

# 전기저항식 변형률 게이지를 이용한 콘크리트의 열팽창계수 측정법

## Coefficient of Thermal Expansion Measurement of Concrete using Electrical Resistance Strain Gauge

남정희 Nam, Jeong-Hee | 정회원 · 한국건설기술연구원 SOC연구소 도로포장연구실 연구위원 · 교신저자 (E-mail : archnam@kict.re.kr)  
안덕순 An, Deok-Soon | 정회원 · 한국건설기술연구원 SOC연구소 도로포장연구실 수석연구원 (E-mail : dsan@kict.re.kr)  
김연복 Kim, Yeon-Bok | 정회원 · 한국건설기술연구원 SOC연구소 도로포장연구실 선임연구위원 (E-mail : ybkim@kict.re.kr)

### ABSTRACT

**PURPOSES :** The purpose of this study is to provide the method of how to measure the coefficient of thermal expansion of concrete using temperature compensation principle of electrical resistance strain gauge.

**METHODS :** The gauge factor compensation method and thermal output(temperature-induced apparent strain) correction method of self-temperature compensation gauge were investigated. From the literature review, coefficient of thermal expansion measurement method based on the thermal output differential comparison between reference material(invar) and unknown material(concrete) was suggested.

**RESULTS :** Thermal output is caused by two reasons; first the electrical resistivity of the grid conductor is changed by temperature variation and the second contribution is due to the differential thermal expansion between gauge and the test material. Invar was selected as a reference material and its coefficient of thermal expansion was measured as  $2.12 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$  by KS M ISO 11359-2. The reliability of the suggested measurement method was evaluated by the thermal output measurement of invar and mild steel. Finally coefficient of thermal expansion of concrete material for pavement was successfully measured as  $15.45 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ .

**CONCLUSIONS :** The coefficient of thermal expansion measurement method using thermal output differential between invar and unknown concrete material was evaluated by theoretical and experimental aspects. Based on the test results, the proposed method is considered to be reasonable to apply for coefficient of thermal expansion measurement.

### Keywords

*coefficient of thermal expansion(CTE), strain gauge, temperature compensation, thermal output(T/O), concrete pavement*

Corresponding Author : Nam, Jeong-Hee, Research fellow  
Highway pavement research division, SOC research Institute,  
Korea Institute of Construction Technology,  
283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea  
Tel : +82.31.910.0190 E-mail : archnam@kict.re.kr

International Journal of Highway Engineering  
<http://www.ijhe.or.kr/>  
ISSN 1738-7159 (Print)  
ISSN 2287-3678 (Online)

## 1. 서론

아스팔트 포장에 비해 상대적 강성이 높아 중차량 이용 도로 혹은 고속국도에 많이 사용되고 있는 콘크리트 포장의 경우, 국내 고속국도 형식의 약 65% 이상을 차

지하고 있다. 특히, 국내에서 많이 시공되는 콘크리트 포장 형식인 무근 콘크리트 줄눈포장(JPCP, Jointed Plain Concrete Pavement)의 경우는 교통하중 뿐만 아니라 환경하중에 의한 영향을 많이 받는 대표적인 구

조 형식이다. 국내의 경우 사계절의 변화가 뚜렷하고, 최근 들어  $-10^{\circ}\text{C}$  미만의 혹한기 및  $30^{\circ}\text{C}$  이상의 혹서기 빈도가 높아짐에 따라 혹한기 동결손상 및 혹서기 Blow-up 손상 등 온도하중에 의한 콘크리트 포장 파손이 증가되고 있다(김찬우, 2013). 이러한 온도하중에 의한 콘크리트 응력을 최소화하기 위해서는 콘크리트 재료의 선택 시 열팽창계수가 낮은 재료를 사용하는 것이 무엇보다 중요하나 현 시방체계에서는 특별한 규정을 제시하고 있지는 않다(국토해양부, 2009).

콘크리트는 상온의 온도범위 내에서 다른 일반 건설 재료와 마찬가지로 온도변화에 일정한 비율로 변화하는 상수인 열팽창계수(CTE, Coefficient of Thermal Expansion)를 가진다. 특히, 콘크리트 포장의 온도하중에 의한 체적변화로 발생하는 응력 예측 및 상·하부 온도차에 의한 컬링(curling) 거동의 예측을 위해서는 열팽창계수의 정확한 측정 및 이해가 필요하다.

일반적으로 국내 규정을 적용하여 열팽창계수를 측정하는 방법에는 ‘건축재료의 선팽창률 측정 방법 (KS F 2608)’ 및 ‘선열팽창계수와 유리 전이 온도의 측정 (KS M ISO 11359-2)’ 방법 등이 있다. 그러나 KS F 2608의 경우 온도 상승 시 콘크리트의 건조수축 변형에 대한 미고려 문제점이 있으며, KS M ISO 11359-2의 경우도 역시 건조수축에 대한 미고려 및 시편의 크기가 제한되어 있어 콘크리트 시편에 적용하기에는 한계가 있다. 국외 규정으로는 대표적으로 ‘Coefficient of Thermal Expansion of Hydraulic Cement Concrete (AASHTO T 336-11)’ 방법이 있으나, 특징 지그(jig) 제작의 어려움 및 LVDT를 포함한 지그의 온도보정이 필요한 번거로움이 있어, 보다 간편하면서도 정밀한 방법으로 콘크리트 포장 재료의 열팽창계수를 측정하는 방법의 제시가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 일반적으로 변형률 측정에 가장 많이 쓰이고 있는 전기저항식 변형률 게이지(electrical resistance strain gauge)의 온도보정 원리(temperature compensation principle)를 이용하여 열팽창계수를 측정하는 방법을 이론적으로 고찰하고 이를 실험적으로 증명하고자 한다.

## 2. 전기저항식 변형률 게이지의 온도보정 원리를 이용한 열팽창계수 측정

일반적으로 전기저항식 변형률 게이지의 이용 목적은 역학적인 하중에 의한 시편의 변형을 측정하는데 있다.

이상적으로는 시편에 부착된 게이지의 전기저항(electrical resistance)은 적용하중에 의한 스트레스에 의해서만 반응하고 그 이외의 환경적인 변수에 영향을 받지 않아야 한다. 그러나 다른 모든 센서와 마찬가지로 전기저항식 변형률 게이지도 완벽하지 않아 게이지의 전기저항은 외력에 의한 변형 뿐만 아니라 온도의 변화에 영향을 받는다(Finke 등, 1978). 이러한 온도에 의한 변형을 올바르게 이해하지 못하고 보정하지 않으면 실험결과의 분석에서 상당히 큰 오류를 범할 수 있다. 특히, 콘크리트 포장 같이 온도하중의 영향을 많이 받는 구조물의 온도해석을 위한 계측 시에는 많은 주의를 요하고 있다. 전기저항식 변형률 게이지의 온도 보정에 관련된 주요 인자인 게이지 상수(gage factor,  $F_G$ )와 Thermal Output (temperature-induced apparent strain)에 대한 이론적 고찰을 수행하고 이를 활용한 열팽창계수 측정방법을 정리하였다.

### 2.1. 게이지 상수 (gage factor, $F_G$ )의 보정

전기저항식 변형률 게이지는 측정하려는 대상에 밀접하게 부착되어 센싱부(metallic resistive foil)가 측정하려는 물체의 변형에 따라 늘어나고 줄어든다. 역학적인 인장이나 수축에 저항할 경우, 대부분 금속은 전기적 저항에 변화가 생기고 이같은 저항의 변화를 통해 변형률을 정밀하게 측정할 수 있다. 일반적으로 게이지의 센싱부는 구리-니켈 합금 혹은 니켈-크롬 합금으로 구성되어 있다. 이 합금은 변형에 비례하는 특정 상수(certain constant)를 가지고 있고 이를 게이지 상수(gage factor,  $F_G$ )로 Eq. (1)과 같이 표현한다(Kyowa Electronic Instruments, 2005).

$$\frac{\Delta R}{R} = F_G \cdot \varepsilon \quad (1)$$

- 여기서,  $R$  : original resistance of strain gauge,  $\Omega$
- $\Delta R$  : elongation/contraction-initiated resistance change,  $\Omega$
- $F_G$  : gage factor
- $\varepsilon$  : strain

그러나 저항의 변화와 변형률 사이의 상관관계인 게이지 상수 자체도 온도의 영향을 받아 변한다. 이 영향은 2.2절에 설명되는 Thermal output에 의한 오차 요인보다는 작지만, 정확한 측정이 요구되거나 온도변화가 큰 경우에는 반드시 보정을 하여야 한다(주진원, 1992).

## 2.2. Thermal Output (T/O)의 보정

전기저항식 변형률 게이지가 설치되고 영점이 잡힌 이후의 온도변화는 게이지의 저항을 변화시킨다. 이같이 온도에 기인한 저항의 변화는 일반적인 역학적 변형률(mechanical strain or stress-induced strain)과 구분하여 thermal output (temperature-induced apparent strain or stress-independent strain, 이하 T/O)으로 정의한다. 온도가 변했을 때의 T/O은 크게 두 가지 이유 때문에 발생한다. 첫째로는 게이지의 저항률(electrical resistivity of the gauge)이 온도에 따라 변하고 그 결과로 게이지의 저항(gauge resistance)이 온도에 따라 변하기 때문이다. 둘째로는 게이지와 시편의 열팽창계수의 차이로 인해 발생된다. 온도가 변하면 시편이 팽창 및 수축을 하게 되고, 게이지 또한 시편과 완전 부착되었기 때문에, 게이지는 실험체와 동일하게 팽창 혹은 수축하게 된다. 이를 확장해 보면, 게이지는 시편의 자유로운 팽창 혹은 수축을 따라 가야 하기 때문에, 게이지와 시편의 열팽창계수가 다를 경우에는 게이지가 역학적으로 구속(mechanically strained)을 받게 되는 것과 동일한 환경에 놓인다. 게이지는 변형에 민감한 합금으로 만들었기 때문에, 게이지는 팽창의 차이에 비례하여 스트레스를 받게 되고 이는 저항의 변화로 나타난다(micro-measurements, 2012). 따라서 온도가  $\Delta T$ 일 때 게이지의 저항변화는 Eq. (2)로 표현할 수 있다.

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{T/O} = [\beta_G + F_G(\alpha_S - \alpha_G)]\Delta T \quad (2)$$

여기서,  $\beta_G$  : temp. coefficient of resistivity of the gauge

$\alpha_S$  : coefficient of thermal expansion of the specimen material

$\alpha_G$  : coefficient of thermal expansion of the gauge

$\Delta T$  : temperature change

여기서, Eq. (1)과 Eq. (2)를 이용하여 T/O에 의한 변형률은 Eq. (3)으로 표현할 수 있다.

$$\varepsilon_{T/O(G/S)} = \frac{(\Delta R/R)_{T/O}}{F_G} = \left[\frac{\beta_G}{F_G} + (\alpha_S - \alpha_G)\right]\Delta T \quad (3)$$

여기서,  $\varepsilon_{T/O(G/S)}$  : thermal output for gauge G on specimen material S

## 2.3. 열팽창계수 측정방법

전기저항식 변형률 게이지의 온도보정 원리를 이용하여 열팽창계수를 측정하는 방법은 동일한 게이지를 열팽창계수를 알고 있는 기준시편(reference material,  $\alpha_R$ )과 측정하고자 하는 시편(unknown material,  $\alpha_S$ )에 동일하게 부착한 후 T/O의 차이를 이용하여 구할 수 있으며, Eq. (3)을 이용하여 이를 Eq. (4a 와 4b)로 정리할 수 있다.

$$\varepsilon_{T/O(G/S)} = \left[\frac{\beta_G}{F_G} + (\alpha_S - \alpha_G)\right]\Delta T \quad (4a)$$

$$\varepsilon_{T/O(G/R)} = \left[\frac{\beta_G}{F_G} + (\alpha_R - \alpha_G)\right]\Delta T \quad (4b)$$

여기서,  $\varepsilon_{T/O(G/S)}$  : T/O for unknown material, S

$\varepsilon_{T/O(G/R)}$  : T/O for reference material, R

측정하려는 시편의 열팽창계수  $\alpha_S$ 를 계산하기 위하여 Eq. (4a)에서 Eq. (4b)를 빼면 Eq. (5)가 얻어지며, 이를 활용하면 콘크리트 시편의 열팽창계수를 비교적 정밀하게 계산할 수 있다(micro-measurements, 2010).

$$\alpha_S = \frac{(\varepsilon_{T/O(G/S)} - \varepsilon_{T/O(G/R)})}{\Delta T} + \alpha_R \quad (5)$$

## 3. 실험결과

### 3.1. 계측결과와 신뢰도 검증

전기저항식 변형률 게이지를 이용하여 열팽창계수를 측정하기 위해 변형률 게이지 자체의 열팽창계수 및 게이지 제작사에서 제공하는 시트(test data sheet)에 나타난 T/O 데이터의 실험조건을 사전에 명확히 확인하여야 한다. 본 실험의 경우 자체적으로 온도보정이 되는 자체온도보정 게이지(self-temperature compensation gauge)를 사용하였으며, Fig. 1과 같이 게이지의 열팽창계수는  $11.8 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ 이고 게이지 상수는 2.11이며, T/O을 측정하기 위해 게이지를 일반 steel (SS 400)에 부착하여 실험을 하였다고 데이터 시트에 제시되어 있다. 본 실험에서는 실험의 정밀도 및 오차요인을 줄이기 위해 1-gauge 4 wire 시

시스템을 사용하였으며, 이를 위한 전용 계측기(data logger)를 사용하였다. 1-gauge 4 wire 시스템의 경우 연장선(lead wire)의 길이와 굵기에 따른 전기저항 변화 및 온도변화에 따른 연장선의 온도보정 필요를 최소화 할 수 있는 장점이 있다.

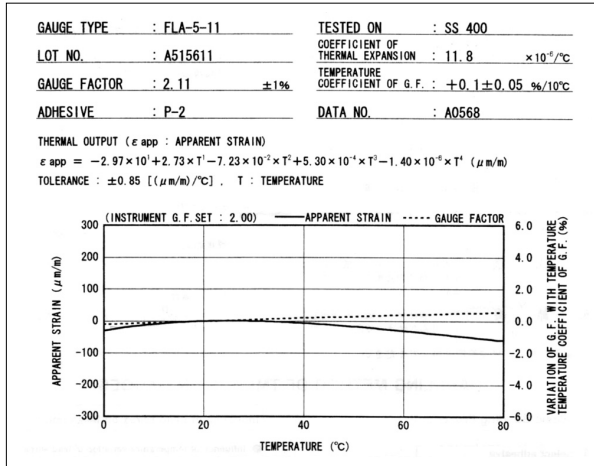


Fig. 1 Strain Gauge Test Data Sheet Sample by Tokyo Sokki Kenkyujo Co. Ltd.

게이지 제작사가 제공한 T/O 데이터의 신뢰성과 1-gauge 4 wire 시스템의 효과를 검증하기 위해 전기저항식 변형률 게이지를 일반 steel에 부착하여 10°C~50°C 온도범위에서 3번 반복해서 변형률을 계측하는 실험을 수행하였다. Fig. 2에서 보는 것과 같이 약 40°C도의 온도변화 구간동안 실제 계측 데이터와 게이지 제작사가 제공한 T/O 데이터가 유사한 비선형 거동을 하는 것을 볼 수가 있고 이를 통해 1-gauge 4 wire 시스템 및 전용 계측기(data logger)를 이용한 계측결과의 신뢰도를 확인할 수 있었다.

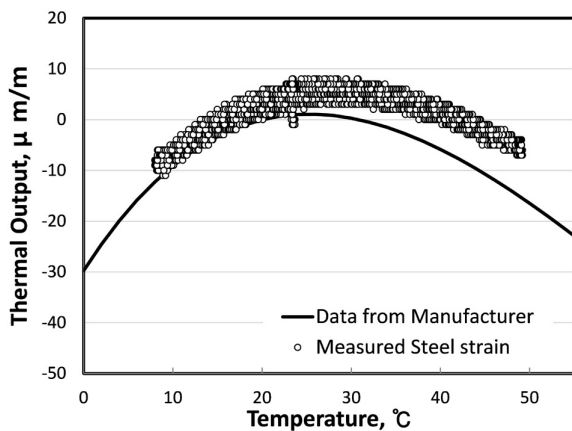


Fig. 2 Thermal Output Comparison between Data from Manufacturer and Measured Steel Strain Data

실제로 40°C 온도변화에 따른 전체 T/O의 변화도 약  $20 \times 10^{-6} \text{m/m}$  이내의 범위를 보이고 있어 자체 온도보정 게이지의 온도보정 효과도 추가로 확인할 수 있었다. 일반적인 하중에 의한 변형률의 범위가  $500 \sim 1,000 \times 10^{-6} \text{m/m}$ 임을 고려할 경우, T/O에 의한 온도보정 효과가 상당히 정밀한 것임을 알 수 있었다. 또한 계측된 T/O 및 제작사 제공 데이터 시트의 T/O 데이터가 유사함을 고려할 경우 본 실험에 사용된 일반 steel의 열팽창계수가 게이지의 열팽창계수( $11.8 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ )와 유사할 것으로도 추정할 수 있다.

### 3.2. 기준시편의 열팽창계수 측정

온도변화에 따른 변형률의 비율인 열팽창계수 측정을 위해 온도변화에 따른 변형이 상온에서 상대적으로 작은 인바(invar, 니켈 36% 함유 합금)를 기준시편으로 선택하였으며, 열팽창계수의 정밀한 측정을 위해 한국산업기술시험원에 실험 의뢰를 하였다. 한국산업기술시험원은 지식경제부 산하기관으로 부품 및 완성품에 대한 품질인증 및 제품설비에 대한 규격시험 및 평가를 실시하고 있는 기관이다. 시험은 'KS M ISO 11359-2 플라스틱-열기계 분석(TMA)-제 2부 : 선열 팽창계수와 유리 전이 온도의 측정'에 따라서 실시하였다. 인바의 경우는 니켈 합금으로 건조수축을 고려할 필요가 없으며, 균질성이 확보되어 시편 크기에 대해 크게 제약사항이 없는 장점이 있다.

시험장비는 TA instrument사의 Q 400 장비를 사용하였으며, 높이 10mm, 지름 10mm인 원형봉 시편을 사용하였다. 열팽창계수 실험은 0°C에서 70°C 범위 사이에서 분당 1°C씩 상승하는 조건에서 수행하였으며, 실험의 신뢰성을 확인하기 위하여 Table 1과 같은 온도조건에서 3번의 반복시험을 수행하였다. Fig. 3에서와 같이 인바는 제시된 실험 온도의 범위와 상관없이 온도변화에 따른 변형률 비가 일정한 값을 나타내고 있으며, 평균값을 통해 최종적으로  $2.12 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ 의 열팽창계수를 얻었다.

Table 1. Coefficient of Thermal Expansion of Invar

Trial	Temp. Range, °C	CTE, $\mu \text{m/m/}^\circ\text{C}$
Test 1	0 ~ 60	1.90
Test 2	0 ~ 60	2.30
Test 3	30 ~ 70	2.16
Average		2.12

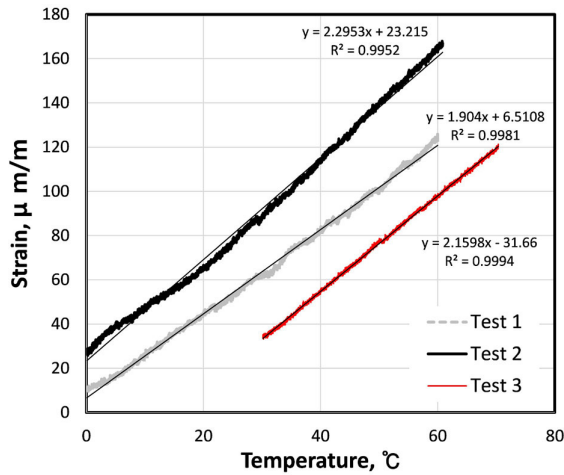


Fig. 3 Coefficient of Thermal Expansion Test Results of Reference Material (Invar)

### 3.3. 게이지 상수(gauge factor, $F_G$ )의 고려

전기저항식 변형률 게이지에 사용되는 합금은 일반적으로 온도변화에 따라 게이지 상수 ( $F_G$ )가 변하므로 정밀한 측정 혹은 온도 변화폭이 큰 실험의 경우에는 반드시 온도보정을 해야 한다. 본 실험에서 사용한 게이지의 경우 상온 20°C를 기준으로 게이지 상수( $F_G$ )가  $2.11 \pm 1\%$ 로 제시되어 있으며 0°C~80°C 범위의 온도변화에 따른 게이지 상수의 변화율(temperature coefficient of gauge factor)은  $0.1 \pm 0.05\%/10^\circ\text{C}$ 로 상당히 안정적인 것으로 평가할 수 있다. 실제 본 실험에서 적용된 온도 범위인 10°C~50°C 범위에서 게이지 상수의 변화율을 적용해서 변형률을 측정했을 경우와 그렇지 않은 경우의 결과를 비교했을 경우 오차는 약 0.1%의 범위 내에서 발생하였기 때문에 온도의 영향에 따른 게이지 상수의 보정은 본 실험 결과의 계산과정에서 생략하였다.

### 3.4. 열팽창계수 측정 Process 검증

전기저항식 변형률 게이지의 T/O를 이용한 열팽창계수 측정을 위해 제시한 Eq. (5)의 타당성 여부를 검증하기 위해 실제 기준 시편인 인바를 이용하여 3.1절의 계측신뢰도 검증에 사용된 일반 steel의 열팽창계수를 계산해 보았다.

Fig. 4과 같이 인바와 일반 steel의 T/O 측정을 위해 120Ω-1-gauge 4 wire를 시편 중앙부에 각각 2개씩 부착하였으며 온도측정을 위한 Thermocouple을 추가로 변형률 게이지 옆에 설치하였다. 방수를 위해 W-1 coating재 및 SB-tape를 이용하여 완전방수처리를 시킨 후 시편을 수조에 수침하였다. 열팽창계수 측정을 위

해 -10°C~60°C 범위까지 PID 제어가 가능한 수조를 사용하였으며, 실제 실험은 10°C~50°C 범위에서 실시하였다. 시편 중심부 온도의 안정화를 위해 온도상승 및 하강 시 비율은 약 10°C/hr로 설정하였으며, Fig. 5에서와 같이 총 3회의 사이클링 실험을 3회 반복 실시하였다. 계측기(data logger)를 통해 분당 1개의 데이터를 계측하였으며, 3번 반복실험 결과 데이터의 경향은 거의 일치하였다. 최종 계산과정에서는 시편 거동의 안정화가 확인된 2번째 사이클 데이터의 평균값을 사용하였다.



Fig. 4 Gauges Installation to Invar and Mild Steel

Fig. 5에서 보는 바와 같이 게이지와 열팽창계수 ( $11.8 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ )가 유사한 일반 steel의 경우는 온도변화에 따라 실제 T/O의 변화가 거의 없으나 열팽창계수가  $2.12 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ 인 인바의 경우 온도거동과 상반되는 T/O 거동을 보이고 있다. 즉, 온도가 증가하면 인바의 변형은 줄어들고, 온도가 감소하면 인바의 변형은 늘어나는 비정상적인 겉보기 변형률(apparent

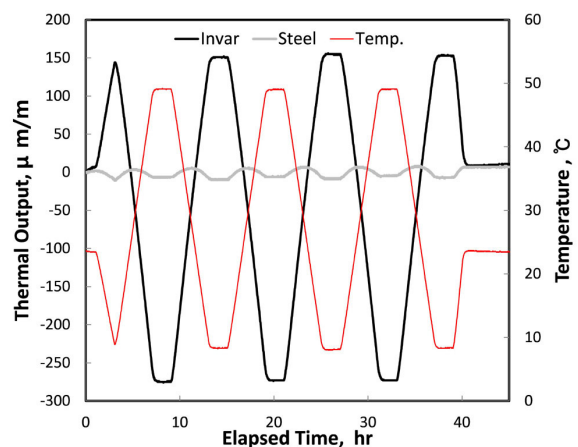


Fig. 5 Thermal Outputs with Temperature Variation (invar & steel)



strain)을 보이는 것이다. 이와 같이 보정전 데이터 (raw data)만을 가지고 실제 온도응력 해석을 한다면 실제 거동과 전혀 상관없는 논리적 오류를 범하게 되는 실수를 하게 되는 것이므로 해석 시 주의해야 한다.

Eq. (5)를 활용하여 일반 steel의 열팽창계수를 구하기 위해 기준시편(invar)의 열팽창계수  $\alpha_R$  및  $\epsilon_{T/O(G/R)}$ 와 일반 steel의  $\epsilon_{T/O(G/S)}$ 를 계측하였으며 이를 Eq. (5)에 적용하여 정리하면 Table 2와 같다. 시편의 거동이 안정화된 2번째 사이클에서 온도가 상승하는 구간(10°C~50°C)과 하강하는 구간(50°C~10°C)에 대해 Table 2에서와 같이 데이터를 계측할 수 있었으며 이를 근거로 열팽창계수를 계산하여 평균  $12.43 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ 을 얻었다. 이는 일반 steel의 열팽창계수 추정치인  $11.8 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ 과 약 5% 범위 내의 오차범위에 해당하며, 본 실험결과를 통해 제시된 Eq. (5)의 타당성을 확인할 수 있었다.

Table 2. Calculation of CTE using Temperature Correction Principle of Electrical Resistance Strain Gauge (Steel)

Elapsed time, hr	T/O, $\mu \text{ m/m}$ (Raw data)		Temp. $^\circ\text{C}$	T/O, $\mu \text{ m/m}$ (Delta)		Temp. $^\circ\text{C}$ ( $\Delta$ )	CTE, $\mu \text{ m/m/}^\circ\text{C}$
	Invar	Steel		Invar	Steel		
14.5	151	-9	8.3				
19	-249	-5	47.5	-400	4	39.2	12.43
20	-273	-6	49				
25	138	-6	9.7	411	0	-39.3	12.42
Average							<b>12.43</b>

### 3.5. 콘크리트 재료의 열팽창계수 측정

Eq. (5)를 사용하여 콘크리트 재료의 열팽창계수를 측정하기 위해 A사에서 제공한 도로포장용 콘크리트 시편 3개를 대상으로 실험을 실시하였다. 콘크리트 시편의 안정화를 위해 실험 72시간 전에 시편을 수조에 수침시켜 충분한 내부 포화도를 확보하였다. 실험은 3.4절에서 제시한 방법과 동일하게 실험 셋팅을 하였으며, 실제 실험 시 수조의 온도 사이클링에서 약간의 차이는 발생하였으나, 전반적으로는 동일한 절차로 실험을 진행하였다. Fig. 6에서와 같이 각 시편별로 2개씩 콘크리트 변형률 게이지를 시편 중심부에 설치하였으며, 3개의 시편 모두 온도변화에 따라 변형률의 변화는 Fig. 7과 같이 유사하게 나타났으며 이를 통해 측정결과의 신뢰도를 확인하였다. Fig. 5과 Fig. 7을 비교하였을 경우 인바와 일반 steel의 경우는 온도 사이클의 반복에 따라 실제 사이클 별 거동의 차이가 거의 발생되지 않으나, 콘크리트 시편

의 경우 이와는 다르게 사이클이 진행됨에 따라 전반적인 변형 형상은 유사하나 변형의 크기가 약간 증가되는 경향을 보이고 있다. 이는 대표적인 다공재료(porous material)인 콘크리트 시편이 사전 수침을 통해 충분한 내부 포화도 확보에도 불구하고 온도 사이클이 반복되면서 포화도가 높아져 팽창된 결과로 보여진다.



Fig. 6 Gauges Installation to Concrete Specimens (sample)

Eq. (5)를 활용하여 콘크리트 시편의 열팽창계수를 구하기 위해 기준시편(invar)의 열팽창계수  $\alpha_R$  및  $\epsilon_{T/O(G/R)}$ 와 콘크리트 시편의  $\epsilon_{T/O(G/S)}$ 를 계측하였으며 이를 Eq. (5)에 적용하여 정리하면 Table 3과 같다. 시편의 거동이 안정화된 2번째 사이클에서 온도가 상승 및 하강하는 구간에 대해 Table 3에서와 같이 데이터를 계측할 수 있었으며 이를 근거로 열팽창계수를 계산하여 평균  $15.45 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ 를 얻었다. 이는 일반적인 콘크리트 포장 재료의 열팽창계수가  $10 \sim 15 \mu\text{m/m/}^\circ\text{C}$ 범위임을 고려할 경우 타당한 값으로 추정할 수 있다.

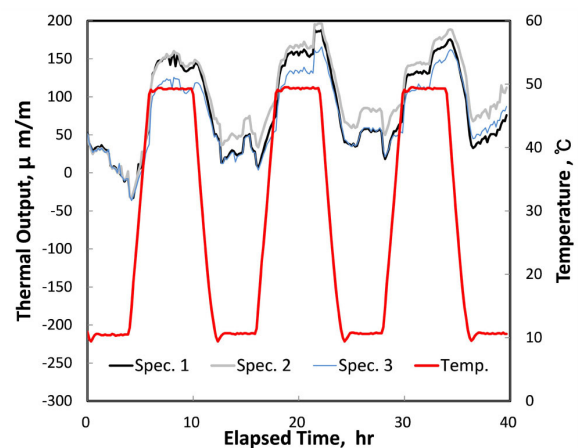


Fig. 7 Thermal Outputs with Temperature Variation (concrete)

Table 3. Calculation of CTE using Temperature Correction Principle of Electrical Resistance Strain Gauge (Concrete)

Elapsed time, hr	T/O, $\mu$ m/m (Raw data)		Temp. $^{\circ}$ C	T/O, $\mu$ m/m (Delta)		Temp $^{\circ}$ C ( $\Delta$ )	CTE, $\mu$ m/m/ $^{\circ}$ C
	Invar	Conc		Invar	Conc		
14-15	151	26	8.3				
18-19	-249	134	47.5	-400	108	39.2	15.08
20-21.5	-273	159	49				
24-25	138	31.5	9.7	411	-127.5	-39.3	15.82
Average							<b>15.45</b>

#### 4. 고찰 및 토론

환경하중 특히, 온도하중에 의한 영향을 최소화하기 위해 중요한 인자인 콘크리트 재료의 열팽창계수를 전기저항식 변형률 게이지를 이용하여 측정하였다. 일반적인 역학적 변형률과 구분하여 온도에 의해 발생하는 thermal output(T/O)을 이용하여 이미 알고 있는 기준시편과 열팽창계수를 측정하고자하는 콘크리트 시편을 동일한 환경조건에서 실험한 후 T/O을 비교하여 콘크리트 시편의 열팽창계수를 구하는 방법을 이론적으로 검토하였다.

자체온도 보정게이지(self-temperature compensation gauge)를 이용하여 변형률을 측정하기 위해서는 반드시 게이지 상수 및 T/O에 대한 온도보정을 해야 한다. 온도하중의 변화 폭이 클 경우에는 게이지 상수의 보정 또한 수행하여야 하나 일반적인 경우에는 T/O에 대한 보정만으로 올바른 해석을 하는 데는 큰 무리가 없었다. 그러나 영하의 온도 범위나 상온에서도 게이지 상수의 비선형성이 큰 게이지의 경우에는 게이지 상수에 대한 온도보정이 꼭 필요하다.

게이지 제작사에서 제공하는 T/O 정보는 게이지 제작사에서 제시한 시편과 동일한 시편에 게이지를 부착하였을 경우에만 적용 가능하고, 다른 시편에 게이지를 부착하였을 경우에는 적용되지 않으므로 추가적인 온도보정을 수행해야 한다. 또한 게이지 제작사가 제시한 것과 같은 동일한 시편에 게이지를 부착하였을 경우에도 3.4 절의 일반 steel의 T/O 자료에서와 같이 온도변화에 따른 변형이 거의 없는 겉보기 변형(apparent strain)을 발견할 수 있다. 이 의미는 온도변화에 의한 추가적인 변형 효과를 자체온도보정 게이지가 상쇄시켰다는 의미로 외력에 의한 역학적 변형률만을 정밀하게 측정할 조건이 완비되었다는 뜻으로 해석할 수 있다. 따라서 오히

려 온도하중에 의한 변형을 측정하기 위해서는 별도의 온도보정 절차를 추가로 거쳐야 한다.

전기저항식 변형률 게이지를 이용할 경우 게이지 연장선 길이 및 온도하중에 의한 노출 정도에 따라 실제 측정에 많은 오차요인을 발생시킬 수 있다. 따라서 게이지 연장선에 대한 길이 및 온도에 의한 보정 혹은 1-gauge 4 wire 시스템을 사용할 것을 권장한다.

콘크리트 시편의 열팽창계수를 측정하기 위해 기준시편은 열팽창계수를 명확히 알고 있는 시편이면 어떤 것이든 가능하나 가능하면 열팽창계수가 낮은 것을 사용하는 것을 권장하며, 기준시편과 동일한 온도하중 범위에서 콘크리트 시편의 T/O을 측정한다면 제시된 Eq. (5)를 적용하여 간편하게 시험대상의 열팽창계수를 측정할 수 있을 것이다.

#### 5. 결론

온도하중에 의한 콘크리트 포장 거동 측면에서 중요한 입력변수인 콘크리트 재료의 열팽창계수를 측정하기 위해 기존의 LVDT를 이용한 방법 대신 전기저항식 변형률 게이지의 온도보정 원리를 이용하여 열팽창계수를 측정하는 방법을 다음과 같이 이론적으로 고찰하고 이를 실험적으로 증명하였다.

1. 전기저항식 변형률 게이지는 온도가 변함에 따라 게이지 상수( $F_G$ )가 변하고 T/O에 대한 보정을 실시하여야 한다. 특히, T/O은 온도변화에 따라 게이지 저항률이 변하고, 게이지와 시편의 열팽창계수의 차이 때문에 발생되므로 이를 반드시 보정해야 한다.
2. 저항의 변화와 변형률 사이의 상관관계인 게이지 상수( $F_G$ ) 자체도 온도의 영향을 받아 보정이 필요하나 본 실험에서 적용된 온도 범위인  $10^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$  범위에서는 온도보정 유·무에 따른 오차가 약 0.1% 범위 내에서 발생하였기 때문에 보정과정을 생략할 수 있었다.
3. T/O의 경우 온도변화에 따른 변형률 변화를 자체 보정하기 위해 개발되었으나, 게이지 제작사가 제시하는 시편에 해당 게이지를 부착하였을 경우에만 제작사에서 제공하는 T/O 데이터를 이용할 수 있다. 실제 게이지와 시편의 열팽창계수가 유사할 경우에는  $40^{\circ}\text{C}$  온도변화에 따른 계측 T/O은 약  $20 \times 10^{-6} \text{m/m}$  이내로 발생되어 자체 온도보정 게이지의 온도보정

효과를 확인할 수 있었다.

4. 기준시편으로 열팽창계수가 낮은 인바(invar)를 선택하였으며 KS M ISO 11359-2에 따라 실험을 의뢰하여  $2.12 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ 의 열팽창계수를 얻을 수 있었다.
5. 기준시편과 측정하려는 시편의 T/O 차이를 이용하여 열팽창계수를 계산할 수 있는 Eq. (5)를 이용하여 일반 steel의 열팽창계수  $12.43 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ 을 얻었으며 이는 일반 steel의 열팽창계수 추정치인  $11.8 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ 과 비교하면 약 5% 오차범위 내에 해당하며, 이를 통해 제시된 Eq. (5)의 타당성을 확인할 수 있었다.
6. 제시된 Eq. (5)를 이용하여 콘크리트 포장 재료의 열팽창계수로  $15.45 \times 10^{-6} \text{m/m/}^\circ\text{C}$ 를 전기저항식 변형률 게이지의 T/O를 이용하여 측정하였으며 이는 일반적인 콘크리트 포장 재료의 열팽창계수가  $10 \sim 15 \mu \text{m/m/}^\circ\text{C}$ 범위임을 고려할 경우 타당한 값으로 추정할 수 있다.
7. 최종적으로 전기저항식 변형률 게이지를 이용하여 기준시편(invar)과 콘크리트 시편의 T/O 차이를 이용하여 콘크리트 시편의 열팽창계수를 측정하는 방식은 타당한 것으로 판단된다.

향후에는 제시한 전기저항식 변형률 게이지의 T/O를 이용한 열팽창계수 측정법을 지그(jig)와 LVDT를 이용한 AASHTO T 336-11 방법 및 콘크리트 시편 내부에 vibrating wire gauge (VWG) 장착을 통해 측정된 결과와 비교·검토를 통해 방법론의 신뢰도를 재확인하고자 한다.

## 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업(2013- 0101-1-1) 재원으로 수행되었습니다.

## References

- AASHTO T 336-11 (2011). *Coefficient of thermal expansion of hydraulic cement concrete*. America Association of State and Highway Transportation Officials.
- Finke, T.E., & Heberling, T.G. (1978). Determination of thermal-expansion characteristics of metals using strain gages. *Experimental Mechanics*, 155-158.
- Ju, J. W. (1992). Temperature characteristics of strain gauge in the extreme low temperature condition. *The Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol 32-6, 514-523.
- Kim, C. W. (2013). Improvement of concrete pavement technology in Korea. Conference material of concrete pavement technical committee. *The Korean Society of Road Engineers*.
- KS F 2608 (2011). *Measuring method of linear thermal expansion for building materials*. Korean Industrial Standards.
- KS M ISO 11359-2 (2002). *Plastics-thermo mechanical analysis(TMA)-Part 2: Determination of coefficient of linear thermal expansion and glass transition temperature*. Korean Industrial Standards.
- Kyowa Electronic Instruments (2005). *What's a strain gage*. KYOWA Electronic Instruments Co., LTD.
- Micro-measurements (2010). Measurement of thermal expansion coefficient using strain gages. *Tech Note TN-513-1*. Vishay Precision Group, 119-129
- Micro-measurements (2012). Strain gage thermal output and gage factor variation with temperature. *Tech Note TN-504-1*. Vishay Precision Group, 35-47
- MLTM (2009). *Standard specification of road construction 2009*. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs
- (Received : Aug. 30 2013, Revised : Sep. 2 2013, Accepted : Oct. 8 2013)