

C/SiC 재료의 물성 측정을 위한 준 해석적 방법

김영국*

Quasi-Analytical Method of C/SiC Material Properties Characterization

Yeong K. Kim*

ABSTRACT

This paper represents a simple and effective calculation method to predict the orthotropic engineering constants for C/SiC woven fabric composite. The method, a quasi-analytical method using the modified equivalent laminated model, idealizes the woven fabric structure as a symmetric three-ply laminate to utilize a classical laminated plate theory. The required initial parameters are in-plane modulus from experiments and crimp ratio of the woven fabric. This study shows its feasibility by demonstrating example to calculate the engineering constants to thickness direction needed for three dimensional thermo-mechanical stress calculations.

초 록

이 논문은 발사체 노즐에 사용되는 내열성 재료인 C/SiC에 대한 이방성 물성을 예측하는 방법으로, 평면 방향의 실험 데이터를 이용해서 9개의 엔지니어링 물성을 간단하고 효과적으로 계산하는 준 이론적 접근에 대해 설명하였다. 이 방법은 C/SiC 복합재료를 직조 보강재의 굴곡율에 따라 세 층으로 이상화 하여, 고전 적층 평판이론으로 계산한다. 평면 방향으로 실행된 실험 데이터와 직조 구조물의 굴곡율을 초기 데이터로 이용하며, 측정이 어려운 두께 방향의 물성을 효과적으로 얻을 수 있었다. 예제를 통하여 이 방법의 유용성을 증명하였다.

Key Words: C/SiC, Thermo-mechanical stress(열응력), Orthotropic properties(이방성 물성)

1. 서 론

카본 화이버로 강화된 실리콘 카바이드 (C/SiC) 복합재료는 최근 항공 우주 내열 재료로

상당히 주목을 받고 있는 재료이다. 카본 화이버는 대단히 높은 온도에서도 그 물성을 유지하고, 밀도가 낮으며 우수한 강도를 지니고 있으나, 산화 현상에 상당히 취약한 것으로 알려져 있다. 특히 화학 증착법 특유의 공정 과정으로 생기는 기공 때문에 물성이 떨어지고 산화 과정을 막지 못하는 단점이 있다. 그러나 최근 액체 실리콘을

* 한국항공대학교

연락처, E-mail: yeong.kim@kau.ac.kr

기공에 주입함으로써 적절한 가격으로 높은 강성을 유지하며, 탄소 화이바의 산화를 효과적으로 막을 수 있음에 따라 높은 온도와 척박한 환경에 노출되기 쉬운 추진체 노즐 재료로 관심을 끌고 있다.

노즐 설계에 있어서 형상 정보와 더불어 가장 중요한 요소는 정확한 물성 데이터이다. 추진체가 연소하는 과정에서 발생하는 온도와 압력으로, 구조 형상의 변형이 발생할 수 있는데, 이로 인해 추력의 크기와 방향이 변할 수 있으므로 발사체의 제어에 상당한 영향을 줄 수 있다. 따라서 노즐을 비롯한 구조체의 형상 안정성을 확보하는 것이 대단히 중요하며 이를 위해서 정확한 열 구조 해석이 필수적으로 수행되어야 한다.

일반적으로 노즐과 같은 복잡한 구조체는 상용 유한 요소 프로그램이 많이 사용되며, 정확한 응력 해석 및 예측을 위해서 정확한 물성을 확보해야 한다[1-4]. 특히 C/SiC는 직조 구조물인 탄소 섬유 보강재의 구조에 따라 강한 이방성 물성을 보인다. 직조 보강 복합 소재의 물성을 구하기 위한 일반적인 방법은 micro mechanical 모델을 이용해서 계산한다[3-7]. 이러한 모델은 보강 섬유와 모재의 물성이 정확한 경우 어느 정도 물성 예측을 가능하게 한다. 그러나 C/SiC의 경우 탄소의 물성은 비교적 정확하게 알려져 있으나, 모재인 SiC는 공정 조건에 따라 Si와 C의 함량이 다르고 특히 기공을 포함하는 경우도 있어 그 물성을 쉽게 수할 수 없다. Fig. 1은 C/SiC의 단면을 보여준다. 또한 평면 방향의 물성은 기존의 인장 실험이나 전단 실험으로 비교적 쉽게 구할 수 있지만 두께 방향의 물성은 실험으로 구하기 상당히 어렵다. 따라서 실험을 직접 실행하지 않고도 쉽게 물성을 예측할 수 있는 방법이 필요하다. 이 논문은 이와 같은 문제를 해결하기 위하여, 실험으로 구할 수 있는 물성, 즉 C/SiC의 평면 방향에 대한 인장 실험을 실시하여 얻은 탄성 계수와, 탄소 섬유의 직조 구조물에 대한 정보만으로 두께 방향의 물성을 포함한 엔지니어링 상수를 모두 구할 수 있는 방법이다.

2. C/SiC의 물성 특성

C/SiC는 SiC를 탄소 직조 섬유로 보강한 전형적인 복합재료이고, 열응력 해석을 위해서는 12개의 엔지니어링 상수 (Young's modulus E_x, E_y, E_z , Shear modulus G_{xy}, G_{yz}, G_{zx} , Poisson's ratio $\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{zx}$, coefficient of thermal expansion $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$)가 필요하다 [Fig. 2].

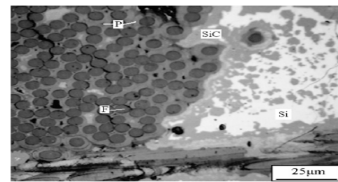


Fig. 1 Section view of C/SiC [7]

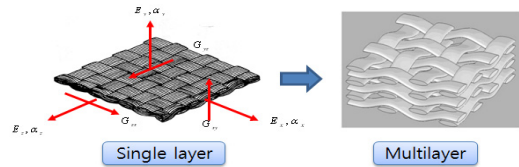


Fig. 2 Orthotropic properties of woven fabric composite

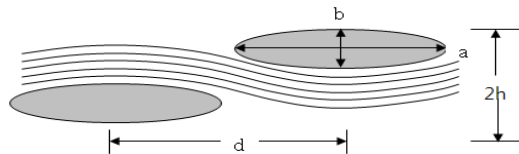


Fig. 3. Geometry parameters of carbon woven fabric

여기서 소개되는 준 이론적 모델은 기 발표된 등가 적층판 이론을 수정한 것으로, 이 모델의 특징은 직물 섬유로 강화된 복합재료 기판을 세 개의 대칭 구조를 가진 기판으로 단순화 하여 warp과 fill 방향의 연성 계수(compliance) C_{ij}^k 를 마치 섬유의 굴곡이 없는 구조로 이상화 하여 계산한다 [5,8]. 이를 위해서 등가의 연성 계수 $\overline{C_{ij}^k}$ 는 기판의 길이방향을 따라 회전하는 물성을 다음과 같이 적분하여 계산한다.

$$\overline{C_{ij}^k} = \frac{1}{2d} \int_0^{2d} C_{ij}^k(x) dx \quad (2-1)$$

여기서 k 는 warp(w)과 fill(f)을 나타내고 d 는 섬유 뭉치 (fiber bundle)사이의 거리를 나타내며, C_{ij}^k 는 섬유 뭉치의 가로세로비(b/a)와 굴곡률 (crimp ratio: h/d)의 함수이고, d 는 섬유 뭉치간의 거리이다[그림 3]. 이 상수들은 C/SiC의 단면을 연마해서 단면을 조사하면 얻을 수 있다.

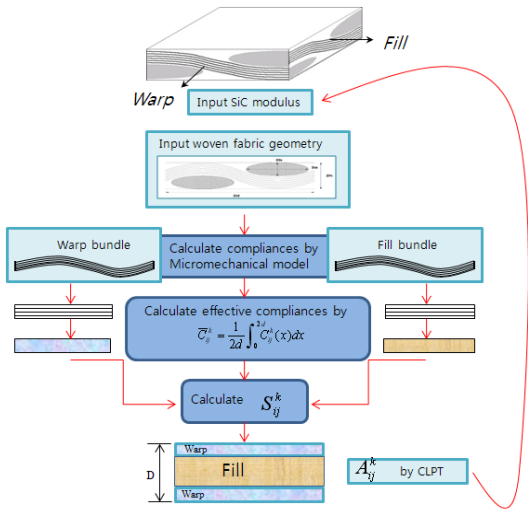


Fig. 4 Flow chart of the calculation

이렇게 해서 얻어진 연성 계수 행렬식은 탄성 계수 S_{ij} 를 계산하기 위해 역 계산되며, 따라서 기판의 탄성 계수 A_{ij} 가 고전 적층판 이론 (classical laminated plate theory)에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$A_{ij} = d^w S_{ij}^w + d^f S_{ij}^f \quad (2-2)$$

여기서 d^w 와 d^f 는 warp과 fill의 두께를 나타낸다. 만약 직조구조가 warp과 fill 방향으로 같은 구조를 갖는다면 평판의 탄성 계수는 다음과 같이 계산된다.

$$E_x = \frac{A_{11}A_{22} - A_{12}^2}{A_{22}D}, \quad E_y = \frac{A_{11}A_{22} - A_{12}^2}{A_{11}D}$$

$$G_{xy} = \frac{A_{66}}{D}, \quad \nu_{xy} = \frac{-A_{12}}{A_{22}} \quad (2-3)$$

여기서 D 는 적층판 전체의 두께를 나타낸다. 초기 C_{ij}^k 를 계산하기 위해 self-consistent field 가정을 이용한 미세역학 모델이 사용되었다[9]. 이 식을 사용하기 위해서는 모재의 물성을 알아야 하는데 이 값을 현재 알 수 없으므로, 실험을 통해서 warp과 fill방향의 탄성 계수 E_x (그리고 E_y)가 계산 될 때 까지 모재의 탄성 계수를 연속적으로 대입하면 전체의 물성을 얻어 낼 수 있다. 여기서 계산된 물성으로 두께 방향으로 warp과 fill 방향의 전단 계수를 다음과 같이 평균해서 얻을 수 있다.

$$G_{yz} = \frac{G_{yz}^w - G_{yz}^f}{2}, \quad C_{ij}^k = \frac{1}{C_{ij}^k} \quad (2-4)$$

즉, 인장 실험으로 얻은 평면 방향의 물성과 탄소 섬유의 물성, 그리고 직조물의 굴곡률을 알면 9개의 탄성계수를 계산할 수 있다. 이에 대한 전체 계산 흐름이 그림 4에 나타나 있다. 열팽창 계수 α 도 같은 방법으로 계산된다.

3. 계산 결과

카본의 물성은 Table 1과 같이 가정하였고, 계산을 하기 위해 인장 실험에 의해서 얻어진 C/SiC의 탄성 계수는 120 GPa, 섬유 체적비(v_f)는 50%, micro scope으로 측정된 직물 섬유에 대한 단면 형상비는 0.08로 가정하였다 (표 2).

Table 1. Carbon material properties

E (GPa)	ν	α
230	0.3	-0.14e-6

이 물성들을 초기 값으로 C/SiC의 값이 120 GPa가 될 때까지 SiC의 값을 연속적으로 대입하였다. 그 결과 SiC의 값이 82.4 GPa일 때 E_x 값이 120 GPa가 되었고 그때 계산된 결과가 Table 3에 수록되어 있다. 따라서 6개의 탄성계수 및 Poisson's ratio (ν)그리고 세 방향의 열팽창 계수

(α)가 모두 계산 되었다.

Table 2. In-plane Young's modulus, CTE, fiber volume fraction and crimp ratio.

E (GPa)	Crimp ratio (h/d)	d (micron)	α	v_f
120	0.08	350	2.0e-6	0.5

Table 3. In-plane Young's modulus, CTE, fiber volume fraction and crimp ratio.

E_x	E_y	E_z	G_{xy}	G_{yz}	G_{zx}
100	100	97	39.2	38	38
ν_{xy}	ν_{yz}	ν_{zx}	α_x	α_y	α_z
0.29	0.27	0.27	1.5e-6	1.5e-6	3.2e-6

Unit of E and G: GPa

3. 결 론

이 논문에서는 평면 방향의 탄성계수와 직물 섬유 구조를 알면 C/SiC의 이방성 물성을 계산할 수 있는 방법이 제시되었다. 계산 결과 12개의 엔지니어링 상수가 모두 얻어졌고 계산과정에서 SiC의 물성도 예측되었다. 이 방법은 3차원 열응력 계산에 필요한 물성 상수를 예측하는데 효율적으로 사용될 수 있다.

참 고 문 헌

1. R. Ramesh Kumar, G. Vinod, S. Renjith, G. Rajeev, M.K. Jana, R. Harikrishnan, "Thermo-structural analysis of composite structures," *Materials Science and Engineering A* 412 (2005) 66 - 70
2. Suresh Kumar, Anil Kumar, Anupam Shukla, G. Rohini Devi, A.K. Gupta, " Investigation of thermal expansion of

3D-stitched C - SiC composites," *Journal of the European Ceramic Society* 29 (2009) 2849 - 285

3. Gregory N. Morscher, Vijay V. Pujar, "Design Guidelines for In-Plane Mechanical Properties of SiC Fiber-Reinforced Melt-Infiltrated SiC Composites," *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 6 [2] 151 - 163 (2009)
4. Jingjiang Nie, Yongdong Xu *, Litong Zhang, Xiaowei Yin, Laifei Cheng, Junqiang Ma, "Effect of stitch spacing on mechanical properties of carbon/silicon carbide composites," *Composites Science and Technology* 68 (2008) 2425 - 2432
5. N. R. Sottos, J. M. Ockers and M. Swindeman, "Thermoelastic Properties of Plain Weave Composites for Multilayer Circuit Board Applications," *J. of Electronic Packaging*, Vol. 121, 1999, pp.37-43.
6. N. K. Naik and P. S. Shembekar, "Elastic Behavior of Woven Fabric Composites:I-Lamina Analysis," *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, 1992, pp. 2196-2225.
7. J. Wang, M. Lin, Z. Xu, Y. Zhang, Z. Shi, J. Qian, G. Qiao, Z. Jin, "Microstructure and mechanical properties of C/C - SiC composites fabricated by a rapid processing method," *Journal of the European Ceramic Society* 29 (2009) 3091 - 3097
8. Y. K. Kim "Viscoelastic Effect of FR-4 Material on Packaging Stress Development," *IEEE transactions on AdvancedPackaging*, Vol.30 No.3, 2007, pp.411-420.
9. J. M. Whitney and R.L. McCullough, *Micromechanical Materials Modeling*, Vol. 2, Delaware Composites Design Encyclopedia, Technomic Publishing Company, Lancaster, PA