

자동차용 경량 복합재료의 기계적 거동예측에 관한 연구

A Study of Estimating the Mechanical Properties of Light-weight Composites for Automobile

고 병 친, 최 진 민, 권 오 건
B.C. Koh, J.M. Choi, O.K. Kwon



고 병 친

- 1953년 5월생
- 유한요소법, 고체역학
- 정회원, 한국자동차부품종합기술연구소 차체구조연구실



최 진 민

- 1952년 1월생
- 구조해석, 경량화설계
- 정회원, 한국기계연구원 수송기계실



권 오 건

- 1962년 9월생
- 파괴역학, 구조해석
- 한국기계연구원 수송기계실

기 때문이다. 이와 같이 자동차, 항공기, 선박, 철도차량과 같은 수송기계류는 연비증가와 고속화라는 주요기능을 달성하기 위하여 주요 부품의 소재로서 신소재를 활용한 고안전 경량 구조재를 많이 채택하고 있다. 특히 자동차의 경우, 차체 외부판넬, 충격완화용 전방 구조물, 차체 하부의 주요 구조, 차체 프레임, 주요 동력전달 부품 등에 고기능 경량 신소재가 사용된다.

복합재료는 물성이 다른 두 가지 이상의 재료가 서로 혼합되어 새로운 기계적 특성을 지니는 인공적인 재료로서 섬유강화 복합재나 금속기지 복합재 등이 있다. 일반적으로 이러한 재료의 기계적 특성은 실험적으로 결정되며, 거시적 측면에서의 파괴강도와 같은 한계특성만이 고려되는 것이 보통이다. 그러나 복합재료는 기본재료 사이의 기계적 특성이 크게 다르기 때문에, 작은 외력에 대해서도 응력집중에 따른 기본재료 사이의 미끄러짐, 강화섬유나 기지재료의 파손 등과 같은 미시적 구조의 손상이 일어나 구조물의 거시적 파괴 이전에 복합재료의 기계적 특성이 크게 저하되어 구조물의 기능성이 약화된다. 따라서 복합재 구조물은 이러한 점을 고려하여 보다 큰 안전도를 감안하여 설계되어야 한다. 이와같은 복합재료의 미시/거시적 거동을 미리 예측할

1. 서 론

최근 미국의 GM사는 1갈론에 100마일을 달리는 소위 “꿈의 차”라는 모델차를 발표한 바 있다. 이 모델차가 이와 같은 놀라운 성능 목표를 이룩할 수 있었던 가장 큰 이유는 차체의 외부판넬과 프레임을 복합재료와 알루미늄 합금으로 구성하여 차량의 중량을 기존 차량의 절반이하에 불과한 중량목표를 달성하였

수 있다면 복합재의 구조설계를 향상시킴으로써 보다 안정성을 확보할 수 있을 것이다.

일반적으로, 복합재료의 미시구조가 구조물에 비하여 지나치게 작기 때문에 복합재 구조물의 거동을 해석하기 위해서는 우선 거시적인 구성방정식, 즉 균일한 등가의 물성값을 가정하고, 이로부터 역학적 해석과정을 거쳐서 복합재 구조물의 응력분포를 구한다. 그러나 이 때의 응력값은 거시적 평균응력값일뿐으로 미시구조의 구성재료의 실제응력값은 아니다. 복합재를 이차가공하고자 할 때는 보다 완전한 미시구조의 정보, 즉 실제 응력에 대한 자료가 필요하게 된다.

최근 Lions¹⁾, Sanchez-Palencia^{2,9)}, Duvaut¹⁰⁾ 등에 의하여 제안된 균질화법은 복합재의 내부 미시구조가 주기성을 가지며, 동시에 이러한 주기성이 전체 구조의 크기에 비하여 매우 작다는 가정 아래서 복합재료 구조재의 “균질화된” 등가 물성을 예측하는 수학적 기법이다. 이와 같은 균질화법은 적어도 선형범위내에서는 비록 실험 자료가 충분하지 못한 경우에도 비교적 정확하게 등가 물성을 예측할 수 있으며, 최근에는 다공질 재료나 복합재료의 미시적 파손현상을 규명하는 데에 널리 적용되고 있다.

2. 균질화법

그림 1 과 같은 복합재료 구조물을 생각하자. 이 때 미시 구조가 주기성을 가진 작은 기본셀(cell)로 이루어져 있으며, 기본 셀의 크기는 전체 구조물의 크기에 비하여 $O(\epsilon)$ 로 극히 작다고 가정하자. ϵ 는 매우 작은 양수로서, 전체 구조물에 대한 기본셀의 크기를 대표하는 매기변수이다. 이러한 구조물에 외부하중이 작용하면, 어느 점의 변형이나 내부 응력은 주어진 점 x 의 ϵ 부근에서 반복적으로 변화한다. 따라서 이와 같은 미시적으로 반복적인 물리량 Ψ 를 전체 구조물의(혹은거시적) 영향 x 과 기본 셀의(혹은 미시적) 영향 $y = x/\epsilon$ 으로 구분하여, $\Psi = \Psi(x, y = x/\epsilon)$ 로 가

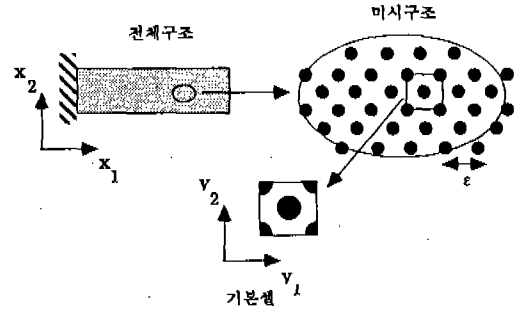


그림 1 거시(전체)구조와 미시구조의 좌표계

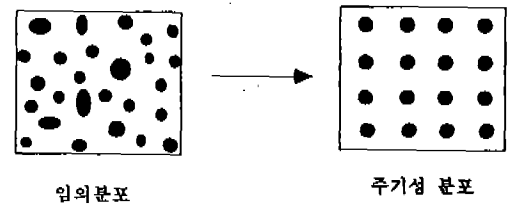


그림 2 주기성의 이상화(예 : 섬유강화 복합재)

정하여도 무리가 없을 것이다. 이러한 함수를 Y -주기성의 함수라고 한다. 일반적으로 복합재의 미시구조가, 그림 2와 같이 어느 정도의 주기성을 가지고 있으므로, 비록 실제로 완벽한 주기성을 가지고 있지 못하더라도 주기성을 수학적으로 가정하자.

이제 x 주위의 미시구조에 기본셀이 주기적으로 분포한다고 생각하고, 기본셀의 좌표를 y 로 표시하자. 거시구조 x 와 미시구조 y 의 관계를 표시하기 위하여 ϵ 을 도입하면, 두 구조사이의 관계식은

$$y = \frac{x}{\epsilon} \quad (1)$$

이 된다.

미시구조의 변위를 u^ϵ 으로 정의하고, 이에 대응하는 강성텐서, 응력 및 변형도를 각각 E^ϵ , σ^ϵ , ϵ^ϵ 이라고 하자. 미시구조의 변위 u^ϵ 와 강성텐서 E^ϵ 는 구조물의 거시구조와 기본셀의 미시구조에 좌우되므로, 다음과 같은 관계식으로 표현할 수 있다.

$$u^\epsilon = u^\epsilon \left(x, y = \frac{x}{\epsilon} \right) \quad (2)$$

$$E^\epsilon = E^\epsilon \left(x, y = \frac{x}{\epsilon} \right) \quad (3)$$

한편, 미시구조의 주기성을 생각하면

$$u(x, y) = u(x, y + Y), \text{ where } Y = (Y_1, Y_2, Y_3) \quad (4)$$

가 된다. 여기서 Y 는 기본셀의 크기이다. 미시구조의 응력과 변형도는 각각

$$\sigma^\epsilon(u^\epsilon) = E^\epsilon \epsilon^\epsilon(u^\epsilon) \quad (5. a)$$

$$\begin{aligned} \sigma^\epsilon(u^\epsilon) &= \frac{1}{2} (\Delta u^\epsilon + u^\epsilon \Delta), \text{ where } \Delta \\ &= \frac{\partial}{\partial x} i + \frac{\partial}{\partial y} j + \frac{\partial}{\partial z} k \end{aligned} \quad (5. b)$$

이 된다.

어떤 구조물의 거시구조의 평형방정식은

$$\Delta \sigma + f = 0 \text{ in } \Omega \quad (6. a)$$

$$\sigma = \sigma^T \quad (6. b)$$

으로 표현된다. 또한 변형체의 경계조건은 다음과 같다.

$$u = g \text{ on } \Gamma_D \quad (6. c)$$

$$\sigma n = t \text{ on } \Gamma_F \quad (6. d)$$

여기서 g 와 t 는 각각 경계면의 움직임과 표면력을, Γ_D 와 Γ_F 는 각각 움직임과 표면력이 정의되는 경계면이다. 이 식은 다음과 같은 최소일의 원리로부터 얻을 수 있다.

$$\inf \Phi_\epsilon(v), \text{ where}$$

$$\Phi_\epsilon(v) = \frac{1}{2} \int_{\Omega^\epsilon} E |\Delta v|^2 d\Omega - \int_{\Omega^\epsilon} \rho f v d\Omega,$$

$$\forall v \in V^\epsilon \quad (7)$$

이상과 같은 관계를 이용하여 복합재 구조물의 거동을 가상일의 원리에 적용하면

$$\begin{aligned} \int_{\Omega^\epsilon} \epsilon^T (v^\epsilon - u^\epsilon) \sigma^\epsilon(u^\epsilon) d\Omega &= \int_{\Omega^\epsilon} (v^\epsilon - u^\epsilon) \\ t^3 d\Gamma \cdot \forall v^\epsilon \in V & \end{aligned} \quad (8)$$

이 된다. 여기서 V^ϵ 는 변위허용집합이며, 열 응력과 초기응력은 고려하지 않는다.

이제 어느 미시구조의 실제변위 u^ϵ 를 다음과 같이 ϵ 에 관하여 전개가 가능하다고 가정하자.

$$\begin{aligned} u^\epsilon &= u_0(x, y) + \epsilon u_1(x, y) + \epsilon^2 u_2(x, y) \\ &+ \epsilon^3 u_3(x, y) + \dots, y = \frac{x}{\epsilon} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, $u_i(x, y)$ $i = 0, 1, 2, 3, \dots$ 는 Y 주기성을 가진 함수이다. 또한 미시구조의 어떤 물량 Ψ^ϵ 의 미분값은

$$\frac{\partial \Psi^\epsilon}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \Psi(x, y) = \frac{\partial}{\partial x} \Psi + \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial}{\partial y} \Psi \quad (10)$$

와 같은 관계식으로 표현된다. 또한 일정한 체적에 존재하는 물리량의 총합은 ϵ 이 영에 근접할 수록 단위셀의 균질화된 양의 총합과 같게 된다. 즉,

$$\begin{aligned} \lim_{\epsilon \rightarrow 0^+} \int_{\Omega^\epsilon} \Psi \left(x, y = \frac{x}{\epsilon} \right) d\Omega &\rightarrow \frac{1}{|Y|} \int_{\bar{Y}} \int_Y \\ \Psi(x, y) dY d\Omega & \end{aligned} \quad (11)$$

의 관계식이 성립한다.

식(9)을 식(8)에 대입하고, 식(10)을 이용하여 정리하면

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega^\epsilon} E_{ijkl} \left\{ \frac{1}{\epsilon^2} \frac{\partial u_{0k}}{\partial y_1} \frac{\partial v_i}{\partial y_j} + \frac{1}{\epsilon} \left(\left(\frac{\partial u_{0k}}{\partial x_1} + \frac{\partial u_{1k}}{\partial y_1} \right) \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{\partial v_i}{\partial y_j} + \frac{\partial u_{0k}}{\partial y_1} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) + \left(\left(\frac{\partial u_{1k}}{\partial x_1} + \frac{\partial u_{2k}}{\partial y_1} \right) \frac{\partial v_i}{\partial y_j} \right. \right. \\ & \left. \left. + \left(\frac{\partial u_{0k}}{\partial x_1} + \frac{\partial u_{1k}}{\partial y_1} \right) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) + \epsilon(\dots) \right\} d\Omega \\ & = \int_{\Omega^\epsilon} \rho f_i v_i d\Omega + \int_{\Gamma_F^\epsilon} t_i^0 v_i d\Gamma \quad \forall v \in V_{\Omega \times Y} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서,

$$\begin{aligned} V_{\Omega \times Y} &= \{x(x, y) : v(x, y) \text{ is } Y\text{-periodic,} \\ & v = 0 \text{ on } \Gamma_D, (x, y) \in \Omega \times Y\} \end{aligned}$$

식(12)을 ϵ 의 차수에 따라 정리하고, 극한관계식(11)을 이용하면, 미시구조와 거시구조의 평형방정식을 구할 수 있다. 먼저 $1/\epsilon^2$ 의 항을 정리하고, $v = v(Y)$ 를 대입하면,

$$\int_Y E_{ijkl} \frac{\partial u_{0k}}{\partial y_1} \frac{\partial v_i}{\partial y_j} dY = 0 \quad \forall v \in V_Y \quad (13. a)$$

이 된다. 혹은

$$\frac{\partial}{\partial y_i} E_{ijkl} \frac{\partial u_{0k}}{\partial y_1} = 0 \quad \text{in } Y \quad (13. b)$$

와 같이 쓸 수 있다. u_0 가 Y_0 주기성이며, E_{ijkl} 이 ellipticity 조건

$$E_{ijkl} e_{kl} e_{ij} \geq C e_{ij} e_{ij}, \quad \forall e_{ij}$$

을 만족하므로, 이 식의 결과는

$$u_0 = u_0(x) \quad (14)$$

가 된다.¹⁾ 즉, 식(14)는 u_0 가 기본셀의 거동과는 관계없이 전체 구조물의 거동에만 좌우된다는 것을 뜻하는 것으로 u_0 는 기본셀의 평균적인 (혹은 균질화된) 변위벡터이다.

한편, 식(12)의 $1/\epsilon$ 의 항을 정리한 후, 식(14)을 대입하고 $v_1 = v_1(y)$ 를 취하면,

$$\begin{aligned} & - \int_Y E_{ijkl} \left(\frac{\partial u_{0k}}{\partial x_1} + \frac{\partial u_{1k}}{\partial y_1} \right) \frac{\partial v_{1i}}{\partial y_j} dY = 0, \\ & \forall v_1 \in V_Y \end{aligned} \quad (15. a)$$

혹은

$$\begin{aligned} & - \frac{\partial}{\partial y_j} E_{ijkl} \frac{\partial u_{1k}}{\partial y_1} = \frac{\partial}{\partial y_j} E_{ijkl} \frac{\partial u_{0k}}{\partial x_1} \quad \text{in } Y \\ & - E_{ijkl} \frac{\partial u_{1k}}{\partial y_1} n_j = E_{ijkl} \frac{\partial u_{0k}}{\partial x_1} n_j \quad \text{on } S \end{aligned} \quad (15. b)$$

으로 표현된다. 여기서 Y 와 S 는 각각 기본셀의 영역과 기본셀 안에 존재하는 두 재료의 경계면을 뜻한다. 식(15)은 u_1 에 대해 선형인 특성을 활용하여

$$-u_1 = -P^{k1} \frac{\partial u_{0k}}{\partial x_1} \quad (16)$$

라고 정의하자. 식(16)을 식(15)에 대입하면, P^{k1} 은 Y -주기성을 갖는

$$\int_Y E_{ijkl} \frac{\partial P_k^{mn}}{\partial y_1} \frac{\partial v_{1j}}{\partial y_i} dY = \int_Y E_{ijmn} \frac{\partial v_{1j}}{\partial y_i} dY,$$

$$\forall v_1 \in V_Y \quad (17)$$

의 해로서 기본셀의 특성변위이다. 식(16)의 u_1 이 기본셀의 평균변위 u_0 의 거시좌표계에 대한 변위도와 기본셀의 특성변위 P^{mn} 의 곱으로 표현되고 있다는 점에 유의하자.

식(12)의 ϵ 의 차수가 0인 항을 묶고 $v_0 = v_0(x)$ 를 취하면, (16)의 결과로부터

$$\int_{\Omega} E_{ijkl}^H \frac{\partial u_{0k}}{\partial x_1} \frac{\partial v_{0i}}{\partial x_j} d\Omega = \int_{\Omega} v_{0i} f_i^H d\Omega + \int_{\Gamma} v_{0i} t_i d\Gamma, \quad \forall v_0 \in V_{\Omega} \quad (18)$$

$$E_{ijkl}^H = \int_Y \left(E_{ijkl} - E_{ijpq} \frac{\partial P_p^{kl}}{\partial y_q} \right) dY \quad (19)$$

$$f^H = \int_Y \rho f dY \quad (20)$$

와 같은 관계식을 얻는다. 여기서 식(19)의 E^H 은 단위셀의 균질화된 탄성텐서로서 복합재료의 재료상수이다. 이것은 단위셀의 특성변위로부터 얻을 수 있다. 식(20)의 f^H 은 단위셀에 작용하는 평균체적력이다. 식(18)은 거시구조의 평형방정식으로서, 기본셀의 평균변위 u_0 의 거동을 표현한다. 이 식은 균질화된 탄성텐서 E^H 와 평균체적력 f^H 를 제외하고는 일반적인 탄성변형체의 평형방정식과 동일하다는 점에 주의하자.

이상과 같이 기본셀의 평균변위 u_0 , 미시변위 u , 및 평균탄성텐서 E^H 가 알려지면, 거시구조의 평균응력뿐만 아니라, 기본셀에 분포하는 미시구조의 응력도 구할 수 있다. 즉, 거시구조에만 좌우되는 균질화된 평균응력 σ^H 는

$$\sigma_{ij}^H(x) = E_{ijkl}^H(x) \frac{\partial u_{0k}}{\partial x_1} \quad (21)$$

이 된다. 반면, 단위셀 내에 분포하는 미시구조의 응력분포는 식(5), (9), (10), (16)으로부터 ϵ 에 대한 1차 이상의 항을 무시하면

$$\sigma_{ij}(x, y) \cong \left(E_{ijkl}(x, y) - E_{ijpq}(x, y) \right.$$

$$\left. \frac{\partial P_p^{kl}}{\partial y_q} \right) \frac{\partial u_{0k}}{\partial x_1} \quad (22)$$

와 같이 표현된다. 즉, 단위셀의 응력분포는 평균변위(거시측면의 변위) u_0 와 단위셀의 특성변위 P^{mn} 에 좌우된다. 이미 예측되는 것처럼, 식(22)에 의한 단위셀 내의 응력분포는 이를 단위셀에 대하여 평균화하면 식(21)의 평균 응력으로 된다는 점에 유의하자.

3. 수치해석 방법

지금까지 주기성을 가진 미시구조의 특성을 활용하여, 미시구조와 거시구조를 함께 고려한 복합재료의 평균 탄성텐서를 평가하고 미시구조의 구조물 거동을 예측하는 수학적 정식화 방법에 대하여 살펴 보았다. 즉, 식(16)으로 정의되는 복합재료 구조물의 평형방정식이 식(15), (18)과 같이 각각 미시구조의 변수와 거시구조의 변수에 대한 미시구조와 거시구조의 평형방정식으로 완전히 분리되어 독립적으로 나타난다.

이러한 결과를 이용하여, 표 1과 같은 순서로 복합재료의 평균 탄성텐서를 평가하고 미시구조의 구조물 거동에 대한 유한요소법을 이용한 수치해를 구할 수 있다.

표 1은 복합재료 구조물의 물성평가와 거동 예측을 위하여 두 번의 유한요소해석이 수행되어야 함을 의미한다. 즉, 복합재료의 물성 평가는 단계 1의 기본셀에 대한 유한요소해석과 단계 2의 과정으로 충분함을 알려준다. 단계 4의 두번째의 유한요소해석은 거시구조에 대하여 수행되며, 일반적인 유한요소해석과 동일하다. 따라서 단계 4를 위한 알고리즘은, 단계 2에서 기본셀의 평균탄성계수 E^H 를 구한 후, 이미 알려진 상업용 소프트웨어의 것을 그대로 활용할 수 있다.

표 1 복합재료 구조물의 물성평가와 거동에
측을 위한 유한요소 해석 과정

단계 1 : 식(17)에 따라, 기본셀에 대한 유한요소해석을 수행하여, 기본셀의 미시구조의 특성변위 P^{mn} 를

- 구한다. 이 때, 각 기본셀 구성 재료의 탄성계수는 미리 주어진다.
- 단계 2 : 단계 1에서 구한 특성변위 P^{mn} 와 식(19)를 이용하여 기본셀의 평균(균질화된) 탄성계수 E^H 를 구한다.
- 단계 3 : 식(20)에 따라 기본셀의 평균(균질화된) 체적력 f^H 을 구한다.
- 단계 4 : 단계 2와 단계 3에서 구한 평균 탄성계수 E^H 와 평균 체적력 f^H 을 이용하여, 식(18)에 따라 거시구조에 대한 유한요소해석을 수행하고, 기본셀의 평균(균질화된) 변위 u_0 를 구한다.
- 단계 5 : 식(21)과 (22)를 이용하여 단위셀의 평균응력과 상세응력을 구한다.

4. 수치예제

4.1 섬유강화복합재

그림 3은 섬유강화 복합재의 단위셀의 치수와 미시구조에 대한 유한요소모델이며, 각각의 원소재의 물성은 다음과 같다.

- Material 1 : 강화섬유
 영 렬 $E = 21000$
 포아슨비 $\nu = 0.3$
- Material 2 : 기지재료
 영 렬 $E = 100$
 포아슨비 $\nu = 0.45$

이와 같은 복합재의 등가 강성텐서는 PREMAT를 활용하여 예측을 시도하였을 때, 등가 강성텐서는 다음과 같이 나타났다.

$$E^H = \begin{pmatrix} 1027.6 & 558.7 & 479.2 & 0 & 0 & 0 \\ 558.7 & 1139.6 & 558.7 & 0 & 0 & 0 \\ 479.2 & 558.7 & 1027.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 114.7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 111.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 114.7 \end{pmatrix}$$

이 등가 강성텐서로부터 등가 물성을 구하면

$$E_x = 779.6, E_y = 1098.6, E_z = 779.6,$$

$$G_{xy} = 114.7, G_{yz} = 114.7, G_{zx} = 111.7,$$

$$\nu_{xy} = 0.026, \nu_{yz} = 0.366, \nu_{zx} = 0.469.$$

이 된다. 여기서 $\nu_{xy} \neq \nu_{yz}$ 라는 점을 주의하자. 본 예제에서는 일본의 QUINT사가 개발한 PREMAT/POSTMAT를 사용하였다.

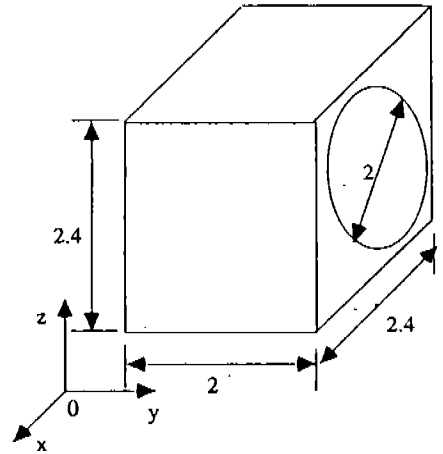


그림 3 (a) 기본셀의 형상

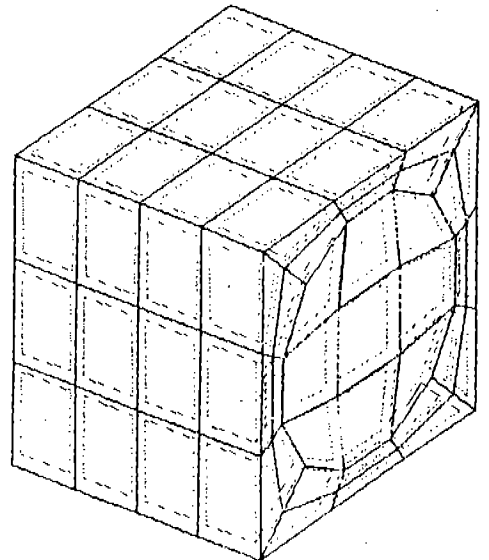


그림 3 (b) 유한요소의 모델

4.2 하니콤 구조물⁴⁾

그림 3 과 같은 하니콤 미시구조를 갖는 판 구조물을 생각해 보자. 하니콤의 원소재는 알루미늄으로서, 그 물성은 $E_{1111} = 108\text{Gpa}$, $E_{1122} = 54\text{Gpa}$, $E_{1212} = 27\text{Gpa}$ 이다. 이와 같은 하니콤 미시구조의 기계적 성질은 각 구성 요소의 치수에 의하여 좌우된다. 그림 4 는 하니콤 중심부(core)의 길이와 상하판(shear panel)의 두께 비에 따른 균질화된 평균 탄성텐서의 변화를 보여준다. 여기서 상하판의 두께가 두꺼울수록 면내 강성(inplane rigidity ; E_{1111}^H 와 E_{1122}^H)은 강해지나, 면외 강성(out-of-plane rigidity ; E_{3333}^H 와 E_{1313}^H)은 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 한편, $E_{2222}^H = E_{3333}^H$, $E_{2233}^H = E_{1133}^H$ 이다.

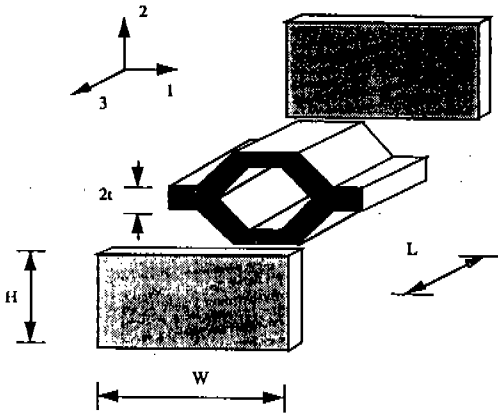


그림 4 (a) 하니콤 기본셀의 형상

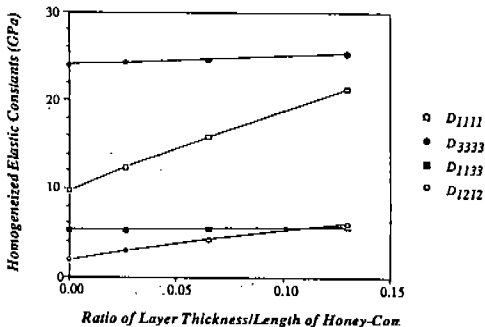


그림 4 (b) 하니콤코어와 두께비에 따른 탄성텐서

5. 결 론

지금까지 균질화법의 정식화를 이용하여 복합재료의 거시적 균질화된 재료상수를 구하고, 이 재료상수를 이용하여 거시구조물의 변형과 응력을 구하고, 이로부터 다시 미시구조의 응력분포와 변형도를 구하는 방법을 기술하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 미시구조내에서의 주기성을 가정한다.
- 2) 균질화법에 의하여 서로 독립적인 기본셀 및 거시구조에 대한 두 가지의 평형방정식이 유도된다.
- 3) 기본셀의 평균변위는 미시구조의 평형과는 무관하다.
- 4) 복합재료의 평균 탄성계수는 기본셀의 평형방정식으로부터 얻을 수 있다.
- 5) 거시구조의 평형방정식은 일반적인 유한요소방법의 평형방정식과 동일하다.
- 6) 기본셀의 평균변위는 복합재료의 평균탄성계수와 거시구조의 평형방정식으로부터 얻을 수 있다.
- 7) 기본셀내의 응력분포는 거시구조의 평균변위뿐만 아니라, 기본셀의 특성변위에도 좌우된다.

이상과 같이, 주기성을 가정한 균질화법은 복합재료 구조물의 물성평가와 거동예측에 대한 매우 적절한 수치해석 방법이다. 균질화법은 이러한 선형변형의 문제뿐만 아니라, 내압을 존재하는 빈공간 소재의 물성³⁾, 기지재료와 강화재료 계면의 미끄러짐 등으로 인한 미세 파손현상^{7,12)} 등의 예측이 가능하다. 그 외에도 탄소성 대변형 거동 이론과 균질화법을 함께 적용하여, squeeze casting 에서 발생하기 쉬운 계면분리나 파단 등의 미소결합과 같은 2차 성형성의 예측도 가능하다.^{4,12)}

감사의 글

본 연구는 과학기술처의 특정연구과제의 일부로 수행되었으며, U. Michigan 의 Dr. Guedes, Prof. Kikuchi 그리고 일본의 Quint 사의 많은 도움이 있었다.

참 고 문 헌

1. J.L.Lions, "Some methods in the mathematical analyses of systems and their control", Science Press, 1981
2. E. Sanchez Palencia, "Non-homogeneous media and vibration theory", Lecture Notes in Phics, Vol.127. Springer Verlag, 1980
3. J.M.Guedes and N.Kikuchi, "Preprocessing and postprocessing for materials based on the homogenization method with adaptive finite element methods", Comp.Meth.Appl. Mech.Engrg., Vol. 83, pp143-198, 1990
4. J.M.Guedes, "Nonlinear computational models for composite materials using homogenization", Ph.D Dissertation, Univ. Michigan, 1990
5. V.Arnault, et al. "Non-linear behavior of damaged woven fabric ceramic composites", Composite Materials:Design and Analysis
6. Z. Hashin, "Large isotropic elastic deformation of composites and porous media", Int. Solids Structures Vol. 21, No.7, pp711-720, 1985
7. F.Lene, "Damage constitutive relations for composite materials", Eng. Frac.Mech., Vol. 25, pp713-728, 1986
8. F.Lene and D.Leguillon, "Homogenized constitutive law for a partially cohesive composite material", Int.J.Solid Structures, Vol. 18, pp.443-458, 1982
9. D.Leguillon and E. Sanchez-Plancia, "On the behavior of a cracked elastic body with (without) friction", Journal de Mechanique theorique et appliquee, Vol. 1, pp.195-209, 1982
10. G.Duvaut, "Homogenization et materiaux composite" Lecture Notes in Phics Vol. 195, Springer-Verlag, 1984
11. S. Muller, "Homogenization of nonconvex integral functionals and cellular elastic materials". Archive for Rational Mechanics and Analysis, Vol. 99, pp189-212, 1987
12. 고병천, "균질화법을 이용한 금속복합재료의 2차 성형성 해석", 김동원교수기념 논문집, 서울대학교, 1991
13. 최진민, 구정서, 권오건, 고병천 "신소재 경량차체 구조물의 최적설계 기술개발(I)", 연구보고서, 과학기술처, 1992
14. PREMA/POSTMAT manual, QUINT, 1991
15. M.R.Piggot, "Load-bearing fibre composites", Pergamon Press, 1980