

경계층과 비등효과를 고려한 외기대류계수에 관한 실험연구

Experimental Study on Coefficient of air Convection with boundary layer and boiling effects

최명성* 김윤용** 송영철*** 이상균**** 김진근***** 이윤*****

Choi, Myoung sung Kim, Yun Yong Song, Young Chul Woo, Sang Kyun Kim, Jin Keun Lee, Yun

ABSTRACT

The setting and hardening of concrete is accompanied with nonlinear temperature distribution caused by development of hydration heat of cement. 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, boiling and layer effects. Finally, the prediction model for equivalent coefficient of air convection 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. For determining the initial coefficient of air convection, boiling effects must be considered. The coefficient of air convection is affected by boundary layer with respect to the distance from the surface.

1. 서론

1930년대 대형 댐의 건설로 처음 소개되었던 콘크리트의 수화열에 의한 온도균열 문제는 그동안 수많은 연구를 통해 많은 부분이 진전되어 왔다. 하지만 콘크리트 표면에서 대기로의 열전달을 나타내는 외기대류에 대한 연구는 국내에 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 대기, 콘크리트 표면의 거칠기, 유동 성질 등 여러 영향인자가 작용하기 때문에 이를 결정하기는 쉽지 않다. Rastrup 등은 전형적인 외기대류계수의 범위를 $4.3 \sim 30 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ 라고

* 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 석사과정

** 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 연구교수

*** 정회원, 한국전력공사전력원구원 선임연구원

**** 정회원, 한국전력공사전력원구원 책임연구원

***** 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수

***** 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정

보고하고 있다. Mandes는 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 등의 실험에서는 풍속이 2~3 m/sec인 경우 외기대류계수를 12~13 kcal/m²·h·℃로, Yamagawa의 실험에서는 8~11 kcal/m²·h·℃로 제안하였다. Ohzawa는 이들의 결과를 분석하여 풍속에 따른 외기대류계수 산정식을 제안하였다. 그러나 각 연구자들이 제안한 외기대류계수는 실험조건에 따라 값의 차이가 심하며 초기 불확실성과 위치별 외기대류계수의 차이를 고려하지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 고안된 콘크리트의 외기대류계수 실험방법을 통해 풍속을 고려하여 초기 과다하게 평가되는 외기대류계수의 보정에 관한 이론적 배경을 제시하고 위치에 따른 외기대류계수의 변화를 경계층의 효과를 이용해서 해석하고자 한다.

2. 실험 개요

2.1 실험 재료 및 배합설계

Table 1은 사용된 콘크리트의 배합설계표로 현재의 원전 격납구조물 배합이다.

Table 1 콘크리트 배합(1종 시멘트)

| 배합강도 (kgf/cm ²) | 물/결합재 비(%) | 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

풍속에 따라 초기 과다하게 평가되는 외기대류계수의 보정을 위해 비등효과 실험을 수행하고, 외기대류계수의 위치별 변화를 고려하기 위한 경계층 효과 실험을 실시하였다

Table 2 실험 변수

| 비등효과 (g) | 경계층효과 (cm) |
|-------------|------------------|
| 증발량 | 2, 5, 10, 20, 40 |

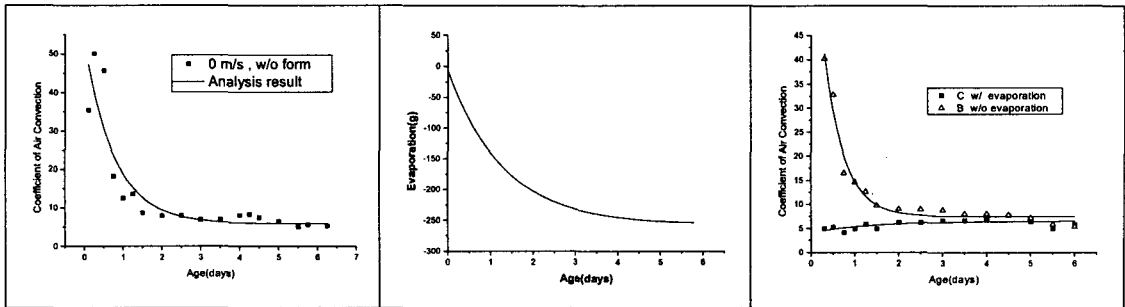
2.3 실험방법

실험체는 200×200×500 mm의 직육면체와 500×500×500 mm 정육면체이고, 대류에 의한 영향을 보다 확실하게 하기 위해 두께 300 mm의 단열재(스티로폼)를 사용하여 콘크리트의 열전달을 개방면 방향

으로 유도하였다. 층류를 만들기 위해 송풍장치 내 honeycomb를 설치하고, 송풍장치 앞·뒤로 철망을 설치하였다. 비등효과 실험을 위해서 실험체의 무게 변화를 측정하였고, 경계층효과 실험을 위해서 실험체의 위치별 K-type의 열전대를 깊이방향으로 5개소 설치하여 측정하였다. 바람은 설치된 풍동내의 송풍기를 이용하여 한 방향으로만 불어주었다. 풍속은 실험체의 개방면 바로 위의 풍속을 측정한 값이다

3. 실험 결과

3.1 비등효과 실험



(a)비등효과를 고려하지 않은 외기대류계수

(b)시간에 따른 증발량

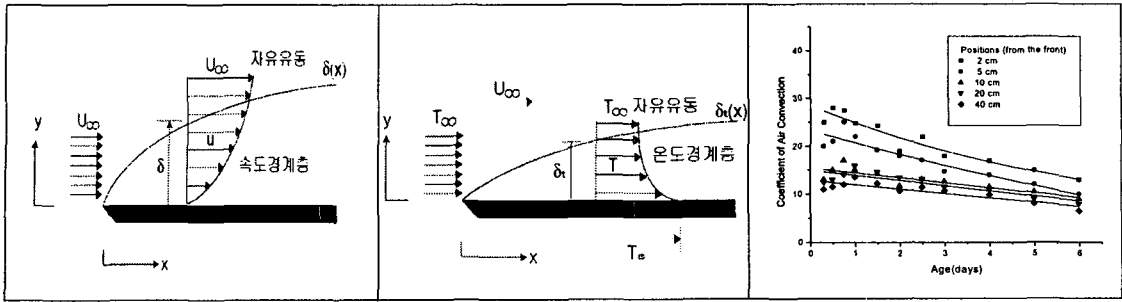
(c)비등효과에 대한 비교

Fig. 1 비등효과 실험(풍속 : 0 m/s)

실험결과를 분석해 보면 기존의 열평형 방정식을 이용한 외기대류계수는 Fig.1(a)처럼 초기 값에서 과잉 평가되는 한계를 가지고 있다. 이는 초기 콘크리트 표면의 수분 증발에 의한 비등의 효과를 고려하지 않았기 때문이다. 고체와 액체계면에서 증발이 일어나는 현상을 비등이라고 하는데 본 실험에서는 콘크리트와 물 사이의 비등효과로 인한 증발현상 때문에 초기 외기대류계수값이 큰 결과가 나온 것이다. 그래서 Fig.1(b)처럼 시간에 따른 증발량 실험을 통해 초기에 높은 증발량을 Fig.1(a)의 결과와 보증해주면 일정한 외기대류계수를 얻을 수 있다.

3.2 경계층 효과 실험

비등효과 실험에서는 개방 면에 대해 외기대류계수가 일정하다는 가정 하에서 실험체 중간위치의 값을 결정하였다. 하지만 외기대류계수는 측정되는 위치에 따라서 Fig.2처럼 변하게 된다. 콘크리트의 경우 쉽게 층류에서 난류로 변화되고, 표면에서 위치별로 경계층의 발달로 대류전달의 저항체로 작용하게 된다. 풍속에 존재하는 경우 속도 경계층이 표면부에서 작용되고, 발생된 속도 경계층은 온도 경계층발생에 영향을 미쳐 대류열전달에 영향을 미치게 된다. 따라서 경계층의 크기가 위치에 따라 변하고, 그에 따라 대류전달의 저항크기가 변하게 되어 위치에 따른 외기대류계수가 변하게 된다. 일반적으로 선단에서 뒷부분으로 갈수록 경계층이 커지기 때문에 뒷부분으로 갈수록 선단에 비해 작은 외기대류계수의 값을 얻게 된다.



(a)속도경계층의 전개

(b)온도경계층의 전개

(c)경계층효과를 고려한 위치별 외기대류계수

Fig.2 경계층 효과 실험

4. 결론

현재의 원전 격납구조물 배합에 대한 비등효과와 경계층 효과를 고려한 외기대류계수 실험을 수행한 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 콘크리트의 외기대류계수를 구하기 위해 기존의 열평형 방정식을 수정한 비등효과를 고려한 수정 열평형 방정식을 이용함으로써 초기 과잉 평가되는 문제점을 해결할 수 있다.
- 2) 원전구조물의 보다 정확한 수화열 해석을 위해서는 위치에 따라 정확한 외기대류계수의 예측이 필요하며, 이를 위해 경계층을 이용한 위치별 외기대류계수의 해석을 통해 보다 정확한 해석이 가능하다.
- 3) 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.

참고문헌

1. 이택식, 이재현, 이준식, "열전달", 희중당, 1992.
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.