

論文

GRP 복합관의 열팽창계수 측정

오진오*, 윤성호**+

Measurements of Thermal Expansion Coefficients in GRP Pipe

Jin-Oh Oh*, Sung-Ho Yoon**+

ABSTRACT

This study was focused on the measurement of thermal expansion coefficients for GRP pipe through strain gage circuits. First of all, thermal expansion coefficients of aluminum beam were measured to examine the validity of the suggested method by using various types of strain gage circuits. Thermal expansion coefficients of GRP pipes along axial and hoop directions were measured to investigate the effect of the location of strain gages, number of repeated measurements, and strain gage types with different thermal expansion coefficients on the thermal strains and the repeatability of measured results. According to the results, thermal expansion coefficients of GRP pipes along hoop direction were lower than those along axial direction due to the constraint effect of reinforced glass fibers on thermal strains along hoop direction. As measurements were repeated, thermal expansion coefficients of GRP pipes were slightly increased, but the degree of increase became smaller. Finally, the same thermal expansion coefficients were obtained irrespective of different types of strain gages with different thermal expansion coefficients if thermal strains of strain gages were compensated by using reference compensation specimen.

초 록

본 연구에서는 스트레인게이지 회로를 이용하여 GRP 복합관의 열팽창계수를 측정하고자 하였다. 이를 위해 다양한 스트레인게이지 회로를 적용하여 알루미늄 보의 열팽창계수를 측정함으로써 측정방법의 타당성을 검증하였다. 또한 스트레인게이지의 부착위치와 반복횟수를 달리하며 또한 열팽창계수가 다른 스트레인게이지를 적용한 경우에 대해 GRP 복합관의 길이방향 및 원주방향 열팽창계수를 측정함으로써 열변형률 결과와 측정결과의 재현성에 미치는 영향을 조사하였다. 연구결과에 따르면 GRP 복합관의 경우 보강된 유리섬유에 의해 원주방향의 열변형률이 제한되어 원주방향 열팽창계수가 길이방향의 열팽창계수에 비해 낮게 나타났다. 또한 GRP 복합관의 후경화로 인해 측정횟수가 증가할수록 측정된 열팽창계수는 다소 증가하지만 증가폭은 점차 감소하였다. 아울러 열팽창계수가 다른 스트레인게이지를 적용하더라도 기준보상시편을 통해 스트레인게이지의 열변형률을 보상하면 동일한 열팽창계수가 얻어짐을 알 수 있었다.

Key Words : GRP 복합관(GRP pipe), 열팽창계수(thermal expansion coefficient), 스트레인게이지 회로(strain gage circuits)

1. 서 론

모래가 배합된 수지에 단섬유 형태의 유리섬유를 함침시켜 제작한 GRP 복합관은 기존의 주철관, 강관, 시멘트관 등

2011년 12월 19일, 수정: 2012년 2월 6일, 게재승인: 2012년 2월 6일

* 금오공과대학교 기계공학과 대학원

**+ 금오공과대학교 기계공학과, 교신저자(E-mail:shyoon@kumoh.ac.kr)

에 비해 열전도도가 낮고 내부식성이 우수하여 많은 관심을 받고 있으며 최근에는 수 km 이상의 긴 거리에 GRP 복합관을 시공하려는 시도도 행해지고 있다. 이러한 경우 온도 변화에 의한 GRP 복합관의 팽창과 수축 등이 주요 설계인자로서 온도에 의한 길이 변화 영향을 최소화하기 위해 팽창루프와 팽창조인트 등의 부가장치를 적용한다. 이때 부가장치의 최적 위치와 개수를 결정하기 위해서는 GRP 복합관의 길이방향 및 원주방향 열팽창계수의 정보가 필수적이다.

일반적으로 열팽창계수를 측정하기 위해서는 팽창계를 이용하는 방법[1-3], 영상을 이용하는 방법[4], 스트레인게이지를 이용하는 방법[5] 등이 제시되어 있다. 스트레인게이지를 이용하는 방법은 다른 방법들에 비해 정량적인 측정과 다양한 재료에의 적용이 가능하다는 장점을 가지고 있다[6,7]. Goo 등[8]과 Kim 등[9]은 스트레인게이지를 이용하여 자유조건과 구속조건을 받는 알루미늄 보의 열팽창계수와 일방향 탄소섬유/에폭시 복합재의 섬유방향 및 섬유 횡방향 열팽창계수를 측정하였다. 이들은 일방향 탄소섬유/에폭시 복합재의 경우 섬유 횡방향 열팽창계수는 섬유방향 열팽창계수에 비해 20배 정도 크다고 하였다. Park 등[10]은 게이지 길이가 다른 스트레인게이지들을 이용하여 화강암의 입자크기에 따른 열팽창계수를 측정하였다. 이들은 스트레인게이지의 온도보정을 위해서는 표준물질을 이용한 방법이 열특성 표준식을 이용한 방법에 비해 정확하다고 하였다.

본 연구에서는 스트레인게이지를 이용하여 GRP 복합관의 길이방향 및 원주방향 열팽창계수의 측정방법을 제시하였다. 이를 위해 Full 브리지, Half 브리지, Quarter 브리지 등의 스트레인게이지 회로를 적용하여 알루미늄(AL6061-T6) 보 시편의 열팽창계수를 측정하고 측정방법의 타당성을 검증하였다. 또한 GRP 복합관의 길이방향 및 원주방향 열팽창계수를 Quarter 브리지 스트레인게이지 회로를 적용하여 측정하였다. 그리고 스트레인게이지의 측정위치와 반복횟수를 달리하여 GRP 복합관의 열팽창계수를 측정함으로써 측정위치의 영향과 측정결과에의 재현성도 조사하였다. 아울러 열팽창계수가 다른 스트레인게이지를 이용하여 GRP 복합관의 길이방향과 원주방향 열팽창계수를 측정함으로써 열팽창계수가 다른 스트레인게이지를 통해 GRP 복합관의 열팽창계수를 정량적으로 평가할 수 있음을 보였다.

2. GRP 복합관의 제작

Fig. 1에는 내부 라이너층, 내부 강화층, 코아층, 외부 강화층, 외부 보호층으로 구성된 GRP 복합관의 적층구조가 나타나 있다. 이때 내부 및 외부 강화층은 일정 장력을 적용하여 폴리에스터 수지에 함침된 유리섬유를 원주방향으로 연속적으로 감은 형태로서 복합관에 작용되는 내부압력과 외부하중을 각각 지지한다. 코아층은 폴리에스터 수지에 함침된 단섬유 형태

의 유리섬유와 모래를 내부 강화층 위에 일정한 두께로 적층시켜 놓은 형태로서 복합관 두께의 대부분을 차지하여 복합관의 이차단면모멘트와 원강성을 높여 준다. 본 연구에서는 내경이 400mm, 압력등급이 16bar, 강성등급이 10000N/m²인 GRP 복합관을 고려하였다.

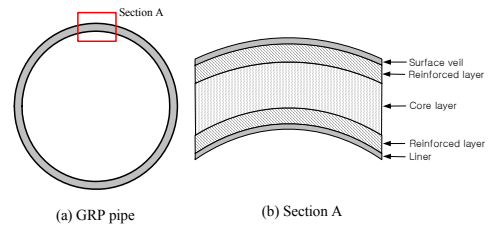


Fig. 1 Configuration of GRP pipe.

3. 이론적 배경

외부하중과 온도 변화를 동시에 받는 부재에 형성된 전체 변형률은 외부하중에 의한 변형률과 온도 변화에 의한 열변형률의 합으로 나타난다. 응력-변형률 관계는 Hook 법칙에 의해 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\sigma = E\epsilon^T = E(\epsilon^M + \epsilon^{th}) = E(\epsilon^M + \alpha\Delta T) \quad (1)$$

여기에서 E는 부재의 탄성계수, α 는 부재의 열팽창계수, ϵ^T 는 전체 변형률, ϵ^M 은 외부하중에 의한 변형률, ϵ^{th} 은 온도 변화에 의한 열변형률, ΔT 는 부재에 가해진 온도 변화이다.

일반적으로 온도 변화를 받는 부재의 경우 부착된 스트레인게이지를 이용하여 열변형률을 측정한다. 이때 측정된 열변형률은 부재의 열변형률 뿐 아니라 스트레인게이지와 리드선의 열변형률도 포함된다. 스트레인게이지의 열변형률은 그 리드 컨덕터와 측정시편과의 열팽창계수 차이에 의해 발생한다. 시편의 순수한 열변형률을 얻기 위해서는 기준보상시편을 이용하여 측정된 열변형률에서 스트레인게이지와 리드선의 열변형률을 제거할 수 있다. 온도 변화에 의한 스트레인게이지의 저항 변화는 식 (2)와 같이 나타난다.

$$\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right) = \left[\beta_G + F_G \left(\frac{1 + K_t}{1 - \nu_0 K_t}\right) (\alpha_s - \alpha_G)\right] \Delta T \quad (2)$$

여기에서 β_G 는 그리드 컨덕터의 열저항계수, F_G 는 스트레인게이지의 게이지상수, K_t 는 스트레인게이지의 횡방향 민감도, ν_0 는 표준시편의 포와송비이다[11,12].

시편의 순수한 열변형률을 평가하기 위해 열팽창률이 아주

낮은 기준보상시편을 이용하면 식 (3)에 의해 스트레인게이지의 열변형률을 제거할 수 있다.

$$\begin{aligned}\epsilon_S - \epsilon_R &= \alpha_S \Delta T - \alpha_R \Delta T \\ &= (\epsilon_{T/O(S)} - \epsilon_{T/O(R)}) \frac{1 - \nu_0 K_t}{1 + K_t} \frac{K_I}{K_G}\end{aligned}\quad (3)$$

여기에서 ϵ_S 와 ϵ_R 은 각각 시편과 기준보상시편에서의 열변형률이다.

4. 측정방법의 타당성 검증

Fig. 2에는 열팽창계수를 측정하기 위한 Full 브리지, Half 브리지, Quarter 브리지 등의 스트레인게이지 회로가 나타나 있다. 이때 동일한 길이의 리드선이 적용된 시편과 기준보상시편을 준비하여 챔버 안에 넣고 각 시편에서의 열팽창계수를 측정하였다. 특히 Quarter 브리지의 경우 시편과 기준보상시편에 각각 Quarter 브리지를 형성시켰으며 측정된 각 시편의 열변형률에서 기준보상시편의 열변형률을 제거하였다.

Fig. 3에는 측정방법의 타당성을 검증하기 위해 참조시편(AL6061-T6)에 대해 측정된 열변형률 결과가 나타나 있다. 이때 열변형률은 25~65°C의 온도 범위에서 측정하였다. 여기서 보면 Full 브리지, Half 브리지, Quarter 브리지를 통해 측정된 참조시편의 온도에 따른 열변형률 변화는 각각 $23.3 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$, $23.4 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$, $11.6 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$ 이다. 또한 Quarter 브리지를 통해 측정된 기준보상시편의 온도에 따른 열변형률 변화는 $-11.8 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$ 이다. 기준보상시편의 열변형률 변화를 이용하여 참조시편의 온도에 따른 열변형률 변화는 $23.4 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$ 로 나타났다. 모든 브리지에서 측정된 온도에 따른 열변형률 변화는 기존 문헌에 제시된 결과와 1% 이내의 오차 안에 있음을 알 수 있다. 특히 Quarter 브리지는 GRP 복합관과 같이 열전도도가 낮거나 챔버 내부 위치에 따라 온도 차이가 발생하는 경우에 유리하게 적용될 수 있다.

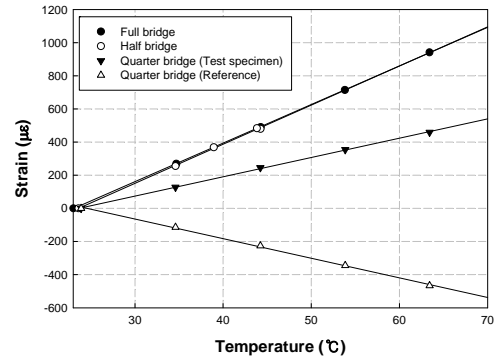
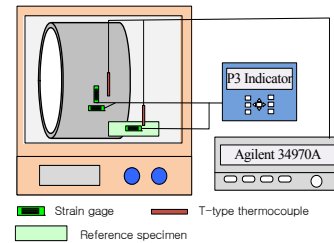
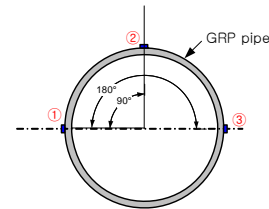


Fig. 3 Thermal strain results of AL6061-T6 specimen measured by various bridge connection methods.



(a) Overview of test set-up



(b) Strain gage locations

Fig. 4 Test set-up of thermal strain measurement for GRP pipe.

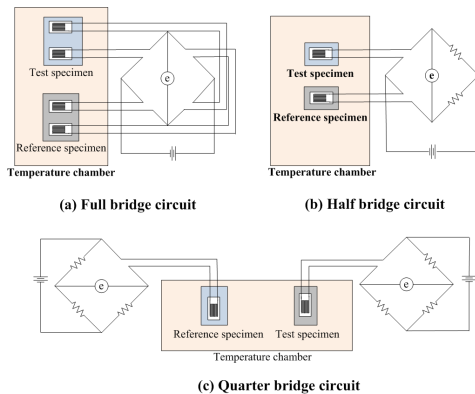


Fig. 2 Strain gage circuits for measuring thermal expansion coefficient.

5. GRP 복합관의 열팽창계수 측정

Fig. 4에는 GRP 복합관의 열팽창계수를 측정하기 위한 시험장치가 나타나 있다. GRP 복합관의 열변형률을 측정하기 위해 GRP 복합관 외면의 0°, 90°, 180° 지점에 이축 스트레인게이지(KFG-5-120-C1-11, Kyowa)를 원주방향과 길이방향으로 부착하였다. 스트레인게이지의 열변형률을 보상하기 위해서는 기준보상시편(Titanium Silicate Code7972, Vishay)을 적용하였다. 이때 온도 범위는 25~60°C를 고려하였으며 10°C 간격으로 열변형률을 측정하였다. 기준보상시편의 열팽창계수는 고려한 온도 범위에서 $0.03 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$ 의 낮은 값을 갖는다. GRP 복합관과 기준보상시편에서의 온도는 T-type 열전대를

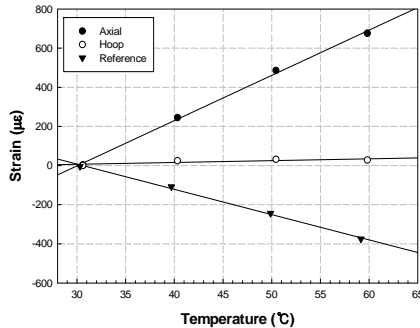


Fig. 5 Thermal strain results of GRP pipe by varying environmental temperatures.

이용하여 온도 안정화 구간에서 분당 1개씩 수집하였다.

Fig. 5에는 기준보상시편의 열변형률 및 GRP 복합관의 길이방향과 원주방향 열변형률이 나타나 있다. 여기에서 보면 기준보상시편의 열변형률은 $12.9 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$ 이고 GRP 복합관의 길이방향과 원주방향의 열변형률은 각각 $23.7 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$ 와 $-0.1 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$ 이다. 이와 같이 GRP 복합관의 원주방향 열변형률이 길이방향의 열변형률에 비해 매우 낮은 이유는 탄성계수가 높고 열팽창계수가 낮은 유리섬유가 원주방향을 따라 보강되어 온도 변화에 의한 열변형이 제한되기 때문으로 판단된다.

Table 1에는 GRP 복합관의 열팽창계수에 대한 재현성을 검증하기 위한 결과가 나타나 있다. 이때 스트레인게이지 부착용 접착제의 후경화 영향을 배제하기 위해 스트레인게이지 접착 후 60°C 에서 2시간 동안 경화시켰으며 열팽창계수는 3회 반복하여 측정하였다. 여기에서 보면 GRP 복합관의 폴리에스터 수지는 온도에 노출되면 후경화가 진행되어 열팽창계수가 증가하지만 반복회수에 따른 열팽창계수의 차이는 점차 줄어들음을 알 수 있다.

Table 2에는 측정위치에 따른 GRP 복합관의 열팽창계수가 나타나 있다. 여기에서 보면 GRP 복합관의 3곳에 부착된 스트레인게이지에서 측정된 길이방향과 원주방향의 열팽창계수는 각각 최대 $1.5 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$ 와 $1.3 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$ 정도 차이를 나타낸다. 이는 단섬유 형태의 유리섬유와 모래로 구성된 GRP 복합관의 경우 위치에 따라 유리섬유 배향과 분포가 달라질 수 있기 때문으로 판단된다.

Fig. 6에는 열팽창계수가 다른 스트레인게이지를 이용하여 측정한 GRP 복합관의 온도에 따른 열변형률 변화가 나타나 있다. 이때 스트레인게이지의 열팽창계수는 스틸용인 경우 $11.7 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$ 이고 알루미늄용인 경우 $23.4 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$ 이다. GRP 복합관의 열변형률은 GRP 복합관과 스트레인게이지와의 열팽창계수 차이 때문에 길이방향의 온도에 따른 열변형률 변화는 스틸용과 알루미늄용인 경우 $24.0 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$ 와 $11.7 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$, 원주방향의 온도에 따른 열변형률 변화는 스틸용과

Table 1 Thermal strain results of GRP pipe by the repeated measurements

		1st	2nd	3rd
Thermal strain for GRP pipe	Axial	22.6	23.7	24.0
	Hoop	-0.1	-0.1	0.0
Thermal strain for Reference specimen		12.7	12.9	13.3
Coefficient of thermal expansion	Axial	35.3	36.6	37.3
	Hoop	12.6	13.0	13.3

unit : $\times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$

Table 2 Thermal strain results of GRP pipe measured at various locations

		0°	90°	180°
Thermal strain for GRP pipe	Axial	22.6	20.5	22.6
	Hoop	-0.1	0.1	1.2
Thermal strain for reference specimen		12.7	13.3	12.7
Coefficient of thermal expansion	Axial	35.3	33.8	35.3
	Hoop	12.6	13.4	13.9

unit : $\times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$

알루미늄용인 경우 $-0.1 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$ 와 $-8.7 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$ 이다. 기준보상시편의 온도에 따른 열변형률 변화는 스틸용과 알루미늄용인 경우 $-13.3 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$ 와 $-24.0 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$ 이다. GRP 복합관에서의 측정결과를 기준보상시편의 측정결과로 보정하면 GRP 복합관의 길이방향과 원주방향 열팽창계수는 스틸용인 경우 $37.3 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$ 와 $13.2 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$, 알루미늄용인 경우 $35.7 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$ 와 $15.3 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$ 이다. 따라서 Quarter 브리지를 이용하여 열팽창계수를 측정하면 열팽창계수가 다른 스트레인게이지를 적용하더라도 GRP 복합관의 열팽창계수는 비교적 정확하게 측정할 수 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 스트레인게이지를 적용하여 GRP 복합관의 열팽창계수를 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) Quarter 브리지의 경우 기준보상시편을 이용하여 온도에 따른 열변형률 변화를 보정하면 스트레인게이지의 열변형률을 제거할 수 있기 때문에 측정시편의 열팽창계수를 정확하게 평가할 수 있었다.
- 2) GRP 복합관의 원주방향 열변형률은 탄성계수가 높고 열팽창계수가 낮은 유리섬유가 원주방향을 따라 보강되어 온도 변화에 의한 열변형이 억제되기 때문에 길이방향의 경우에 비해 낮게 나타났다.
- 3) GRP 복합관이 온도에 반복적으로 노출되면 폴리에스터 수지에 후경화가 진행되어 열팽창계수가 달라질 수 있지만 반복회수에 따른 열팽창계수의 차이는 점차 감소하였다. 또한 GRP 복합관의 위치에 따라 단섬유 형태의 유리섬유 배향과

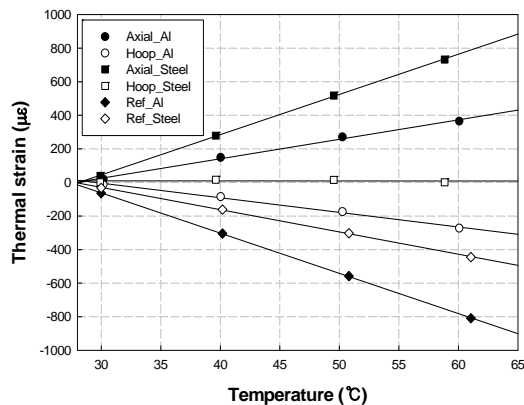


Fig. 6 Thermal strain results GRP pipe for two types of strain gage with different thermal expansion coefficient.

분포가 달라 스트레인게이지 부착 위치에 따라서도 열팽창계수의 차이는 발생하였다.

4) 열팽창계수가 다른 스트레인게이지를 적용하여 GRP 복합관의 열팽창계수를 측정하면 스트레인게이지의 열팽창계수 차이만큼 열변형률의 차이가 나타날 수 있지만 기준보상시편을 이용하여 스트레인게이지의 열변형률을 보상하면 동일한 GRP 복합관의 열팽창계수가 얻어짐을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 (주)코오롱인더스트리의 지원으로 수행되었으며 연구지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Deng, D.Q., and Xu, L., "Measurements of Thermal Expansion Coefficient of Phenolic Foam at Low Temperatures," *Journal of Crogenics*, Vol. 43, No. 8, 2003, pp. 465-468.
- 2) Mukhopadhyay, A.K., and Zollinger, D.G., "Development of Dilatometer Test Method to Measure Coefficient of Thermal Expansion of Aggregates," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 21, No. 12, 2009, pp. 781-788.
- 3) Loser, R., Munch, B., and Lura, P., "A Volumetric Technique

for Measuring the Coefficient of Thermal Expansion of Hardening Cement Paste and Mortar," *Journal of Cement and Concrete Research*, Vol. 40, No. 7, 2010, pp. 1138-1147.

- 4) Bing, P., Hui-min, X., Tao, H., and Asundi, A., "Measurement of Coefficient of Thermal Expansion of Films Using Digital Image Correlation Method," *Journal of Polymer Testing*, Vol. 28, No. 1, 2009, pp. 75-83.
- 5) ASTM D5335, "Standard Method for Linear Coefficient of Thermal Expansion of Rock Using Bonded Electric Resistance Strain Gages," *Annual Book of ASTM*, Vol. 04.08, 1999.
- 6) Versluis, A., Douglas, W.H., and Sakaguchi, R.L., "Thermal Expansion Coefficient of Dental Composites Measured with Strain Gauges," *Journal of Dental Materials*, Vol. 12, No. 5, 1996, pp. 290-294.
- 7) Wang, H., Zhou, X., Sun, L., Dong, J., and Yu, S., "The Effect of Stress Levels on the Coefficient of Thermal Expansion of a Fine-Grained Isotropic Nuclear Graphite," *Journal of Nuclear Engineering and Design*, Vol. 239, No. 3, 2009, pp. 484-489.
- 8) Goo, N.S., Kwon, Y.D., Kim, J.S., and Yoon, K.J., "Measurement Method of Strain/Stress in a Variable Temperature Environment and Its Application to Measurement of CTE of a Composite," *Journal of Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 29, No. 2, 2001, pp. 43-51.
- 9) Kim, J.S., and Yoon, K.J., "Characterization of Thermal Expansion Coefficients of Carbon/Epoxy Composite for Temperature Variation," *Journal of Korean Society for Composite Materials*, Vol. 12, No. 6, 1999, pp. 1-7.
- 10) Park, C., Cheon, D.S., Synn, J.H., Kim, H.M., and Park, Y.J., "Measurement of Thermal Expansion Coefficient of Rock using Strain Gauge," *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, Vol. 17, No. 6, 2007, pp. 475-483.
- 11) Vishay Micro-measurement, "Measurement of Thermal Expansion Coefficient Using Strain Gage," *Measurements Group TECH NOTE TN-513-1*, 2007.
- 12) Vishay Micro-measurement, "Strain gage Thermal Output and Gage Factor Variation with Temperature," *Measurements Group TECH NOTE TN-504-1*, 2007.