용한 경우에 비해 온도차이가 커지고, 더 작은 단열 효과를 나타내게 된다.

3.3 외기온도에 따른 변화

동일한 풍속, 양생조건하에 외기온도를 달리하여 실험한 결과(Fig. 4)를 보면 온도분포의 변화가 거의 발생되지 않고 있다. 즉 외기온도의 변화에 따른 열소산율의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

이는 외기온도를 변화시키면 시험체 내부의 절대적인 온도값은 변화하나, 그 분포는 거의 일정함을 의미한다. 이와 같은 사실로 미루어 볼 때, 표면에서의 열소산을 나타내는 외기대류계수는 외기온도 변화에 의한 영향이 매우 미미한 것으로 판단된다.

3.4 비등효과에 의한 영향

고체와 액체계면에서 증발이 일어나는 현상을 비등이라고 하는데 이 연구에서는 콘크리트 내 물과의 비등으로 인한 증발현상 때문에 초기 많은 양의 물이 증발하게 된다(Fig. 5).

각 풍속별 실험 결과를 분석해 보면, 주로 양생 재료를 사용하지 않은 경우 전체적으로 초기에 열소산이 많이 일어나는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 경화전 콘크리트 내부의 수분 증발에 의한 것으로서 초기 외기대류계수에

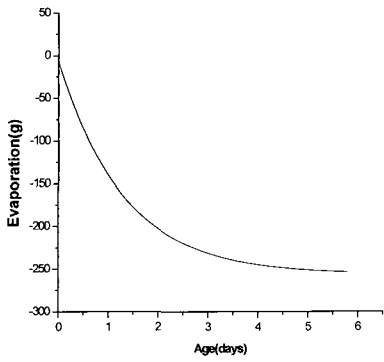


Fig. 5 Evaporation curve with ages

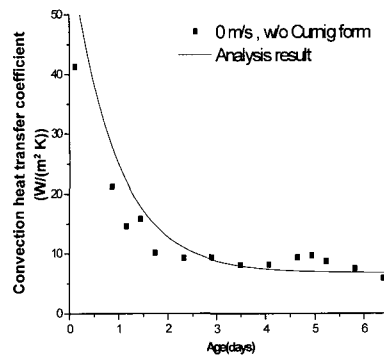


Fig. 6 Convection heat transfer coefficient with ages

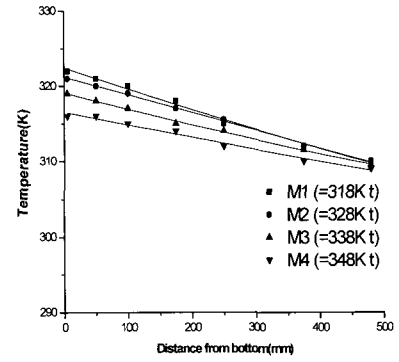


Fig. 7 Temperature distribution curve with maturity

큰 영향을 미친다(Fig. 6). 따라서 양생 초기의 이런 수분 증발에 의한 열손실은 콘크리트 내부 온도 결정에 매우 큰 영향을 끼칠 수 있으므로, 외기대류계수를 결정함에 있어서 수분증발에 의한 비등효과는 고려되어야 한다.

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.

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

여기서, h_c 는 외기대류계수, T_i 는 표면부의 온도, T_{sur} 는 외기온도, λ 는 열전도율, dT/dx 는 표면부에서의 온도기울기이다.

4.2 외기대류계수 모델식

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

$$M = \sum (T - T_0) \Delta t \quad (2)$$

여기서, M 은 속성도, T_0 는 기준온도로 263 K, Δt 는 시간 간격이다.

동일한 속성도를 갖는 시점에서 실험체의 온도분포를 이

용하여 회귀분석을 실시하고, 회귀분석식을 이용하여 표면부에서의 온도기울기와 표면부의 온도를 결정하였다. 회귀분석은 풍속 0m/s 경우인 Fig. 7과 같이 나타난다. 회귀분석 결과를 이용하면 표면부의 온도와 온도기울기를 구할 수 있다.

$$h_c = \lambda \frac{A_i}{B_i} \quad (3)$$

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

식 (3)을 이용하여 외기대류계수를 구하기 위해서는 표면온도를 알아야 한다. 여기서는 외기대류계수 일반식을 추정하기 위해 양생재료가 없는 경우의 실험결과를 이용하여 계산하였다. 즉, 식 (3)에서의 열평형은 Fig. 7의 콘크리트 온도분포로부터 구한 실험체 표면부의 온도를 사용하였다.

Table 3는 풍속과 양생 조건, 외기온도, 열전도율의 변화에 따른 외기대류계수를 나타내고 있다. 이 때의 열전도율은 열전도율 실험을 통하여 얻은 범위내의 값인 1.7, 1.9, 2.1, 2.3 W/(m·K)로 가정하였다. Table 3의 분석 결과를 보면, 속성도 각 단계별 열전도율의 변화가 나타나고 열전도율의 변화에 따라서 외기대류계수도 변함을 알 수 있다. 이러한 결과는 식 (3)에서 보는바와 같이 콘크리트 내부의 열유속이 열전도율에 의해 결정되기 때문이다. 따라서 표면부의 열전도율을 결정하는 것이 이 해석 방법에서는 매우 중요하다. 이 연구에서 사용된 배합에 대한 열전도율 측정 결과에 의하면, 콘크리트의 열전도율은 2.1 W/(m·K) 정도의 값을 갖는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 이 연구에서 얻어진 양생재료가 없는 경우의 실험 결과와 기존에 제안된 외기대류계수를 비교하고 있다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 이 연구에서 얻어진 외기대류계수는 Mendes의 제안식과 가까운 것으로 보인다. 이러한 외기대류계수의 차이는 실험 방법 및 실험 조건과 해석 방법에 서로 다르기 때문인 것으로 사료된다.

Table 3 Analytical results

Curing condition	Conductivity	T=293 K				T=303 K			
		Convection heat transfer coefficient h_c (W/(m ² · K))							
		0 m/s	1 m/s	2.3 m/s	4.3 m/s	0 m/s	1 m/s	2.3 m/s	4.3 m/s
w/o Curing form	1.7	8.1	11.7	13.9	19.7	8.3	13.0	14.7	20.9
	1.9	9.1	13.3	15.8	22.3	9.5	14.8	16.7	23.7
	2.1	10.3	15.0	17.6	25.0	10.7	16.6	18.7	26.5
	2.3	11.3	16.5	19.5	27.5	11.7	17.7	20.7	29.3
Curing blanket	1.7	3.1	3.6	4.0	4.3	3.6	3.8	4.4	5.1
	1.9	3.4	4.0	4.7	5.6	4.0	4.3	5.0	5.8
	2.1	3.9	4.6	5.2	6.3	4.5	4.8	5.5	6.5
	2.3	4.3	5.1	5.6	6.9	5.0	5.3	6.1	7.2
Curing blanket + Plastic sheets	1.7	1.8	2.0	2.3	3.3	1.9	2.3	3.3	3.6
	1.9	2.2	2.3	2.6	3.8	2.2	2.5	3.4	4.0
	2.1	2.4	2.6	3.0	4.3	2.4	2.9	3.9	4.5
	2.3	2.6	2.9	3.3	4.7	2.6	3.2	4.4	5.0

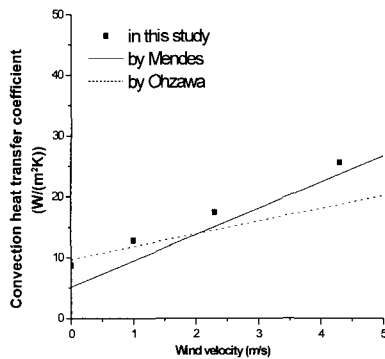


Fig. 8 Comparison with previous models

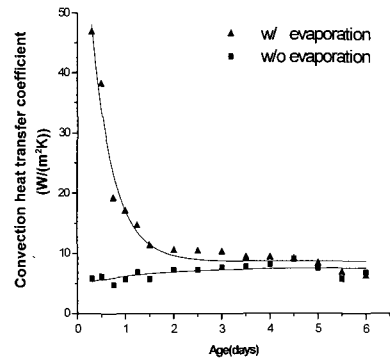


Fig. 9 Comparison with evaporation

5. 비등효과를 이용한 결과 분석

양생 재료가 없는 경우의 실험 결과를 기존의 열평형 방정식을 이용하여 분석해 보면 초기에 외기대류계수가 큰 것을 알 수 있다(Fig. 6). 이런 현상은 비등에 의한 콘크리트 내의 수분 증발 때문인 것으로 사료된다. 비등효과를 증명하기 위해, 시간에 따른 증발량 실험을 수행하였다(Fig. 5). 실험 결과와 열전달을 이용해서, 풍속 0 m/s, 양생 재료를 사용하지 않은 경우 표면 수분증발열을 다음 식 (4)와 같이 계산된다.

$$l_b = 4.186 \times \{539 - 0.64(T - 373) - 0.00083(T - 373)^2\} \quad (4)$$

여기서, l_b 는 물의 증발열(J/g), T 는 온도(K)이다. 이때 콘크리트 온도와 외기온도가 293 K 일때 2465 J/g으로 계산된다. 실험 조건에서 표면온도의 변화는 수화열의 발생, 대류 열전달, 증발에 의한 열소산에 의해 결정된다.

5.1 수화열 발생

수화열 발생은 단일온도 상승 실험을 통해서 예측할 수 있다. 하지만 분석시의 임의시간에서의 수화열 발생은 무시할 정도로 작다고 가정하였다.

5.2 대류 열전달

대류에 의한 열전달은 콘크리트 표면 온도와 외기온도의 차이 때문에 일어나는데, 이 열전달은 다음의 식으로 계산 할 수 있다.

$$q_{convec} = h_c(T_i - T_{sur}) \quad (5)$$

5.3 증발에 의한 열 소산

시간에 따른 증발열을 예측하기 위해 Fig. 5의 실험 결과를 회기분석을 통해서 증발열의 변화를 결정하였다. 초기에는 증발열의 변화가 증가하다가 시간이 지남에 따라 차츰 감소하다가 일정 시간이 경과한 후에는 거의 발생되지 않음을 알 수 있다.

5.4 증발 효과를 고려한 수정 열평형 방정식

기존의 열평형 방정식에 의한 외기대류계수 결정 방법은 초기에 외기대류계수가 과잉 평가되는 단점을 갖고 있다. 이는 초기 콘크리트 내의 수분 증발에 의한 비등효과를 고려하지 못하고 있기 때문이다. 따라서 비등효과를 고

려한 수정 열평형 방정식을 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$\lambda \left(\frac{dT}{dx} \right) = h_c (T_i - T_{sur}) + \frac{dE}{dt} \times l_f / A \quad (6)$$

여기서, E 는 시간에 따른 증발량(g), A 는 증발 단면적이다.

수정된 열평형 방정식을 이용하여 실험 결과를 분석해 보면 Fig. 9 와 같이 구할 수 있다. 이로부터 비등효과를 고려하면 시간에 따른 외기대류계수의 변화가 일정하다는 것을 알 수 있다.

6. 외기대류계수 모델식 제안

6.1 개요

Table 3의 결과는 양생 재료와 외기온도에 따른 외기대류계수의 변화를 나타내고 있다. 양생 재료의 영향을 고려한 외기대류계수의 일반식을 제안하기 위해서는 사용된 양생재료의 열특성(이 논문에서는 열전도계수의 향으로 표현함) 및 두께를 고려한 일반적인 모델식이 필요하다. 이를 위해 이 논문에서는 Fig. 10과 같은 열전달 모식도의 개념을 사용하였다.

Fig. 10에서 $T_{s,i}$ 는 양생 재료의 내부면의 온도, $T_{s,o}$ 는 양생재료의 외부면의 온도, T_{∞} 는 외기의 온도를 나타낸다. Fig. 10에서 실선은 해당 재료와 동일한 두께의 콘크리트를 가정한 조건에서의 총 열저항을 나타내고 있다. 이를 식으로 나타내면 식 (7)과 같다.

$$R_T = R_c + R_{ex} = \frac{L_c}{k_c A_c} + \frac{1}{h_{ex} A_c} \quad (7)$$

여기서, R_T 는 총 열저항, R_{ex} 는 결과분석 조건에서의 대류 열저항, L_c 는 콘크리트의 두께, k_c 는 콘크리트의 열전도율, A_c 는 콘크리트의 단면적, h_{ex} 는 결과 분석에 의한 Table 3의 외기대류계수이다.

그러나, 이러한 경우는 양생 재료에 의한 열전달을 콘크리트로 대체한 경우로 실제와는 다른 값을 갖게 되며, 양생재료의 열특성 및 두께 등을 고려할 수 없다. 따라서 양생재료를 고려하기 위해서는 Fig. 10의 점선과 같은 열전달이 발생한다고 가정할 수 있다. 이와 같은 열전달에서의 총 열저항은 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

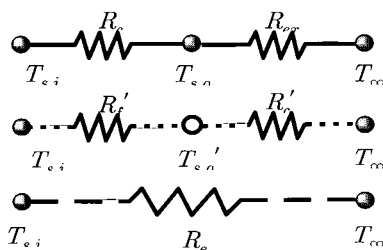


Fig. 10 Conceptual flow chart

$$R_T = R_f' + R_c' = \frac{L_f}{k_f A_f} + \frac{1}{h_c A_c} \quad (8)$$

여기서, R_f' 은 양생재료의 열저항, R_c' 은 콘크리트의 대류 조건에 의한 열저항, L_f 는 재료의 두께, k_f 는 재료의 열전도율, A_f 는 재료의 단면적, h_c 는 평균외기대류계수이다.

양생 재료에 의한 전도와 표면부의 대류를 통합된 하나의 등가대류 조건으로 가정한다면 Fig. 10의 굵은 점선과 같이 가정할 수 있으며, 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_T = R_e = \frac{1}{h_e A_{ef}} \quad (9)$$

여기서, R_e 는 등가대류에 의한 열저항, h_e 는 등가외기대류계수, A_{ef} 는 대류 단면적이다.

위의 식 (8)과 식 (9)의 총 열저항은 동일하므로 식 (10)과 같은 관계식으로 나타낼 수 있으며, 이를 이용하여 등가외기대류계수를 식 (11)과 같이 유도할 수 있다.

$$R_e = R_f' + R_c' \quad (10), \quad \bar{h}_e = \frac{1}{A_{ef} \left(\frac{L_f}{k_f A_f} + \frac{1}{h_c A_c} \right)} \quad (11)$$

6.2 콘크리트의 외기대류계수

식 (11)을 적용하기 위해서는 우선 양생 재료가 없는 경우, 즉 콘크리트의 외기대류계수를 구해야 한다. 이 연구에서는 공기유동에 따라 대류계수값의 차이가 크다는 것을 알지만, 콘크리트 표면의 거칠기 등에 의해 실제 작용되는 유동은 난류로 가정하였다. 콘크리트의 외기대류계수는 난류유동 상황에서 식(12a)와 같이 구할 수 있다.

$$N_L = \frac{\bar{h}_c L}{k} = 0.0296 Re^{4/5} Pr^{1/3} \quad (12a)$$

여기서, N_L 는 Nusselt수, \bar{h}_c 는 평균외기대류계수, L 는 대류 길이, k 는 공기의 열전도율, Re 는 Reynolds수, Pr 은 Prandtl수이다. 식 (12a)의 난류경계층 조건은 평행유동내의 평판에 대한 강제대류인 경우에 해당하는 식으로 풍속이 0m/s일 경우에는 대류에 의한 열손실이 일어나지 않는다고 가정한 경우이다. 그러나, 실제의 경우는 이러한 강제대류뿐만 아니라 유동체의 자유유동에 의한 자유대류가 발생하므로 이에 대한 고려가 필요하다.

자유대류의 경우 Bejan은 가열되어 있는 평판 위에서의 대류계수 결정을 위해 식 (12b)와 같이 제안하고 있다.

$$\bar{N}_L = 0.15 Ra_L^{1/4} \quad (12b)$$

여기서 Ra_L 는 $10^4 \sim 10^7$, $Ra_L = \frac{g \beta}{\alpha_d \nu} L^3 (T_i - T_{sur})$ g 는 중력 가속도, β 는 부피온도팽창 계수, α_d 는 온도 밀도, L 는 대류길이, T_i 는 표면온도, T_{sur} 는 외기온도이다. Table 3의

양생 재료가 없는 경우의 분석 결과는 구하고자 하는 일반식에 해당하므로 열전도율이 2.1 W/(m·K)인 경우에 대한 결과를 이용하여 식 (12)와 비교하면 Fig. 11과 같이 나타낼 수 있다.

Fig. 11에서 보는 바와 같이 Table 3의 분석 결과는 난류경계층 조건에서의 외기대류계수 변화와 비교하여 볼 때 풍속에 의한 영향을 제대로 고려하고 있음을 알 수 있다. 단, 풍속이 0m/s일 때에 값의 차이가 남을 알 수 있는데, 이는 자유대류에 관한 식 (12b)는 일정한 표면온도나 일정한 열유속과 같은 국한된 조건에 대해서만 제시되어 있으나, 실제의 경우 표면 조건이나 유동체의 체적, 열유속의 변화에 따라 이런 요인들이 달라지기 때문인 것으로 사료된다. 강제대류의 경우 식 (12a)에 $Pr = 0.707$, $Re = vL/\nu$, $\nu = 15.89 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $k = 2.62 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 를 대입하여 콘크리트의 외기대류계수(\bar{h}_c)를 구성하면, 식 (13a)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{h}_c = 4.114v^{4/5}L^{-1/5} \quad (13a)$$

자유대류의 경우 식 (12b)에 g 는 9.8 m/s^2 , β 는 0.0033 K^{-1} , ν 는 $16.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, α_d 는 $22.9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 를 대입하면 식 (13b)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{h}_c = 1.5 \times (T_i - T_{sur})^{1/3} \quad (13b)$$

6.3 양생 조건을 고려한 외기대류계수 모델식

식 (11)의 등가외기대류계수를 구하기 위해서 양생 재료의 열전도율(k_f), 단면적(A_f), 두께(L_f), 대류 단면적(A_d) 과 식 (13)의 콘크리트의 외기대류계수를 이용하여 구할 수 있다. 강제대류의 경우 식 (13a)를 대입하여 식 (14a)와 같이 구할 수 있고, 자연대류의 경우 식 (13b)를 대입하여 식 (14b)와 같은 양생 조건을 고려한 외기대류계수 모델식을 구할 수 있다.

강제대류

$$\bar{h}_c = \frac{1}{A_{cf} \left(\frac{L_f}{k_f A_f} + \frac{1}{4.114v^{4/5}L^{-1/5} A_c} \right)} \quad (14a)$$

자유대류

$$\bar{h}_c = \frac{1}{A_{cf} \left(\frac{L_f}{k_f A_f} + \frac{1}{1.5 \times (T_i - T_{sur})^{1/3} A_c} \right)} \quad (14b)$$

제한된 외기대류계수 모델식 식 (14)의 정확도를 분석하기 위해 이 연구에서 수행된 실험결과를 이용하여 Fig. 12와 같이 비교하였다. 수정된 열평형 방정식을 이용하여 계산된 외기대류계수와 식 (14)에 의해 제안된 모델식에

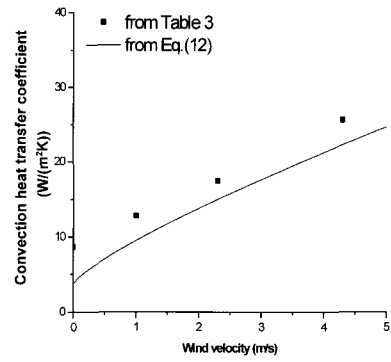


Fig. 11 Comparison between analytical and theoretical results

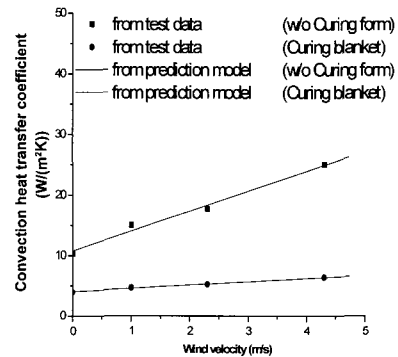


Fig. 12 Relationship between measured and predicted values for convection heat transfer coefficient

의한 외기대류계수를 비교하면 풍속뿐만 아니라 양생조건에 따른 외기대류계수의 변화를 정확히 예측함을 알 수 있다. 이 연구에서 사용된 양생재료(양생포)의 재료적 특성상 열전도율은 약 0.04 W/(m·K), 두께는 0.002 m로 평균값을 사용하였다.

6. 결 론

외기대류계수에 관한 실험을 수행하고, 이를 토대로 이론적인 모델식을 제시한 이 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 콘크리트 표면과 외기와의 열전달을 나타내는 외기대류계수는 풍속외에도 양생 조건 및 두께에 따라 영향을 받는다.
- 2) 외기온도의 변화에 의한 외기대류계수의 차이는 다른 영향인자들에 비해 그 효과가 미비하여 외기대류계수 결정에 영향이 거의 없는 것으로 판단된다.
- 3) 외기대류계수에 관한 실험을 수행하고, 실험 조건에 대한 외기대류계수를 계산하였다. 분석 결과에 의하면 외기대류계수는 양생 조건 및 두께에 따라 풍속의 영향도가 다르게 나타났으며, 이는 기존의 모델식에서 예측한 것과 유사한 경향을 나타냈다.
- 4) 기존의 열평형 방정식을 이용한 외기대류계수를 산정할 때 초기에 과다한 값으로 계산되었다. 이는 비등효과에

의한 증발의 영향을 고려해 주지 않았기 때문이다. 이를 위해 경화전 콘크리트의 비등효과를 고려한 수정 열평형 방정식을 제안하고, 이를 이용하여 외기대류계수를 산정하면 일정한 값으로 수렴하는 결과를 얻을 수 있었다.

- 5) 외기대류계수에 관한 이론적인 배경을 통하여 앞에서 언급한 영향인자를 모두 고려할 수 있는 외기대류계수 모델식을 제안하였으며, 제안된 모델식에 의해 계산된 외기대류계수는 실험에 의한 외기대류계수와 정확히 일치함을 확인하였다.
- 6) 수화열에 의한 온도 해석을 보다 정확히 수행하기 위해서는 이 연구와 같은 열특성계수에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다. 특히 이 연구에서 수행된 외기대류계수에 대해서 보다 다양한 양생 재료 형상(두께·재료 변화 등)에 대한 추가적인 연구가 필요하고, 열전도율에 대한 추가적인 고려가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 한전전력연구원의 “원전콘크리트 구조물의 수화열 및 건조수축저감”과제의 지원으로 수행되었으며, 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, pp.32~59.
3. Chapman, *Fundamental of Heat Transfer*, Macmillian Inc., New York, 1982, pp.6~79.
4. Fernando, A. B., Mendes, P. A., and Mirambell, E., “Heat of Hydration Effects in Concrete Structures”, *ACI Materials Journal*, Vol.89, No.3, 1992, pp.139~148.
5. Mendes, P. A., *Temperature Gradients for Concrete Bridges*, MSc thesis, Technical University of Lisbon, 1989, pp.78~114.

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, pp.36~70.
7. 山川, 笠原, 小林, “マスコンクリートの熱傳導率試験方法の検討”, 弟37回土木學會年次學術講演會概要集, 弟5部, Vol.37, No.5, 1982, pp.27~64.
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, pp.254~261.
9. 김국한, 전상운, 망기성, 김진근, “콘크리트의 열전도율에 관한 실험적 연구”, 콘크리트학회논문집, Vol.13, No.4, 2001, pp.305~313.
10. 이택식, 이재현, 이준식, 열전달, 회중당, 1992, pp.14~61..
11. Eckert, E. R. G., and R. M. Drake, *Analysis of Heat and Mass Transfer*, McGraw-Hill, New York, 1972, pp.10~39.
12. Kang, Y. M. and Park, G. C., “An experimental Study on Evaporative Heat Transfer Coefficient and Applications for Passive Cooling of AP600 Steel Containment”, *Nuclear Engineering and Design*, 204, 2001, pp.347~359.
13. Billard, Y., Shekarchi, M., Debicki, G., Granger, L., and Chauvel, D., “Heat and Mass Transfer in a Concrete Wall with Composite Linear under Accidental Conditions”, *Nuclear Engineering and Design*, 228, 2004, pp.261~272.
14. Kapila, D., Falkowsky, J., and Plawsky, J., “Theraml Effects During the Curing of Concrete Pavement”, *ACI Material Journal*, Vol.94, No.2, 1997, pp.119~128.
15. Hsieh, C. and Qin, C., “Characterization of Thermal Properties of Concrete and Temperature Prediction Model”, *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol.9, No.2, 1997, pp.121~132.
16. Thomas, L. C., *Heat Transfer*, Prentice-Hall International, New Jersey, 1992, pp.463~502.
17. Kapila, D., Falkowsky, J., and Plawsky, J., “Theraml Effects During the Curing of Concrete Pavement”, *ACI Material Journal*, Vol.94, No.2, 1997, pp.119~128.
18. Machida, N. and Uehara, K., “Nonlinear Thermal Stress Analysis of A Massive Concrete Structure”, *Computer & Structures*, Vol.26, No.26, 1987, pp.287~296.
19. Kim, J. K. and Yang, E. I., “Factors for Hydration Heat and Thermal Stress in Mass Concrete”, *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol.9, No.3, 1997, pp.15~23.

요 약

이 연구에서는 외기와의 열전달을 나타내는 외기대류계수에 관한 실험을 실시하였다. 외기대류계수에 관한 기존의 모델에서 나타났던 문제점을 해결하기 위해 실험 변수로 풍속외에 양생 조건의 종류(양생포, 양생포 + 비닐), 외기온도, 비등효과를 선정하였다. 실험 결과를 이용하여 외기대류계수를 산정하고자 열평형 방정식을 이용한 수치해법을 사용하였으며, 이론적인 고찰을 통해 각 양생 조건별로 풍속에 따른 외기대류계수의 변화를 예측할 수 있는 모델식을 제안하였다. 열평형 방정식을 이용한 수치해법에서 초기에 외기대류계수가 과잉평가되는 문제점을 해결하기 위해 비등효과에 의한 증발량을 고려하여 수정 열평형 방정식을 제안하였다. 양생 조건을 고려한 제안된 모델식에 의하면, 모든 경우에 풍속에 따라 외기대류계수가 증가하는 경향을 보였으나 양생 재료의 사용여부나 양생 조건에 따라 다른 양상을 보이는 것을 알 수 있었다. 이러한 양상의 차이는 양생 재료의 열특성에 의해 결정되는 것으로 외기대류계수는 양생 재료가 없는 경우, 양생포를 사용한 경우, 양생포 + 비닐을 사용한 경우의 순으로 풍속의 영향을 받는 것으로 나타났다. 제안된 모델식을 이용하면 수화열에 의한 콘크리트 구조물의 온도해석시 보다 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료되며, 향후 이러한 열특성계수에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 열특성계수, 외기대류계수, 풍속, 외기온도, 비등효과