역해석기법을 이용한 복합재료 구성성분의 열팽창계수 예측

임 재 혁¹ · 손 동 우^{2*}

¹한국항공우주연구원 위성구조팀, ²한국해양대학교 기계·에너지시스템공학부

Evaluation of the Coefficient of Thermal Expansion of Constituents in Composite Materials using an Inverse Analysis Scheme

Jae Hyuk Lim¹ and Dongwoo Sohn^{2*}

¹Satellite Structure Department, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon, 305-806, Korea

²Division of Mechanical and Energy Systems Engineering, College of Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, 606-791, Korea

Abstract

In this paper, we propose an evaluation scheme of the coefficients of thermal expansion (CTE) of constituents in composite materials using an inverse analysis. The size of constituents typically is about a few micrometers, which makes the identification of material properties difficult as well as the measurement results inaccurate. The proposed inverse analysis scheme, which is combined with the Mori-Tanaka method for predicting an equivalent CTE of composite materials, provides the CTE of the constituents in a straightforward manner by minimizing the cost function defined in lamina scale with the steepest descent method. To demonstrate the effectiveness and accuracy of the proposed scheme, the CTEs of several fibers (glass fiber, P75, P100, and M55J) embedded in matrix are evaluated and compared with experimental results. Furthermore, we discuss the effects of uncertainty of laminar and matrix properties on the prediction of fiber properties.

Keywords : composite materials, CTE(coefficient of thermal expansion), Mori-Tanaka method, inverse analysis scheme

1. 서 론

복합재료는 비강성 및 비강도의 우수성 때문에 자전거, 테니스 라켓과 같은 생활용품부터 항공기, 인공위성, 스포츠카 등 고사양 대형 구조물에까지 다양하게 사용되고 있다. 이뿐만 아니라, 복합재료는 Table 1에서 나타나듯이 열팽창계수(CTE: Coefficient of Thermal Expansion)가 금속재료에 대비하여 현저히 작다. 그러므로 복합재료를 활용하면 하루에 14번 가량 온도 $-100^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ 의 열주기 환경을 겪는 저궤도 지구관측 위성의 별추적기, 탑재체에 부여되는 엄격한 열지향오차(thermal pointing error) 및 길이안정성(dimensional stability) 요구조건을 손쉽게 만족시킬 수

있다. 아울러, 최근 Geosye-1(해상도: 0.41cm, 2008년 발사) WorldView-2(해상도: 0.31cm, 2014년 8월 13일 발사)와 같이 50cm 이하의 해상도를 갖는 상업용 지구관측 위성시대가 본격적으로 도래함에 따라 인공위성의 지향정밀도 및 열안정성에 대한 요구조건이 더욱 엄격해 지고 있다. 이를 준수하기 위해서 기존의 알루미늄 기반 구조체로는 인공위성 개발에 한계가 있으므로 점차 비강성, 비강도, 길이안정성 측면에서 유리한 복합재료로 인공위성이 개발되는 추세이다.

통상적으로 복합재료에 대한 열팽창계수는 TMA(Thermo Mechanical Analyzer) 또는 간섭계(interferometer)를 활용한 시편시험을 통해 측정한다. 대부분의 경우, 복합재료는 라미나(lamina)로 구성된 롤(roll)단위 형태로 구매하기

* Corresponding author:

Tel: +82-51-410-4291; E-mail: dsohn@kmou.ac.kr

Received May 13 2014; Revised May 26 2014

Accepted May 27 2014

©2014 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Table 1 CTE of various materials for aerospace applications

Material	CTE(ppm/°C)
Aluminum ^a	23.10
Stainless steel ^a	17.30
Invar ^a	1.2
Titanium ^a	8.6
Zerodur(glass) ^a	0.02
IM7(longitudinal) ^b	-0.4±1.0
IM7/977-3 Composite lamina(longitudinal) ^b	0.18
IM7/977-3 Composite lamina(transverse) ^b	23.4
IM7/977-3 Composite quasi isotropic laminate ^a	0.591

^a Daniel and Ishai(2006)

^b Kulkarni and Ochoa(2006)

때문에 섬유(fiber)와 기지(matrix)가 결합된 상태의 열팽창계수는 알 수 있으나, 섬유와 기지 자체의 열팽창계수에 대해서는 별도로 측정을 수행해야 한다. 그러나 복합재료의 섬유 또는 개재물의 경우 그 크기가 통상 수 마이크로미터 수준이기 때문에 물성을 측정하는 일은 매우 번거롭고 어렵다. 특히 탄소섬유의 기계적 물성치 같은 경우는 통상적인 길이 방향 물성측정 방법만 미국재료시험규격 ASTM D3379에 등록되어 있으며 가로등방성(transverse isotropic) 특성의 복합재료 섬유를 이용해서 구조해석을 수행할 때 필요한 5개의 탄성계수와 2개의 열팽창계수 중 길이방향을 제외한 나머지 탄성계수 4개와 열팽창계수 1개는 신뢰성 있게 구하기 어려운 실정이다(Daniel *et al.*, 2006). 물론 최근 들어 탄소 섬유 소재의 재료물성에 대한 관심이 높아져서 다양한 실험적 연구가 이루어지고 있지만 측정결과가 서로 잘 일치하지 않는 등 그 결과에 대한 신뢰성이 높지 않은 상태이다(Miyagawa *et al.*, 2006). 또한 복합재료는 높은 온도에서 경화를 시켜 상온에서 활용하는 특성 때문에 잔류응력이 발생하는데 섬유의 물성치를 정확하게 알 수 없기 때문에 대부분의 경우에는 이를 고려하고 있지 못하다(Rupnowski *et al.*, 2005; Benedikt *et al.*, 2005). 아울러 최근 들어 관심이 고조되고 있는 복합재료의 마이크로스케일 및 나노스케일 수준 거동해석을 위해서는 이러한 구성재료의 정확한 물성 규명이 필수적이다(Shin *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2013).

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해서 역해석기법을 이용한 복합재료 구성요소의 열팽창계수 예측기법을 제안하고 그 유효성을 검증하였다. 이를 위해 2장에서는 해석이론에 대해서 소개를 하고 3장에서는 복합재료 라미나와 구성요소의 물성이 정확히 알려진 문제를 다루어 방법론의 정확도를 검증하였다. 또한 현재 재료물성이 부분적으로 공개되

어 있는 탄소섬유 M55J의 열팽창계수를 두 가지 복합재료 샘플데이터 M55J/M18과 M55J/RS12B를 이용하여 분석하였다. 아울러 라미나 또는 기지 물성의 불확실성에 따라 달라지는 섬유 열팽창계수 변화에 대해 고찰하였다.

2. 역해석기법을 이용한 복합재료 구성요소의 열팽창계수 예측기법

2.1 라미나 스케일 목적함수

서론에서 언급하였듯이 복합재료의 물성치는 라미나 수준에서 시험을 통해 용이하게 측정될 수 있다. 그러므로 식 (1)과 같이 직교이방성(orthotropic)을 가정하고, 라미나 수준의 열팽창계수 측정치와 해석치의 차이의 역을 목적함수로 정의하였다.

$$f = (\alpha_1^{test} - \alpha_1^{analysis})^2 + (\alpha_2^{test} - \alpha_2^{analysis})^2 + (\alpha_3^{test} - \alpha_3^{analysis})^2 \quad (1)$$

여기서, α^{test} 와 $\alpha^{analysis}$ 는 각각 라미나 수준에서의 복합재료 열팽창계수의 시험치 및 해석치를 가리킨다. 또한 첨자 1, 2, 3은 방향을 나타낸다.

라미나 스케일의 열팽창계수는 일반적으로 이를 구성하는 모든 구성재료의 탄성계수, 열팽창계수의 함수이나 본 연구에서는 구성재료의 탄성계수는 알고 있다고 가정하였고 그러므로 식 (2)와 같이 독립변수는 열팽창계수 3개와 복합재료 구성성분의 수(N_{mat})의 곱($N_{mat} \times 3$)으로 나타내어 진다.

$$\alpha^{analysis} = \alpha^{analysis}(E_1^i, E_2^i, G_{12}^i, G_{23}^i, \nu_{23}^i, \alpha_1^i, \alpha_2^i, \alpha_3^i) \approx \alpha^{analysis}(\alpha_1^i, \alpha_2^i, \alpha_3^i) \quad (2)$$

여기서, 첨자 i 는 복합재료를 구성하는 i 번째 구성성분을 가리킨다.

탄소섬유가 포함된 단방향 복합재료(unidirectional composite) 라미나인 경우, 탄소섬유($i=1$)가 가로등방성, 기지 재료($i=2$)가 등방성을 띄기 때문에 독립적인 열팽창계수는 총 3개($\alpha_1^1, \alpha_2^1, \alpha_3^1$)가 된다. 이 중에서 통상적으로 기지재료의 열팽창계수는 알려져 있기 때문에 독립변수가 2개인 문제로 귀결되며, 라미나의 수준에서 목적함수는 식 (3)과 같이 탄소섬유의 2개의 열팽창계수(α_1^1, α_2^1)를 찾는 문제로 바뀌기 때문에 쉽게 복합재료 구성재료의 물성치를 찾을 수 있다. 또한 3개의 독립변수 중에서 섬유의 길이방향 열팽창계수

(longitudinal CTE) α_1^f 가 알려져 있는 경우에는 식 (3)을 최소화함으로써 탄소섬유의 가로방향 열팽창계수(transverse CTE) α_2^f 와 기지재료의 열팽창계수 α_1^m 를 도출할 수 있다.

$$f = (\alpha_1^{test} - \alpha_1^{analysis})^2 + 2(\alpha_2^{test} - \alpha_2^{analysis})^2 \quad (3)$$

라미나 스케일의 등가열팽창계수의 예측치 $\alpha^{analysis}$ 는 다음 2.2절에 설명하는 다양한 등가열팽창계수 해석모델을 이용해서 구할 수 있다.

2.2 등가열팽창계수 예측모델의 선정

등가열팽창계수를 찾기 위한 많은 선행연구가 있었으나 그 중 Schapery 기법(Schapery, 1968; Strife *et al.*, 1979), Mori-Tanaka 기법(Rupnowski *et al.*, 2005), 전산균질화 기법(Islam *et al.*, 2001; Karadeniz *et al.*, 2007; Yu *et al.*, 2007)이 비교적 정확한 것으로 알려져 있으며, 본 연구에서는 본격적인 역해석기법의 적용에 앞서 3가지 방법의 정확도를 비교하였다.

2.2.1 대표적인 등가열팽창계수 예측모델

Schapery(1968)는 섬유와 기지가 모두 등방성이라고 가정하고 열탄성 에너지 보존법칙에 기반하여 등가열팽창계수를 식 (4)와 같이 유도하였으며, Strife와 Prewo(1979)가 이를 가로등방성 섬유에 적용할 수 있도록 식 (5)와 같이 변형하였다.

$$\alpha_1 = \frac{E_1^f \alpha_1^f V_f + E_1^m \alpha_1^m V_m}{E_1^f V_f + E_1^m V_m} \quad (4)$$

$$\alpha_2 = (1 + \nu_{12}^f) \alpha_2^f V_f + (1 + \nu^m) \alpha^m V_m - \alpha_1 (\nu_{12}^f V_f + \nu^m V_m) \quad (5)$$

여기서, f 는 섬유, m 는 기지를 가리키며, V_f 는 섬유체적비, V_m 는 기지체적비이다.

Mori-Tanaka 기법에서는 식 (6)에 의하여 열팽창계수를 도출한다(Rupnowski *et al.*, 2005).

$$\alpha^f = \frac{1}{V_f} (C^f)^{-1} [(C^m - C^f)(S - f_v(S - I)) - C^m] \times (\alpha^m - \alpha^c) + \alpha^m \quad (6)$$

여기서, α^f , α^m , α^c 는 각각 섬유, 기지, 복합재료 라미나의

열팽창계수벡터를 나타낸다. 또한 C^f 와 C^m 는 각각 섬유와 기지의 강성행렬, S 는 Eshely 텐서, I 는 6×6 단위행렬을 나타낸다.

전산균질화 기법에서는 먼저 Fig. 1과 같이 전체복합재료에서 대표성을 갖는 RVE(Representative Volume Element)를 선정하여 유한요소 모델링을 수행하고 여기에 적절한 경계조건을 가하여 응력해석을 수행한다. 여기에서 사용한 방법은 Islam 등(2001)과 Karadeniz와 Kumlutas(2007)이 제안한 등가열팽창계수 예측기법으로 변형 전후의 RVE의 길이 변화를 이용해서 등가 열팽창계수를 계산하는 방법이다.

Islam 등(2001)은 2차원 평면변형률 조건의 RVE에 대하여 주기적 경계조건을 적용하였으며, Karadeniz와 Kumlutas(2007)는 주기적 경계조건 대신 이와 유사한 일정변위경계조건을 부여하였다.

이 방법은 단순히 유한요소 모델링을 수행한 후에 RVE에 주기적 변형 경계조건을 부여하고 초기온도와 최종온도를 토대로 온도차이 ΔT 를 부여하기 때문에 해석 절차가 간단해진다. 이렇게 주기적 변형 경계조건을 주면 Fig. 2와 같이 변형 전과 변형 후의 RVE의 경계가 일정하게 유지되기 때문에 하나의 RVE만으로도 여러 개의 RVE를 붙여놓은 것과 같은 효과가 있어 경계조건이 해석결과에 미치는 효과가 최소화된다. 아울러 변위 적합조건(Compatibility)도 쉽게 만족하는 것으로 알려져 있다. 여기에, RVE에 수분변화와 특별한 외력이 없는 경우에 변형률 ϵ_j 와 열팽창계수 α_j 의 관계는 식 (7)과 같이 간략화되며, RVE에 대한 j 축의 변형 전

Fig. 1 RVE selection and finite element mesh

Fig. 2 Undeformed and deformed shapes of the RVE due to thermal expansion

길이 X_j 와 변위 ΔX_j 를 계산하여 식 (8)에 대입함으로써 열 팽창계수를 도출할 수 있다.

$$\epsilon_j = \alpha_j \Delta T = \frac{\Delta X_j}{X_j} \quad (j = 1, 2, 3) \quad (7)$$

$$\alpha_j = \frac{\Delta X_j}{X_j \Delta T} \quad (8)$$

한편, 위의 식 (4)~(8)에서 열팽창계수 α , 탄성계수 E , 포와송비 ν 는 온도에 따라 달라지지만, 여기에서는 특정 온도 근방에서의 열팽창계수 예측에 초점을 맞추고 있기 때문에 이러한 특정 온도 근방에서의 물성치는 일정한 값으로 간주할 수 있다. 또한 본 연구는 물성치 확보가 수월한 상온 근처에서의 열팽창계수 예측을 대상으로 하였으나, 임의의 온도에서도 아무런 문제없이 본 절에서 다룬 등가열팽창계수 예측모델을 적용할 수 있다.

2.2.2 등가열팽창계수 예측모델의 검증

앞서 2.2.1절에서 설명한 3가지의 등가열팽창계수 예측 모델(Schapery, Mori-Tanaka, 전산균질화 기법)의 성능을 검증하기 위해서 다양한 섬유체적비에 따른 복합재료의 열팽창계수를 계산하고 시험결과와 비교하였다. 계산에 사용된 복합재료는 유리섬유 복합재료 Glass/Epoxy와 탄소섬유 복합재료 P75/Epoxy930, 탄소섬유/금속 복합재료(MMC: Metal Matrix Composite) P100/Aluminum2024이며, 섬유와 기지의 물성치는 Table 2와 Table 3에 나타내었다.

Table 2 Material properties of fibers
(Karadeniz and Kumlutas, 2007)

Fiber	Glass Fiber (Isotropic)	P75 (Transversely Isotropic)	P100 (Transversely Isotropic)
E_1 (GPa)	72.0	550.40	796.63
E_2 (GPa)	72.0	9.52	7.24
G_{12} (GPa)	30.0	6.9	6.9
ν_{12}	0.2	0.2	0.2
ν_{23}	0.2	0.4	0.4
α_1^f (ppm/°C)	5.0	-1.35	-1.40
α_2^f (ppm/°C)	5.0	6.84	6.84

Table 3 Material properties of matrices
(Karadeniz and Kumlutas, 2007)

Matrix	Epoxy (Isotropic)	Epoxy930 (Isotropic)	Aluminum2024 (Isotropic)
E (GPa)	3.5	4.35	73.11
ν	0.35	0.37	0.33
α (ppm/°C)	52.5	43.92	23.22

여기에서 Glass/Epoxy는 섬유와 기지의 기계적 성질이 등방성/등방성을 나타내며, P75/Epoxy930는 가로등방성/등방성을 띤다.

P100/Aluminum2024도 P75/Epoxy930와 마찬가지로 가로등방성/등방성을 띄지만 기지가 금속재료인 MMC이다. 길이방향 열팽창계수는 재료에 상관없이 예측 결과가 모두 시험결과와 잘 일치하는 것을 확인하였다.

가로방향 열팽창계수의 경우 Glass/Epoxy 및 P75/Epoxy 930의 복합재료는 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내듯이 모든 예측결

Fig. 3 Transverse CTE of Glass/Epoxy unidirectional composite

Fig. 4 Transverse CTE of P75/Epoxy930 unidirectional composite

Fig. 5 Transverse CTE of P100/Aluminum2024 unidirectional composite

파가 시험결과와 잘 일치하였다. 그러나 P100/Aluminum 2024 복합재료의 경우에는 Fig. 5와 같이 전산균질화 기법과 Mori-Tanaka 기법의 예측결과만이 시험결과와 잘 일치한다는 것을 확인할 수 있었다.

Schapery 기법은 섬유와 기지가 모두 등방성이라고 가정해서 예측식을 도출한 후에 물리적인 고찰이나 수학적으로 엄밀한 근거없이 가로등방성을 갖는 섬유에 맞게 수정한 식이기 때문에 P100/Aluminum2024 복합재료에 대한 결과에서 시험결과와 큰 차이를 보이는 것으로 추정된다. 한편, Fig. 3과 Fig. 4에서 Schapery 기법에 의한 예측결과가 시험결과가 잘 일치하는 이유는 우연의 일치로 참고문헌(Karadeniz *et al.*, 2007)에서 설명하고 있다.

Mori-Tanaka 기법은 섬유와 기지의 상호작용이 작다고 가정하고 유도한 식이기 때문에 섬유체적비가 0.6이상인 경우 전산균질화 기법과 약간의 차이가 있는 것으로 보이나 그 차이가 현격하지는 않다. 이러한 경향성은 기존의 연구의 결과와도 일치한다(Benedikt *et al.*, 2003). 그러므로 본 연구에서는 열팽창계수 예측에 있어 정확하면서도 효율적인 Mori-Tanaka 기법을 사용하였다.

2.3 계산절차

앞서 2.1절에서 언급한 목적함수를 최소화시키기 위해서 Fig. 6과 같은 형태로 최대경사하강법(Steepest Descent Method)을 사용하였다. 최대경사를 구하기 위해서 식 (9)와 같은 수치미분치를 사용하였다.

$$\frac{\delta f}{\delta \alpha_j^i} \cong \frac{\Delta f}{\Delta \alpha_j^i} \quad (9)$$

Fig. 6 Flowchart of inverse analysis

해석에 필요한 초기 열팽창계수로는 1ppm/℃을 사용하였다. 측차를 위한 증분 $\Delta \alpha_j^i$ 은 1ppm/℃으로 설정하였고 수렴점 근방에서는 증분에 대한 황금분할(golden section)을 수행하여 수렴성을 향상시켰다. 또한 수렴 판정조건(tolerance)으로 목적함수를 사용하여 그 크기가 10^{-12} 이하가 될 때까지 측차를 진행하였다.

3. 수치예제

먼저 3.1절에서는 본 연구에서 제안한 방법론을 검증하기 위해서 복합재료와 그 구성재료의 재료물성이 잘 알려진 재료를 대상으로 역해석기법을 이용해서 구성재료의 열팽창계수의 값을 계산하였다. 다음으로 3.2절에서는 재료물성이 잘 알려지지 않은 M55J 섬유의 열팽창계수를 두 종류의 복합재료 M55J/M18, M55J/RS12B로부터 각각 도출하고 그 값을 서로 비교해 보았다. 또한 수치예제를 통하여 복합재료의 물성 또는 기지의 물성에 대한 불확실성이 역해석기법 정확도에 끼치는 영향에 관해 살펴보았다.

역해석기법을 이용해서 섬유의 열팽창계수를 도출하는 경우, 통상적으로 1% 내외로 존재하는 기공(void)을 무시하였으므로 섬유와 기지의 성질이 선형 탄성이라고 가정하였다. 또한 섬유와 기지가 완전 결합되어 있다고 가정하여 박리, 슬립 등의 계면의 결함을 무시하였고, 섬유의 단면 형상이 완전한 원형이라고 가정하였다. 아울러 섬유의 구부러짐(kink)이 없다고 가정하였다.

3.1 Glass, P75, P100에 대한 열팽창계수 예측 및 라미나 물성의 불확실성에 따른 영향 분석

본 연구에서 제안된 역해석기법의 성능을 검증하기 위해서 Glass/Epoxy, P75/Epoxy930, P100/Aluminum2024 복합재료를 대상으로 섬유의 열팽창계수를 예측해 보았다. 이를 위해서 앞서 2.2.2절에서 등가열팽창계수 예측모델의 검증 과정에서 도출한 복합재료의 열팽창계수 측정결과를 다시 이용하였다. 기지의 물성은 Table 3의 값을 그대로 사용하였으나, 복합재료 라미나에 대한 물성은 Table 4와 같이 측정치(평균)와 복합재료 열팽창계수의 통상적인 변동계수(COV: coefficient of variance, 표준편차를 평균으로 나눈 값) 5%를 고려하였다. 이를 이용해 복합재료 열팽창계수의 불확실성에 따른 영향을 분석하였다.

역해석기법을 통해서 구한 복합재료 섬유의 열팽창계수는 Table 5에 평균(μ)과 표준편차(σ)로 나타내었다. P100에 대한 α_1^f 를 제외하면 Table 2에 주어진 복합재료 섬유에 대

Table 4 Material Properties of lamina of composite materials

Property	Glass/Epoxy	P75/Epoxy930	P100/Aluminum2024
α_1 (ppm)	6.11±0.3 ^a	-1.04±0.05 ^a	1.52±0.076 ^a
α_2 (ppm)	21.9±1.1 ^a	34.5±1.73 ^a	26.2±1.31 ^a
V_f	0.70	0.48	0.40

^a Approximated value with 5% COV

Table 5 Predicted CTE values of fibers

Fiber	α_1^f (ppm/°C)	α_2^f (ppm/°C)
Glass (in Glass/Epoxy)	4.98±0.31 (6% ^a)	6.29±1.47 (23% ^a)
P75 (in P75/Epoxy930)	-1.51±0.06 (4% ^a)	7.71±3.50 (45% ^a)
P100 (in P100/Aluminum2024)	-1.55±0.08 (5% ^a)	0.84±9.45 (1125% ^a)

^a COV

한 열팽창계수(Karadeniz *et al.*, 2007)는 복합재료 물성의 불확실성을 고려하여 예측한 섬유 열팽창계수 분포 범위 내에 있다는 것을 확인할 수 있다.

Glass/Epoxy, P75/Epoxy930 복합재료의 경우 복합재료 라미나의 열팽창계수의 5% 변동에 따라 길이방향은 최대 6%(0.31ppm/°C), 가로방향은 최대 45%(3.50ppm/°C)의 변화를 보였다. 그러나 P100/Aluminum2024의 경우 α_2^f 의 표준편차가 ±9.45ppm/°C로 COV 1125%에 해당하는 매우 큰 변화를 보임을 확인하였다. 이는 기지재료 Aluminum 2024이 높은 강성을 보유하고 있기 때문으로 추정되며 P100/Aluminum2024과 같은 MMC 재료의 섬유 물성을 역해석을 이용해서 예측하는 경우에는 복합재료 라미나의 열팽창계수 측정결과에 대한 신뢰도를 높여야 할 것으로 판단된다.

3.2 M55J에 대한 열팽창계수 예측 결과

현재 재료물성이 부분적으로만 공개되어 있는 탄소섬유 M55J의 열팽창계수를 2가지 복합재료 시편 M55J/M18 (Sample #1)과 M55J/RS12B(Sample #2)의 시험결과를 이용하여 예측하고 그 결과를 분석하였다. 또한 라미나 또는 기지 물성의 불확실성이 M55J의 열팽창계수 예측에 미치는 영향을 함께 고찰하였다.

3.2.1 라미나의 열팽창계수와 기지의 포와송비의 불확실성에 따른 영향 분석

Table 6과 같이 참고문헌에 기술된 M55J/M18 라미나의 탄성계수 및 열팽창계수를 역해석기법에 적용해서 섬유의 탄성계수 및 열팽창계수를 도출하였다. M55J/M18의 섬유

Table 6 Material Properties of M55J/M18 and constituents

Property	Reference value			Predicted value
	M55J/M18 $\mu \pm \sigma$	M55J (Fiber)	M18 (Matrix)	M55J(Fiber) $\mu \pm \sigma$
E_1 (GPa)	300.6 ^a	540 ^b	4.2 ^c	496.52 ^d
E_2 (GPa)	5.91 ^a		4.2 ^c	6.38 ^d
G_{12} (GPa)	4.61 ^a		1.5 ^c	17.92 ^d
G_{23} (GPa)	2.143 ^c		1.5 ^c	2.78 ^d
ν_{12}	0.318 ^a		0.4 ^c	0.25 ^d
α_1 (ppm/°C)	-1.016±0.07 ^a	-1.1 ^b	55.1 ^c	-1.37±0.07
α_2 (ppm/°C)	35.25±1.47 ^a		55.1 ^c	2.70±2.60

^a Romeo and Frulla(1995)

^b Toray Industries, Inc.,

(<http://www.torayca.com/en/index.html>)

^c Hexcel Corporation(<http://www.hexcel.com>)

^d Predicted value in this study using the scheme proposed by Rupnowski *et al.*(2005)

체적비는 0.602이다. M55J/M18 라미나에 대한 탄성계수는 Table 6에서의 평균값 μ (Romeo *et al.*, 1995)으로 일정하게 사용하였으며, M55J 섬유의 탄성계수 예측에는 Rupnowski 등(2005)가 제안한 기법을 사용하였다. 라미나의 열팽창계수는 Romeo와 Frulla(1995)가 8개의 시편에 대해서 측정한 값들을 사용하여 섬유의 열팽창계수를 예측하였다. 즉, 라미나의 열팽창계수 변화에 따른 섬유의 열팽창계수 변화를 평가하였다. Table 6에 함께 나타낸 바와 같이 섬유에 대한 열팽창계수는 각각 길이방향 -1.37±0.07 ppm/°C, 가로방향 2.70±2.60ppm/°C로 얻어졌다.

다음으로, 섬유체적비가 0.56인 M55J/RS12B 복합재료를 대상으로 하여 M55J 섬유의 열팽창계수를 예측해 보았다. 역해석기법에 사용된 라미나와 기지의 물성치는 Table 7과 같다. 위의 M55J/M18 라미나에 대한 해석과 마찬가지로 M55J/RS12B 라미나의 열팽창계수는 Lee(2010)가 9개의 시편에 대해서 측정한 값을 사용하였다. 기지재료 RS12B에 대한 탄성계수와 열팽창계수는 참고문헌(TenCate, 2014)에 기술된 값을 사용하였지만, RS12B의 포와송비는 알려지지 않았기 때문에 전형적인 기지재료의 포와송비를 고려하여 0.35~0.45 사이의 값을 산정하였다. 즉, 라미나의 열팽창

Table 7 Material Properties of M55J/RS12B and constituents

Property	M55J/RS12B $\mu \pm \sigma$	Property	RS12B
α_1 (ppm/°C)	-0.91±0.04 ^a	E (GPa)	3.40 ^b
α_2 (ppm/°C)	37.70±1.29 ^a	ν	0.40±0.05 ^c
V_f	0.56 ^a	α (ppm/°C)	52.0 ^b

^a Lee(2010)

^b TenCate(<http://www.tencate.com>)

^c Assumed value

Table 8 Comparison of CTE values of M55J by inverse analysis of two composite laminates

Sample	α_1^f (ppm/°C)	α_2^f (ppm/°C)
Sample #1	-1.37±0.07	2.70±2.60
Sample #2 with $\nu=0.35$	-1.21±0.04	10.68±3.28
Sample #2 with $\nu=0.40$	-1.23±0.04	6.42±3.38
Sample #2 with $\nu=0.43$	-1.24±0.04	3.51±3.49
Sample #2 with $\nu=0.45$	-1.25±0.04	1.40±3.51

계수뿐만 아니라 기지재료의 포와송비를 다양하게 가정하고, 이와 같은 불확실성이 열팽창계수 예측에 미치는 영향을 함께 평가해 보았다.

첫 번째 시편(Sample #1)과 두 번째 시편(Sample #2)에서 라미나의 열팽창계수 변화에 따른 M55J 섬유 열팽창계수 예측결과를 Table 8과 같다. 두 번째 시편의 경우는 기지의 포와송비에 의한 영향을 분석하기 위하여 포와송비를 0.35, 0.40, 0.43, 0.45로 달리 하여 예측결과를 나타냈다.

이러한 예측결과를 정규분포로 가정하여, 섬유의 길이방향과 가로방향의 열팽창계수를 각각 Fig. 7과 Fig. 8에 나타냈다. 예측된 섬유의 길이방향 열팽창계수 α_1^f 의 표준편차는 라미나 열팽창계수의 표준편차와 비슷한 수준으로 나타지지만, 가로방향 열팽창계수 α_2^f 의 표준편차는 2~3배 수준으로 더 증폭되는 것을 확인할 수 있다. 특히, 두 번째 시편에서 길이방향 열팽창계수는 포와송비 변화에 따라 거의 변화가 없었으나, 가로방향 열팽창계수는 평균 및 표준편차에 급격한 변화가 나타나는 것을 확인하였다. 즉, 복합재료에서 섬유의 가로방향 열팽창계수는 기지의 포와송비에 매우 민감하다고 추론할 수 있다. 참고적으로, 두 번째 시편에서 포와송비가 0.43인 경우에 대한 가로방향 열팽창계수의 평균값이 첫 번째 시편에서의 얻는 평균값과 유사하다는 것을 Fig. 8로부터 알 수 있다. 이러한 예측결과는 역해석기법을 통해 섬유의 물성치를 예측하는 경우 기지재료의 포와송비를 엄밀하게 측

Fig. 7 Comparison of probability density function of longitudinal CTE of M55J between two samples **Fig. 8** Comparison of probability density function of transverse CTE of M55J between two samples

정해야 할 필요가 있음을 의미한다.

또한 두 가지 시편에 대하여 역해석으로 얻은 M55J의 열팽창계수의 유사성을 독립표본 T-검정을 통해 고찰하였다. 유의수준 5%(신뢰도 95%)를 사용하였으며, Sample #2의 포와송비를 0.35, 0.40, 0.43, 0.44, 0.45로 각각 달리 하여 Sample #1의 결과와 비교하였고 이에 대한 결과를 Table 9에 나타내었다. M55J의 길이방향 열팽창계수 α_1^f 의 경우, 평

Table 9 Comparison of the results of M55J CTEs in terms of equalities of variances and means

Sample compared with Sample #1	α_1^f (ppm/°C)		α_2^f (ppm/°C)	
	Significance (%) by Levene's test for equality of variances	Significance (%) by T-test for equality of means	Significance (%) by Levene's test for equality of variances	Significance (%) by T-test for equality of means
Sample #2 with $\nu=0.35$	19.8 (Equal variances)	0.0 (Different)	80.8 (Equal variances)	0.0 (Different)
Sample #2 with $\nu=0.40$	20.4 (Equal variances)	0.0 (Different)	73.3 (Equal variances)	0.3 (Different)
Sample #2 with $\nu=0.43$	20.9 (Equal variances)	0.0 (Different)	68.4 (Equal variances)	25.9 (Equal)
Sample #2 with $\nu=0.44$	21.1 (Equal variances)	0.0 (Different)	66.7 (Equal variances)	74.4 (Equal)
Sample #2 with $\nu=0.45$	21.2 (Equal variances)	0.0 (Different)	65.0 (Equal variances)	60.3 (Equal)

균의 동일성 유의확률이 0%로 기준인 5%보다 작으므로 Sample #1보다 Sample #2의 결과가 더 크다고 할 수 있다. 두 결과의 분산은 Levene의 등분산검정 유의확률 20% 수준으로 기준인 5%보다 크므로 동일하다는 것을 확인할 수 있다. M55의 가로방향 열팽창계수 α_2' 의 경우, Sample #2에서 포와송비가 0.43~0.45 범주에 있을 때 Sample #1과의 평균의 동일성 유의확률이 26%이상으로 5%보다 크므로 평균값이 동일하다고 할 수 있으며, 분산의 경우에도 Levene의 등분산검정 유의확률 60%이상 수준이기 때문에 분산도 동일하다고 할 수 있다. 즉, 두 가지 종류의 시편에 대한 결과는 길이방향 열팽창계수 평균치에 약간의 차이는 존재하지만 동일한 표준편차분포를 갖고 있으며, 가로방향 열팽창계수는 포와송비가 0.43~0.45일 때 평균 및 표준편차가 95% 신뢰도로 동일하다고 할 수 있다.

3.2.2 기지 물성의 불확실성에 따른 영향 분석

섬유의 열팽창계수 예측에 영향을 줄 수 있는 기지 물성의 불확실성에 대한 분석을 추가적으로 실시하였다. 앞서 3.2.1 절에서 다룬 포와송비 0.43인 경우의 M55J/RS12B 복합재

Fig. 9 Change in probability density function of longitudinal CTE of M55J due to uncertainty of RS12

Fig. 10 Change in probability density function of transverse CTE of M55J due to uncertainty of RS-12

료를 기준으로 하여, RS12B 기지의 탄성계수와 열팽창계수의 불확실성이 섬유의 열팽창계수 예측에 미치는 영향을 살펴보았다. 여기에서는 기지의 탄성계수와 열팽창계수의 불확실성에 의한 COV를 각각 5%이하 수준인 $\pm 0.2\text{GPa}$, $\pm 2.0\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 로 산정하였다.

이때 역해석기법으로 예측한 섬유의 길이방향과 가로방향 열팽창계수를 각각 Fig. 9와 Fig. 10에 나타냈다. 섬유의 길이방향 열팽창계수의 경우에는 기지재료의 물성 변화에 따라 COV가 3.2%에서 5.6%로 2.4% 증가를 보였으나, 가로방향 열팽창계수의 COV는 99.4%에서 185.8%로 86.4% 증가하는 것을 확인하였다. 즉, 신뢰도 높은 결과를 얻기 위해서 기지의 물성치도 정확하게 측정되어야 함을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 Mori-Tanaka 기법과 역해석기법을 결합하여 복합재료 구성재료의 열팽창계수를 예측기법을 제안하고, 재료의 물성이 잘 알려진 복합재료 구성성분(glass P75, P100)의 열팽창계수를 예측함으로써 기법의 유효성을 검증하였다. 또한 재료물성이 부분적으로만 알려진 M55J의 열팽창계수를 예측하고 그 결과를 분석하였다. 특히, 복합재료 구성성분인 섬유의 열팽창계수를 예측에 필요한 기초적인 자료인 라미나의 열팽창계수, 기지의 포와송비, 기지의 탄성계수 및 열팽창계수에 불확실성이 내포되어 있을 때, 섬유의 열팽창계수 예측에 미치는 영향을 고찰하였다. 섬유의 길이방향 물성은 기지 재료물성의 불확실성에 큰 차이를 보이지 않았으나 가로방향 열팽창계수는 기지의 물성에 큰 차이를 나타내었다. 여기에서 예측에 필요한 자료에 포함된 불확실성 편차 수준보다 2~3배 가량 증폭된 편차를 갖는 결과를 보였다. 섬유의 가로방향 열팽창계수를 정확하게 추정하기 위해서는 라미나 또는 기지의 물성을 정밀하게 측정하여 이용할 필요가 있음을 의미한다.

한편, 본 연구에서는 Mori-Tanaka 기법에 근거한 단순한 예측모델과 많은 가정(기공 및 계면 영향 무시, 완전결합 등)을 사용했지만, 제안된 기법을 정확성과 신뢰성 측면에서 개선하기 위해서는 다양한 형태의 상세한 RVE를 사용할 필요가 있다. 현재 재료물성 측정장비와 정밀계측기술의 발전, Micro CT 및 영상처리기법을 활용한 복합재료 해석기술의 발전 추세를 감안할 때 실제적인 섬유 분포, 중간상(interphase)의 특성을 고려하여 제안된 역해석기법을 적용하면 보다 신뢰성 있는 구성성분의 물성치를 추출할 수 있을 것이다. 이때, Mori-Tanaka 기법 외에 전산균질화 기법을 도입하면 기지 내의 임의적인 섬유 분포, 중간상, 결함 등을 수용할 수 있으므로 더욱

정확한 역해석이 가능해질 것이다. 또한, 본 연구에서는 시편 물성치에 대한 제한된 정보로 인하여 8개 또는 9개 수준의 시편에 대한 통계적인 접근을 시도했으나, 다수의 시편에 대한 물성치를 토대로 하여 구성성분 물성치에 대한 일반화된 경향 분석이 가능할 것으로 예상된다.

References

- Benedikt, B., Kumosa, M., Predecki, P. (2005) An Evaluation of Residual Stresses in Graphite/PMR-15 Composites by X-ray Diffraction, *Acta Mater.*, 53, pp.4531~4543.
- Benedikt, B., Rupnowski, P., Kumosa, M. (2003) Visco-elastic Stress Distributions and Elastic Properties in Unidirectional Composites with Large Volume Fractions of Fibers. *Acta Mater.*, 51, pp.3483~3493.
- Daniel, I.M., Ishai, O. (2006) *Engineering Mechanics of Composite Materials*, Second edition, Oxford university press, New York, USA.
- Hexcel Corporation <http://www.hexcel.com> (accessed 2014)
- Islam, MD.R. Sjölin, S.G., Pramila, A. (2001) Finite Element Analysis of Linear Thermal Expansion Coefficients of Unidirectional Cracked Composites, *J. Compo. Mater.*, 35, pp.1762~1776.
- Karadeniz, Z.H., Kumlutas, D. (2007) A Numerical Study on the Coefficients of Thermal Expansion of Fiber Reinforced Composite Materials, *Compos. Struct.*, 78, pp.1~10.
- Kulkarni, R., Ochoa, O. (2006) Transverse and Longitudinal CTE Measurements of Carbon Fibers and their Impact on Interfacial Residual Stresses in Composites, *J. Compo. Mater.*, 40, pp.733~754.
- Lee, D.-H. (2010) Precise Measurement of Thermal Expansion of Composite Materials for Space Applications, Master's Thesis, KAIST, Daejeon, Korea.
- Miyagawa, H., Mase, T., Sato, C., Drown, E., Drzal, L.T., et al. (2006) Comparison of Experimental and Theoretical Transverse Elastic Modulus of Carbon Fibers, *Carbon*, 44, pp.2002~2008.
- Romeo, G., Frulla, G. (1995) Analytical and Experimental Results of the Coefficient of Thermal Expansion of High-Modulus Graphite-Epoxy Materials, *J. Compo. Mater.*, 29, pp.751~765.
- Rupnowski, P., Gentz, M., Sutter, J.K., Kumosa, M. (2005) An Evaluation of the Elastic Properties and Thermal Expansion Coefficients of Medium and High Modulus Graphite Fibers, *Compos. Part A*, 36, pp.327~338.
- Schapery, R.A. (1968) Thermal Expansion Coefficients of Composite Materials based on Energy Principles, *J. Compo. Mater.*, 2, pp.380~404.
- Shin, H., Yang, S., Yu, S., Chang, S., Cho, M. (2012) A Study on the Sequential Multiscale Homogenization Method to Predict the Thermal Conductivity of Polymer Nanocomposites with Kapitza Thermal Resistance, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 25, pp.315~322.
- Strife, J.R., Prewo, K.M. (1979) The Thermal Expansion Behavior of Unidirectional and Bidirectional Kevlar/Epoxy Composites, *J. Compo. Mater.*, 13, pp.264~277.
- TenCate <http://www.tencate.com> (accessed 2014)
- Toray Industries, Inc. <http://www.torayca.com/en/index.html> (accessed 2014)
- Yang, S., Yu, S., Ryu, J., Cho, M. (2013) A Study on the Prediction of Elastoplastic Behavior of Carbon Nanotube/Polymer Composites, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 26, pp.423~430.
- Yu, W., Tang, T. (2007) A Variational Asymptotic Micromechanics Model for Predicting Thermoelastic Properties of Heterogeneous Material, *Int. J. Solid & Struct.*, 44, pp.7510~7525.

요 지

복합재료 구성성분은 수 마이크로미터 수준의 크기를 가지고 있으므로 시험을 통한 정확한 물성 측정이 매우 어렵다. 그러므로 본 논문에서는 역해석을 이용하여 복합재료 구성성분의 열팽창계수를 예측할 수 있는 기법을 제안한다. 복합재료에 대한 등가 열팽창계수를 예측할 수 있는 Mori-Tanaka 기법과 결합된 역해석기법을 이용하면, 라미나 수준의 목적함수를 최소화함으로써 구성성분의 열팽창계수를 효율적으로 구할 수 있다. 본 연구에서 제안한 기법을 검증하기 위하여 다양한 섬유(glass fiber, P75, P100, M55J)에 대한 열팽창계수를 예측하고 이를 시험결과와 비교하였다. 또한 라미나와 기지 물성치에 대한 불확실성이 섬유 물성치 예측에 미치는 영향을 분석하였다.

핵심용어 : 복합재료, 열팽창계수, Mori-Tanaka 기법, 역해석기법