극저온 환경에서의 섬유강화 복합재료의 열팽창 계수 측정을 위한 스트레인 게이지의 보정에 관한 연구

Calibration of Strain Gauge for Thermal Expansion Coefficient of Fiber Reinforced Composites at Cryogenic Temperature

이원오[1,*], 이상복[2], 이진우[2], 엄문광[2]

Wonoh Lee[1,*], Sang-Bok Lee[2], Jin-Woo Yi[2], Moon-Kwang Um[2]

Abstract: Since the fiber reinforced polymeric (FRP) composites are considered in next generation of space transportation systems, reliable thermal expansion properties should be well provided for structural design of composite materials. To obtain accurate mechanical behaviors at a cryogenic temperature, precise strain measurement and calibration must be provided. In this work, apparent strains (or thermal output) of temperature self-compensated strain gages were deliberately investigated for epoxy, CTBN modified epoxy and carbon fabric composite system from room temperature to liquid nitrogen temperature. Also, fourth-order thermal output curves were presented for the further calibration. The results showed that the thermal output is heavily dependent on test materials and a large amount of apparent strains were observed for the polymer resins.

Key Words: strain gauge, cryogenic temperature, thermal output, calibration, composites.

1. 서 론

최근 초전도 산업 및 군사, 우주항공, 수송, LNG, LPG 선박의 저장 탱크와 같은 저온 환경에 노출되는 분야 등에서 고분자 복합재료의 저온 환경에서의 뛰어난 기계적 특성이 요구되고 있다. 특히 저온 환경에서 섬유강화 복합재료는 섬유와 모재의 열팽창 계수(Thermal Expansion Coefficient, CTE) 차이로 계면에서 열응력이 발생하게 되기 때문에[1] 정확한 열 변형량을 측정하는 것이 필수적이다. 따라서 열변형에 의한 복합재료 구조물의 손상을 줄이고 복합재료의 열적, 구조적 특성 설계를 위하여 저온 환경에서의 열팽창 계수의 정확한 측정 방법이 필요하다.

열팽창 계수의 측정 방법으로는 가장 폭넓게 쓰이는 방법인 고체, 액체, 분말 및 액상 시료의 온도 변화에 따른 부피 변화를 측정하는 Dilatometer를 이용하거나, 간섭계를 이용하는 Interferometry, Laser를 이용하는 방법 등이 있으나[2] 극저온에서 사용하기에 비용소모가 크고 다루기 어렵다는 단점이 있다. 최근 정확도가 매우 향상된 스트레인 게이지를 이용하여 극저온 환경에서 열팽창 계수를 비교적 간단하고 정밀하게 측정할 수 있는 연구가 보고 되고 있다[3].

스트레인 게이지는 온도변화에 큰 영향을 받기 때문에 사용하는 재료에 따라 온도보상이 필요하다. 특히 극저온과 같이 온도변화가 큰 경우에는 재료에 하중이 가해지지 않더라도 열변형에 의한 출력값이 크게 나타나게 된다. 스트레인 게이지 제작사에서 제공하는 스트레인 게이지마다 온도에 따른 겉보기 변형률과 게이지 상수의 온도 보상값을 명시하여 주지만 부착되어 사용되는 재료가 다르거나 77K 이하의 온도에서는 보상값이 명시되지 않아 열변형이 큰 재료나 액체헬륨(4.2K) 온도와 같은 극저온에서 변형률 측정 시 큰 오차를 수반할 수 있다. 따라서 사용하고자 하는 재료에 따른 극저온에서의 온도보상은 정확한 필수적인 요소이다[4].

겉보기 변형률은 온도 변화에 있어서 재료의 종류에 따라 큰 차이를 보이기 때문에 실험적으로 결정된 값을 사용해야 되고[5], 게이지 상수는 보정 치구를 사용하여 주어진 온도 및 변형률 하에서 변형률을 측정하여 값을 보정할 수 있다[6,7]. 특히 겉보기 변형률은 극저온 환경 하에서 부착하는 시편에 따라 큰 차이를 보일 수 있고 고분자 수지를 사용하는 복합재료의 경우 겉보기 변형률이 일반 금속 재료보다 매우 크다고 알려져 있다. 비록 극저온 환경에서의 보정법 연구가 다수 진행 되었으나 대부분 금속 재료 연구에 국한 되어 있어 고분자 복합재료를 위한 스트레인 게이지의 정확한 보정법이 필요하다.

이에 본 연구에서는 섬유강화 복합재료의 열팽창 계수를 극저온 환경에서 스트레인 게이지를 이용하여 측정하는데 필요한 보정법을 제시하고자 하였다. 이를 이용하여 섬유강화 복합재료의 수지로서 널리 쓰이는 에폭시 수지 및 CTBN 고무 변성 에폭시 수지와 탄소섬유 복합재료의 열팽창 계수를 측정하였다. 또한 수직 회전형 게이지 상수 보정 치구를 개발하여 정확도를 검증하고자 하였다.

2. 스트레인 게이지를 이용한 열팽창계수 측정

2.1. 스트레인 게이지의 온도 특성

온도 변화에 따라 보정해야 하는 스트레인 게이지의 두 가지 중요한 요소는 겉보기 변형율과 게이지 상수이다. 겉보기 변형율은 스트레인 게이지가 출력해주는 변형율 값으로서 스트레인 게이지의 저항체가 온도의

[1]정 회 원 : 한국기계연구원 부설 재료연구소
[2]비 회 원 : 한국기계연구원 부설 재료연구소
*교신저자 : wonohlee@kims.re.kr
원고접수 : 2010년 08월 03일
심사완료 : 2010년 09월 05일
게재확정 : 2010년 09월 05일

함수이며, 스트레인 게이지를 이루는 재료와 시험하고자 하는 재료의 열팽창 계수가 차이가 있기 때문에 보정이 필요하다. 이러한 겉보기 변형률을 보정하는 대표적인 방법으로는 Active-Dummy 회로 보상 방법과 스트레인 게이지 자체 온도 보상 방법이 있다.

Active-Dummy 회로 보상법은 동일한 스트레인 게이지를 dummy 게이지로 사용하여 1/2 브리지로 연결하여 변형을 측정하려는 active 게이지를 시험편에 부착시키고 dummy 게이지를 동일한 재질의 변형이 없는 다른 시험편에 부착시켜 측정하는 방법이다. 따라서 Active 게이지와 dummy 게이지가 동일한 스트레인 게이지 이고, 온도조건이 같고, dummy 게이지가 기계적인 변형을 전혀 받지 않을 경우, 브리지 회로에서 온도에 의한 영향은 상쇄되고, 브리지 회로를 통해 출력되는 변형률의 값은 실제 기계적인 변형에 의한 변형률과 같게 되어 열변형에 의한 영향을 보정할 수 있게 된다. 그러나 시편이 아닌 구조물의 측정 시 회로를 추가로 구성해야 하며, 재료 자체의 열팽창 거동을 측정할 수 없다는 단점이 있다.

이를 보완하기 위해 스트레인 게이지 제작사들은 자체 온도 보상 게이지를 개발하여 온도 변화에 따라 겉보기 변형률을 최소화하도록 스트레인 게이지 내부에 보상 회로를 설계하여 겉보기 변형율 보상값을 함께 제공하고 있다. 이러한 자체 온도 보상 스트레인 게이지는 온도 보상을 하지 않은 게이지에 비해서 겉보기 변형률을 상당히 줄일 수 있지만 단일 게이지 자체 내에 보상 회로가 존재하기 때문에 완벽하게 온도 보상이 되기는 어렵다는 단점이 있으며 제공되는 보정값이 특정 재료에만 국한된다는 한계점을 가지고 있다.

2.2. 스트레인 게이지를 이용한 열팽창 계수 측정

스트레인 게이지로 열팽창 계수를 측정하는 방법은 온도에 따른 열변형율을 측정하여 얻을 수 있는데 이때 스트레인 게이지 자체의 겉보기 변형율이 함께 측정되므로 이를 보상하여야 한다. 따라서 시편과 열팽창 계수를 알고 있는 표준 재료에 대해 겉보기 변형율을 측정하고 이들의 차를 이용하게 되면 측정하고자 하는 시편의 열팽창 계수를 구할 수 있게 된다.

하중이 없는 시편(S)에 부착된 스트레인 게이지의 온도 변화(ΔT)에 따른 겉보기 변형율(ε_{TO})는 시편의 열팽창 계수(α_S)와 스트레인 게이지의 열팽창 계수(α_G), 저항온도계수(β_G) 및 게이지 상수(F_G)의 함수이다.

$$\Delta\epsilon_{TO}^{R}=\left\{\frac{\beta_G}{F_G}+(\alpha_S-\alpha_G)\right\}\Delta T \qquad (1)$$

식 (1)은 열팽창 계수를 알고 있는 표준 시편(R)에도 같게 적용할 수 있으므로

$$\Delta\epsilon_{TO}^{S}=\left\{\frac{\beta_G}{F_G}+(\alpha_R-\alpha_G)\right\}\Delta T \qquad (2)$$

가 되고, 식 (1)과 (2)의 차이를 고려하면

$$\alpha_S=\alpha_R+\frac{\Delta(\epsilon_{TO}^{S}-\epsilon_{TO}^{R})}{\Delta T} \qquad (3)$$

로서 시편의 열팽창 계수를 얻을 수 있다. 본 연구에서 사용되는 표준 재료는 열팽창 계수가 매우 작은 Titanium Silicate이며 -100°C~+100°C의 환경에서 약 $0.02\text{x}10^{-6}$/°C의 값을 갖는다. 본 연구에서 사용된 Titanium Silicate는 PGO사의 ULE™를 선정하였으며 열팽창 계수는 다음과 같은 4차 다항식으로 표현되며 Table 1에 계수들을 정리하였다.

$$\alpha=A_0+A_1T+A_2T^2+A_3T^3+A_4T^4 \qquad (4)$$

Table 1. CTE of reference sample ($\mu\varepsilon$/°C).

$A_0(\text{x}10^{-2})$	$A_1(\text{x}10^{-3})$	$A_2(\text{x}10^{-5})$	$A_3(\text{x}10^{-8})$	$A_4(\text{x}10^{-10})$
-2.05	1.82	-2.45	3.16	7.97

3. 실 험

3.1. 실험 재료

스트레인 게이지가 부착될 시편으로는 섬유강화 복합재료 제작에 가장 일반적으로 사용되는 에폭시 수지 및 열변형이 큰 CTBN 변성 에폭시 수지 그리고 탄소 섬유강화 복합재료를 제작하여 실험하였다. 두 가지의 수지에 대해서 Table 2와 같은 조성을 고려하였다. 기본 에폭시 수지는 에폭시와 경화제의 비율을 10:9로 하였고, CTBN 고무 변성 에폭시 수지는 에폭시:CTBN:경화제의 비율을 7:3:9로 하였다.

탄소 섬유강화 복합재료 시편은 5장의 평직을 적층하여 120°C, 2시간 동안 경화하여 제작하였다. 탄소 섬유는 Mitsubishi사에서 제조한 TR-30S (밀도 $=1.79\text{g/cm}^3$)를 사용하였고 이로 이루어진 평직(plain weave)을 가지고 수지충진공정(Resin Transfer Molding, RTM)을 통해 섬유의 부피비가 50%인 복합재료를 제조하였다. 모든 시편의 크기는 NASA에서 시행한 방법[5]에 따라 가로 50mm, 세로 50mm로 제작하였고, 두께는 수지의 경우 3mm, 복합재료의 경우 1.12mm로 제작하였다.

Table 2. Specification of polymer resins.

Type	Material	Model No.	Weight ratio
Epoxy resin	Epoxy Hardener	YD-128 KBH-1089	10 9
CTBN modified epoxy resin	Epoxy CTBN rubber Hardener	YD-128 KR-207 KBH-1089	7 3 9

3.2. 스트레인 게이지와 온도 센서

극저온 환경에서 시험을 수행하기 위하여 스트레인 게이지는 TML사의 CF Series를 선정하였으며, 기본적인 데이터는 Table 3에 정리하였다. 스트레인 게이지의 접착은 동일 회사의 EA-2A를 사용하였다. 겉보기 변형률과 게이지 상수 측정의 경우 온도가 주요 변수가 되기 때문에 극저온 환경에서 정확한 온도 측정이 가능한 Lakeshore사의 331S 온도 콘트롤러와 DT-670 silicon diode 온도 센서를 사용하였다.

Table 3. Specification of cryogenic strain gauge.

Model	CFLA-6-350-11-6FA-1LT
Gauge length	6 mm
Gauge factor	2.03 ±1%
Resistance	350±1.5Ω
CTE (Room Temp.)	11.8×10^{-6}/°C
Gauge factor calib.	-0.03±0.05%/10°C

3.3. 실험 방법

극저온 환경에서의 열팽창 계수의 측정을 위해 상온에서 -120°C 까지 온도 환경을 구현할 수 있는 환경 챔버를 사용하였다. 환경 챔버는 액체 질소를 분사시켜 이를 기화하여 온도를 낮추는 방식으로 온도 조절은 비례주기를 2초로 짧게 설정하여 챔버 내부의 온도 변화를 최소화 하였다. 또한 -196°C에 대한 열팽창 계수는 시편을 직접 액체 질소에 담가 시험하였으며 갑작스런 열충격을 막기 위하여 인장 시험기에 수직강하 치구를 제작하여 시편을 매달아 느린 속도로 서서히 내려가면서 측정하였다.

기준 온도는 상온인 20°C로 설정하였고 매 20°C의 온도간격에 대해 시편의 온도가 충분히 균일하도록 안정화시키기 위하여 약 15분간 동일 온도를 유지시킨 후 열변형율을 반복하여 측정하였다.

4. 결과 및 분석

4.1. 스트레인 게이지 부착 위치 시험

먼저 시편에 부착된 스트레인 게이지의 위치에 따른 겉보기 변형률 값을 알아보기 위해 Fig. 1과 같이 Center-top, Center-bottom, Off-center-top의 세 위치에 열변형이 큰 CTBN변성 에폭시 수지 시편에 스트레인 게이지를 부착하여 -120°C까지 실험하였다. Fig. 2(a)에 나타난 바와 같이 세 위치에서 모두 시편의 온도는 동일하게 나타났다. 이는 환경 챔버 실험 방법이 전체 시편에 걸쳐서 균일한 온도 분포를 구현할 수 있다는 것으로 판단할 수 있다. 그러나 Fig. 2(b)와 같은 열변형율 분포를 살펴보면 동일 온도에서, center-top과 center-bottom 위치에서는 거의 유사한 열변형률을 나타내었으나, off-center-top 위치에서는 다른 두 위치보다 큰 값을 보였다. 이는 시편의 외곽으로 갈수록 자유 경계면에서의 큰 열변형에 의해 균일한 변형 분포를 주지 못한다는 것을 알 수 있다. 따라서 경계면의 영향이 적은 center-top 위치에 스트레인 게이지를 부착하여 온도에 따른 변형 시험을 수행해야 하며 본 연구의 나머지 시험에 대해서도 이를 고려하여 실험하였다.

4.2. 열팽창 계수의 측정

에폭시 수지, CTBN 변성 에폭시 수지 및 탄소섬유 강화 복합재료에 대한 열변형률 측정값을 Fig. 3에 나타내었다. 이와 함께, 스트레인 게이지 제작사에 제공하는 보정값을 함께 그려보았는데 측정한 데이터와 많은 차이를 보이고 있다는 것을 확인할 수 있다. 이는 겉보기 변형률은 특히 극저온 환경일 경우 재료에 따라 실험적으로 보정되어져야 한다는 것을 의미한다.

또한 표준 재료인 Titanium Silicate와 복합재료는 (+)의 겉보기 변형율 값을 나타내었는데 스트레인 게이지가 $\Delta T<0$인 실험 조건에서 더 많은 열수축을 했기 때문이며 이는 스트레인 게이지의 열팽창 계수가 표준 재료와 복합 재료보다 크다는 것을 의미한다. 고분자 수지의 경우, 온도가 낮아질수록 변형률이 매우 크게 나타난다는 것을 알 수 있으며 CTBN 고무 변성 수지의 열변형이 일반 에폭시 수지보다 크다는 것을 알 수 있다. 또한 탄소섬유의 열팽창 계수가 작기 때문에 복합재료의 겉보기 변형률은 작게 측정되었다.

Fig. 3에서부터 $\epsilon_{TO}^{S}-\epsilon_{TO}^{R}$을 구한 뒤 이를 5차 다항식으로 보간 후 미분하여 식 (3)을 이용하여 열팽창 계수를 구하였고 식 (4)의 형태로 Table 4에 정리하였다. 얻어진 값과 문헌값을 비교해 보면 탄소섬유-에폭시 복합재료의 경우 3.8$\mu\varepsilon$로서 상온에서의 문헌치인 0-7$\mu\varepsilon$[3,7]의 범위에 나타나고 있으며 에폭시 수지의 경우는 약 44$\mu\varepsilon$로서 문헌치인 50$\mu\varepsilon$[8]과 유사한 결과를 얻을 수 있었다. CTBN 변성 수지는 일반 상용 고분자 수지가 아니기 때문에 비교하지 못하였다.

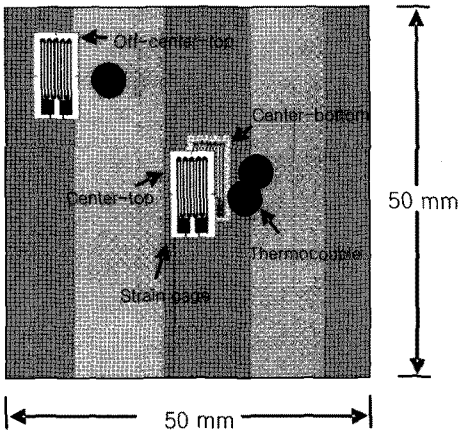
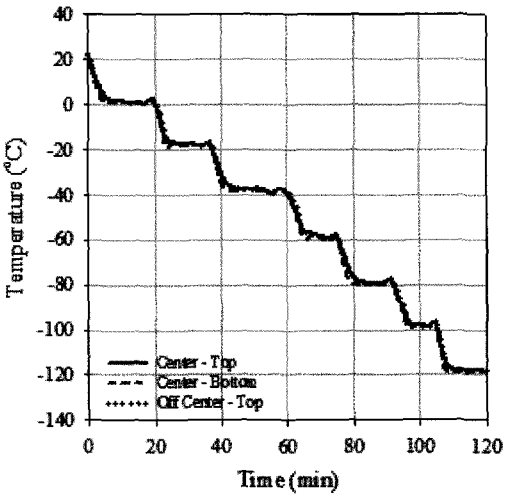
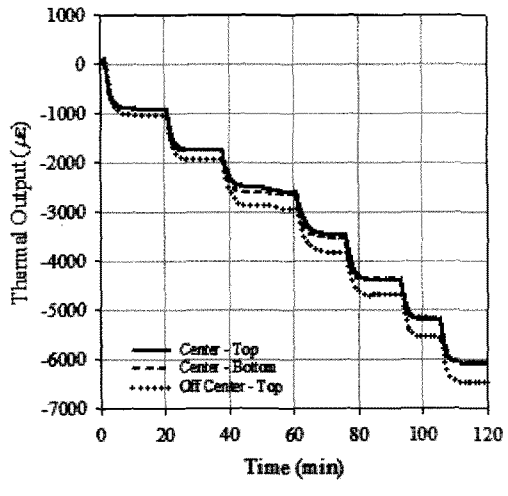


Fig. 1. Location of strain gage.



(a)



(b)

Fig. 2. (a) Temperature profiles and (b) distribution of thermal output with respect to location of strain gage.

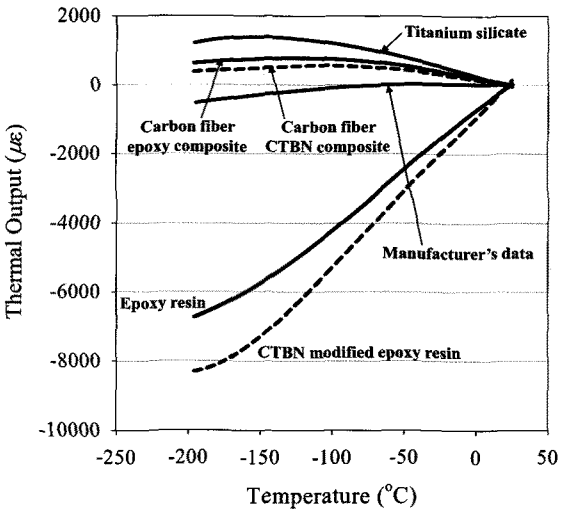


Fig. 3. Thermal output of several materials.

Table 4. Measured CTE ($\mu\varepsilon$/°C).

	Epoxy	CF/Epoxy Composite	CTBN-epoxy	CF/CTBN composite
A_0	43.905	3.804	54.702	5.661
A_1	-0.1033	4.037×10^{-3}	1.150×10^{-1}	2.250×10^{-2}
A_2	-5.590×10^{-4}	-4.341×10^{-5}	1.629×10^{-3}	4.437×10^{-4}
A_3	2.331×10^{-5}	-1.707×10^{-6}	-6.900×10^{-6}	4.491×10^{-6}
A_4	1.460×10^{-7}	-8.432×10^{-9}	-1.684×10^{-7}	2.295×10^{-8}

5. 게이지 상수 보정 치구

5.1. 스트레인 게이지의 게이지 상수 보정

스트레인 게이지는 자체가 하나의 저항체이기 때문에 재료가 변형을 하게 되면 이에 따른 저항의 변화율을 변형율 값으로 변환하여야 하며 이 때 사용하는 계수가 게이지 상수이다. 이 게이지 상수는 스트레인 게이지 저항 자체의 변화에 따른 것이기 때문에 온도에 따라 변하게 되며 이를 보정해주어야 한다. 다만 겉보기 변형율과의 차이점은 게이지 상수가 재료의 열팽창 특성에 기인하는 것이 아니기 때문에 부착되는 재료와 무관하게 스트레인 게이지 자체만의 보정을 수행하면 된다.

게이지 상수의 보정은 일반적인 규격[9-11]에도 나와 있듯이 Constant stress beam을 통해 순굽힘 거동을 이용하는 방법을 사용한다. Fig. 4와 같은 Constant stress beam은 길이가 L이고 두께가 t인 beam의 끝단에 δ만큼의 처짐량을 부과하여 순굽힘 거동을 할 경우에 beam에 결리는 인장 변형량은

$$\epsilon = \frac{\delta t}{L^2} \tag{5}$$

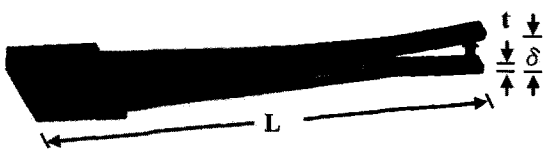


Fig. 4. Constant stress beam.

가 되며 constant stress beam 치구가 같은 재질이며 등방성 재료라고 가정하면

$$\frac{d\epsilon}{dT} = 0 \tag{6}$$

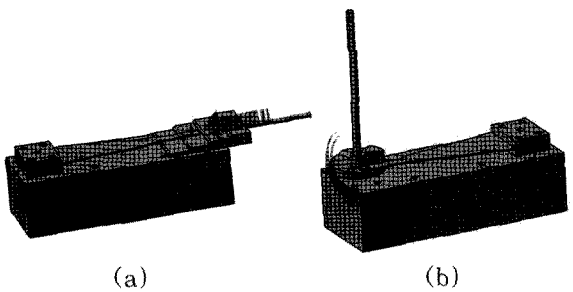
라는 관계를 얻을 수 있기 때문에 모든 온도 구간에서 부착 재료에 무관한 변형율을 구현할 수 있고 이에 따라 게이지 상수값을 얻을 수 있게 된다.

5.2. 게이지 상수 보정 치구 개발

게이지 상수 보정 치구들은 처짐량을 부과하기 위해 step block을 사용하게 되는 데 기존의 방법들은 Fig. 5(a)와 같은 수평형의 구조를 가지고 있다[12]. 그러나 이 방법은 균일한 온도 분포를 가져야 하는 극저온 챔버나 dewer에서 넓은 면적을 요구하거나 수평 유지가 아닌 수직 상태로 측정해야 하는 단점을 가지고 있다. 이에 본 연구에서는 Fig. 5(b)와 같은 수평 회전형 step block을 구현하여 좁은 극저온 챔버나 dewer에서로 수평 상태를 유지할 수 있도록 고안하였다. 개발된 게이지 상수 보정치구는 200$\mu\varepsilon$ 단위로 800$\mu\varepsilon$까지 변형률을 갖도록 식 (5)에 의해 높이 δ의 원형 계단(step block)을 설계하였다. 실험에서는 이 block을 회전시키면서 빔이 순굽힘 변형을 하게 되고, 이에 따라 순차적으로 변형량을 부가할 수 있게 된다.

5.3. 유한요소해석을 통한 스트레인 분포 고찰

이론적으로 constant stress beam은 전체적으로 순굽힘 거동을 하여 시편 영역에 동일한 변형율 분포를 나타내어야 하지만 실제 거동은 이와 다르기 때문에 Fig. 6과 같은 유한요소해석을 통하여 균일한 변형율이 나타나는 영역을 알아보고자 하였다. 사용한 재료는 일반 스틸 재료이며 처침 방향에 따른 양쪽 면에서 시편의 중심선을 따른 스트레인 분포를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 6을 살펴보면 constant stress beam의 전 영역에서 고른 변형율 분포를 얻고 있지 못하다는 것을 확인할 수 있다. 특히 Fig. 7에 나타난 바와 같이 위/아랫면의 변형율 분포가 다르며 아랫면에서는 인가 변형율이 증가할수록 균일한 변형율을 나타내는 영역이 줄어들고 있다. 또한 클램핑 영역에 가까울수록 변형율의 불균일성이 매우 크게 나타났다.



(a) (b)

Fig. 5. Constant stress beam with (a) horizontal and (b) rotational type step blocks.

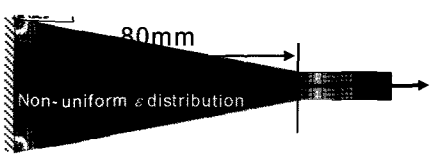
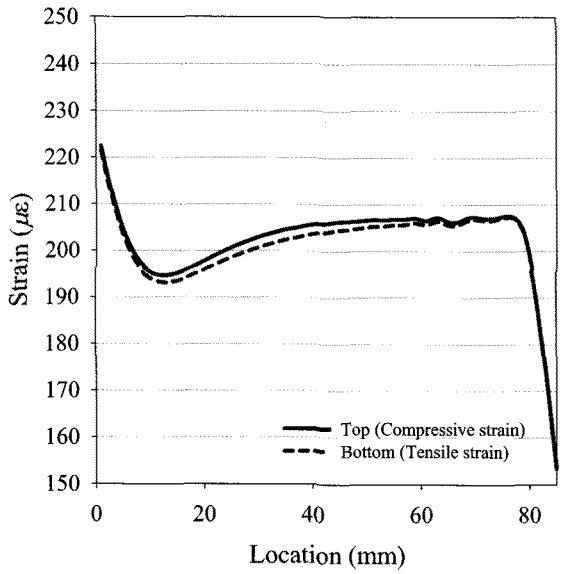
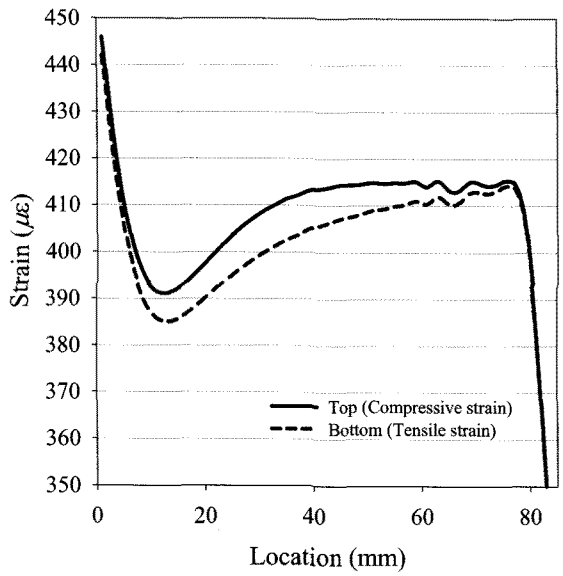


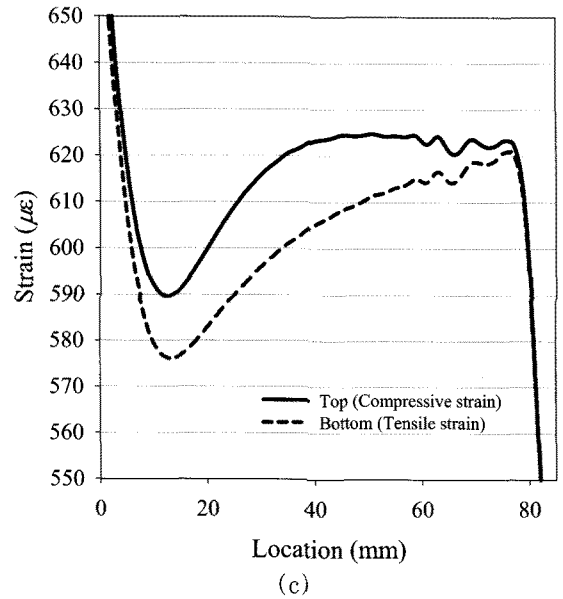
Fig. 6. Strain distribution in constant stress beam by FEM simulation (Bottom surface, 200$\mu\varepsilon$).



(a)

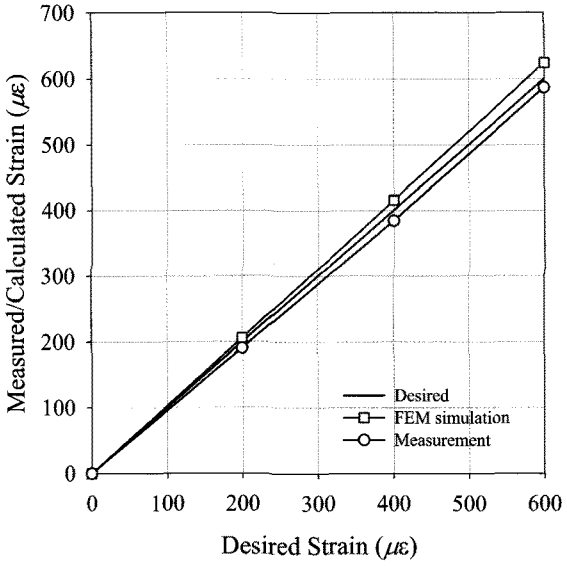


(b)

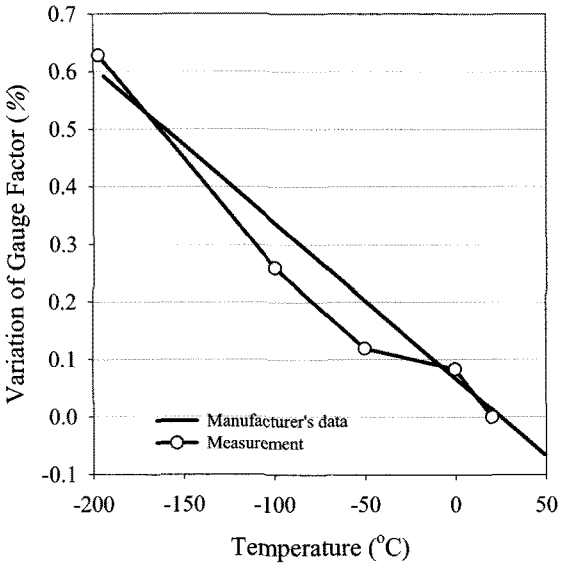


(c)

Fig. 7. Strain profiles in constant stress beam specimen: Applied strain level= (a) 200$\mu\varepsilon$, (b) 400$\mu\varepsilon$, (c) 600$\mu\varepsilon$.



(a)



(b)

Fig. 8. Gauge factor calibration: (a) Room temperature test and (b) variation of gauge factor.

비교적 고른 변형율 분포를 보이는 구간은 클램핑 위치로부터 50~55mm 지점이며, 이 지점에서 윗면이 아랫면보다 균일한 변형율 분포를 나타내었다. 따라서 게이지 상수를 보정하기 위해 스트레인 게이지를 부착하는 위치는 윗면의 50~55mm 지점이 되어야 하며 실제 게이지 상수 보정 실험 또한 이 위치에서 수행하기로 결정하였다.

5.4. 게이지 상수 보정 실험

개발된 회전 블록형 게이지 상수 보정 치구의 검증을 위해 20, 0, -50, -100, -196°C에서 굽힘 시험을 수행하였다. 온도 환경은 3.3절에서의 방법과 동일하게 -100°C 까지는 환경 챔버를 이용하였고, -196°C에서는 수직강하 치구를 이용하여 시편을 서서히 액체 질소에 담근 뒤 시험을 수행하였다.

Fig. 8(a)의 상온 시험 결과를 보면 실험 결과가 인가한 설계치보다 다소 낮게 측정되었으며 FEM에 의한 해석 결과는 높게 나타났다. 이러한 오차는 constant stress beam의 실제 거동이 순굽힘 거동이 아니며 Fig. 7에 나타난 바와 같이 불균일한 변형율

분포 및 치구 자체의 정교한 가공이 다소 부족한데서 기인하는 것으로 판단된다. 그러나 Fig. 8(b)에 나타낸 저온 실험 결과를 보면 게이지 제작사에서 제공하는 게이지 상수 보정값과의 차이가 매우 적으며 온도가 낮아질수록 선형적으로 증가하는 양상을 비교적 정확하게 보이고 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 극저온 환경 하에서 열변형이 큰 소재인 에폭시, CTBN 변성 에폭시 수지 및 탄소섬유 강화 고분자 복합재료의 열팽창 계수를 측정하기 위한 스트레인 게이지를 이용한 보정법을 제시하였다. 스트레인 게이지는 온도 변화에 따라 겉보기 변형율이 변화하기 때문에 이를 보정해 주어야 하며 본 연구에서는 titanium silicate를 이용한 표준 재료를 통해 재료의 열팽창 계수를 얻고자 하였다. 실험 결과 스트레인 게이지는 시편 끝단의 자유 열변형 거동의 영향을 최소화할 수 있도록 시편의 중앙에 부착하여야 한다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 제작사에서 제공하는 값과 달리 재료에 따라 매우 큰 겉보기 변형률이 측정되었고 이는 고분자 재료와 같이 열팽창 계수가 큰 소재에 대해 필수적으로 겉보기 변형률을 보정하여야 한다는 것을 의미한다.

극저온에서의 게이지 상수 보정을 위해 순굽힘 치구에 대한 유한요소해석을 통해 constant stress beam의 변형율 분포를 확인하여 게이지 상수 보정 시 부착되는 스트레인 게이지의 위치를 결정할 수 있었다. 또한 새로운 게이지 상수 보정 치구로서 회전식 원형 스텝 블록을 고안하였다. 개발된 보정 치구의 검증을 통해 액체 질소 온도까지 게이지 상수 보정의 정확도를 확보하였다.

감사의 글

본 연구는 한국기계연구원 부설 재료연구소의 일반 사업인 "극저온용 고분자 복합재료 및 물성평가 기술 개발"의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드린다.

참 고 문 헌

[1] 김명곤, 강상국, 김천곤, 공철원, "극저온 환경에서 탄소섬유강화 복합재료의 수지 조성 변화에 따른 인장 물성 측정", 한국복합재료학회지, 제20권, 제4호, pp. 1-8, 2007.

[2] S. Kanagaraj, S. Pattanayak, "Measurement of the thermal expansion of metal and FRPs", Cryogenics, Vol. 43, No. 7, pp. 399-342, 2003.

[3] F. Lanza di Scalea, "Measurement of thermal expansion coefficients of composite using strain gages", Experimental mechanics, Vol. 38, No. 4, pp. 233-241, 1998.

[4] 주진원, 김갑순, "극저온 환경에서 스트레인 게이지의 겉보기 변형률 특성에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제16권, 제6호, pp. 1099-1107, 1992.

[5] K. Matthew, H. Kowalkowski, W. Kevin River and Russel, Thermal Output of WK-Type Strain Gauges on Various Materials at Cryogenic and Elevated Temperatures, NASA/TM-1998-208739, 1998.

[6] C. Ferrero, "Stress analysis down to liquid helium temperature", Cryogenics, Vol. 30, No. 3, pp. 249-254, 1990.

[7] 김주식, 윤광준, "탄소섬유 복합재료의 온도변화에 대한 열팽창계수 특성 변화 규명", 한국복합재료학회지, 제12권, 제6호, pp. 1-7, 1999.

[8] G. Hartwig, "Thermal expansion of fibre composites", Cryogenics, Vol. 28, No. 4, pp. 255-266, 1998.

[9] A. Kaufman, "Investigation of Strain Gages for Use at Cryogenic Temperatures", Experimental Mechanics, Vol. 3, No. 8, pp. 177-183, 1963.

[10] BS 6888:1988, "Methods for Calibration of Bonded Electrical Resistance Strain Gauges", 1998.

[11] ASTM E251-92, "Standard Test Methods for Performance Characteristics of Metallic Bonded Resistance Strain Gages", 2009.

[12] C. Ferrero, C. Marinari and E. Martino, "Calibration systems for strain gauges to be used at cryogenic temperatures", Sensors and Actuators A, Vol. 31, pp. 125-129, 1992.

저 자 소 개

이원오(李元五)
1977년 2월 2일생, 1999년 서울대 공대 응용화학부 졸업, 2006년 동 대학원 재료공학부 졸업(공학박사), 현재 한국기계연구원 부설 재료연구소 선임연구원.

이상복(李相福)
1973년 2월 22일생, 1996년 포항 공대 재료금속공학과 졸업, 2004년 동 대학원 신소재공학과 졸업(공학박사), 현재 한국기계연구원 부설 재료연구소 선임연구원.

이진우(李鎭雨)
1974년 6월 28일생, 1999년 한양 공대 공업화학과 졸업, 2001년 광주과기원 대학원 신소재공학과 졸업(공학석사), 현재 한국기계연구원 부설 재료연구소 선임연구원.

엄문광(嚴文光)
1965년 3월 1일생, 1988년 서울대 공대 기계공학과 졸업, 1995년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 한국기계연구원 부설 재료연구소 책임연구원.