



외기대류계수에 관한 실험적 연구

전상은¹⁾ · 김진근^{1)*}

¹⁾한국과학기술원

(2002년 12월 5일 원고접수, 2003년 2월 7일 심사완료)

Experimental Study on Coefficient of Air Convection

Sang-Eun Jeon¹⁾ and Jin-Keun Kim¹⁾

¹⁾ Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, 305-701, Korea

(Received December 5, 2002, Accepted February 7, 2003)

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, 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. Finally, the prediction model for equivalent coefficient of air convection including effects of velocity of wind and types of form was theoretically proposed.

The coefficient of air convection in the proposed model 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.

Keywords : thermal property, coefficient of air convection, velocity of wind, type of form

1. 서 론

1930년대 대형 댐의 건설로 처음으로 소개되었던 콘크리트의 수화열에 의한 온도균열 문제는 그동안의 수많은 연구를 통해 많은 부분 해결되었다. 그러나 해석적인 방법에서 중요한 입력변수에 대한 연구는 아직 미진한 상태이다. 특히 콘크리트 표면에서 대기로의 열전달을 나타내는 외기대류에 대한 연구는 국내외에 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 실험결

과나 모델식이 제안되어 있다. 외기대류계수는 대기, 콘크리트 표면의 거칠기, 유동 성질 등 여러 영향인자가 작용하기 때문에 이를 결정하기는 쉽지 않다. Rastrup 등³⁾은 전형적인 외기대류계수의 범위를 $4.3 \sim 30 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ 라고 보고하고 있다. Mendes⁴⁾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, 특히 거푸집의 영향을 고려하지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트의 외기대류계수를 실험적으로 산정할 수 있는 실험방법을 고안하고, 이를 통해

* Corresponding author

Tel : 042-869-3614 Fax : 042-869-3610

E-mail : kimjinkeun@kaist.ac.kr

풍속뿐만 아니라 거푸집의 종류에 따른 외기대류계수의 변화를 예측할 수 있는 모델식을 제안하고자 한다.

2. 실험 개요

2.1 실험 재료 및 배합설계

Table 1은 실험에 사용된 재료의 물리적 성질을 나타내고 있으며, Table 2는 사용된 콘크리트의 배합설계표이다. 외기대류계수는 콘크리트의 배합과 상관없이 일정하므로 여기서는 두 가지 배합에 대해서 실험을 수행하였다.

2.2 실험변수

외기대류계수는 풍속뿐만 아니라 거푸집의 종류에 따라 서로 영향을 받으므로, 본 연구에서는 풍속 외에 거푸집의 종류를 고려하기 위해 Table 3과 같이 거푸집의 재료와 두께에 대한 외기대류계수의 변화를 구하고자 하였다. 풍속은 송풍장치의 특성상 일정한 간격으로 정하지 못하고, 송풍기의 상황에 따라 결정되었다.

2.3 실험방법

실험은 동일 풍속에 대해 4개의 실험체(거푸집이 없는

경우, 철재거푸집, 목재 20mm 거푸집, 목재 10mm 거푸집)에 대해 수행하였고, 바람은 설치된 풍동내의 송풍기를 이용하여 한 방향으로만 불어주었다. 풍속은 실험체의 개방면 바로 위의 풍속을 측정된 값이다(Fig. 1).

실험체는 Fig. 2와 같이 200×200×500 mm의 직육면체이고, 대류에 의한 영향을 보다 확실하게 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.

3. 실험 결과

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.

Table 1 Physical properties of materials

	Cement (Type V)	Fine aggregate	Coarse aggregate
Specific surface area	3210	-	-
Specific gravity	3.15	2.55	2.58
Fineness modulus	-	2.95	7.23
Compressive strength of 28day (kgf/cm ²)	367	-	-

Table 2 Mix proportion of concrete

W/C (%)	S/A (%)	Unit weight (kgf/m ³)				Admixture	
		W	C	S	G	AE	WR
40	39	181	450	630	989	0.023	2.23
50	42	181	362	707	989	0.018	1.81

Table 3 Test parameters

Wind velocity (m/s)	Type of form	Thickness of form (mm)
0~5	-	-
	Steel	20
	Wood	10
		20

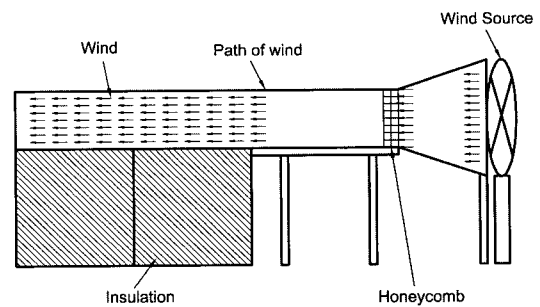


Fig. 1 Overall apparatus

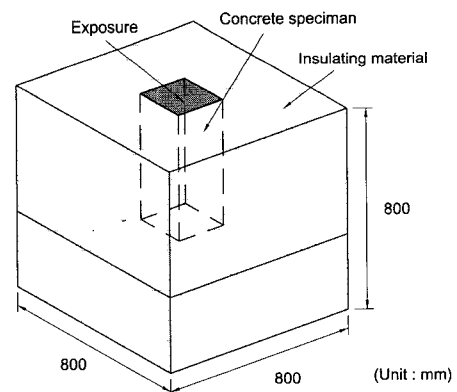
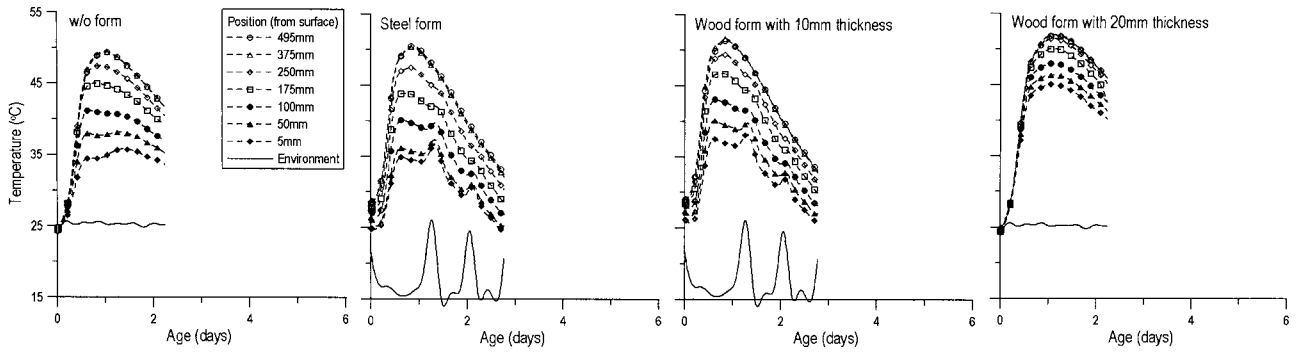
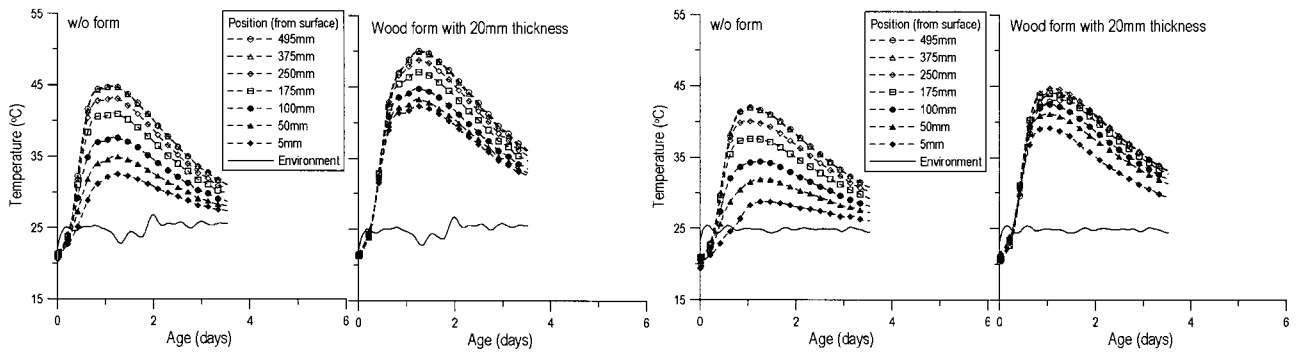


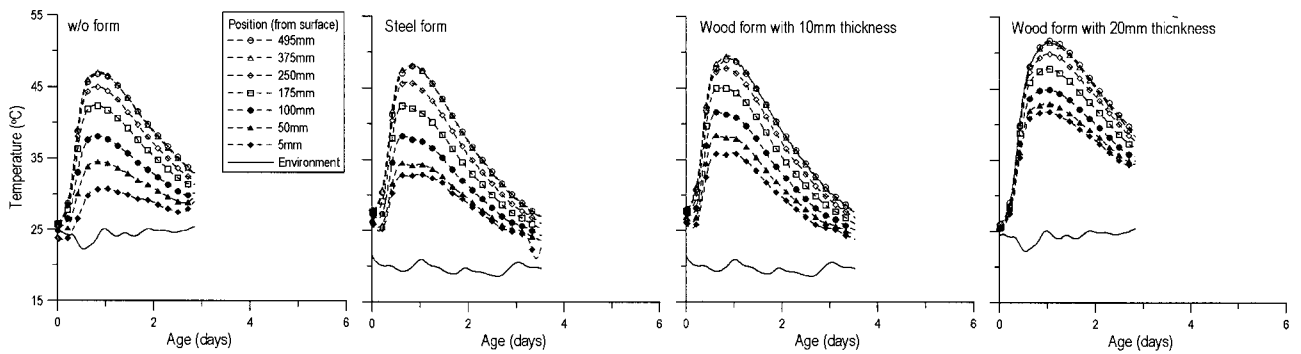
Fig. 2 Shape of concrete specimen and insulating form



(a) 0 m/s



(b) 1 m/s

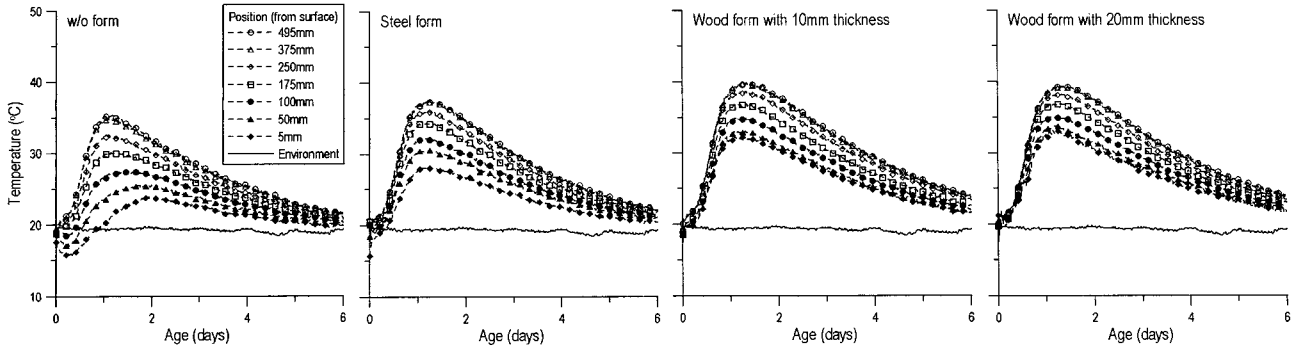


(c) 3 m/s

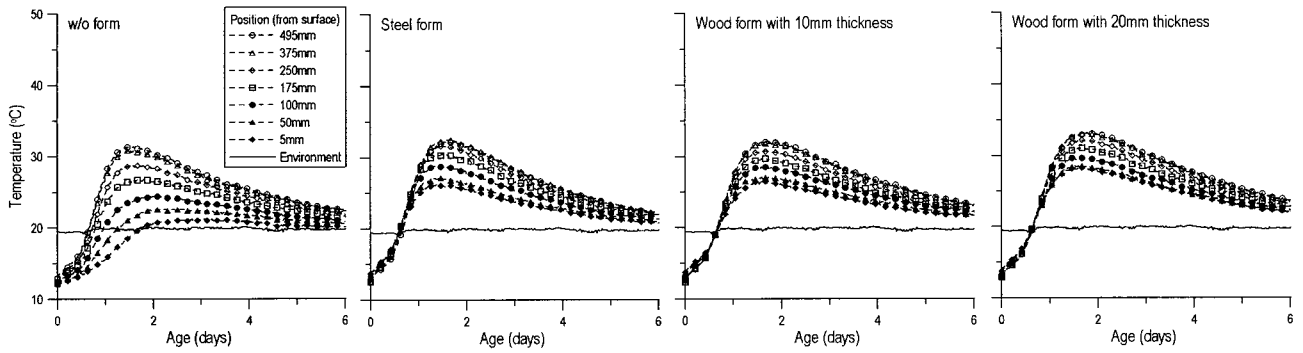


(d) 5 m/s

Fig. 3 Experimental results (W/C=40%)



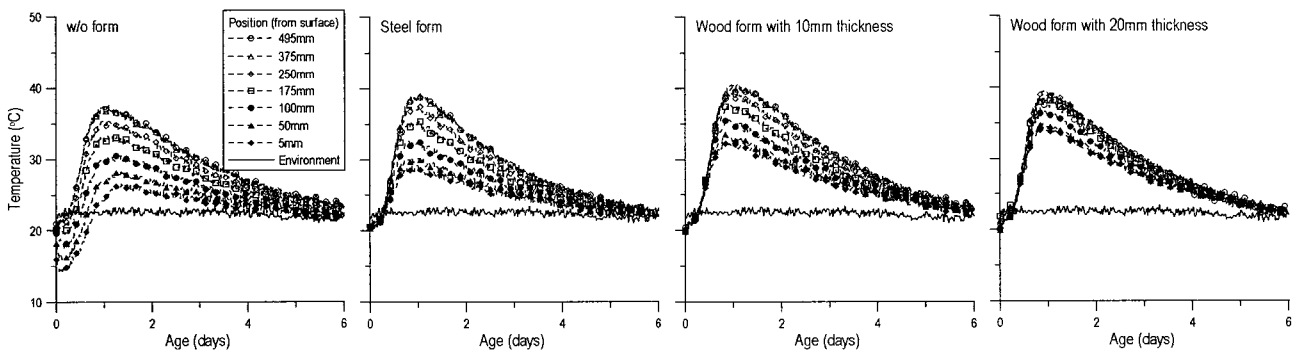
(a) 0 m/s



(b) 1.2 m/s



(c) 1.9 m/s



(d) 3.5 m/s

Fig. 4 Experimental results (W/C=50 %)

풍속이 빨라짐에 따라 최대 온도 시점의 온도차이가 증가하고 있다. 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 결론지을 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 철재 거푸집 경우와 목재 거푸집에 따른 온도분포를 보면, 거푸집의 재원에 따라서도 온도분포의 변화가 일어남을 알 수 있다. 목재에 비해 상대적으로 열전도율이 큰 철재 거푸집을 사용하면, 심부와 표면부에 관계없이 외기로의 열소산이 더 잘 이루어진다. 따라서, 철재 거푸집을 사용한 경우가 목재 거푸집을 사용한 경우에 비해 온도차이가 커지고, 더 작은 단열 효과를 나타내게 된다.

3.3 증발열에 의한 영향

각 풍속별 실험결과를 보면, 주로 거푸집을 사용하지 않은 경우 전체적으로 온도 하강부분이 나타나고 있다. 이러한 현상은 주로 콘크리트 표면의 수분 증발에 의한 증발열로 인해 나타나는 것으로서 Fig. 4에서 보는 바와 같이 풍속이 증가할수록 온도하강이 뚜렷이 나타나는 것을 알 수 있다.

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.

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

4.2 외기대류계수 모델식

식 (1)의 일차원 모델식을 가지고 외기대류계수의 실험 결과를 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.

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

여기서 M 은 숙성도, T_0 는 기준온도로 -10°C , Δt 는 시간 간격이다.

동일한 숙성도를 갖는 시점에서 실험체의 온도분포를 이용하여 회귀분석을 실시하고, 회귀분석식을 이용하여 표면부에서의 온도기울기와 표면부의 온도를 결정하였다. 회귀분석은 풍속 0m/s 경우인 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.

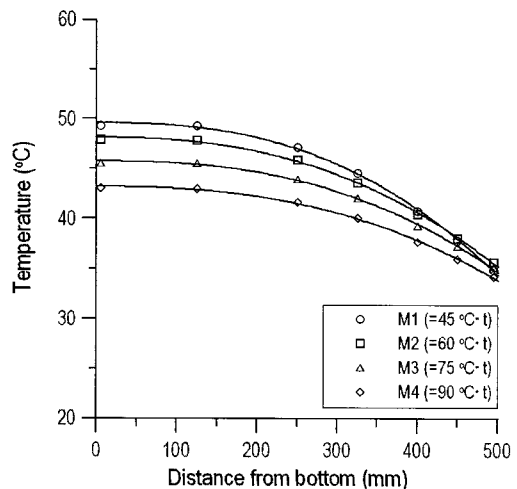


Fig. 5 Temperature distribution curve with maturity

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

식 (3)을 통하여 속성도에 따른 열전도율의 변화를 구할 수 있다. Table 4는 풍속과 거푸집 종류에 따른 열전도율의 변화와 대류계수를 나타내고 있다. 이 때의 열전도율은 열전도율 실험을 통하여 얻은 범위내의 값인 1.5, 1.7, 1.9, 2.1로 가정하였다. 또한 실험결과 중 20mm 목재 거푸집을 사용한 경우, 심부쪽으로 열이 빠져나가는 결과

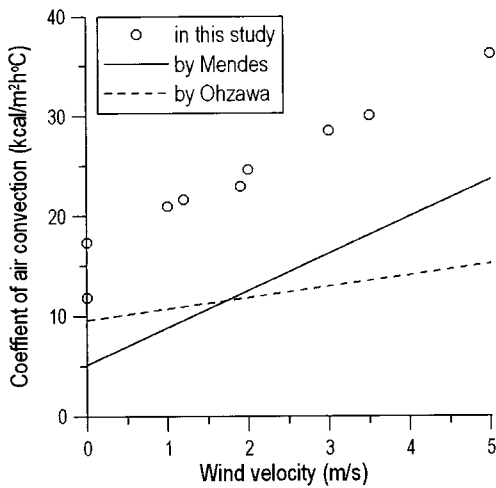


Fig. 6 Comparison with previous models

를 보이는 2m/s와 1.9m/s에 대해서는 결과분석에서 제외하였다. Table 4의 분석 결과를 보면, 속성도 각 단계별 열전도율의 변화가 나타나고 열전도율의 변화에 따라서 대류계수도 변함을 알 수 있다. 이러한 결과는 식 (4)에서 보는 바와 같이 콘크리트 내부의 열유속이 열전도율에 의해 결정되기 때문이다. 따라서 표면부의 열전도율을 결정하는 것이 본 해석방법에서는 매우 중요하다. 본 연구에서 사용된 배합에 대한 열전도율 측정결과에 의하면, 콘크리트의 열전도율은 1.9kcal/m·h·°C 정도의 값을 갖는 것으로 나타났다⁹⁾.

Fig. 6은 본 연구에서 얻어진 거푸집이 없는 경우의 외기대류계수와 기존에 제안된 외기대류계수를 비교하고 있다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 본 연구에서 얻어진 외기대류계수는 기존의 대류계수 예측 모델식을 크게 상회하며, 풍속에 대한 외기대류계수의 변화는 Mendes의 제안식과 좀 더 가까운 것으로 보인다. 이러한 대류계수의 차이는 실험 및 해석방법이 서로 다르고, 또한 거푸집의 준치여부에 대한 영향으로 판단된다.

5. 외기대류계수 모델식 제안

5.1 개요

Table 4의 결과는 거푸집 종류에 따른 외기대류계수의 변화를 보여주고 있다. 거푸집의 영향을 고려한 외기대류계수의 일반식을 제안하기 위해서는 사용된 거푸집의 열특성(본 논문에서는 열전도계수의 향으로 표현함) 및 두께를 고려한 일반적인 모델식이 필요하다. 이를 위해 본 논문에서는 Fig. 7과 같은 열전달 모식도의 개념을 사용하였다.

Table 4 Analytical results for W/C=40% and W/C=50%

Type of form	Conductivity	W/C=40%					W/C=50%			
		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
-	1.5	9.4	16.6	19.5	22.6	27.5	13.7	17.4	18.1	22.2
	1.7	10.7	18.8	22.1	25.6	31.8	15.6	18.1	20.5	26.1
	1.9	11.9	21.0	24.7	28.6	36.0	17.4	21.7	23.0	30.1
	2.1	13.2	23.2	27.3	31.6	40.2	19.2	23.1	25.4	34.1
Steel	1.5	7.3	-	-	9.0	12.3	8.0	9.9	12.7	14.0
	1.7	8.3	-	-	10.2	13.9	9.0	11.3	14.4	15.8
	1.9	9.2	-	-	11.4	15.5	10.1	12.6	16.1	17.7
	2.1	10.2	-	-	12.7	17.2	11.1	13.9	17.8	19.5
Wood with 10mm thickness	1.5	4.3	-	-	7.5	10.2	4.4	6.1	6.8	7.5
	1.7	4.9	-	-	8.5	11.5	5.0	6.9	7.7	8.5
	1.9	5.5	-	-	9.5	12.9	5.6	7.7	8.6	9.5
	2.1	6.0	-	-	10.5	14.2	6.2	8.5	9.5	10.5
Wood with 20mm thickness	1.5	4.2	3.6	-	4.2	3.9	3.5	4.5	-	5.5
	1.7	4.7	4.1	-	4.8	4.5	4.0	5.1	-	6.2
	1.9	5.3	4.5	-	5.4	5.0	4.6	5.7	-	7.0
	2.1	5.8	5.0	-	5.9	5.5	4.9	6.3	-	7.7

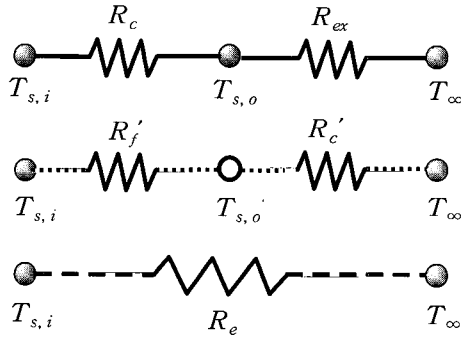


Fig. 7 Conceptual flow chart

Fig. 7에서 $T_{s,i}$ 는 거푸집의 내부면의 온도, $T_{s,o}$ 는 거푸집의 외부면의 온도, T_{∞} 는 외기의 온도를 나타낸다. Fig. 7에서 실선은 4장에서 수행된 결과 분석에 해당되는 경우로 해당 거푸집과 동일한 두께의 콘크리트를 가정한 조건에서의 총 열저항을 나타내고 있다. 이를 식으로 나타내면 식 (5)와 같다.

$$R_T = R_c + R_{ex} = \frac{L_c}{k_c A_c} + \frac{1}{\bar{h}_{ex} A_c} \quad (5)$$

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 콘크리트 단면적, \bar{h}_{ex} 는 결과분석에 의한 Table 4의 외기대류계수이다.

그러나, 이러한 경우는 거푸집에 의한 열전달을 콘크리트로 대체한 경우로 실제와는 다른 값을 갖게 되며, 거푸집의 열특성 및 두께 등을 고려할 수 없다. 따라서 거푸집을 고려하기 위해서는 Fig. 7의 점선과 같은 열전달이 발생한다고 가정할 수 있다. 이와 같은 열전달에서의 총 열저항은 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$R_T = R'_f + R'_c = \frac{L_f}{k'_f A_f} + \frac{1}{\bar{h}_c A_c} \quad (6)$$

여기서, R'_f 는 콘크리트의 대류 조건에 상응하는 거푸집의 열저항, R'_c 는 콘크리트의 대류 조건에 의한 열저항, L_f 는 거푸집의 두께, k'_f 는 콘크리트의 대류 조건에 상응하는 거푸집의 열전도율, A_f 는 거푸집의 단면적, \bar{h}_c 는 콘크리트의 외기대류계수이다.

거푸집에 의한 전도와 표면부의 대류를 통합된 하나의 등가대류 조건으로 가정한다면 Fig. 7의 굵은 점선과 같이 가정할 수 있으며, 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_T = R_e = \frac{1}{\bar{h}_e A_{cf}} \quad (7)$$

여기서, R_e 는 등가대류에 의한 열저항, \bar{h}_e 는 등가외기대류계수, A_{cf} 는 대류 단면적이다.

위의 식 (6)과 (7)의 총 열저항은 동일하므로 식 (8)과 같은 관계식으로 나타낼 수 있으며, 이를 이용하여 등가의 기대류계수를 식 (9)와 같이 유도할 수 있다.

$$R_e = R'_f + R'_c \quad (8)$$

$$\bar{h}_e = \frac{1}{A_{cf} \left(\frac{L_f}{k'_f A_f} + \frac{1}{\bar{h}_c A_c} \right)} \quad (9)$$

여기서, $k'_f = ak_f$ 이고, k_f 는 거푸집의 열전도율이다.

5.2 콘크리트의 외기대류계수

식 (9)를 적용하기 위해서는 우선 거푸집이 없는 경우, 즉 콘크리트의 외기대류계수를 구해야 한다. 콘크리트의 외기대류계수는 이상 대류 조건(완전발달된 난류영역 범위)에서의 식 (10)으로부터 얻을 수 있다¹⁰⁾.

$$Nu_L = \frac{hL}{k} = 0.0296 Re^{4/5} Pr^{1/3} \quad (10)$$

여기서, Nu_L 는 Nusselt수, h 는 평균외기대류계수, L 은 대류 길이, k 는 공기의 열전도율, Re 는 Reynolds수, Pr 은 Prandtl수이다. 식 (10)의 이상 대류 조건은 평형유동내의 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. Table 4의 거푸집이 없는 경우의 분석 결과는 여기서 구하고자 하는 일반식에 합당하므로 Table 4의 결과 중 열전도율이 1.9 kcal/m·h·°C인 경우에 대한 결과를 이용하여 식 (10)과 비교하면 Fig. 8과 같이 나타낼 수 있다.

Fig. 8에서 보는 바와 같이 Table 4의 분석 결과는 이상 대류 조건에서의 외기대류계수 변화와 비교하여 볼 때 풍속에 의한 영향을 제대로 고려하고 있음을 알 수 있다. 단, 풍속이 0m/s일 때의 값 차이가 남을 알 수 있는데, 이는 자유대류에 의한 외기대류계수로 볼 수 있다. 자유대류에 관한 경험식은 일정한 표면온도나 일정한 열유속과 같은 국한된 조건에 대해서만 제시되어 있으나, 실제의 경우 표면 조건이나 유동체의 체적, 열유속의 변화에 따라 달라질 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 실험값으로부터 얻은 자유대류 조건에서의 외기대류계수 값을 사용하기로 한다.

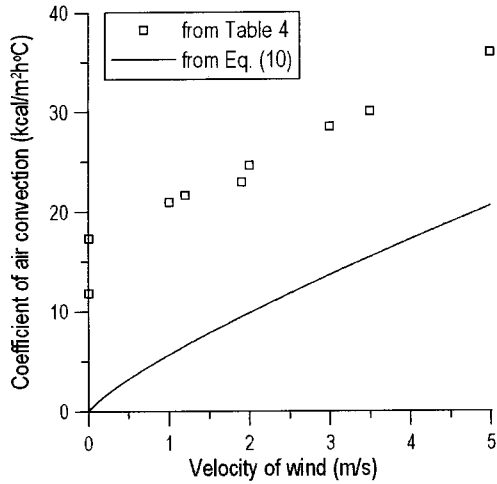


Fig. 8 Comparison between analytical and theoretical results

식 (10)에 $Pr = 0.707$, $Re = vL/\nu$, $\nu = 15.89 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $k = 2.26 \times 10^{-2} \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$ 를 대입하여 콘크리트의 외기대류계수(\bar{h}_c)를 구성하면, 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{h}_c = 14.55 + 4.114v^{4/5}L^{-1/5} \quad (11)$$

여기서, v 는 풍속(m/s), L 은 대류길이(m)이다.

5.3 거푸집을 고려한 외기대류계수 모델식

식 (9)의 등가외기대류계수를 구하기 위해서는 콘크리트의 대류 조건에 상응하는 거푸집의 열전도율(k_f')을 구해야 한다. 이를 위해 식 (5)와 (6)을 이용한 식 (12)로부터 열전도율 보정계수인 α 를 구할 수 있다.

$$ak_f = k_f' = \frac{L_f}{A_f} \left(\frac{1}{\frac{L_c}{k_c A_c} + \frac{1}{A_c} \left(\frac{1}{\bar{h}_{ex}} - \frac{1}{\bar{h}_c} \right)} \right) \quad (12)$$

거푸집의 재질에 따른 α 값을 구하기 위해 Fig. 9와 같이 모든 경우에 대한 평균값을 이용하여 철재 거푸집인 경우 $\alpha = 0.008$, 목재 거푸집인 경우 $\alpha = 0.92$ 를 얻을 수 있다.

식 (9)에서 $A_c = A_f = A_{cf}$ 와 α , \bar{h}_c 를 이용하여 식을 재정리하면 다음 식 (13)과 같은 외기대류계수에 관한 일반식을 얻을 수 있다.

$$\bar{h}_e = \frac{1}{\left(\frac{L_f}{ak_f} + \frac{1}{14.55 + 4.114v^{4/5}L^{-1/5}} \right)} \quad (13)$$

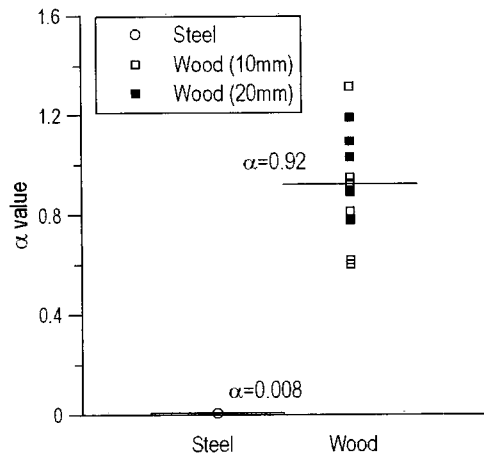


Fig. 9 α values with types of form

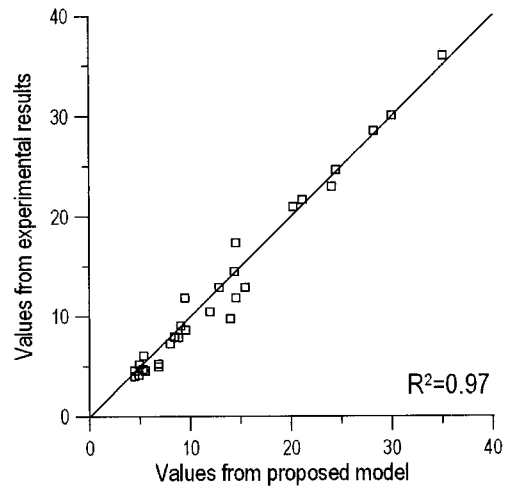


Fig. 10 Relationship between measured and predicted values for coefficient of air convection

위의 식 (13)의 정확도를 분석하기 위해 본 실험에서 수행된 실험결과를 이용하여 비교하였다. 식 (13)과 같이 등가외기대류계수의 개념을 이용한다면 식 (4)의 평형 조건은 실험체의 표면이 아닌 콘크리트의 표면(철재 거푸집 및 목재 20mm 거푸집인 경우 실험체 표면에서 20mm의 위치, 목재 10mm 거푸집인 경우 실험체 표면에서 10mm 위치)의 온도를 이용해야 한다. 이를 통해 계산된 외기대류계수와 식 (13)의 제안된 모델식에 의한 외기대류계수를 비교하면 Fig. 10과 같은 상관관계를 보임을 알 수 있다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 제안된 모델식은 풍속뿐만 아니라 거푸집의 준치 여부에 따른 외기대류계수의 변화를 정확히 예측할 수 있다.

6. 결 론

외기대류계수에 관한 실험을 수행하고, 이를 토대로 이

론적인 모델식을 제시한 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 콘크리트 표면과 외기와의 열전달을 나타내는 외기대류계수는 풍속외에도 거푸집의 종류 및 두께에 따라 영향을 받는다.
- 2) 외기대류계수에 관한 실험을 수행하고, 실험 조건에 대한 외기대류계수를 계산하였다. 분석 결과에 의하면 외기대류계수는 거푸집 종류 및 두께에 따라 풍속의 영향도가 다르게 나타났으며, 이는 기존의 모델식에서 예측한 것보다 큰 것으로 나타났다.
- 3) 외기대류계수에 관한 이론적인 배경을 통하여 앞에서 언급한 영향인자를 모두 고려할 수 있는 외기대류계수 모델식을 제안하였으며, 제안된 모델식에 의한 외기대류계수는 실험에 의한 외기대류계수를 정확히 예측하고 있음을 확인하였다.
- 4) 수화열에 의한 온도해석을 보다 정확히 수행하기 위해서는 본 연구와 같은 열특성계수에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다. 특히 본 연구에서 수행된 외기대류계수에 대해서 실제 현장에서 사용되고 있는 거푸집 형태(유로폼, 양생포 등)와 보다 다양한 거푸집 형상(두께 변화 등)에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술평가원(KISTEP)의 국가지정 연구실 사업(National Lab)의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

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), "마스콘크리트의 초기ひび割れとその防止對策に關する研究", 1964.
7. 山川, 笠原, 小林, "마스콘크리트의 열傳導率試驗方法の檢討", 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, "마스콘크리트의 초기ひび割れとその防止對策に關する研究(I)", 發電水力, No. 57, 1962.
9. 김국한, 전상은, 방기성, 김진근, "콘크리트의 열전도율에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회논문집, Vol. 13, No. 4, 2001, pp305~313.
10. 이택식, 이재현, 이준식, "열전달", 희중당, 1992.

요 약

본 연구에서는 외기와의 열전달을 나타내는 외기대류계수에 관한 실험을 실시하였다. 외기대류계수에 관한 기존의 모델에서 나타났던 문제점을 해결하기 위해 실험변수로 풍속외에 거푸집의 종류(목재, 철재)를 선정하였다. 실험결과를 이용하여 외기대류계수를 산정하고자 열평형 방정식을 이용한 수치해법을 사용하였으며, 이론적인 고찰을 통해 각 거푸집별로 풍속에 따른 외기대류계수의 변화를 예측할 수 있는 모델식을 제안하였다. 제안된 모델식에 의하면, 모든 경우에 풍속에 따라 외기대류계수가 증가하는 경향을 보였으나 거푸집의 사용여부나 거푸집 재료에 따라 다른 양상을 보이는 것을 알 수 있었다. 이러한 양상의 차이는 거푸집 재료의 열특성에 의해 결정되는 것으로 외기대류계수는 거푸집이 없는 경우, 철재 거푸집을 사용한 경우, 목재 거푸집을 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, 거푸집 종류