

유한요소법을 이용한 평직 세라믹 기지 복합재료의 등가물성치 산정

이성욱[†] · 조종두^{*}

Finite Element Analysis for Effective Properties of Ceramic Matrix Plain Woven Textile Composites

Sung-Wook Lee and Chongdu Cho

Key Words : Finite Element Method(유한요소법), Ceramic Matrix Composites(세라믹 기지 복합재료), Plain Weave(평직), Effective Properties(등가 물성치), Unit Cell(단위 구조)

Abstract

Effective properties of ceramic matrix plain woven textile composites were calculated using finite element analysis. The considered geometry is a unit cell of plain weave and the analysis was performed by commercial finite element program, ANSYS. The materials for analysis are 3 types for matrix, 1 type for fiber with various volume fraction. The result indicates that the effective properties of ceramic matrix composites can be controlled by the volume fraction. The result can be used for numerical analysis using ceramic matrix composites.

기호설명

E_i : i 방향 탄성계수

E_f : 섬유의 탄성계수

E_m : 기지의 탄성계수

V_f : 섬유의 부피분율

V_m : 기지의 부피분율

v_{ij} : 각각의 방향 프와송의 비

G_{ij} : 각각의 방향 전단탄성계수

G_f : 섬유의 전단탄성계수

G_m : 기지의 전단탄성계수

α_i : i 방향 열팽창계수

α_f : 섬유의 열팽창계수

α_m : 기지의 열팽창계수

K : 체적탄성계수(bulk modulus)

ρ : 밀도

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

최근, 자동차의 디스크 브레이크에 있어 기존 재료의 대체재료로서 세라믹 기지 복합재료(Ceramic Matrix Composites)를 적용하려는 시도가 활발히 진행되고 있다. CMC 재료 자체는 세라믹 기지와 섬유의 적절한 형상 배치와 부피분율(volume fraction)을 조절함으로써 디스크 브레이크에 이상적인 물성치를 갖는 재료를 만들어낼 수 있으며 특히 열팽창 계수가 0 에 가깝게 설계가 가능하므로 열변형 자체를 차단할 수 있다¹⁾. 게다가 CMC의 밀도는 주철의 30% ~ 50%이며 기계적 성질 또한 더욱 우수하기 때문에 CMC 재료는 기존의 주철 재료를 사용한 디스크 브레이크들이 안고 있었던 여러 문제점 들을 극복할 수 있다. 그러나 CMC는 비등방성(anisotropic), 비균질성(non-homogeneous) 재료이므로 단일 물성치를 수

[†] 인하대학교 대학원 고체역학 연구실
E-mail : flookie@hanmail.net
TEL : (032)860-7321 FAX : (032)868-1716

^{*} 인하대학교 기계공학과

치해석에 직접적으로 대입할 수가 없으며 방향에 따른 물성치를 따로 계산해야만 한다.

평면 직조 복합재료는 일방향 복합재료에 비해 섬유다발의 직조 구조로 인하여 면의 방향으로의 기계적 특성이 우수하고 충격에 의한 파괴에 잘 저항한다. 또한 면내의 직각 방향으로 보다 균형된 물성치를 가지고 있고 복잡한 형상을 가진 구조물로의 성형성이 탁월하다. 그러나 평면 직조 복합 재료의 매우 복잡한 기하학적 형상은 이 재료의 물성치를 계산하거나 상세 응력 거동을 예측하는 것을 매우 어렵게 한다²⁾. 이에 본 논문에서는 평면 직조 복합재료에 있어 가장 기본이 되는 평직 형태(Figure 1)에 대하여 유한요소법을 이용, 단위구조해석(unit cell analysis) 수행을 통하여 CMC 재료의 등가물성치(effective property)를 산정하였으며 이 계산에서 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS 를 사용하였다. 수치해석에 있어 물성치의 적용은 필수적인 요소이므로 산정된 등가물성치는 CMC 재료를 사용한 디스크 브레이크 등의 수치해석에 적용될 수 있을 것이다.

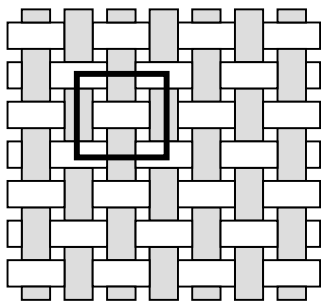


Fig. 1 Weave pattern of plain woven textile composites(plain weave)

2. 유한 요소 해석

2.1 단위 구조

단위 구조란 어떤 구조물에 있어서 하나의 특정 기본 구조 단위를 계속 반복하여 얻을 수 있는 경우 그 최소 기본 단위로 정의되며 이 최소 기본 단위구조를 사용하여 해석을 수행하는 것을 단위 구조 해석이라 한다. 여기서 단위 구조는 단순히 기하학적 형성만의 반복성을 의미하는 것이 아니고 경계 조건과 하중조건의 반복성까지 포함하고 있다³⁾. 이에 본 논문에서는 CMC 평면 직조 복합 재료의 평직 형태 구조 해석을 위해 단위 구조 해석을 수행하여 물성치를 산정하기로 한다.

2.2 단위 구조 모델.

직물 복합 재료의 기하학적 모델은 복잡한 미세구조를 가지고 있으므로 정확한 물성치를 계산하기 위해서는 정확한 미세구조의 기하학적 모델

링이 필요하다. 평면 직조 복합 재료는 0° 방향의 섬유다발(위사, Fill)과 90° 방향의 섬유다발(경사, Warp), 그리고 순 기지 지역(Pure Matrix Pocket)으로 이루어져 있다. 본 논문에서는 섬유다발 단면은 볼록렌즈(lenticular) 형상이고, 섬유다발의 굴곡은 사인곡선의 경로를 따른다고 가정하였다. 또, 0° 방향의 섬유다발과 90° 방향의 섬유다발은 모양과 재질이 동일하다고 가정하였고, 이 가정들에 따라 평직(plain weave)의 경우에 대해 단위구조를 모델링 하였다 (Figure 2, Figure 3)²⁾.

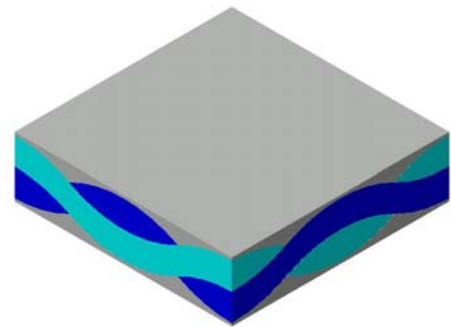


Fig. 2 Unit cell model of plain weave



Fig. 3 Tow model of plain weave

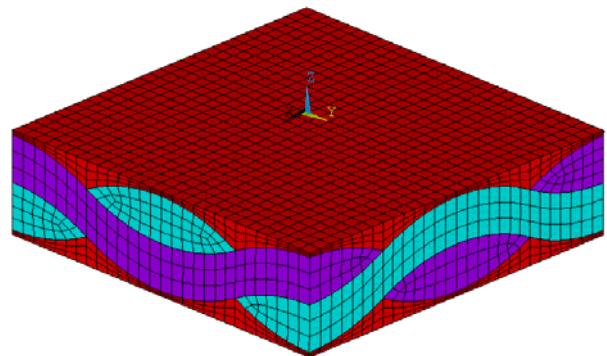


Fig. 4 Unit cell FE model for plain weave

2.3 메쉬 생성

단위구조 모델에 ANSYS element library 의 SOLID95 육면체 요소를 사용하여 메쉬를 생성하였다(Figure 4).

2.4 물성치 계산

평면 직조 복합재료는 섬유다발을 먼저 직조하

고 섬유다발 속에 수지를 탐침시킨 후 적층하여 성형하게 된다. 그러므로 본 논문에서 섬유다발이라고 칭한 부분에는 섬유와 수지로 되어 있으나 섬유다발은 수천개의 섬유를 함유하고 있으므로 충분히 등가 단일 재료로 간주할 수 있다고 생각하여 평면 직조 복합재료가 섬유다발(tow)과 수지(matrix)의 두 가지 재료로 되어 있다고 가정하였다. 또, 0° 방향의 섬유다발과 90° 방향의 섬유다발은 사용된 섬유의 종류나 수지의 체적비 등에 따라 서로 다른 물성치를 가질 수 있으나 여기에서는 동일한 물성치를 가지는 것으로 가정하였다²⁾. 이 가정에 따라 섬유다발에 대한 등가 탄성계수는 Chamis의 공식을, 등가 열팽창 계수는 Shapery의 방법을 따라서 계산하였으며 Poisson ratio는 Poisson contraction effects를 통하여 계산하였다⁴⁾. 열적 물성치로서 열전도도는 복합재 혼합이론(rule of mixture)을 이용하여 계산하였다. Chamis의 SEM model은 다음과 같다.

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (1)$$

$$E_2 = \frac{E_m}{1 + \sqrt{V_f} (1 - E_m / E_f)} \quad (2)$$

$$\nu_{12} = \nu_{f12} V_f + \nu_m V_m \quad (3)$$

$$G_{12} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{V_f} (1 - G_m / G_f)} \quad (4)$$

또한 열팽창 계수는 Shapery model을 이용하여 다음의 식으로 계산할 수 있다⁵⁻⁷⁾.

$$\alpha_1 = \frac{E_f V_f \alpha_f + E_m V_m \alpha_m}{E_f V_f + E_m V_m} \quad (5)$$

$$\alpha_2 = (1 + \nu_m) V_m \alpha_m + (1 + \nu_f) V_f \alpha_f - \alpha_1 \nu_{12} \quad (6)$$

각 방향의 Poisson ratio는 Poisson contraction effects를 이용하여 얻어낼 수 있다⁵⁾.

$$G_{23} = \frac{E_2}{2(1 + \nu_{23})} \quad (7)$$

$$\nu_{23} = 1 - \nu_{21} - \frac{E_2}{3K} \quad (8)$$

$$K = \left[\frac{V_f}{K_f} + \frac{V_m}{K_m} \right]^{-1} \quad (9)$$

$$K_f = \frac{E_f}{3(1 - 2\nu_f)} \quad (10)$$

$$K_m = \frac{E_m}{3(1 - 2\nu_m)} \quad (11)$$

본 논문에서는 (1)~(11)의 식들을 이용하여 Table 1에 나와있는 세 가지 기지 재료와 한 가지 섬유 재료를 조합하여 구성된 세 가지 종류의 복합재료에 대한 등가 물성치를 계산하였다. 전체 섬유의 부피분율을 35%로 가정한 경우의 예를 들면, 섬유다발의 부피분율이 61.2%이므로 전체적으로 섬유의 부피분율이 35%가 되도록 하기 위하여 섬유다발 내에서의 섬유의 부피분율을 $0.35/0.612 = 0.57$, 즉 57%의 섬유가 섬유다발 내부에 존재하도록 하였다(Table 2).

Table 1 Material properties of matrices and fiber

Material	LAS	Si ₃ N ₄	SiC	C _f (High modulus)
$\alpha(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	1.3	3.3	4.7	-0.5
E(GPa)	81	310	440	370
ν	0.3	0.27	0.3	0.3
$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	2.4×10^3	3.2×10^3	3.2×10^3	1.76×10^3

Table 2 Calculated effective material properties of tow ($V_f = 35\%$)

fiber tow	C _f /LAS	C _f /Si ₃ N ₄	C _f /SiC
$\alpha(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	$\alpha_1 = -0.245$	$\alpha_1 = 0.972$	$\alpha_1 = 1.96$
	$\alpha_2 = 0.43$	$\alpha_2 = 1.15$	$\alpha_2 = 1.67$
E(GPa)	$E_1 = 246$	$E_1 = 344$	$E_1 = 400$
	$E_2 = 51$	$E_2 = 276$	$E_2 = 513$
G(GPa)	$G_{12} = 76$	$G_{12} = 136$	$G_{12} = 148$
	$G_{23} = 16.3$	$G_{23} = 102$	$G_{23} = 217$
ν	$\nu_{12} = 0.3$	$\nu_{12} = 0.29$	$\nu_{12} = 0.3$
	$\nu_{23} = 0.561$	$\nu_{23} = 0.354$	$\nu_{23} = 0.183$
$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	2.04×10^3	2.38×10^3	2.38×10^3

2.5 해석의 수행

해석에 있어, 섬유 재료는 C_f로 고정하고 기지의 재료를 LAS, Si₃N₄, SiC의 3가지 재료에 대하여 $V_f = 35\%$ 인 경우의 경우를 수행하였고 LAS,

SiC 의 경우 에는 $V_f = 30\%$, $V_f = 40\%$ 인 경우 역 시 해석을 통해 등가물성치를 산정하였다. 각각의 경우에 있어 섬유다발(tow)의 등가물성치는 위의 식(1)~식(11)을 사용하여 계산한 값을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유한 요소 해석의 결과

해석의 결과로 산정된 각 재료에 따른 등가 물 성치는 Table 3 에서 나타내고 있으며, CMC 재료의 특성을 잘 보여주고 있다. C_f/SiC 의 부피분율에 따른 계산된 물성치 역시 Table 4 와 Table 5 에서 나타내고 있으며 부피분율의 변화에 따른 물성치 의 변화를 알 수 있다.

Table 3 . Calculated effective material properties (Plain weave, $V_f = 35\%$)

Material	C_f/LAS	C_f/Si_3N_4	C_f/SiC
α ($10^{-6}/^{\circ}C$)	$\alpha_1=0.324$	$\alpha_1=1.961$	$\alpha_1=3.00$
	$\alpha_2=0.309$	$\alpha_2=1.964$	$\alpha_2=3.00$
	$\alpha_3=0.434$	$\alpha_3=1.902$	$\alpha_3=2.87$
E (GPa)	$E_1 = 119$	$E_1 = 311$	$E_1 = 449$
	$E_2 = 119$	$E_2 = 311$	$E_2 = 449$
	$E_3 = 79$	$E_3 = 304$	$E_3 = 451$
G (GPa)	$G_{12} = G_{21}$ = 44	$G_{12} = G_{21}$ = 121	$G_{12} = G_{21}$ = 173
	$G_{13} = 45$	$G_{13} = 121$	$G_{13} = 174$
	$G_{23} = 45$	$G_{23} = 120$	$G_{23} = 176$
	$G_{31} = G_{32}$ = 30	$G_{31} = G_{32}$ = 118	$G_{31} = G_{32}$ = 177
	$\nu_{12} = \nu_{21}$ = 0.345	$\nu_{12} = \nu_{21}$ = 0.284	$\nu_{12} = \nu_{21}$ = 0.298
ν	$\nu_{13} = 0.323$	$\nu_{13} = 0.279$	$\nu_{13} = 0.289$
	$\nu_{23} = \nu_{32}$ = 0.314	$\nu_{23} = \nu_{32}$ = 0.293	$\nu_{23} = \nu_{32}$ = 0.274
	$\nu_{31} = 0.314$	$\nu_{31} = 0.293$	$\nu_{31} = 0.274$
$\rho(kg/m^3)$	2.18×10^3	2.7×10^3	2.7×10^3

Table 4 Calculated effective material properties of C_f/SiC (Plain weave)

V_f (%)	30	35	40
α ($10^{-6}/^{\circ}C$)	$\alpha_1=3.24$	$\alpha_1=3.00$	$\alpha_1=2.75$
	$\alpha_2=3.25$	$\alpha_2=3.00$	$\alpha_2=2.76$
	$\alpha_3=3.13$	$\alpha_3=2.87$	$\alpha_3=2.65$
E (GPa)	$E_1 = 449$	$E_1 = 449$	$E_1 = 448$
	$E_2 = 449$	$E_2 = 449$	$E_2 = 448$
	$E_3 = 450$	$E_3 = 451$	$E_3 = 452$
G (GPa)	$G_{12} = G_{21}$ = 173	$G_{12} = G_{21}$ = 173	$G_{12} = G_{21}$ = 173
	$G_{13} = 174$	$G_{13} = 174$	$G_{13} = 174$
	$G_{23} = 176$	$G_{23} = 176$	$G_{23} = 176$
	$G_{31} = G_{32}$ = 176	$G_{31} = G_{32}$ = 177	$G_{31} = G_{32}$ = 178
	$\nu_{12} = \nu_{21}$ = 0.298	$\nu_{12} = \nu_{21}$ = 0.298	$\nu_{12} = \nu_{21}$ = 0.298
ν	$\nu_{13} = 0.290$	$\nu_{13} = 0.289$	$\nu_{13} = 0.288$
	$\nu_{23} = \nu_{32}$ = 0.276	$\nu_{23} = \nu_{32}$ = 0.274	$\nu_{23} = \nu_{32}$ = 0.272
	$\nu_{31} = 0.276$	$\nu_{31} = 0.274$	$\nu_{31} = 0.272$

3.2 결과의 고찰

계산된 각 세라믹 기지 재료의 등가물성치를 기존의 자동차 디스크 브레이크 재료인 주철과 비교해 보면, 요구되는 조건에 매우 우수한 재료 특성을 가지고 있는 것을 알 수 있으며 특히 열팽창 계수의 부분에 있어서는 거의 0 에 가까운 값을 보여줌으로써(LAS 의 경우) 디스크 브레이크 등의 열팽창이 문제시되는 부품의 대체재료로서 적합함을 알 수 있다

부피분율이 변화함에 있어 각 재료의 등가물성치의 변화를 살펴보면 탄성계수 등의 기본적인 물성치는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 그러나 열팽창계수의 변화에 있어서는 비교적 큰 변화율로 변화함을 알 수 있으며 이는 요구되는 물성치를 가지는 재료를 부피분율을 조절함으로써 얻는 것이 가능함을 보여준다. 이에 물성치를 제어함에 있어 부피분율의 증감을 이 결과를 이용해 결정할 수 있을 것이다.

Table 5 Calculated effective material properties of C_f/LAS (Plain weave)

V_f (%)	30	35	40
α ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	$\alpha_1=0.409$	$\alpha_1=0.324$	$\alpha_1=0.224$
	$\alpha_1=0.412$	$\alpha_2=0.309$	$\alpha_2=0.164$
	$\alpha_3=0.919$	$\alpha_3=0.434$	$\alpha_3=0.684$
E (GPa)	$E_1 = 113$	$E_1 = 119$	$E_1 = 125$
	$E_2 = 113$	$E_2 = 119$	$E_2 = 125$
	$E_3 = 79$	$E_3 = 79$	$E_3 = 79$
G (GPa)	$G_{12} = G_{21}$	$G_{12} = G_{21}$	$G_{12} = G_{21}$
	= 42	= 44	= 46
	$G_{13} = 43$	$G_{13} = 45$	$G_{13} = 47$
	$G_{23} = 43$	$G_{23} = 45$	$G_{23} = 48$
	$G_{31} = G_{32}$	$G_{31} = G_{32}$	$G_{31} = G_{32}$
	= 30	= 30	= 30
v	$\nu_{12} = \nu_{21}$	$\nu_{12} = \nu_{21}$	$\nu_{12} = \nu_{21}$
	= 0.338	= 0.345	= 0.351
	$\nu_{13} = 0.322$	$\nu_{13} = 0.323$	$\nu_{13} = 0.325$
	$\nu_{23} = \nu_{32}$	$\nu_{23} = \nu_{32}$	$\nu_{23} = \nu_{32}$
	= 0.315	= 0.314	= 0.312
	$\nu_{31} = 0.315$	$\nu_{31} = 0.314$	$\nu_{31} = 0.312$

4. 결 론

해석의 결과로 나온 각 세라믹 기지 복합재료의 등가물성치의 특징으로부터 요구되는 조건에 적합한 기지의 재료를 채택할 수 있으며 부피분율의 변화에 따른 각 등가물성치의 변화성향으로부터 원하는 성질을 가지는 재료의 물성치를 어느 정도 제어할 수 있을 것이라 생각된다. 결과로 나온 등가물성치의 값들은 같은 형태의 세라믹 기지 복합재료를 사용하는 재료의 수치해석에 있어 자료로 쓰일 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2003년도 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) Chamis, C. C., 1989, "Mechanics of Composite Materials: Past, Present, and Future", Journal of Composites Technology and Research, Vol. 11, No. 1, pp. 3-14.
- (2) Kyeong-sik Woo, 1995, "Effect of Fiber Tow Waviness and Harness Number on Mechanical properties of Plain Woven Textile Composites", The Korean Society for Composites material, Vol. 8, No. 3, pp.60~73.
- (3) Kyeongsik Woo, 1997, "A Study on the Stiffness/Strength Variation due to Thickness Change for Thin Plain Weave Textile Composites", The Korean Society for Composites material, Vol. 10, No. 2, pp.1~12.
- (4) Woo. K. and J. D. Whitcomb, 1997, "Effect of Fiber Tow Misalignment on the Engineering Properties of Plain Weave Textile Composites", Composite Structure, Vol 37(3/4), pp. 343-355.
- (5) Dasgupta, A., Agrawal, R. K. and Bhandarkar, S. M., 1993, "Three-Dimensional Modeling of Woven-Fabric Composites for Effective Thermo-Mechanical and Thermal Properties", Composites Science and Technology, Vol. 56, pp. 209-223.
- (6) Shapery, R. A., 1968, "Thermal Expansion Coefficient of Composite Materials Based on Energy Principles", Journal of Composites Technology and Research, Vol. 2, No. 3, pp. 380-404.
- (7) D. Hull and T. W. Clyne, 1996, An Introduction to composite materials, Cambridge University Press, pp.71-77.