

온도응력 측정용 시험장치의 개발

전상은^{1)*} · 김국한²⁾ · 김진근¹⁾

¹⁾한국과학기술원 토목공학과 ²⁾한국도로공사 도로연구소

(2000년 9월 16일 원고접수, 2001년 4월 26일 심사완료)

Development of Thermal Stress Measuring System

Sang-Eun Jeon^{1)*}, Kook-Han Kim²⁾, and Jin-Keun Kim¹⁾

¹⁾Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejeon, 305-701, Korea

²⁾Highway Research Institute, Korea Highway Coporation, Sungnam, 461-380, Korea

(Received September 16, 2000, Revised April 26, 2001)

ABSTRACT

Even though numerous researches have been performed for the prediction of thermal stresses in mass concrete structures by both analytical and experimental means, the limitations exist for both approaches. In analytical approach, the fundamental limitation is derived from the difficulty of predicting concrete properties such as modulus of elasticity, coefficient of thermal expansion, etc.. In experimental approach, there are many uncertainties related to in-situ conditions, because a majority of researches have focused on measuring thermal stresses in actual and simulated structures.

In this research, an experimental device measuring thermal stresses directly in a laboratory setting is developed. The equipment is located in a temperature chamber that follows the temperature history previously obtained from temperature distribution analysis. Thermal strains are measured continuously by a strain gauge in the device and the corresponding thermal stresses are calculated simply by force equilibrium condition.

For the verification of the developed device, a traditional experiment measuring thermal strains from embedded strain gauges is performed simultaneously. The results show that the thermal strain values measured by the newly developed device agree well with the results from the benchmark experiment.

Keywords : thermal stress, modulus of elasticity, coefficient of thermal expansion

1. 서 론

매스콘크리트 구조물을 시공할 때, 그리고 고강도 콘크리트를 사용할 때에 문제가 되고 있는 시멘트 수화열은 구조물 내외부에 주어진 구속조건에 따라 온도응력을 발생시키고, 경우에 따라서는 구조물에 균열을 발생시켜 구조물의 사용성, 수밀성, 내구성 등에 심각한 영향을 준다. 따라서 수화열에 의해 발생하는 온도응력의 크기 및 균열 발생 유무를 밝히는 것은 매우 중요하다.

콘크리트 구조물에 발생하는 온도응력을 추정하는 방법에는 크게 해석적인 방법과 실험적인 방법이 있다. 해석적인 방법으로는 다양한 시공조건 등을 효과적으로 모사할 수 있는 유한요소법이 주로 사용되며, 실험적인 방법은 실제 구조물 및 모의 실험체에 대하여 특정 장비나 게이

지를 이용하여 직접 온도응력을 추정하는 방법과 실내 실험용으로 제작된 온도응력 측정용 시험장치를 이용하는 방법으로 나눌 수 있다. 그러나 해석적인 방법은 콘크리트의 불확실한 물성치를 가정해야 하고, 구조물에서 직접 온도응력을 측정하는 실험적 방법은 비경제적이며 현장조건에 크게 영향을 받는다. 따라서 콘크리트 압축강도 시험과 같이 실내에서 간편하게 다양한 배합과 조건에 대하여 온도응력을 측정할 수 있는 시험장치의 개발이 절실히 요구되고 있다. 국외의 경우 일본, 유럽 등에서는 이미 80년대 초반부터 실내 실험용 온도응력 시험장치의 개발과 이에 대한 다양한 연구가 일본의 Tazawa와 Iida¹⁾, Aokage, Ito, Watanabe²⁾, 독일의 Technical University of Munich^{3~7)}를 중심으로 수행되었다.

본 연구에서는 국내에서 처음으로 시도되는 실내용 온도응력 시험장치를 개발하고 이를 다양한 관점에서 검증하였다. 개발된 시험장치는 콘크리트와 사용재료의 열팽창 계수를 달리하여 임의적으로 내외부 구속을 모사할 수 있

* Corresponding author

Tel : 042-869-3654 Fax : 042-869-3610

E-mail : tomy@kaist.ac.kr

도록 하였고, 실제 콘크리트 구조물에서 발생하는 온도를 구할 수 있도록 항온항습조를 사용하여 다양한 조건에서 콘크리트 온도응력의 변화를 정량적으로 구할 수 있도록 하였다.

2. 온도응력 측정을 위한 기존의 연구

2.1 개요

수화열에 의해 발생한 콘크리트의 온도분포와 온도응력을 효율적으로 예측하기 위해서는 여러가지 영향인자에 대한 고려가 이루어져야 한다. 수화열에 의한 콘크리트의 온도분포는 콘크리트의 비열, 열전도율 및 단열온도상승값 등과 같은 열적특성 뿐만 아니라, 외기온도의 변화나 풍속의 변화 등에도 영향을 받게 된다. 또한 수화열에 의한 콘크리트의 온도응력은 수화열에 의한 온도분포 외에도 콘크리트의 탄성계수, 열전도율 및 크리프계수 등에 영향을 받게 된다. 온도응력에 영향을 주는 이들 요소들은 시간에 따라 특성값이 변하는 시간의존적인 특징을 가지므로 해석만으로 수화열에 의한 콘크리트의 온도응력을 정확히 예측하기는 어려우며, 따라서 수화열에 의한 콘크리트의 균열발생 여부를 정확히 예측하기 위해서는 콘크리트의 각종 특성을 예측하지 않고도 온도응력을 측정할 수 있는 실험기법의 도입이 필요하다.

2.2 유한요소법을 이용한 해석적 방법

유한요소해석 기법을 이용하여 콘크리트 구조물의 수화열에 의한 온도응력을 예측하기 위해서는 첫째로 수화열에 의해 발생하는 온도이력을 해석하고, 둘째로 콘크리트의 탄성계수를 포함한 시간에 따른 콘크리트의 역학적 물성치를 숙성도 이론에 의해 해석하고, 셋째로 앞에서 구한 온도이력 및 콘크리트의 탄성계수이력을 이용하여 수화열에 의해 발생된 온도응력을 해석한다.

그러나 앞서도 기술하였듯이 해석적 방법에 의해 수화열에 의한 온도응력을 예측하기 위해서는 상당히 많은 입력변수의 정확도가 요구될 뿐 아니라 각종 이론들의 정확도가 높아야 한다. 그러나 기존의 연구결과에 의하면, 수화열에 의한 콘크리트의 온도분포는 어느 정도 정확히 예측할 수 있으나 온도응력은 그렇지 않다. 이는 콘크리트의 탄성계수, 열팽창계수 및 크리프 계수 등과 같은 초기재령의 각종 물성치들이 모델식에 의한 결과와 상당한 차이를 보이기 때문이다. 따라서 해석적 방법에 의해 수화열에 의한 온도응력을 예측하기 위해서는 이와 같은 문제점과 한계성이 있다.

2.3 계측기에 의한 실험적 방법

계측기에 의한 실험적 방법은 실제 구조물이나 이를 실험 목적에 맞게 축소한 모형 실험체에 대하여 계측기를 이용하여 원하는 부분의 온도응력을 측정하는 방법이다. 콘크리트에 발생하는 온도응력을 측정에 사용되는 대표적인 계측기는 매립형 변형률 게이지, 무응력계, 유효응력계 등이 있다. 매립형 변형률 게이지에 의한 방법은 게이지의 탄성계수와 온도에 의한 영향에 따라 오차를 보일 수 있으며, 무응력계도 앞의 변형률 게이지를 사용하므로 같은 문제가 나타나게 된다. 또한 변형률 게이지를 사용하는 방법은 측정값이 변형률이므로 콘크리트의 탄성계수를 사용하여 응력을 계산해야 한다. 따라서 이 과정에서 추가되는 오차를 고려해야 한다. 이러한 변형률 게이지의 문제점을 해결하기 위해 개발된 유효응력계는 로드셀(Load-Cell)을 통하여 직접 온도응력을 측정하는 장비로서 상당한 정확도를 보이고 있는 것으로 알려져 있으나, 가격이 고가이고 장착에 따른 문제들이 있다.

이와 같은 계측기를 이용한 방법들에 의해 수화열에 의한 균열발생을 예측하기 위해서는 상당한 실험결과가 축적되어야 하므로 현실적으로 불가능한 방법이다. 즉 충분한 데이터가 이용되지 않으면, 시공된 실제 구조물에서의 응력만을 알 수 있어 시공전에 미리 수화열에 의한 균열발생 여부를 예측할 수 없는 문제점이 있다.

2.4 실내 실험용 시험장치

초기재령 콘크리트의 온도 균열 발생을 막기 위해서는 온도의 증가뿐만 아니라 응력의 발생정도를 측정할 수 있어야 한다. 또한 응력은 온도의 증가는 물론 탄성계수 발현이나 콘크리트의 크리프, 건조수축 등의 여러 가지 요인의 영향을 복합적으로 받게 된다. 따라서 이러한 초기재령 콘크리트에 대하여 온도응력을 측정하고, 다양한 배합에 대한 균열발생 경향을 파악하기 위하여 실내실험용으로 제작된 것이 바로 온도균열 시험장치이다.

온도균열 시험장치는 80년대 들어 주로 일본과 독일을 중심으로 발달하였는데 일본에서는 온도균열 시험장치를 이용하여 콘크리트 수화열에 의한 온도응력과 그 메커니즘에 대하여 연구하였고, 독일에서는 Technical University of Munich에서 Cracking Frame이라는 실험장치를 개발하여 초기재령 콘크리트의 온도응력과 균열발생 경향을 연구하였다.

1984년 독일 Technical University of Munich의 E. Gierlinger와 R. Springen-schmid에 의하여 개발된 TSTM (Temperature Stress Testing Machine)은 cracking frame을 보다 개선한 것으로 전체적인 아이디어나 형태는 cracking frame과 같지만 로드셀을 달아 직접 온도응력을 측정하고, 스텝 모터를 이용하여 콘크리트 시편의 변위를 최소 0.001 mm까지 제어할 수 있도록 설계되었다. 따라서

봉의 재질에 따라서 특정한 구속도만을 모사했던 cracking frame과는 달리 TSTM은 0~100 %의 다양한 구속조건을 실험목적에 따라 구현할 수 있다. 그 외에 거푸집은 cracking frame과 같이 콘크리트의 온도를 조절할 수 있도록 구리 파이프를 매설하여 온도해석에 의해 얻어진 다양한 온도이력을 줄 수 있게 되었다. 뿐만 아니라 콘크리트의 변형은 1 μm 의 정확도를 가진 광학 스트레인 리코더를 이용하여 시험 시편에 직접 접촉하지 않고 측정되었다.

3. 온도응력 측정용 시험장치의 개발

3.1 개요

앞에서 언급한 바와 같이 외국에서 개발되고 있는 균열 발생 시험장치를 근간으로 하여 매스콘크리트의 온도분포 및 응력발현을 모사할 수 있는 실내용 온도응력 시험장치를 개발하였다. 본 시험장치는 온도응력을 실내에서 간편하게 측정할 수 있으며 확실한 콘크리트의 물성치를 그대로 반영할 수 있다. 본 시험장치의 개략적인 형상은 Fig. 1과 같다.

전체적인 형상은 독일의 cracking frame과 유사하고 실험 방법은 일본의 온도균열 시험장치와 비슷하지만, 저렴한 비용으로 이들의 단점을 보완한 것이 특징이다. 우선 cracking frame의 경우 나무와 폴리스티렌으로 단열을 시켰다고는 하나 기본적으로 단열 시험이라는 한계점을 가지고 있고, 외부 온도의 영향을 완전히 배제하지 못한다는 단점을 가지고 있는데 반해 본 시험장치는 항온항습조 내에서 실험을 수행함으로써 외부 온도의 영향을 완전히 배제하고 원하는 온도이력을 가할 수 있다. 그리고 온도 균열 시험장치에서 콘크리트의 건조수축을 방지하기 위하여 구리판이나 얇은 폴리에틸렌 판을 이용하였는데 본 실험에서는 항온항습조내의 온도와 함께 습도 역시 제어

하여 85 % 이상의 습도를 유지하도록 하였다. 또한 TSTM과 같이 다양한 구속을 모사하기 위해 Fig. 1과 같이 양쪽 cross-head 사이에 열팽창계수가 다른 여러 가지 금속판을 이용할 수 있도록 하였다. 온도균열 시험장치의 경우 다양한 구속을 모사하기 위해 파이프내에 물의 온도를 변화시키는 방법을 이용하였는데 이것은 외부 온도와 의 상호 영향을 정확히 고려하기 힘들고, 파이프의 종류를 바꾸는 방법 역시 파이프의 치수가 본 시험장치에 비해 매우 크기 때문에 비경제적이다.

Fig. 1의 시험장치에서 알 수 있듯이 개발된 시험장치의 핵심은 cross-head 사이에 설치하는 금속판에 있다. 금속판의 열팽창계수가 0이거나 열전도율이 0이라면 콘크리트의 완전구속 상태를 모사할 수 있다. 그러나 이러한 재료가 존재하지 않기 때문에 보다 효과적으로 내부구속과 외부구속을 구현하기 위하여 판의 열팽창계수를 변화시키기로 하였다. 즉, 매스콘크리트 구조물에서 내부 구속이 강한 외측부의 온도응력 경향은 콘크리트보다 열팽창계수가 큰 재료의 판을 이용하여 모사할 수 있고, 반대로 외부구속 또는 내부구속이 강한 내측부의 온도응력 경향은 콘크리트보다 열팽창계수가 작은 재료의 판을 이용하여 모사가 가능하다. 본 온도응력 시험장치에서 사용된 재료의 물성치를 콘크리트와 비교하면 Table 1과 같다.

3.2 실험 방법

금속판에는 각 재료에 따른 변형률게이지를 붙이고, 콘크리트 내에는 매립게이지를 설치하였다. 금속판 표면, 콘크리트와 항온항습조 내부에는 온도센서를 통하여 프로그램된 온도가 제대로 구현되는지 확인할 수 있도록 하였으며, 콘크리트의 초기 소성수축과 건조수축 방지를 위해 습도는 항상 85 %를 유지하도록 온도와 함께 프로그래밍하였다. 또한, Fig. 1에서 알 수 있듯이 타설되는 콘크리트의 양은 그다지 많지 않고 두께도 80 mm에 불과하므로, 공기 중에 직접 노출되는 부분에서 활발하게 열순환이 이루어짐을 고려할 때 타설된 콘크리트 자체에서 발생하는 수화열의 영향은 미미할 것으로 예상되고, 실측 결과도 미미한 것으로 나타났다. Fig. 1에서 점선으로 표시된 콘크리트의 경계 부분은 타설 전에 셀로판 테이프를 붙이고, 타설 후 실험이 수행되는 6시간 후에 제거하였다. 프레임에 받치는 얇은 steel판에는 실험 전에 미리 그리스와 기름을 충분히

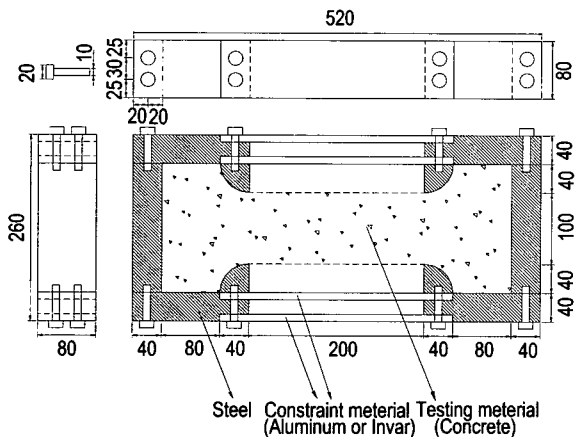


Fig. 1 Apparatus of developed equipment

Table 1 Material property

Material	Thermal expansion ($\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)	Modulus of elasticity ($\times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$)
Concrete	10	3.00
Steel	11	21.0
Aluminum	24	7.33
Invar	4.5	2.89

발라 혹시라도 발생할 지 모르는 마찰을 방지하였으며, 판 대신 여러 개의 베어링을 이용한 참조 실험을 통해 마찰력이 영향을 끼치지 않음을 확인하였다. 위의 시험장치를 이용하여 대상 구조물의 온도응력을 예측하기 위해서는 우선 온도해석이 수행되어야 한다. 즉, 해석 프로그램을 통하여 온도해석을 하고 해석된 온도이력과 동일한 온도 상태를 구현할 수 있는 항온항습조에서 실험을 수행한다. 온도에 의한 변형률을 측정한다는 것은 매우 정밀한 실험을 요구하므로 초기 타설온도를 맞추기 위해서 타설 하루 전에 미리 프레임, 골재, 물 등 사용재료를 초기온도 및 습도로 고정시켜 놓은 항온항습조에 넣어두었다. 그러나 위와 같이 초기 타설온도를 조정하여도 타설시 외기온이나 그 밖에 원인에 따라 타설을 완료한 시점에서의 프레임, 콘크리트, 항온항습조의 내부온도가 다소 다를 수 있으므로 타설 후 6시간동안 항온항습조 내부를 초기온도로 고정하여 금속판(aluminum, invar), 콘크리트, 항온항습조 내부가 완전히 동일한 온도가 되도록 하였다. 이후에는 온도해석에서 얻어진 온도이력을 항온항습조를 통해 그대로 구현하였다.

3.3 온도응력 측정 및 분석 방법

온도응력 측정용 시험장치는 콘크리트와는 다른 열팽창계수를 가지는 판을 가진 시험장치 안에 콘크리트를 타설하여 초기 콘크리트의 재료적 성질을 유지하고, 미리 프로그램에 의하여 구해진 온도이력을 항온항습조를 통해 구현하여 궁극적으로 완전 구속 상태의 실제 매스콘크리트 내의 온도응력을 직접 추정해볼 수 있다. 변형이 완전히 구속된 상태라면 콘크리트의 응력은 식 (1) 과 같이 표현할 수 있다.

$$f_{c, res} = E_c \epsilon_{c, free} \quad (1)$$

여기서, $f_{c, res}$: 완전구속시 콘크리트의 온도응력
 E_c : 콘크리트의 탄성계수
 $\epsilon_{c, free}$: 구속이 없었을 때 발생했을 콘크리트의 변형률

그러나 시험장치에서는 완전한 구속을 구현하는 것이 아니므로 식 (2)를 통해 발생하는 응력을 나타낼 수 있다.

$$f_c = E_c (\epsilon_{c, free} - \epsilon_c) \quad (2)$$

여기서, f_c : 콘크리트 실험체에서 발생한 응력
 ϵ_c : 콘크리트 실험체에서 발생한 변형률

따라서 시험장치 안의 콘크리트와 시험장치와의 힘의

평형에 의하여 다음과 같은 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$A_s E_s (\epsilon_{s, free} - \epsilon_s) = A_c E_c (\epsilon_c - \epsilon_{c, free}) \quad (3)$$

여기서, A_s, A_c : 구속판과 콘크리트의 단면적
 E_s, E_c : 구속판과 콘크리트의 탄성계수

여기서 구하고자 값은 온도에 의하여 발생하는 콘크리트의 응력이므로 위의 식을 정리하여 표현하면 다음과 같다.

$$f_c = \frac{A_s}{A_c} E_s (\epsilon_{s, free} - \epsilon_s) \quad (4)$$

위의 식에서 A_s, A_c, E_s 는 이미 알고있는 상수이고, $\epsilon_{s, free}$ 역시 다음과 같은 식으로 쉽게 구할 수 있다.

$$\epsilon_{s, free} = \alpha_s \Delta T \quad (5)$$

여기서, α_s : 구속판 재료의 열팽창계수
 ΔT : 온도변화량

즉, 탄성계수나 열팽창계수 등의 물성치가 불분명한 초기재령에서도 특정시간의 프레임의 변형률(ϵ_s)만 측정한다면, 그 시간의 콘크리트의 응력을 바로 구해낼 수 있다.

4. 개발된 시험장치의 신뢰성 검증

4.1 재료 실험결과

4.1.1 콘크리트의 배합

본 실험에 사용된 콘크리트의 배합은 Table 2와 같다.

4.1.2 콘크리트의 역학적 특성

Table 3은 본 배합에서 사용된 콘크리트에 대한 강도와 탄성계수 실험 결과이다. 실험의 특성상 타설 후 7일 이전의 초기 재령에 대한 실험만을 수행하였다. 콘크리트는 각 실험에서 사용된 온도이력(외측부 : Fig. 3(a), 내측부 : Fig. 4(a))과 상대습도 85%에서 양생되었다. 각 실험결과는 동일한 조건, 동일한 재령의 콘크리트 공시체 3개를 실험하여 얻은 평균값이다. Table 3에 의하면 상대적으로 최고 온도값이 큰 내측부의 경우가 강도와 탄성계수의 값

Table 2 Mix proportion

W/C (%)	S/A (%)	Unit content(kgf/m ³)				Adimixture
		Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	
50	42	181	360	707	989	1.81

Table 3 Mechanical properties of concrete

Age (days)	Compressive strength (kgf/cm ²)		Splitting tensile strength (kgf/cm ²)		Modulus of elasticity × 10 ⁵ (kgf/cm ²)	
	Surface	Interior	Surface	Interior	Surface	Interior
1	188	259	26.4	31.0	2.0	2.7
2	239	346	30.1	36.7	2.3	2.8
3	265	350	33.2	37.7	2.6	3.0
7	313	363	36.8	38.3	2.9	3.0

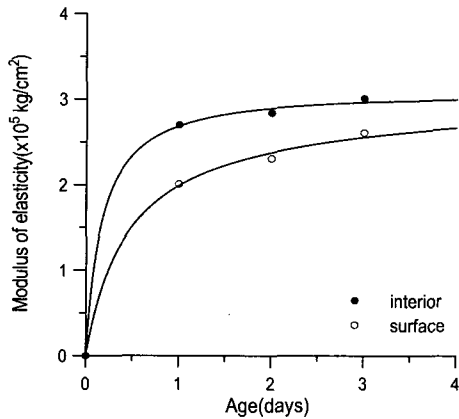


Fig. 2 Variation of modulus of elasticity of concrete

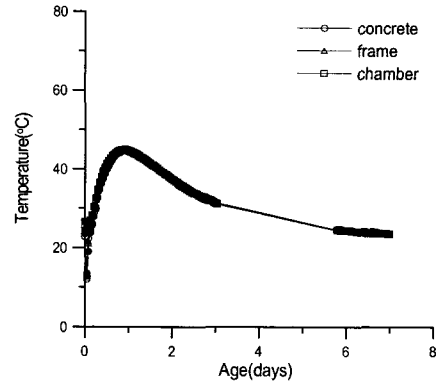
이 크게 나타나고 있다. 이는 동일 배합의 콘크리트라도 양생온도의 차이에 의한 속성도의 차이가 나기 때문이다. Fig. 2는 Table 3의 결과를 토대로 배합된 콘크리트의 탄성계수에 대하여 회귀분석한 결과이다.

4.2. 검증 실험

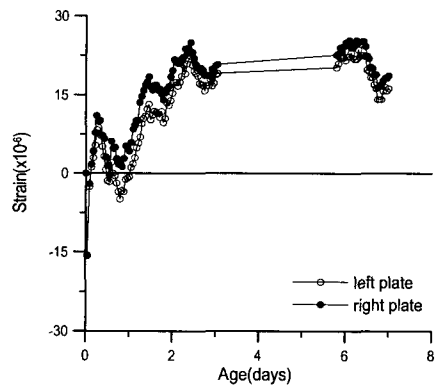
4.2.1 콘크리트보다 열팽창계수가 큰 재료(알루미늄)

개발된 시험장치의 타당성을 확인하기 위하여 구속판을 콘크리트보다 열팽창계수가 큰 알루미늄 재료로 하여 실험을 실시하였다. Fig. 3(a)는 대상 구조물의 온도분포 해석결과 중 외측부의 온도를 항온항습조에 프로그래밍하여 얻은 온도결과이다. Fig. 3(a)에 의하면 콘크리트, 프레임, 항온항습조내의 온도가 약 1°C 내외의 오차를 보이면서 설정온도를 제대로 따라가고 있다. 따라서 임의의 온도분포 해석결과를 이용하여 시험장치를 원하는 온도이력으로 제어할 수 있다는 것이 검증되고, 시멘트 수화열에 의한 영향을 완전히 배제할 수 있다는 가정이 증명되었다.

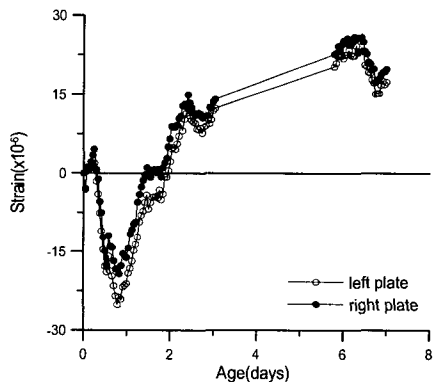
Fig. 3(b)는 변형률게이지를 이용하여 시간에 따른 알루미늄판의 변형률을 측정된 결과이다. Fig. 3(b)에서 측정된 변형률이 변동하고 있는 것을 볼 수 있는데, 이러한 문제는 사용된 변형률게이지와 측정기기의 전기 잡음으로 해석할 수 있으며 이것은 shielding이나 grounding을 통해 해결할 수 있을 것으로 판단된다. 특히 이 경우에 발생하는 변형률이 최대 20 μm 정도이므로 정밀한 변형률게이지를 사용하면 보다 안정적인 결과를 얻을 수 있을 것이다.



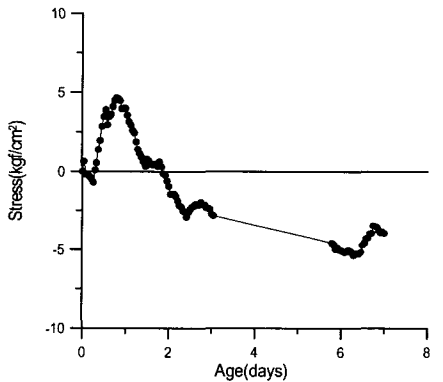
(a) Temperature history



(b) Measured strain from strain



(c) Restrained strain of aluminum plate



(d) Stress of concrete

Fig. 3 Test results using aluminum plate as constrained bar

Fig. 3(b)의 결과를 토대로 구속판에 작용하는 응력을 추정하기 위해서는 구속판과 콘크리트의 변형률의 차이에 따른 구속 변형률을 산출해내야 한다. 즉 시험장치와 사용 게이지의 특성에 의해 발생하는 온도변화에 따른 변형률을 측정하여야 한다. 이를 위하여 예비실험으로서 콘크리트를 타설하지 않은 경우 온도 변화에 따른 시험장치의 변형률 변화를 측정하였다. 이 결과를 이용하여 Fig. 3(b)의 변형률에서 알루미늄판에 걸리는 순수한 구속 변형률을 환산하여 Fig. 3(c)에 나타내었다. Fig. 3(c)에 의하면 예측하였던 변형률의 변화에 맞게 초기에는 압축변형이 발생하고 온도하강시기에는 인장변형이 일어나는 것으로 나타났다. 또한 알루미늄판의 좌·우측 변형률이 거의 일치하는 것으로 보아 편심의 영향은 미미하다고 사료된다.

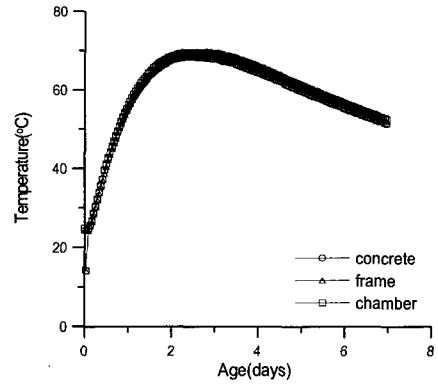
Fig. 3(c)의 결과를 가지고 알루미늄판의 탄성계수와 알루미늄판과 콘크리트의 단면적을 이용하여 Fig. 3(d)와 같이 콘크리트에 작용하는 구속 응력을 계산하였다. Fig. 3(d)를 보면 내부구속이 강한 외측부의 응력발현 경향과 동일하게 나타나고 있는데, 이를 통해 시험장치의 구속이 내부구속에서 표면부의 효과를 정확히 모사하고 있다고 생각된다. Fig. 3(d)에 의하면 콘크리트의 인장응력이 최대가 되는 시점은 20시간 정도이며, 이 때의 응력값은 약 5 kgf/cm^2 이다.

4.2.2 콘크리트보다 열팽창계수가 작은 재료(Invar)

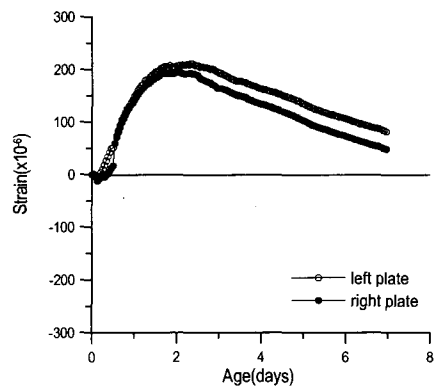
Fig. 4는 3.2.1절의 알루미늄 재료를 사용한 실험과 같이 Invar를 사용한 경우의 실험결과이다. Fig. 4(a)에 의하면 알루미늄의 경우와 같이 의도한 온도이력을 콘크리트와 구속판, 항온항습조가 미세한 오차를 가지고 재현하고 있다. Fig. 4(b)와 (c)의 변형률 변화에서 보는 바와 같이 콘크리트보다 열팽창계수가 작은 Invar를 사용하면 외부 구속과 내부구속이 강한 내측부의 응력을 모사할 수 있으며, Fig. 4(d)에서 이를 확인할 수 있다. Fig. 4(d)에서 콘크리트에 작용하는 최대 응력은 40시간 정도에 나타나며, 2.5 kgf/cm^2 의 압축응력이 작용하고 있다.

4.3 신뢰성 분석

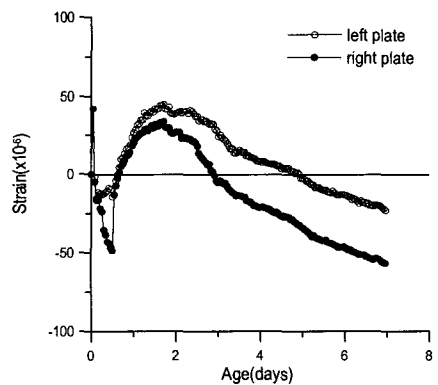
개발된 시험장치를 가지고 3절에서 언급한 실험방법을 통해 얻은 실험결과와 신뢰성을 검토해보기 위해 콘크리트에 대한 참조실험을 병행하였다. 콘크리트에 대한 참조 실험으로는 앞에서 기술한 강도 및 탄성계수 시험과 콘크리트에 매립게이지를 설치하여 주어진 조건에서 콘크리트에 발생하는 변형률을 직접 측정하였다. 우선 구속이 없는 경우에 주어진 온도이력에 의한 콘크리트의 신축을 고려하기 위하여 $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ 공시체 내부에 매립게이지를 설치하였다. 이 공시체는 시험장치를 이용한 실험 시작 시점인 타설 후 6시간이 지날 때 탈형을 하여 바닥에



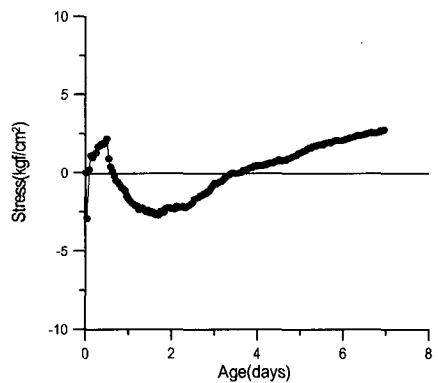
(a) Temperature history



(b) Measured strain from strain gauge



(c) Restrained strain of invar plate



(d) Stress of concrete

Fig. 4 Test results using invar plate as constrained bar

서 마찰에 의한 구속이 일어나지 않도록 한 후 변형률을 측정하였다. Fig. 5는 콘크리트 매립게이지를 이용하여 시간에 따른 콘크리트의 변형률 변화를 측정한 결과이다.

콘크리트에 대한 실험을 통하여 콘크리트에서 발생하는 구속응력을 구하기 위해서는 구속 변형률과 시간에 따른 콘크리트의 탄성계수를 알아야 한다. 구속 변형률은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 구속된 경우와 구속되지 않은 경우의 차이 값으로 쉽게 구할 수 있고, 탄성계수는 3.1절에서 수행한 탄성계수 실험을 통해 얻은 값을 사용하였다. 단, 실험은 타설 후 6시간이 지난 때 실시하였으므로 탄성계수도 이 시점부터 적용하였다.

Fig. 2와 Fig. 5에서 얻은 값들을 이용한 콘크리트의 응력과 시험장치를 이용한 응력을 비교하면 Fig. 6과 같다.

Fig. 6에서 볼 수 있듯이 시험장치를 이용하여 얻은 콘크리트의 응력이 콘크리트에 직접 변형률게이지를 설치하여 얻은 응력과 현저한 차이를 보이고 있다.

Fig. 6과 같이 응력이 차이가 나는 이유는 극초기 재령에서의 콘크리트와 매립게이지 사이의 불완전한 부착 거동과 콘크리트 매립게이지의 온도보상이 제대로 이루어지지 않았기 때문으로 판단된다. 사용된 매립 게이지(EGP-5-120)는 15~40°C의 온도범위에서 온도보상을 해 주고 있다. 일반적으로 게이지의 특성상 온도보상은 콘크리트의 열팽창계수를 일정값($10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)으로 가정하여 gage factor($2.05 \pm 0.1\%$)를 이용해 온도보상을 한다. 즉 이 온도범위에서 매립게이지로부터 얻어지는 콘크리트의 변형률은 gage factor에 의해 온도변화에 따른 변형률 제외 한 순수 변형률을 의미한다. 그러나 콘크리트 재료의 특성상 초기재령에서는 콘크리트의 열팽창계수가 매우 크게 변하는 것으로 알려져 있는데⁸⁻⁹⁾, 특히 극초기재령(여기서는 타설 후 13시간 이내)에서는 열팽창계수가 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 보다 크게 나타나므로 콘크리트 변형률게이지를 통해 측정된 값은 실제 변형률보다 과대평가될 수 있다. Fig. 6에 의하면 콘크리트의 열팽창계수가 안정적인 값을 갖는 타설 후 13시간 이후의 응력 변화는 매립게이지를 통하여 얻은 응력과 구속 금속판의 변형률을 통하여 얻은 응력이 유사하게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 여기서는 발현된 최대 압축응력을 갖는 시점을 기점으로하여 매립 변형률게이지를 통해 얻은 응력을 보정하였다. Fig. 7은 보정된 응력과 시험장치를 이용한 응력을 비교하였다. 보정한 결과에 의하면 시험 장치를 이용하여 얻은 응력과 콘크리트의 변형률을 이용한 응력의 변화가 동일하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉, 본 시험장치를 이용하여 온도응력을 예측하는 것이 기존의 매립형 변형률게이지나 직접 응력을 측정하는 유효응력계를 이용하여 구하는 방법의 문제점을 보완한 보다 신뢰성 있는 방법임을 알 수 있다.

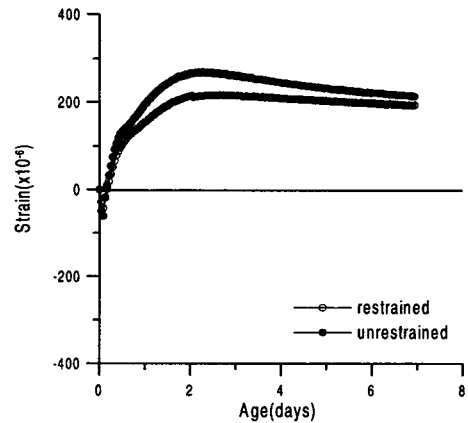


Fig. 5 Measured strain of concrete

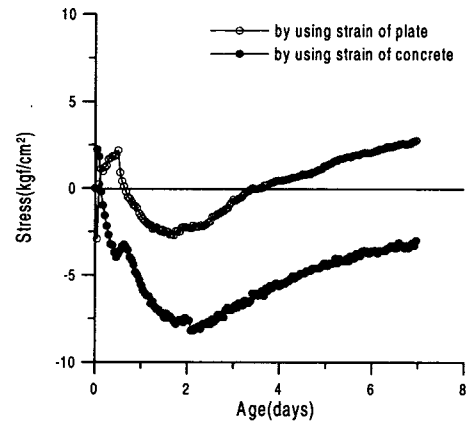


Fig. 6 Comparison of stresses

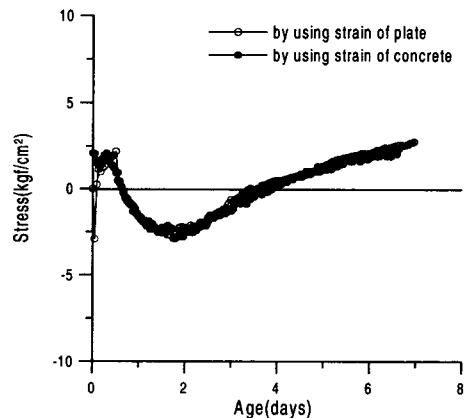


Fig. 7 Comparison of stress after compensation

지금까지의 연구결과에 의해 확인된 시험장치의 타당성에 근거하여 앞으로 본 시험장치의 활용성을 높이기 위해서는 보다 많은 연구가 추가적으로 수행되어야 할 것이다. 우선 보다 다양한 구속 조건을 구현하기 위해서 구속판의 재료뿐만 아니라 단면을 변화시킬 수 있다. 이러한 구속 조건의 변화를 실제 구조물에서 발생하는 응력(해석결과)과 비교하면 구조물에 따른 구속정도를 결정할 수 있고, 종국에는 실제 구조물에서 발생하는 온도응력을 보다 정확하게 예측할 수 있을 것이다. 또한 개발된 시험장치를

통해 콘크리트의 초기 물성치(열팽창계수, 탄성계수 등)를 연구하는데 있어 보다 정밀한 결과를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결 론

콘크리트 구조물의 수화열에 의한 온도응력을 측정하기 위한 온도응력 측정용 시험장치를 개발하였으며, 개발된 시험장치를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 개발된 온도응력 측정용 시험장치는 상용화된 항온 항습조를 이용하여 콘크리트 구조물의 특정 위치에서의 온도이력을 거의 유사하게 모사할 수 있다. 따라서 실제 콘크리트에 사용될 배합을 가지고 콘크리트 구조물의 특정 위치에서의 온도응력을 효과적으로 모사할 수 있다.

2) 알루미늄 재료를 사용하여 온도응력 측정용 시험장치를 제작한 경우 매스콘크리트의 외측부의 구속 응력을, Invar 재료를 사용한 경우는 매스콘크리트의 내측부의 구속 응력을 모사할 수 있다. 그러나 실험결과의 신뢰성을 높이기 위해서는 보다 정밀한 계측기를 사용하여 전기적인 간섭을 최대한 줄이는 것이 필요하다.

3) 온도응력 측정용 시험장치의 사용 재료와 구속판의 단면을 변화시키면 다양한 구속정도에 따른 콘크리트의 온도응력을 구할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 온도응력 시험장치를 이용하여 콘크리트의 탄성계수 및 열팽창계수와 같은 시간의존적인 콘크리트의 각종 특성을 예측할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술평가원(KISTEP)의 엔지니어링 핵심공통기반기술 사업과 국가지정 연구실 사업(National Lab.)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Tazawa, E. and Iida, K., "Mechanism of Thermal Stress Generation due to Hydration Heat of Concrete," *Transaction of the Japan Concrete Institute*, Vol.5, 1983, pp.119~126.
2. Aokage, H., Ito, Y. and Watanabe, N., "Experimental Study on Effective Modulus of Elasticity in Massive Concrete," *Transaction of the Japan Concrete Institute*, Vol.8, 1986, pp.119~124.
3. RILEM TC 119-TCE : *Avoidance of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages*.
4. Breitenbucher, R., "Investigation of Thermal Cracking with the Cracking-Frame," *Material and Structures*, Vol.23, 1990, pp.172~177.
5. Springenschmid, R., Breitenbucher, R., and Mangold, M., "Development of the Cracking Frame and the Temperature-Stress Testing Machine," *Proceedings of the International RILEM Symposium*, 1994, pp.137~144.
6. Thielen, G. and Hintzen, W., "Investigation of Concrete Behaviour under Restraint with a Temperature-Stress Test Machine," *Proceedings of the International RILEM Symposium*, 1994, pp.145~152.
7. Schoppel, K., Plannerer, M., and Springenschmid, R., "Determination of Restraint Stresses and of Material Properties during Hydration of Concrete with the Temperature-Stress Testing Machine," *Proceedings of the International RILEM Symposium*, 1994, pp.153~160.
8. 日本コンクリート工學協會, "마스콘크리트의 온도應力研究委員會報告書", 1985. 11, pp.5~9.
9. Yamakawa, H., Nakauchi, H., Kita, T., and Onuma, H., "A Study of the Coefficient of Thermal Expansion of Concrete," *Transaction of the Japan Concrete Institute*, Vol.8, 1986, pp.111~118.

요 약

매스콘크리트 구조물에서 발생하는 온도응력을 예측하기 위해 많은 연구가 해석적인 방법과 실험적인 방법을 통해 수행되어왔다. 그러나 이러한 해석적인 방법과 실험적인 방법으로 온도응력을 예측하는 것은 한계가 있다. 해석적인 방법은 콘크리트의 탄성계수, 열팽창계수와 같은 물성치를 정확히 알아야 한다. 그리고 실험적인 방법은 대부분이 실제 구조물이나 모형 구조물을 통하여 직접 온도응력을 측정한다. 그러나 이와 같은 방법은 경제적인 문제뿐만 아니라 현장의 불확실한 조건들을 감수해야 한다.

본 연구에서는 온도응력을 실내에서 직접적으로 측정할 수 있는 시험장치를 개발하였다. 개발된 온도응력 시험장치는 콘크리트와 다른 열팽창계수를 갖는 재료를 이용하여 실제 구조물에서 발생할 수 있는 콘크리트의 내/외부 구속에 의한 온도응력의 변화를 구현할 수 있으며, 이를 정량적으로 예측할 수 있다. 실험은 해석을 통해 얻은 온도응력을 구현할 수 있는 항온습습조에서 수행하였고, 온도응력은 장비에 부착된 변형률계이지를 통해 얻은 변형률을 이용하여 계산하였다.

개발된 장비의 검증에 위해 매립계이지를 이용하여 온도응력을 측정하는 실험을 동시에 수행하였고, 이 결과에 의하면 개발된 시험장치는 불확실한 콘크리트의 초기재령 물성치를 고려하여 보다 정확하게 온도응력을 측정할 수 있으며, 검증실험 결과에 의해 그 객관성과 타당성을 입증할 수 있었다.

핵심용어 : 온도응력, 탄성계수, 열팽창계수, 내/외부 구속
