

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 42(10), 809-815(2014)

DOI:<http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2014.42.10.809>

비선형 열팽창 특성을 고려한 이종 접합 복합재의 열변형 해석

김정범*, 김홍일*, 전호찬*

Analysis of Thermal Deformation of Co-bonded Dissimilar Composite considering Non-linear Thermal Expansion Characteristics of Composite Materials

Jeong-Beom Kim*, Hong-Il Kim* and Ho-Chan Jeon*

Agency for Defense Development(ADD)

ABSTRACT

The co-bonded dissimilar composite under a wide range of temperature change shows thermal distortion due to the differences in thermal expansion characteristics of the composite materials. Analysis of the thermal expansion characteristics of each composite is required for the design of co-bonded dissimilar composite structure with considering the shape distortion during the manufacturing process. In this work, digital image correlation (DIC) technique is introduced for measuring the thermal distortion characteristics of co-bonded dissimilar composite specimen, carbon/epoxy and silica/phenolic. The thermal distortion of co-bonded dissimilar composite specimen is numerically estimated and compared with the experiments. The estimated results is successfully validated using the measured results.

초 록

큰 온도 변화를 받는 이종 접합 복합재는 재료의 서로 다른 열팽창 특성으로 인해 열에 의한 형상 왜곡이 발생되기 쉽다. 성형 과정에서 이종 접합 복합재 구조물의 제작 공정 중의 형상 왜곡 현상을 고려하기 위해서 구성하는 각각의 복합재료들에 대한 열팽창 특성 분석이 우선적으로 요구된다. 본 논문에서는 Carbon/Epoxy와 Silica/Phenolic의 이종접합 복합재료 시편의 열변형 특성을 측정하기 위해 디지털 영상 상관 기법(DIC)을 활용하였다. 이종 접합 복합재 시편의 열변형에 대해 수치 해석을 수행하였고 이를 실험 결과와 비교하였다. 수치해석을 통한 예측 결과는 실험을 통하여 입증되었다.

Key Words : Co-bonded dissimilar composite(이종 접합 복합재), Shape distortion(형상 왜곡), Thermal deformation(열변형), Digital image correlation technique(디지털 영상 상관 기법), Thermal distortion characteristics(열변형 특성)

† Received: July 14, 2014 Accepted: August 22, 2014

<http://journal.ksas.or.kr/>

* Corresponding author, E-mail : hong-il.kim@add.re.kr

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

I. 서론

비행체의 고속 비행환경으로 인해 발생하는 공력가열은 기체 구조물을 열하중에 노출시켜 강도를 저하시킨다[1,2]. 이러한 측면에서 경량이며 강도와 열차단 특성이 우수한 복합재료가 고속 비행체의 구조재료로 주로 사용되고 있다. 이렇게 적용되는 복합재료는 요구되는 특성에 따라 개별 소재의 우수한 특성을 활용하기 위해 이종 접합 복합재의 형태로 구성되기도 한다[3, 4]. 하지만 이러한 이종 접합 복합재를 구성하는 복합재료 각각의 열팽창 특성이 모두 다를 뿐만 아니라 온도에 따라 비선형 특성을 나타내기도 하다. 이로 인하여 운용 시 온도 변화에 의한 형상 왜곡 (thermal distortion)이 발생하기도 하며, 특히 성형 공정에서 형상 공차가 유발되기도 한다[5,6]. 이를 극복하기 위하여 각 재료의 열변형을 미리 예측하여 설계에 반영하기도 한다[7, 8]. 이러한 예측 설계를 제대로 수행하기 위해서는 이종 접합 복합재를 구성하는 각 재료의 온도에 따른 정량적 열팽창 특성이 필요하다. 복합재료의 열팽창 특성을 측정하는 방법은 여러 가지가 있다[9]. 기존의 변위 측정 방법은 변형률 게이지, LVDT(Linear Variable Differential Transformer) 등 접촉식 센서를 사용하는데 이러한 방법의 경우 센서의 부착 위치에서의 변위만 측정 가능하며, 특히 변형률 게이지의 경우 사용 온도범위가 제한되어 있어 별도의 온도 보상이 요구되기도 하는 등 여러 가지 단점들이 있다. 한편 레이저 간섭계 등을 이용한 비접촉식 변위 측정 장치를 사용하면 굉장히 정밀한 열팽창 측정이 가능하다[10, 11]. 하지만 이러한 레이저 간섭계를 이용한 방법은 고가의 장비가 필요하고, 대상 시편의 형상 및 변위 방향이 정확하게 정의되어야 하기 때문에 그 취급이 매우 까다롭다. 한편 디지털 영상 상관 기법 (Digital Image Correlation technique, DIC)은 디지털 카메라로 촬영된 시편의 변형 전 후 영상을 비교하여 변형을 계산하는 방법으로 접촉 없이 시편의 동시 다점, 다차원 변형 측정이 가능하며 특히 변형률 게이지로 측정이 어려운 고온 영역에서도 변형률 측정이 가능하다[12-15]. 또한 디지털 영상을 기반으로 하기 때문에 충분한 변형 측정 정확도를 보유하고 있으면서도 영상 보정을 쉽게 할 수 있어 취급이 용이하다는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 관심 온도 영역에서 복합재료 시편의 열팽창 특성을 측정할 수 있으며, 이종 접합 복합재 구조물의 다차원 형상 왜곡을 파악할 수 있는 DIC

기법을 사용하였다.

본 연구에서 다룬 이종 접합 복합재는 경량이며 강도 특성이 우수한 Carbon/Epoxy(CE)와 삭마 특성이 우수하며 높은 강도, 낮은 열팽창계수를 가지는 Silica/Phenolic(SP)이 접합된 구조를 가진다. 이 때 CE와 SP은 서로 다른 열팽창 특성을 가져 온도 변화에 따라 이종 접합 복합재 구조의 형상 왜곡이 발생한다. 이러한 형상 왜곡은 구조물의 조립성과 공력특성에 영향을 미치기 때문에 이종 접합 복합재를 사용한 구조물 개발 시 고려되어야 할 부분이다. 따라서 본 연구에서는 우선 CE와 SP 단일 소재 복합재 시편의 열변형을 DIC를 이용하여 측정하여 시편의 길이방향 열팽창 특성을 획득하고, 이를 이종 접합 복합재 시편의 열변형 유한요소 해석에 적용하였다. 해석 결과의 검증을 위하여 각각의 단일 복합재료 CE와 SP를 접합한 이종 접합 복합재 시편을 제작하고, 이 시편의 열 급힘 변형 측정을 DIC를 이용하여 수행한 후, 측정 결과와 유한요소 해석 결과와 상호 비교분석하였다.

II. 측정 시스템

DIC 시스템을 이용하여 시편의 정밀한 변위를 측정하였다. 그리고 온도 환경 제어를 위해서 시편 주변 온도를 균일하게 유지하며 가열되도록 환경챔버를 사용하였고, 측정되는 변위 결과에 시편 내부에서 발생하는 온도 편차로 인한 영향을 최소화하도록 가열 속도는 일정하게 유지하며 시험을 수행하였다.

2.1 DIC 시스템

DIC 기법은 카메라로 촬영된 시편의 영상을 이용하여 변형량을 측정하는 비접촉식 측정 기법의 하나이다. Fig. 1은 DIC 기법의 원리를 도시한 것으로, 픽셀들의 집합인 Facet의 변형 전과 후의 영상에서 픽셀들 사이의 상관관계를 정의하고, 이런 상관관계로부터 각 픽셀의 변형량을 계

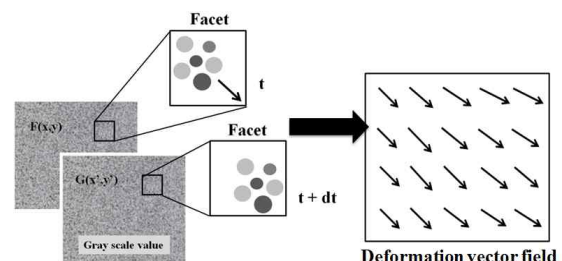


Fig. 1. Theory of DIC technique

산하는 방법이다. 이런 DIC 기법을 활용하기 위해 시편의 표면에 대비가 높은 스페클 패턴을 생성시켜 디지털 영상에서 Facet으로 인식되도록 하여야 한다. 흰색과 검정색 고온용 스프레이를 사용하여 불규칙적인 점으로 구성된 스페클 패턴을 형성하여 사용하였다.

DIC 시스템으로 GOM사의 ARAMI2050 Pixel의 해상도를 가지는 두 대의 디지털 시스템을 사용하였다. ARAMIS 시스템은 2448×텔 카메라와 촬영된 이미지를 처리하여 변형을 계산할 컴퓨터 한 대로 구성된다. 두 대의 디지털 카메라로 측정 영역을 촬영하므로 면내와 면외 변형을 모두 측정할 수 있다.

Pan Bing의 연구 결과[16]에서 본 논문의 열팽창 측정 시스템을 이용하여 스테인리스 스틸의 열팽창계수 측정결과와 재료 핸드북 상의 열팽창계수를 비교하였다. 그 결과 DIC 시스템의 측정 불확도는 최대 0.3 ppm/℃로 나타나 고온 영역에서도 정밀한 열팽창계수 측정이 가능한 특징을 가진다.

2.2 환경챔버

환경챔버는 정면에 관측창이 설치되어 있고 최대 300 ℃까지 가열 가능한 Sunsystem사의 EC13HA를 사용했다(Fig. 2). 챔버 내부에 전기코일로 가열된 열을 송풍팬을 이용하여 강제 대류시켜 내부 온도를 균일하게 유지시킨다. 챔버 내부의 온도 제어와 영상 촬영용 트리거 신호를 보내기 위해 제어 프로그램인 Oven Controller가 사용된다. 이를 통해 가열속도를 일정하게 유지하며 입력된 온도 프로파일에 따라 시편을 가열시키는 것이 가능하고, 일정 온도변화 간격마다 시편 영상을 촬영할 수 있도록 트리거 신호를



Fig. 2. Arrangement of environment chamber and two digital cameras

DIC 시스템에 송출하게 해준다. 본 시험에서는 STS304로 제작된 시편 고정치구가 사용되었다. 시험 중 치구의 열변형으로 인해 발생하는 시편의 강제운동은 측정 후 결과 분석 시 DIC 시스템의 알고리즘을 사용하여 효과적으로 보정 가능하다. 향후 수행될 시험에 대해서는 온도변화에 따른 변형이 상대적으로 작은 인바(Invar)를 사용하여 고정치구를 제작할 계획이다.

III. 열팽창 계수 정의

재료의 열팽창 특성은 일반적으로 열팽창계수 (Coefficient of Thermal Expansion, CTE)로 정의된다. ASTM E228 규격에 따라 열팽창계수를 정의하는 방법은 순간 열팽창계수 (α_T , instantaneous CTE), 평균 선형 열팽창계수 (α_{mv} , mean linear CTE), 할선 열팽창계수 (α_s , secant based CTE)로 세 가지로 구분할 수 있다[17]. 순간 열팽창계수는 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 온도(T)에서 재료 변형률의 기울기로 정의된다(수식 1). 순간 열팽창계수는 인공위성 반사경 등과 같이 열팽창이 매우 작게 관리되어야 하는 구조물에 사용되는 재료의 열팽창 특성 파악에 사용되며 매우 정밀한 (수 nm) 수준의 시편 길이(L) 측정 능력이 필요하다. 한편 식 2의 평균 선형 열팽창계수는 온도 범위 (T_0-T_1)에서의 평균 열팽창을 뜻하며, 온도 범위 안에서는 시편의 열팽창계수는 동일하다. 따라서 넓은 온도범위에서 재료의 비선형 열팽창 특성을 표현하지 못하는 단점이 있다. 시컨드 열팽창계수는 기준 온도(T_{ref})부터 관심 온도(T)까지 시편의 열팽창으로 정의한 것이다(수식 3). 따라서 Fig. 3에서 볼 수 있듯이, 평균 선형 열팽창계수와 달리 시편 열팽창의 비선형을 표현할 수 있으며, 적절한 온도 범위를 선택함으로써 충분히 정확한 열팽창계수를 획득할

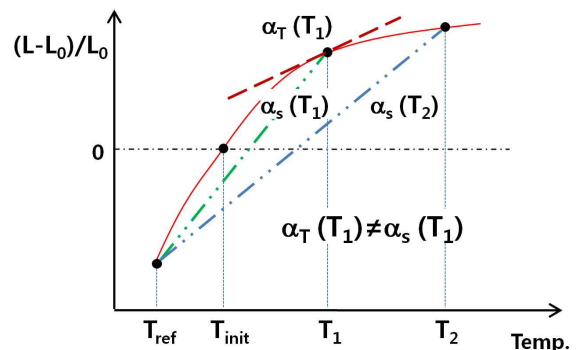


Fig. 3. Definition of thermal expansion coefficient

수도 있다. 따라서 본 연구에서는 할선 열팽창계수를 사용하여 각 재료의 열팽창계수를 정의하였다. 이 때, 기준 온도와 시작 온도(T_{init}) 모두 25 °C를 사용하였다.

$$\alpha_T(T) = \frac{1}{L(T_0)} \cdot \left(\frac{dL}{dT} \right)_T \quad (1)$$

$$\alpha_m(T) = \frac{\{L(T_1) - L(T_0)\}}{L(T_0)} \cdot \frac{1}{(T_1 - T_0)} \quad (2)$$

$$T_0 \leq T \leq T_1$$

$$\alpha_s(T) = \frac{\{L(T) - L(T_{ref})\}}{L(T_{ref})} \cdot \frac{1}{(T - T_{ref})} \quad (3)$$

IV. 열팽창 계수 측정

4.1 시편 정보 및 시험 조건

CE와 SP 시편 모두 각각 탄소와 실리카 페브릭의 적층 형태로 한국화이버에서 제작하였으며, 사용된 재료는 Table 1에서 명기된 것과 같다. CE는 시편의 길이방향으로 페브릭이 적층된 것에 반해 SP는 적층 각도로 기울어진 형태로 적층되었다. 시편의 형상은 Fig. 4와 같다.

본 시험에서는 800 °C 이상 고온에서도 패턴의 변화가 없는 흰색과 검정색의 고온용 스프레이를 사용하여 시편 표면에 불규칙적인 패턴을 생성하

Table 1. Specimen information

시편	재료	적층 방향
CE	HPW193/RS3232	길이 방향
SP	HFM-5504	길이 방향에서 적층 각도로 기울어짐

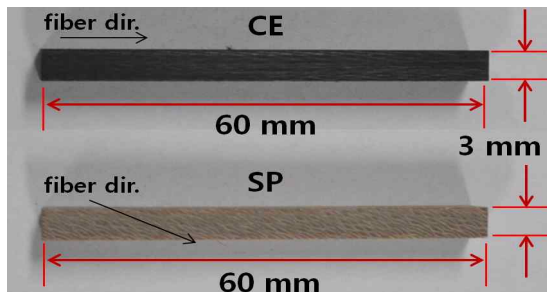


Fig. 4. Single material composite specimens for measuring CTE

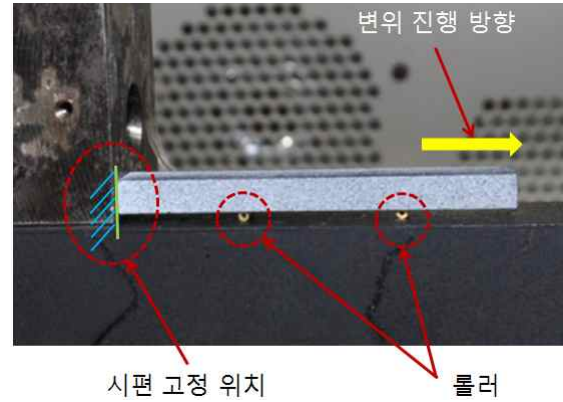


Fig. 5. Fixing method and boundary conditions of specimen

여 DIC 시스템으로 시편의 변형을 인식할 수 있도록 하였다. 시편은 정밀한 측정을 위해 Fig. 5와 같이 수평으로 고정하여 시험을 실시하였다. 변위 측정 정밀성을 높이기 위해서 시편의 한쪽 끝은 집착 면적을 최소화하여 집착제로 고정시키고 변형이 진행되는 동안 시편과 고정치구 사이에 발생 가능한 마찰 영향을 최소화하기 위해서 두 개의 볼러를 사용하였다. 시험 온도 조건은 25 °C부터 130 °C까지 가열속도 0.5 °C/min로 가열 후 유지하도록 하였다. 가열조건은 이중 복합재 시편의 성형온도를 고려하여 결정하였다. 디지털 영상은 25 °C부터 130 °C까지 시편 온도 5 °C 상승 시 마다 촬영하였다. 시험 시 발생하는 시편의 강제운동은 DIC 시스템에서 자체적으로 보정하도록 하였다. 시험 중 DIC 시스템의 정확도를 확보할 수 있게, 카메라 주변 온도를 시험이 종료 시까지 상온으로 유지하였다.

4.2 열팽창 계수 측정 결과

DIC 기법으로 시편에 분포된 변위 데이터 추출하여 시편의 변형된 길이를 계산한 후 식 (3)을 이용하여 온도에 따른 시편의 열팽창계수를 계산하였다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 CE보다 SP의 열팽창계수가 3배 이상 큰 것이 확인되었다. 그리고 SP의 열팽창계수는 온도가 증가함에 따라 큰 폭으로 줄어드는 것을 시험을 통해 확인할 수 있었다. Table 2에는 열팽창계수 측정 결과를 표로 정리하였다.

V. 이중 접합 복합재 열변형 해석

본 절에서는 앞서 구한 열팽창계수를 이용하여 CE와 SP가 접합된 복합재의 열변형을 해석하고, 이중 접합 복합재의 열변형 실험을 통해 그

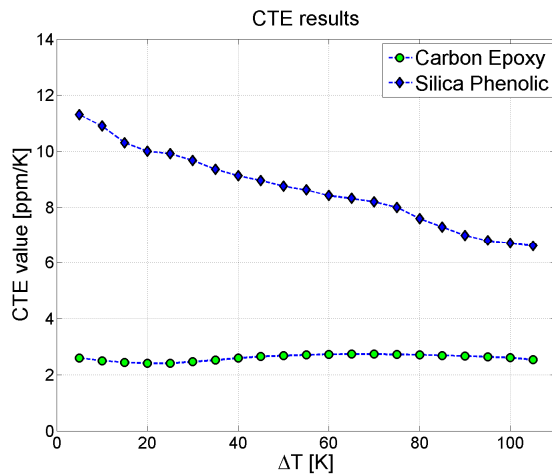


Fig. 6. Secant CTE results of specimens

Table 2. Secant CTE results with increasing temperature

ΔT (T ₀ : 25°C)	Secant CTE [ppm/K]	
	CE	SP
10	2.50	10.90
30	2.46	9.67
50	2.68	8.76
70	2.74	8.20
90	2.67	7.00
105	2.54	6.60

결과를 검증하였다. 이종 접합 복합체는 길이 방향 열팽창계수의 차이로 인해 굽힘 변형이 주로 발생하게 된다. 따라서 이러한 굽힘 변형을 유발할 수 있도록 시편과 실험을 구성하여 해석 결과와 비교할 수 있게 하였다.

5.1 CE/SP 접합 복합재 열변형 실험

CE와 SP를 코본딩(co-bonding)기법으로 접합한 이종 접합 복합재 시편을 제작하였다. 굽힘 변형 측정이 용이하도록 제작 가능한 범위 내에서 시편 두께를 얇게 가공하였다(Fig. 7). 이종 접합 복합재 열변형 실험은 재료의 열팽창 시험과 달리 시편을 수직으로 세워 굽힘 변형을 측정하였다. 실험 조건은 25°C부터 130°C까지 가열 속도 0.5°C/min로 가열 후 유지하도록 하였다. 그리고 시편의 온도를 정확히 측정하면서 변형 측정의 영향을 최소화하기 위하여 Fig. 8과 같이 온도 측정용 시편을 따로 마련하여 온도를 측정하였다. 시편의 굽힘 변형을 정의하기 위해서 시편의 CE와 SP가 접합된 선을 따라 13개의 X-방향 변위를 DIC 시스템에서 측정하였다. 이 때 기준온도 25°C 시편의 형상을 기준으로 각 점의

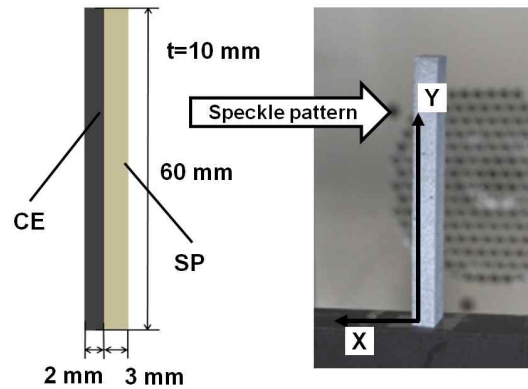


Fig. 7. Bi-material composite specimen



Fig. 8. Specimens for measuring CTE and temperature

변위를 계산하였다.

5.2 열변형 해석

이종 접합 복합재의 열변형 해석은 3차원 변위와 온도를 계산할 수 있는 4차원 8절점 요소인 C3D8T 요소 780개로 구성된 모델을 이용하여 Abaqus 6.12에서 수행하였다. CE와 SP는 완전 접합되었다고 가정하였으며, 시편의 바닥이 시편 고정 치구에 완전 고정된 조건을 가정하였다. 그리고 가열 속도가 0.5 °C/min 정도로 느리기 때문에, 시편 내부의 온도가 동일하게 유지됨을 가정하였다. 각 재료의 열팽창계수는 실험을 통해 획득한 열팽창계수를 사용하였다(Table 2)해석에 사용된 재료의 주요 물성치는 Table 3과 같다. Table 3의 기계적 물성치는 상온 (25°C)에서 자체 인장 시험을 통해 획득한 값이다. 열전도도는

Table 3. Material data for analysis

물성	CE	SP
E ₁₁ [GPa]	62.0	19.2
E ₂₂ [GPa]	62.0	20.0
E ₃₃ [GPa]	4.3	3.79
G ₁₂ [GPa]	3	2
ν ₁₂	0.05	0.05

시편 내부 온도가 동일하도록 임의로 설정하였다. 해석 시 기준 온도는 실험과 동일하게 25°C로 하였으며, 5단계의 온도 변화 ($\Delta T=20, 40, 60, 80, 100^\circ\text{C}$) 조건에 대하여 해석을 수행한 후 시편의 굽힘 변형을 획득하였다.

5.3 결과 고찰

Figure 9에는 이중 접합 복합재의 해석 및 실험을 통해 구한 시편 끝단의 굽힘 방향(X-방향) 변위를 나타내었다. SP의 길이방향 (Y-방향) 열팽창계수가 CE에 비해 3배 이상 크기 때문에 시편 가열 시 CE쪽 (X-방향)으로 굽힘이 발생될 것으로 예상되었는데, 해석 및 실험 결과 또한 예측된 결과를 보였다. Fig. 9에서 확인할 수 있듯이 측정된 열팽창계수를 이용하여 해석한 이중 접합 복합재의 굽힘 변형이 실험을 통해 측정된 결과와 유사하였다. 따라서 열팽창계수 측정이 정확하게 수행되었으며, 해석 조건 또한 적절한 것으로 판단된다. 한편 해석 결과에서 주목할 점은 굽힘 변형이 온도 변화에 선형적이지 않음이다. $\Delta T=80^\circ\text{C}$ 까지는 굽힘 변형이 커지다가 온도 변화가 더 커지면 굽힘 변형이 줄어드는 현상을 보였다. 이러한 이중 접합 복합재 굽힘 변형의 비선형성은 실험을 통해서도 확인할 수 있었다. 이는 CE의 열팽창계수가 온도 변화에도 약 2.5 ppm/K으로 유지됨에 반해서 SP의 열팽창계수는 온도에 따라 감소(11 ppm/K \rightarrow 7 ppm/K)하기 때문으로 판단된다. 결론적으로 이중 접합 복합재를 구성하는 재료의 정확한 열팽창계수 획득을 통해 이중 접합 복합재의 변형을 정확히 예측할 수 있었다.

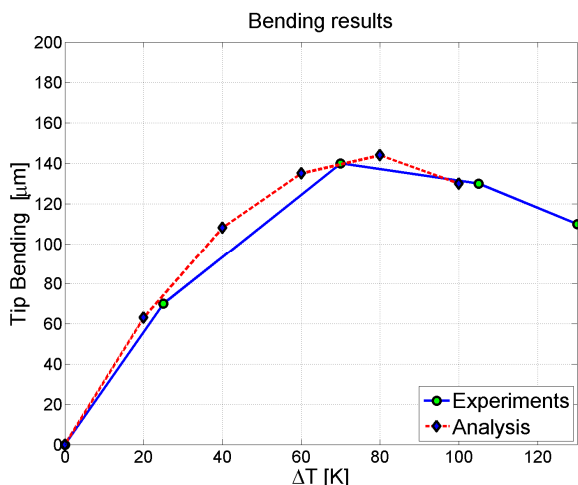


Fig. 9. Bending deformation results of bi-material composite specimen

VI. 결 론

이중 접합 복합재의 경우 재료의 열팽창 특성 차이로 인해 성형과정 혹은 운용 시 온도 변화에 의한 형상 왜곡이 발생하기 쉽다. 이러한 현상을 최소화하기 위하여 설계단계에서 형상 왜곡 현상을 예측할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 이러한 노력의 일환으로 이중 접합 복합재를 구성하는 복합재료들의 열팽창계수를 측정하고 이를 이용하여 이중 접합 복합재의 열변형을 예측하는 과정을 정리하였다. 먼저 DIC 시스템을 이용하여 CE와 SP 시편의 길이 방향의 열팽창계수를 측정하였다. SP 시편의 경우 온도에 따라 열팽창계수가 큰 폭(약 11 ppm/K \rightarrow 7 ppm/K)으로 감소하는 현상을 확인하였다. 측정된 열팽창계수를 이용하여 CE와 SP가 접합된 이중 접합 복합재의 굽힘 변형 해석을 수행하고 이를 실험 결과와 비교하였다. 해석을 통해 이중 접합 복합재의 굽힘 변형이 비교적 정확하게 예측되었다. 결론적으로 이중 접합 복합재를 구성하는 재료의 정확한 열팽창계수 획득을 통해 이중 접합 복합재 구조의 제작 및 운용 시 예상되는 형상 왜곡을 예측할 수 있음을 확인하였다. 한편 열팽창계수 뿐만 아니라 각 재료의 기계적 강성 또한 온도에 따라 변화할 수 있다. 따라서 추가 시험을 통해 온도에 따른 각 재료의 기계적 강성을 획득하면 보다 정확한 이중 접합 복합재의 열변형 예측이 가능할 것으로 판단된다.

References

- 1) Kawato, H., Watanabe, S., Yamamoto, Y., Fujii, K., "Aerodynamic Performances of Lifting-Body Configurations for a Reentry Vehicle", J. Spacecraft Rocket. 42(2), 2005, pp. 232~239
- 2) Kotanchik, J. N., BRYAN R., "Structures and Materials for Manned Reentry Vehicles", AIAA Paper. No. 66-987, 1966
- 3) Koo, J. H., Ho D. W. H., Ezekoye, O. A., "A Review of Numerical and Experimental Characterization of Thermal Protection Materials . Part I. Numerical Modeling", AIAA Paper. No. 2006-4936, 2006
- 4) Brennan, J., Prewo, K. M., "Silicon carbide fibre reinforced glass-ceramic matrix composites exhibiting high strength and toughness", J.

Mater. Sci., 17(8), 1982, pp. 2731~2383

5) Havis, C. R., Peterson, G. P., Fletcher, L. S., "Predicting the thermal conductivity and temperature distribution in aligned fiber composites", Int. J. Thermophys, 3(4), 1989, pp. 416~422

6) Zimcik, D. G., Koike, B. M., "Thermal distortion Behavior of Graphite reinforce Aluminum Space Structures", J. Spacecraft Rocket. 27(4), 1990, pp. 380~385

7) Wijskamp, S., "Shape Distortions in Composite Forming," PhD Dissertation, Univ. of Twente, 2005

8) Svanberg, J. M., "Predictions of Manufacturing Induced Shape Distortions", PhD Dissertation, Lulea University of Technology, 2002

9) Wolff, E. G., "Introduction to the Dimensional Stability of Composite Materials", DEStech Publication, 2004

10) Kim H.I., Han J. H., Yang H. S., Cho Ch. R., Cho H. J., Kim H. B., "Design of High-precision CTE measurement System for the Structural Materials in Space Applications", J. KSAS, 36(9), 2008, pp. 916~922

11) Kim, H.-I., Yoon, J.-S., Kim, H.-B., "Measurement of the thermal expansion of space structures using fiber Bragg grating sensors and displacement measuring

interferometers", Meas. Sci. Technol, 21(8), 085704, 2010

12) Kim K. S., "Principle of Digital Image Correlation", J. KSNT, 32(5), 2012, pp. 597~602

13) Jin, T. L., Goo, N. S., "Thermal Stress Measurement of a Double Ring Structure Using Digital Image Correlation Method", Experimental Techniques, online published, 2013

14) De Strycker, M., Schueremans, L., Van Paepegem, W., Debruyne, D., "Measuring the thermal expansion coefficient of tubular steel specimens with digital image correlation techniques", Opt. Laser Eng., 48(2010), 2010, pp. 978~986

15) Montanini, R., Freni, F., "Non-contact measurement of linear thermal expansion coefficients of solid materials by infrared image correlation", Meas. Sci. Technol., 25(1), 015013, 2014

16) Pan B., Wu D., Xia Y., "High-temperature deformation field measurement by combining transient aerodynamic heating simulation system and reliability-guided digital image correlation", Opt. Laser Eng., 48(2010), 2010, pp. 841~848

17) ASTM E228-11, Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials With a Push-Rod Dilatometer, 2011