열손실량 보정을 통한 콘크리트 단열온도상승량 예측 장치

진은웅¹⁾ · 김진용²⁾ · 김진근^{1)*}

¹⁾한국과학기술원 건설및환경공학과 ²⁾삼성엔지니어링 토목건축팀

Equipment for Measuring the Adiabatic Temperature Rise of Concrete by Compensating Heat Loss

Eun-Woong Jin,¹⁾ Chin-Yong Kim,²⁾ and Jin-Keun Kim^{1)*}

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

²⁾Civil & Structural Engineering Team, SAMSUNG Engineering, Seoul 134-090, Korea

ABSTRACT Adiabatic temperature rise test for predicting heat of hydration in mass concrete is especially inconvenient in the field. In order to overcome the problem, the equipment to effectively and conveniently measure semi-adiabatic temperature change was developed. The main objective of this paper is to propose a new and simple equipment for measuring semi-adiabatic temperature rise by using insulation bottles. In order to predict exact heat loss of concrete using this device, it is required to assume the specific heat loss coefficient of the device by water temperature change inside the experimental device. According to experimental and analytical results, the adiabatic temperature rise does not have significant differences in changes of temperature and humidity of air, as well as initial temperature of water. By comparing adiabatic temperature rise tests, the equipment for measuring semi-adiabatic temperature change can be used to predict the hydration heat of concrete within sufficient accuracy.

Keywords : equipment for measuring semi-adiabatic temperature rise, heat of hydration, heat loss, adiabatic temperature rise, convection coefficient

1. 서 론

콘크리트는 수경성 재료로서 경화과정에서 화학반응에 의해 시멘트 1 g당 약 120 cal 정도의 열이 발생하며, 이를 수화열이라 부른다. 콘크리트 내부에서 수화열이 발생되면 타설되는 부재의 크기가 큰 경우에는 열이 외기로 빠르게 소산되는 부재의 표면과 아직 소산되지 않은 부재의 내부에 온도 차이가 생겨 내부구속에 의한 온도응력이 발생하며, 새로 타설되는 부재가 기존의 구조물과 맞닿아 있는 경우에는 외부구속에 의해 수화열 발생 초기에는 부재 전체에 압축응력이 발생되다가 부재의 온도가 감소하기 시작하는 시점부터 서서히 인장응력이 증가하는 경향을 보인다.

이러한 온도응력의 크기가 콘크리트의 인장강도보다 크면 콘크리트에 균열이 발생되며, 유발되는 온도응력의 크기는 콘크리트의 수화 발열 특성과 밀접한 관련이 있다.

콘크리트의 수화발열량을 측정하는 방법에는 용해열법

이나 전도형 미소열량계를 이용하여 시멘트의 수화열을 측정해 이것에 의해 콘크리트의 발열량을 환산하는 방법과 콘크리트를 단열 조건에 놓고 타설 온도로부터 상승되는 온도를 측정하는 시험인 단열온도상승시험을 이용하여 콘크리트의 발열 상태를 직접 측정하는 방법이 있다. 미소열량계는 시멘트의 수화발열 특성을 측정하기 위한 기기로서 시멘트와 물을 일정한 온도 조건에서 반응시켜 발생하는 열량을 측정하는데, 이 방법은 소량의 시료로서 각 배합에 대한 비교 실험이 가능하지만, 시료의 온도가 무시되므로 실제로 매스 콘크리트의 온도 상승량을 예측하기에는 적절하지 않다고 지적되고 있다.¹⁾ 따라서 콘크리트의 수화 발열 특성은 단열온도상승시험을 통해 측정하는 것이 가장 정확하나, 시험 비용이 매우 고가이고 시공간상의 제약으로 인해 한계가 있는 실정이다. 이에 대부분의 현장에서는 1입방미터 정도의 모형 부재를 타설하여 간이 단열온도상승시험을 실시하는 것이 일반적이다. 그러나 간이 시험은 완전한 단열 조건이 아니기 때문에 설사 부재 정중앙의 온도 이력을 측정한다 해도 외부로 손실되는 열만큼 콘크리트의 수화 발열량과 과소평가하게 되는 문제가 있다. 이에 간이 단열온도상승시험에 의해 획득한 온도 상승량에 열손실량을 보정함으로써

*Corresponding author E-mail: kimjinkeun@kaist.ac.kr

Received February 21, 2012, Revised August 4, 2012,

Accepted August 20, 2012

©2012 by Korea Concrete Institute

써 단열온도상승시험에서 획득할 수 있는 결과에 상응하는 정확도로 콘크리트의 수화 발열량을 예측할 수 있는 신속하고, 경제적이며 간편한 간이 수화열 측정 장치의 개발이 필요한 실정이다. 간이 수화열 측정 장치에 대한 기존의 연구는 거의 없는 실정이며 단순히 손실량을 보정하는 방법이거나^{2,5)} 기존의 단열온도상승시험 장치와 거의 유사한 수준이다.⁶⁾ 이 연구는 열손실량을 보정한 간이 수화열 측정 장치의 수화 발열량과 실제 단열온도상승시험과의 비교를 바탕으로 현장에서 손쉽게 측정 가능한 간이 수화열 측정 장치의 개발 가능성을 입증하고자 한다. 간이 수화열 측정 장치가 개발된다면, 콘크리트 수화열 측정 비용을 대폭 절감시킬 수 있고, 전문적인 지식이 없는 현장에서도 손쉽게 콘크리트의 수화열을 측정할 수 있으며, 수화열 측정 장치가 보편화되고 이를 통하여 콘크리트 품질 관리가 유리해질 것으로 기대된다.

이 논문에서는 간이 수화열 측정 장치를 완성하기에 앞서 시중에서 손쉽게 구할 수 있는 보온병을 이용하여 이 시험 장치 개발 가능성을 검증하고자 하였다.

2. 간이 수화열 측정 장치의 특징 및 열손실량 보정 절차

2.1 간이 수화열 측정 장치의 특징

최종적으로 만들고자 하는 시험 장치의 형상은 Fig. 1과 같다. 열손실량을 보정하는 과정은 비교적 간단하기 때문에 이를 이해하거나 적용하는데 큰 어려움이 있는 것은 아니지만, 실제 건설 현장에서 효율적으로 이용하기 위해서는 관련 시험체를 규격화하고 시험 결과의 분석 과정을 자동화할 필요가 있다.

측정 장치는 시험체를 단열 조건에 가능한 가까운 상태로 유지할 수 있도록 하며, 열손실량을 보정하기 위하여 외기 온도와 콘크리트의 내부 온도를 온도 센서를 이용하여 측정한다. 측정된 온도 값은 분석 장치를 이용하여 단열온도상승값을 계산하고 이를 디스플레이 패널에 표시한다. 이 장치를 편리하게 휴대하기 위해서 외부 전원과 별도의 충전식 배터리를 모두 사용할 수 있도록 구상하였다.

Fig. 1 Conceptual shape of measuring device

2.2 열손실량 보정을 통한 단열온도상승량 예측 과정

2.2.1 열손실량 보정을 통한 콘크리트 단열온도상승 예측식

간이 단열온도상승시험의 경우, 콘크리트의 수화열로 인해 발생하는 열량과 외부로 손실되는 열량의 차이만큼 콘크리트의 내부 온도가 변한다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\rho C \Delta T(t) V = \Delta Q(t) = Q_{hyd}(t) - Q_{out}(t) \quad (1)$$

여기서,

ρ : 콘크리트의 밀도

C : 콘크리트의 비열

t : 시간

$\Delta T(t)$: 콘크리트 내부의 평균적인 온도 변화

V : 콘크리트 부피

$\Delta Q(t)$: 콘크리트 내부의 열량 변화

$Q_{hyd}(t)$: 수화열로 인해 발생하는 열량

$Q_{out}(t)$: 외부로 손실되는 열량

콘크리트 내부의 평균적인 온도 변화는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$\Delta T(t) = [\int_V (T(x, y, z, t) - T_{ini}) dV] / V \quad (2)$$

여기서,

x, y, z : 콘크리트 내부 위치를 나타내는 좌표 변수

T_{ini} : 콘크리트 초기 온도 ($T_{ini} = T(x, y, z, 0)$)

외부로 손실되는 열량은 일반적으로 외기 온도와 콘크리트 표면 온도의 차이에 비례하는 것으로 알려져 있으며, 그 비례상수를 대류계수라 부르며, 열손실량은 식 (3)에 의하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_{out}(t) &= \int_0^t \int_S h_a (T_s(x, y, z, t) - T_{air}(x, y, z, t)) dA dt \quad (3) \\ &= \int_0^t \int_S -k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial n} dA dt \end{aligned}$$

여기서,

h_a : 대류계수

$T_{air}(x, y, z, t)$: 시간 t 일 때의 외기 온도

$T_s(x, y, z, t)$: 시간 t 일 때 콘크리트의 표면 온도

S : 열손실 면적

k : 열전도계수

$\partial T / \partial n$: 열손실면에 수직한 방향에 대한 표면의 온도 기울기

식 (3)을 식 (1)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 관계식 (4)를 얻을 수 있다.

$$\Delta T_{adi}(t) = \Delta T(t) + \frac{1}{\rho C V} \int_0^t \int_S h_a (T_s(t) - T_{air}(t)) dA dt \quad (4)$$

여기서, $\Delta T_{adi}(t)$ 는 시간 t 의 단열온도상승량이다. 만약 시

간 및 위치에 관계없이 h_a 가 일정하고, 특정 시간에 콘크리트의 열손실 면에서 측정된 $T_s(t) - T_{air}(t)$ 값이 위치에 관계없이 일정하다면 식 (4)를 다음 식 (5)와 같이 단순화할 수 있다.

$$\begin{aligned}\Delta T_{adi}(t) &= \Delta T(t) + \frac{h_a S}{\rho CV} \int_0^t (T_s(t) - T_{air}(t)) dt \\ &= \Delta T(t) + \alpha \int_0^t (T_s(t) - T_{air}(t)) dt\end{aligned}\quad (5)$$

여기서, α 는 열손실계수이다. 즉, 콘크리트 내부의 온도 분포, 열손실계수(대류계수), 외기 온도를 알면 식 (4), (5)를 사용하여 콘크리트의 단열온도상승량을 추정할 수 있다.

2.2.2 온도 분포 단순화를 위한 시험체 선정

식 (2)를 사용하여 콘크리트 내부의 평균적인 온도 변화를 계산하기 위해서는 임의의 시간 t 에 대한 콘크리트 시험체 내부의 온도 분포 $T(x, y, z, t)$ 가 필요한데 이는 시간 t 에 시험체 내부 특정 지점의 온도를 측정하고 그 결과를 외삽(extrapolate)하여 추정한다. 즉, 온도 분포 함수 $T(x, y, z, t)$ 를 단순화할수록 이를 외삽법으로 추정하기 위한 온도 측정 지점의 개수가 감소하여 시험 비용을 절감할 수 있다. 따라서 간이 수화열 측정 장치에서 시험체 형상과 단열 조건을 적절하게 조절함으로써 시험체 내부의 온도 분포를 1차원으로 단순화할 수 있다. 이때 온도 분포는 $T(x, t)$ 로 표현된다. 우선, 장치에서 온도 분포의 단순화를 위해 콘크리트 시험체의 형상은 원기둥으로 선정하였다. 이러한 형상의 시험체는 중심부 부근에서 1차원에 가까운 열손실 조건이 구현되기 때문이다. 즉, 중심부 부근의 온도 분포는 시험체 중심에서 수평으로 측정된 거리만의 함수로 표현된다. 그러나 원기둥의 위아래 면이 완전한 단열 조건이 아니라면 위아래 면 부근에서 3차원 형태로 열이 손실되는 한계가 있는데, 기둥의 높이 h 가 폭 d 보다 충분히 크거나 위아래 면의 단열 성능이 옆면보다 상대적으로 매우 우수한 경우에는 시험에 필요한 기간 동안 원기둥 중심부 부근의 온도 분포를 1차원 조건 즉, 축대칭 조건으로 유지시킬 수 있다. 그러나 h 가 너무 크면 불필요하게 시험체의 크기가 커져서 재료가 낭비되는 물론 시험체의 취급도 어려워지는 단점이 있으므로 간이 수화열 측정 장치는 실용성을 고려하여 h/d 비를 2~3 수준으로 유지하면서 위아래 면의 단열 성능을 조절하여 중앙부에서 1차원의 열손실 조건을 모사하고자 한다.

2.2.3 온도 분포 함수의 가정

콘크리트 시험체의 열손실 조건을 1차원으로 가정할 수 있다면 임의의 시간 t 에 대한 콘크리트 내부의 온도 분포를 하나의 변수로서, 콘크리트의 열손실 면에서 이에 수직한 방향으로 측정된 거리인 x 로 표현할 수 있다. 온도 분포를 모사하기 위해 사용되는 수식은 어떤 형태를 사용하여도 무방하나, 식 (6)과 같이 가장 단순한 형

태의 수식인 2차 다항식을 사용하였다.

$$T(x, t) = A_1 x^2 + A_2 x + A_3 \quad (6)$$

여기서, A_1, A_2, A_3 은 온도 분포를 모사하기 위한 상수이며, 경계 조건과 시험체에서 직접 측정된 온도값을 사용하여 결정하였다. 식 (6)의 경우에 3개의 미지수를 아래의 Fig. 2와 같이 2지점의 온도와 중심부 기울기 조건 등 총 3가지 조건을 이용하여 구했으며, 콘크리트 시편의 정중앙과 표면 온도, 그리고 외기 온도를 시간 t 의 각 위치에서 측정된 온도인 $T_c(t), T_s(t), T_{air}(t)$ 로 표현하였다. Fig. 2는 식 (6)을 사용하여 모사한 콘크리트 내부의 온도 분포를 나타낸 것이며, x 는 열손실 면에 수직한 방향으로 측정된 거리, d 는 시험체의 지름을 나타낸다. 따라서 $x=0$ 인 지점은 열손실 표면, $x=d/2$ 인 지점은 콘크리트 시편의 정중앙을 의미하며, 콘크리트 내부의 온도 분포는 $x=d/2$ 지점을 중심으로 축대칭 분포가 된다.

주어진 온도 측정값과 콘크리트 내부 온도 분포의 대칭 관계에 의해 $T(x, t)$ 가 다음 식 (7)과 같은 관계를 만족하여야 함을 알 수 있다.

$$\frac{\partial T(d/2, t)}{\partial x} = 0, T(0, t) = T_s(t), T(d/2, t) = T_c(t) \quad (7)$$

식 (6)을 식 (7)에 대입하여 정리하면 다음 식 (8)과 같이 A_1, A_2, A_3 을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}A_1 &= \frac{4}{d^2}(T_s(t) - T_c(t)), A_2 = \frac{4}{d}(T_c(t) - T_s(t)), \\ A_3 &= T_s(t)\end{aligned}\quad (8)$$

마지막으로 식 (6)의 온도 분포를 식 (2)와 (5)에 대입하여 단순화시키면 다음 식 (9), (10)과 같은 관계식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned}\Delta T &= \left[\int_s (T(x, t) - T_{ini}) ds \right] \times \frac{4}{d^2 \pi} \\ &= \frac{T_c(t) + T_s(t)}{2} - T_{ini}\end{aligned}\quad (9)$$

Fig. 2 Prediction of temperature distribution in concrete

$$\Delta T_{adi} = \Delta T + \frac{4h_a}{\rho C d} \int_0^t (T_s(t) - T_{air}(t)) dt \quad (10)$$

식 (9), (10)은 콘크리트 내부의 온도 분포를 식 (6)과 같은 2차 다항식으로 표현한 경우에 대해 단순화된 단열온도 예측식으로서, 온도 분포식을 어떻게 가정했느냐에 따라 그 형태가 달라질 수 있다. 그러나 어떤 형태의 온도 분포식을 사용하든 위 절차에 따르면 단순화된 단열 온도 예측식을 유도할 수 있다.

2.2.4 열손실계수의 추정

간이 수화열 측정 장치의 열손실계수를 구하는 과정은 아래와 같다. 간이 수화열 측정 장치가 규격화되면 장치의 열손실계수가 거의 일정한 값으로 유지되므로 이를 도표로 정리하여 사용자에게 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 간이 수화열 측정 장치의 열손실은 측정 장치 내의 전도와 대류, 복사의 복합적인 과정을 통해서 일어나지만 이를 하나의 열손실계수(대류계수)로 정의하고자 한다.

(1) 기본 열손실계수 추정

① 수화발열량을 무시할 수 있는 경우

콘크리트의 수화반응은 타설 후 5일 정도가 지나면 전체 반응의 98 퍼센트 이상이 완료된다. 즉, 일반 콘크리트의 경우는 $t > 5$ 일, 저발열 콘크리트의 경우는 $t > 7$ 일이 되면 $\Delta T_{adi} = 0$ 으로 가정할 수 있으며, 이를 식 (5)에 적용하면 다음 식 (11)과 같은 관계식을 구할 수 있다.

$$\alpha(t) = \frac{-\Delta T(t)}{\int_0^t (T_s(t) - T_{air}(t)) dt} \quad (11)$$

식 (11)을 사용하면, 콘크리트의 수화반응이 거의 완료된 이후의 온도 측정 결과를 이용하여 간이 단열온도상승시험의 열손실계수 α 를 계산할 수 있다.

② 수화발열량을 무시할 수 없는 경우

식 (3)에 나타난 콘크리트 열손실 면의 경계 조건과 식 (5)에 나타난 대류계수와 열손실계수 사이의 관계에 의해 다음 식 (12)와 같은 식을 유도할 수 있다.

$$h_a = \frac{k}{(T_s(t) - T_{air}(t))} \times \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} = \alpha \frac{\rho C V}{S} \quad (12)$$

즉, 콘크리트 내부의 온도 분포 함수만 정의되면 그 도함수 값을 이용하여 대류계수를 추정할 수 있으며, 이를 이용하여 최종적으로 열손실계수 α 를 계산할 수 있다. 예를 들어 식 (6)과 같은 온도 분포 함수를 사용하는 경우, 식 (12)를 다음 식 (13)과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} h_a(t) &= \frac{-k}{(T_s(t) - T_{air}(t))} \times \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \\ &= \frac{4k (T_c(t) - T_s(t))}{d (T_s(t) - T_{air}(t))} \end{aligned} \quad (13)$$

(2) 추가 열손실 보정계수 (위·아래 면을 통한 열손실량 보정)

식 (10)은 시험체의 위·아래 면으로는 전혀 열이 손실되지 않는다고 가정하고 유도된 것이며, 식 (12)와 (13)은 기본적으로 시험체 옆면을 통한 열손실 속도만을 고려한 것이다. 식 (11)의 경우에는 시험체의 전체 면적에 걸친 열손실을 이미 고려하고 있으므로, 추가 열손실 보정계수를 적용할 필요가 없다. 그러나 시험체를 최대한 1차원 열손실 조건에 가깝게 구성한다 해도, 위·아래 면으로 미소한 양의 열손실이 발생할 수 있다. 이러한 추가적인 열손실량은 앞서 추정한 기본 열손실계수에 식 (14)와 같은 추가 열손실 보정계수를 곱하여 간단하게 고려할 수 있다.

$$\gamma_{add} = 1 + \frac{h_{a,t} A_t + h_{a,b} A_b}{h_{a,s} A_s} \quad (14)$$

여기서,

γ_{add} : 추가 열손실 보정계수

$h_{a,t}$: 윗 면의 대류계수

$h_{a,b}$: 아랫 면의 대류계수

$h_{a,s}$: 옆 면의 대류계수

A_t : 윗 면의 면적

A_b : 아랫 면의 면적

A_s : 옆 면의 면적

3. 보온병을 이용한 간이 수화열 측정 장치의 타당성 검증

이 시험에서는 간이 수화열 측정 장치를 완성하기 전에 시중에서 손쉽게 구할 수 있는 단열 성능이 뛰어난 보온병을 이용하여 이 장치의 타당성을 입증하고자 하였다. 시험 장치는 아래 Fig. 3과 같이 보온병 2개를 이용하여 제작하였는데 이는 앞에서 가정하였던 요건을 만족 시킴으로써 열손실 조건을 단순화시키기 위함이다. 시험 장치 내부에는 직경 80 mm 높이 240 mm인 소모성 아크릴 관을 제작하였으며, 시험 장치는 추가적인 열손실을 최소화하고 복사로 인한 영향을 배제하고자 아래 Fig. 3

Fig. 3 Device for measuring adiabatic temperature rise of concrete

과 같이 표면을 열반사 단열재로 감쌌다. 콘크리트의 단열온도상승량을 정확히 예측하기 위해서는 시험 장치의 정확한 대류계수를 산정하는 것이 가장 중요하다. 따라서 이 시험에서는 열손실량을 보정하기 전 시험 장치의 정확한 대류계수를 추정하고자 하였다. 시험 장치의 대류계수는 내부에 물을 넣은 후 수온 변화를 이용하여 추정하였다. 앞서 제시한 콘크리트를 타설하여 열손실량을 추정하는 방법도 있으나, 콘크리트를 이용하는 경우 콘크리트의 수화 발열량으로 인하여 정확한 열손실량 추정에 어려움이 있으므로 발열량이 없는 수온 변화와 식 (11)을 이용하여 대류계수를 추정하였다.

간이 수화열 측정 장치는 현장에서 사용하기 때문에, 현장의 온도와 습도를 모사하고자 Table 1과 같은 변수를 두고 시험을 실시하였으며 외부 온도와 습도는 우리나라 4계절을 모사하고자 하였다. 내부 온도는 시험 장치 내부에 콘크리트가 타설될 경우 상승할 수 있는 온도 범위를 변수로 설정하였으며, 외부 온도와 습도는 항온항습기를 이용하여 조절하였다. 외부와 내부의 온도에 따른 대류계수는 아래 Table 2와 같으며, 이 시험 이전에 예비 시험으로 시중에서 판매하는 동일한 보온병 3개를 이용하여 외부 온도 20°C, 내부 온도 60°C에서 습도에 따른 대류계수를 도출하였는데, 아래 Fig. 4와 같이 대류계수는 습도 변화에 영향을 받지 않았기 때문에 외부 습도에 대한 대류계수의 변화는 없는 것으로 간주하

Table 1 Experimental variables for measuring convection coefficient

Experimental variables	Internal temperature (°C)	External temperature (°C)	External humidity (%)
	60 40	35	80
		20	60
		10	40

Table 2 Convection coefficient of device

Internal temperature External temperature	10°C	20°C	35°C
60°C	0.957	0.978	0.991
40°C	0.961	0.969	0.982

Fig. 4 Convection coefficient for each insulation bottle

여 추가적인 시험은 실시하지 않았다.

결과에서 드러나듯 외부 온도와 습도, 내부 온도는 시험 장치 고유의 대류계수에는 크게 영향을 주지 않는다. 그 이유는 시험 장치가 가지고 있는 단열 성능이 상당히 뛰어나기 때문에 시간당 손실량으로 계산되는 대류계수 값이 크게 바뀌지 않은 것으로 사료된다. 대류계수의 값이 크게 변하지 않기 때문에 수화열을 측정할 현장에서 더욱 간편하게 사용할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 수화열을 해석할 때 안전성 측면에서 시험 장치가 가질 수 있는 대류계수의 범위 중에서 가장 큰 값을 선택하는 것이 합리적이라고 사료된다.

Fig. 5는 시험 장치의 대류계수 범위이다.

4. 실제 단열온도상승시험과 간이 단열온도상승 시험 결과 비교를 통한 신뢰성 검증

4.1 신뢰성 검증

앞서 구한 시험 장치의 대류계수를 사용하여 열손실량을 보정한 뒤 실제 단열온도상승시험과 비교해 보았다. 검증은 총 세 번에 걸쳐 이루어졌다. 검증은 단열온도상승시험기를 이용한 시험과 같은 배합, 같은 재료를 이용하여 실험동에서 이루어졌다. 각 검증의 배합비는 아래의 Table 3과 같으며 콘크리트의 초기 온도는 각각 20.4°C, 22.1°C, 20.1°C이다.

시험 장치의 온도 상승량 측정은 앞서 가정하였던 시료의 정중앙 지점과 표면부를 측정하였으며, 측정은 K 타입의 열전대를 이용하였다. 시험 장치에서 측정된 결과는 아래의 Fig. 6과 같다. 다음 그림에서 알 수 있듯이

Fig. 5 Convection coefficient of device

Table 3 Mix proportions of concrete

	w/b (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m ³)					
			W	C	FA	S	G	SP
Test 1	44.5	46.3	160	360	-	822	971	0
Test 2	40	44.4	163	326	82	749	939	2.6
Test 3	45	42.9	167	297	74	972	731	2.31

(a) Temperature history in test 1

(b) Temperature history in test 2

(c) Temperature history in test 3

Fig. 6 Concrete temperature history in device

시험 장치 내부 위치에 따른 온도 변화는 거의 없는 것을 알 수 있으며, 비가 가장 낮은 2차 검증의 온도가 가장 높고, 저발열 시멘트를 사용한 1차 검증의 온도가 가장 낮은 것을 알 수 있다. 수화열에 의해서 콘크리트 내부의 온도가 최대 올라갈 수 있는 하절기를 모사하고자 30°C, 60%의 항온항습기 내에서 실험을 실시하였다.

실제 단열온도상승시험 결과와 열손실량을 보정한 시험 장치내 콘크리트의 단열온도상승량은 Fig. 7과 같다. 열손실량을 보정할 때 고려해야 하는 대류계수는 시험 장치의 대류계수 범위 중 가장 큰 값인 0.991 kcal/m²·°C·h와 가장 작은 값인 0.957 kcal/m²·°C·h를 사용하였으며, 콘크리트의 단위 중량은 콘크리트 표준시방서⁷⁾에 제시된 2300 kg/m³을, 콘크리트의 비열은 아래의 식 (15)를 이용

(a) Adiabatic temperature rise in test 1

(b) Adiabatic temperature rise in test 2

(c) Adiabatic temperature rise in test 3

Fig. 7 Comparison of adiabatic temperature rises and analytical results

하여 추정하였다.

$$C_{CO} = \frac{C_C C + C_W C + C_S C + C_G C}{C + W + S + G} \quad (15)$$

여기서,

C_{CO} , C_C , C_W , C_S , C_G : 각각 콘크리트, 시멘트, 배합수, 잔골재, 굵은골재 비열

C , W , S , G : 각각 시멘트, 배합수, 잔골재, 굵은골재의 단위 중량

결과를 살펴보면 시험 장치의 대류계수 편차가 작기 때문에 대류계수에 의해 예측된 단열온도상승량의 차이는 거의 나타나지 않는다. 그러나 안전성 측면에서 시험 장치의 대류계수 범위 중에서 가장 큰 값을 선택하는 것이 합리적이라고 사료된다. 1차 검증의 경우 초기에 약 5 퍼센트 작게 예측되나 최종 예측값은 거의 일치하며, 2차와 3차 검증의 경우에는 중반에 약 8 퍼센트 정도 크게 예측되는 것 이외에는 시험 장치를 이용하여 예측한

단열온도상승량이 비교적 정확하게 예측됨을 알 수 있다.

시험 장치를 이용한 콘크리트의 발열량이 단열온도상승 시험값과 차이가 발생하는 이유는 열전대의 측정 오차, 물을 이용하여 추정된 시험 장치의 열손실계수의 오차, 시험 장치에 콘크리트를 타설한 실험동과 단열온도상승시험을 실시했던 연구소의 외기 온도 차이로 인한 콘크리트 초기 온도 차이 등으로 예상되며, 시간이 경과함에 따라서 온도상승량 차이가 작아지는 이유는 단열온도상승 시험기는 콘크리트 내부의 온도 상승에 따라 주위 온도를 콘크리트 내부의 온도와 일치시키는 원리로 온도가 일치되기까지 작은 열손실이 발생하게 되나 시험 장치의 열손실량을 보정하는 과정은 시간 차이로 인한 열손실량이 없기 때문이라고 사료된다.

4.2 간이 수화열 측정 장치로 예측된 단열온도상승량의 민감도 분석

열손실량을 보정할 때 사용하는 식 (10)에서 고려해야 하는 변수로는 콘크리트 비열, 단위중량, 시험 장치의 대류계수, 시험 공시체의 직경이다. 각 변수에 따라서 예측된 단열온도 상승량의 민감도는 Fig. 8과 같다. 민감도 분석은 검증 (2)에서 예측한 단열온도 상승량을 이용하였다.

분석 결과 일반 콘크리트 단위중량의 경우 콘크리트 표준시방서에서 제시한 2300 kg/m^3 이외에 문헌에 따라서 $2200\sim 2400 \text{ kg/m}^3$ 의 범위를 갖는다고 명시하고 있으나⁸⁾ 단열온도상승량을 예측할 때 크게 영향을 주는 변수가 아님을 알 수 있다. 콘크리트의 비열의 경우에는 일반적으로 $0.26\sim 0.30 \text{ kcal/kg}\cdot^\circ\text{C}$ 사이의 값을 가지는 것⁷⁾으로 알려져 있으나 분석 결과 비열값에 따라 단열온도상승량을 예측할 때 최대 5°C 의 차이를 줄 수 있기 때문에 식 (15)를 이용하여 정확한 값을 도출하는 것이 필요하다. 마지막으로 단열온도 상승량을 예측할 때 가장 크게 영향을 미치는 인자인 시험 장치의 열손실계수(대류계수)의 경우 대류계수가 $0.1 \text{ kcal/m}^2\cdot^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ 증가함에 따라 예측되는 온도 상승량은 약 5°C 이상으로 민감하게 반응하므로 시험 장치의 정확한 대류계수의 산정이 필수적이라고 사료된다.

5. 결 론

이 연구에서는 간이 수화열 측정 장치를 완성하기 이전에 단열 성능이 뛰어난 보온병으로 시험 장치를 제작하여 타당성을 검증하였다. 제시된 식을 이용하여 시험 장치의 열손실계수를 추정하고 이를 바탕으로 열손실량을 보정하여 콘크리트의 단열온도상승량을 예측하였다. 실제 단열온도상승 곡선과의 검증을 통해 간이 수화열 측정 장치의 객관성 및 타당성을 입증하였다. 이 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 정확한 열손실량을 보정하기 위하여 필수적으로 산정해야 하는 시험 장치의 열손실계수는 외부의 온도와 습도, 내부의 온도에 크게 영향을 받지 않는 것으로

(a) Sensitivity analysis by unit weight

(b) Sensitivity analysis by specific heat

(c) Sensitivity analysis by convection coefficient

Fig. 8 Sensitivity analysis for variables, i.e., unit weight, convection coefficient and sepcific gravity

로 드러났다. 따라서 열손실량을 보정할 때 산정해야 하는 열손실계수를 일정한 값으로 결정할 수 있다.

- 2) 시험 장치를 이용하여 예측한 콘크리트 단열온도상승량은 기존의 단열온도상승 시험기에 의해 구한 값과 오차 범위 약 5% 안에서 거의 유사하게 예측됨을 알 수 있다.
- 3) 실제 현장에서 간이 수화열 측정 장치를 사용할 경우에 측정 장치의 정확한 열손실계수를 추정하는 것이 필수적이며, 장치의 열손실계수 범위 중에서 가장 큰 값을 사용하는 것이 안전성 측면에서 합리적이라고 사료된다.
- 4) 민감도 분석 결과 콘크리트의 단위중량은 콘크리트 단열온도상승량 예측에서 크게 영향을 주지 않는 요

소임을 알 수 있었고, 콘크리트의 비열은 콘크리트가 갖는 일반적인 범위에 따라 최대 5°C의 차이를 줄 수 있었으며, 마지막으로 시험 장치의 대류계수의 경우에는 대류계수가 0.1 kcal/m²·°C·h 증가함에 따라 예측되는 온도 상승량은 약 5°C 이상으로 민감하게 반응하므로 시험 장치의 정확한 대류계수의 산정이 필수적이라고 사료된다.

- 5) 간이 수화열 측정 장치가 개발된다면 콘크리트 수화열 측정비용이 절감되고 콘크리트의 품질 관리에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 지식경제부 원자력융합원천기술개발사업(과제번호 #20111520100090)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Hyun, J.-Y., "Development of Experimental Equipment for Thermal Stress in Mass Concrete," M. S. Thesis, Korea

Advanced Institute of Science and Technology, 2000, pp. 14-18.

2. RILEM TC119-TCE, "Recommendations of TC 119-TCE: Avoidance of thermal cracking in concrete at early ages," *Materials and Structures*, Vol. 30, No. 202, 1997, pp. 451-464.
3. Moon, D.-J., "Prediction of Adiabatic Temperature Rise of Concrete Containing Mineral Admixture," Ph. D Thesis, Hanyang University, 1998, pp. 19-43.
4. Livesey, P., Donnelly, A., and Tomlinson, C., "Measurement of the Heat of Hydration of Cement," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 13, No. 3, 1991, pp. 177-183.
5. Ng, P. L., Ng, I. Y. T., and Kwan, K. H., "Heat Loss Compensation in Semi-Adiabatic Curing Test of Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 105, No. 1, 2008, pp. 52-61.
6. Korea Institute of Construction Technology, "Equipment for Measuring Adiabatic Temperature Rise of Concrete," Korea patent 10-1151668, 2012.
7. Korea Concrete Institute, *Standard Concrete Construction Specification Commentary Manual*, Kimoondang Publishing Co., Korea, 2009, 762 pp.
8. Lee, Y. G., Lee, S. C., Park, C. W., Ko, S. G., and Park, J. G., "New Concrete Engineering," Goomibook, Korea, 2010, 219 pp.

요 약 매스 콘크리트에서 발생하는 수화열을 예측하기 위한 단열온도상승시험은 시험 비용이 고가이고 시공간상 제약으로 인해 한계가 있는 실정이다. 이에 신속하고 경제적이며 간편한 간이 수화열 측정 장치의 개발이 필요한 실정이다. 이 연구에서는 간이 수화열 측정 장치를 완성하기 전 단열 성능이 뛰어난 보온병에 콘크리트를 타설하고 열손실량을 보정하여, 간이 수화열 측정 장치의 타당성을 입증하고자 하였다. 열손실량을 정확히 예측하기 위해서는 측정 장치의 정확한 열손실계수를 추정하는 것이 필수적인데, 열손실계수는 단열 장치 내부의 수온 변화를 이용하여 추정하였다. 시험 결과 장치 고유의 열손실계수는 외부 온도와 습도, 내부 온도 변화에 크게 변하지 않는 것으로 드러났다. 실제 단열온도상승시험과 열손실량이 보정된 보온병의 단열온도상승량과의 검증 시험을 통해 이 연구의 객관성과 타당성을 입증할 수 있었다.

핵심용어 : 간이 수화열 측정 장치, 수화열, 열손실, 단열온도상승, 대류계수