

<논문> SAE NO. 96370038

입자와 섬유로 보강된 SMC 복합재의 기계적 특성에 관한 연구

Mechanical Properties of Particle and Fiber Reinforced SMC Composites

정 현 조,* 윤 성 호**
H. Jeong, S. - H. Yoon

ABSTRACT

An analytical model has been developed to predict the elastic properties of a filled resin reinforced by chopped fibers, a three-phase composite such as a filled sheet molding compound(SMC). In the model the matrix material and fillers form an effective matrix. The effective matrix is then considered to be reinforced with long fibers lying in the sheet plane but randomly oriented in the plane. Expressions for the resulting transversely isotropic composite properties are explicitly presented. Using this model, the Young's and shear moduli are calculated for the SMC sample with filler weight fraction of 35% and fiber content of 30%. The same properties are also determined experimentally. The agreement between the calculated and measured elastic moduli is found to be very good for the in-plane properties. However, the out-of-plane properties show a large difference because the effect of voids is not taken into account in the model.

주요기술용어 : Sheet Molding Compounds(SMC), Three-Phase Composites(3상 복합재), Orientation average(방향 평균), Effective Matrix(유효기지재), In-Plane Properties(면내 성질), Out-of-Plane Properties(두께 방향 성질), Voids(기공)

1. 서 론

단섬유 보강 복합재에 대한 성형 기술의 발전과 더불어 SMC(sheet molding compounds)의 고성능 공업용에의 사용도 급격히 증가하고

다. SMC 복합재는 금속재 부품과 비교할 때 높은 비강성, 높은 비강도 및 저렴한 가격의 장점을 지니고 있다. 또한 무게 경감, 연료 효율, 내부식성, 가격 경제성, 복잡한 부품의 양산 적합성에 관한 관심의 증가와 함께 SMC 복합재는 자동차 산업에서 그 사용이 증가하고 있다. 트럭의 후드와 측면 패널, 미니 밴의 미닫이 문과 같은 자동차의 차체에 많이 사용되고 있다. 구조용

* 정희원, 국방과학연구소

** 국방과학연구소

복합재로서 지속적인 사용 증가와 함께 여러 하중조건하에서 SMC 재료의 기계적 특성 평가도 대단히 중요시되고 있다. 정하중 상태에서의 기계적 특성은 가장 기본적인 재료 성질로서 보강재의 효과와 방향 분포 특성으로 인한 거시적 이방성에 대한 이론적 예측과 실험을 통한 이들 성질의 평가가 포함된다.

보강재와 기지재로 구성되는 2상 복합재료의 유효 성질을 결정하기 위하여 많은 이론적 모델이 개발되었다^{1),2)}. 대부분의 이러한 모델에서 구형 입자^{3)~5)}, 타원체^{6),7)} 또는 무한 섬유^{8),9)} 형태의 보강재가 다루어 지고 있다. 그러나 산업 응용에서 실제 복합재는 이보다 훨씬 복잡하며 때로 입자 및 섬유가 동시에 보강재로 사용되기도 한다. 이러한 복합재에서 균일 분포된 입자는 복합재의 기계적 및 열적 성질을 전반적으로 향상시키는 반면에 일방향 정렬 또는 면내 랜덤 방향 섬유는 복합재에 특정 방향으로 보강 효과를 가져다 준다. 이와 같은 일반적인 3상 복합재에 대한 이론 모델은 아직 개발되어 있지 않다.

본 논문에서는 이와 같이 입자와 섬유로 보강된 3상 SMC 복합재의 기계적 특성을 이론해석과 실험을 통하여 평가하였다. 이론 해석에서 입자와 섬유의 상호 작용을 무시하며 이렇게 하므로써 입자와 섬유의 효과를 독립적으로 평가할 수 있으므로 계산이 간단해 진다. 이론 모델에서 먼저 입자와 수지로 구성된 하나의 유효 기지재(복합재)를 고려한다. 이 복합재의 성질은 Hashin-Shtrikman의 하한계 식^{3),4)}을 이용하여 구한다. 다음에 이 기지 복합재에 섬유가 보강된 복합재를 고려하며 섬유는 모두 복합재의 면내에 누워 있고 면내에서 랜덤한 방향 분포를 갖는다고 가정한다. 이 복합재의 성질은 두 단계로 나누어서 계산한다. 먼저 일방향 정렬 섬유 복합재에 대하여 Hill-Hashin 식^{8),9)}을 적용한 후 Christensen과 Waals¹⁰⁾가 제안한 방향 평균을 수행한다. 기계적 특성 평가 실험에서 복합재의 면내 인장, 전단 특성 뿐만아니라 두께 방향의 성질도 구한다. 폴리에스터 수지에 칼슘카보네이트(CaCO₃) 충전재와 유리 섬유가 보강된 SMC-R35 복합재에 대한 이론적 계산값을 실험값과

비교한다.

2. 재료 및 시편

사용된 시편은 길이가 50mm인 단섬유 형태의 E-유리섬유를 불포화 폴리에스터 수지에 임의 방향으로 분산시킨 SMC 복합재료로서 미세분말의 칼슘카보네이트(CaCO₃)를 충전재로 사용하였다. Table 1에는 시편 제작에 사용한 SMC 복합재료의 구성비와 각 구성재료의 성질이 나타나 있다.

복합재료의 성질은 대부분이 구성요소의 부피분율을 사용하여 계산되므로 주어진 무게분율로부터 부피분율을 구할 필요가 있다. 이들 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$v_r = \frac{w_r/\rho_r}{w_r/\rho_r + w_p/\rho_p + w_f/\rho_f} \quad (1)$$

$$v_p = \frac{w_p/\rho_p}{w_r/\rho_r + w_p/\rho_p + w_f/\rho_f} \quad (2)$$

$$v_f = \frac{w_f/\rho_f}{w_r/\rho_r + w_p/\rho_p + w_f/\rho_f} \quad (3)$$

여기서 첨자 r, p, f는 각각 기지재, 충전재, 섬유와 관련되는 양을 표시하며 v, w, ρ는 구성요소의 부피분율, 무게분율 및 밀도를 나타낸다. 이들 식에 Table 1의 값을 대입하면 구성요소의

Table 1 Material properties of SMC constituents

Constituents	Weight fraction	Density (gm/cm ³)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
Resin : Polyester	0.35	1.12	3.5	0.37
Filler : CaCO ₃	0.35	2.70	41.4	0.21
Fiber : E-glass	0.30	2.54	73.0	0.25

부피분을 값 $v_r=0.56$, $v_p=0.23$, $v_f=0.21$ 을 얻을 수 있다.

SMC 복합재료의 기계적 특성을 평가하기 위한 시편은 압축성형공법을 적용하여 제작하였으며, 이때 사용된 프레스의 용량은 100Ton이다. 시편 제작 과정은 다음과 같다.

- (1) 금형을 조립하기 전에 아세톤으로 금형의 이물질을 제거하고 표면을 이형제로 이형 처리한다.
- (2) 금형을 조립하여 프레스에 고정시키고 금형 내부를 압축공기로 세척한 다음 이형제로 이형처리한다.
- (3) 금형을 130°C로 잠깐 예열시킨다.
- (4) 적절한 크기로 절단된 미경화 상태의 SMC 프리프레그를 금형에 투입하고 규정된 온도와 압력을 작용하여 성형한다.
- (5) 성형이 완료되면 금형에 부착된 탈형고리를 이용하여 제품을 탈형한다. 이때 제품에 힘이 생기지 않도록 쟁반위에서 냉각치구를 이용하여 상온에서 서서히 냉각시킨다.
- (6) 시편은 시편가공 부위의 손상을 최소화하기 위해 다이아몬드 휠을 이용하여 절단하고 절단된 면은 사포로 다듬질한다.

3. 이 론

SMC 복합재의 유효 물성 계산에서 이 복합재는 폴리에스터 수지, 충전재 및 유리 섬유로 구성된 3상 복합재로 취급한다. 또한 유리 섬유는 chopped strand mat 구조로서 일반적으로 방향성을 갖게 된다. 이러한 3상 복합재의 유효 물성을 직접 구할 수 있는 이론식은 아직 개발되어 있지 않다. 본 절에서는 기존의 2상 복합재에 대한 식을 활용하여 3상 복합재의 성질을 결정하고자 한다. 먼저 수지와 충전재로 구성된 복합기지재(matrix)의 성질을 구한 후, 여기에 한방향으로 정렬된 섬유로 보강된 복합재를 고려한다. 마지막으로 2-D 랜덤 방향 분포를 갖는 최종 복합재의 유효 성질을 구한다. 해석 과정에서 다음과 같은 몇 가지 가정을 도입하였다. 복합재

의 각 구성요소는 균질, 등방성이며 충전재와 유리섬유는 수지 내에서 균일하게 분포하고 있다. 충전재는 편의상 구형으로, 섬유는 형상비가 무한한 원주로서 평면상에서 랜덤한 방향분포를 갖는 것으로 가정한다. 따라서 결과적인 성질은 복합기지재는 등방성이 되고 최종 복합재는 횡방향 등방성이 된다. 구성 요소들은 서로 완전히 접촉하고 있으며, 성형시에 일반적으로 발생할 수 있는 기공(voids)과 같은 다른 상의 영향은 무시한다.

3.1 수지/충전재로 구성된 기지 복합재

기지 복합재의 성질을 계산하기 위하여 구형 입자 보강 복합재에 대한 Hashin³⁾의 식과 Hashin-Shtrikman⁴⁾의 하한계 식을 사용한다. 이 경우 복합재는 거시적으로 등방성이므로 두개의 독립 상수로 탄성 거동을 묘사할 수 있으며, 이들 상수는 다음과 같다.

$$K_m = K_r \left(1 + \frac{v_p^*}{\frac{K_r}{K_p - K_r} + \frac{3(1 - v_p^*)K_r}{3K_r + 4G_r}} \right) \quad (4)$$

$$G_m = G_r \left(1 + \frac{v_p^*}{\frac{G_r}{G_p - G_r} + \frac{6(1 - v_p^*)(K_r + 2G_r)}{3K_r + 4G_r}} \right) \quad (5)$$

여기서 첨자 m은 기지 복합재와 관련되는 양을 표시하며, K와 G는 체적 탄성계수와 전단 탄성계수이다. v_p^* 는 충전재의 유효 부피분율이며 다음 식으로부터 계산할 수 있다.

$$v_p^* = \frac{v_p}{v_p + v_r} \quad (6)$$

또한 등방성 재료에 대한 탄성계수 사이의 상호

관계로부터 Young계수와 Poisson 비도 구할 수 있다.

$$E_m = \frac{9K_m G_m}{3K_m + G_m} \quad (7)$$

$$\nu_m = \frac{3K_m - 2G_m}{2(3K_m + G_m)} \quad (8)$$

Weng⁵⁾에 의하면 식 (4)와 (5)는 구형 계재물에 대한 Mori-Tanaka 방법¹²⁾으로 구한 결과와 일치한다.

3.2 기지/섬유로 구성된 일방향 복합재

기지 복합재의 성질을 구하였으므로 이 기지재에 일방향으로 정렬된 섬유가 보강된 복합재의 유효 성질을 구할 수 있다. 이 경우 복합재는 횡방향 등방성의 성질을 갖게 되며, 따라서 5개의 독립 상수로서 그 거동을 완전하게 묘사할 수 있다. 재료의 대칭축은 11방향을 섬유 방향, 22방향을 평면내에서 11에 수직한 방향, 그리고 33방향을 두께 방향으로 정의한다. Hill⁸⁾과 Hashin⁹⁾에 따르면 이와 같은 재료의 성질은 다음 식으로 주어진다.

$$E_{11} = \nu_l E_l + \nu_m E_m + 4\nu_l \nu_m G_m \left[\frac{(\nu_l - \nu_m)^2}{\frac{\nu_m G_m}{K_l + G_l/3} + \frac{\nu_l G_m}{K_m + G_m/3} + 1} \right] \quad (9)$$

$$\nu_{12} = \nu_l \nu_l + \nu_m \nu_m + \frac{\nu_l \nu_m (\nu_l - \nu_m) \left[\frac{G_m}{K_m + G_m/3} \frac{G_m}{K_l + G_l/3} \right]}{\frac{\nu_m G_m}{K_l + G_l/3} + \frac{\nu_l G_m}{K_m + G_m/3} + 1} \quad (10)$$

$$K_{23} = K_m + \frac{G_m}{3} + \frac{\nu_l}{\frac{1}{K_l - K_m + (G_l - G_m)/3} + \frac{\nu_m}{K_m + 4G_m/3}} \quad (11)$$

$$G_{12} = G_m \frac{G_l(1 + \nu_l) + G_m(1 - \nu_l)}{G_l(1 - \nu_l) + G_m(1 + \nu_l)} \quad (12)$$

$$G_{23} = G_m \left[1 + \frac{\nu_l}{\frac{G_m}{G_l - G_m} + \frac{(K_m + 7G_m/3)\nu_m}{2(K_m + 4G_m/3)}} \right] \quad (13)$$

여기서 ν 는 Poisson 비, K_{23} 는 평면 변형을 체적 탄성계수(plane strain bulk modulus)이다. 이들 공학적 상수는 강성 성분 C_{ij} 와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\begin{aligned} C_{11} &= E_{11} + 4\nu_{12}^2 K_{23} \\ C_{12} &= 2K_{23}\nu_{12} \\ C_{22} &= G_{23} + K_{23} \\ C_{23} &= -G_{23} + K_{23} \\ C_{66} &= G_{12} \end{aligned} \quad (14)$$

Weng¹¹⁾에 의하면 식 (9)~(13)은 무한 길이의 원주에 대한 Mori-Tanaka 방법¹²⁾으로 구한 결과와 일치한다.

3.3 2-D 랜덤 방향 섬유 강화 복합재

최종 복합재에서 섬유는 평면 내에서 랜덤한 방향 분포를 갖는다고 가정하였다. 따라서 복합재는 횡방향 등방성이 되며, x_1-x_2 면이 등방성

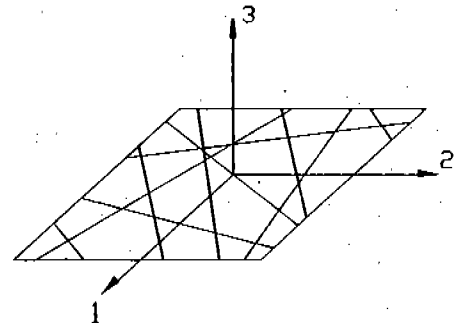


Fig.1 Composite with fibers randomly oriented in the x_1-x_2 plane.

면이다. Fig.1은 섬유가 x_1-x_2 면 위에 놓여 있으며, 이 면에서 랜덤한 방향 분포를 갖는 것으로 도시적으로 나타내고 있다. 이와 같은 상태의 재료 성질을 결정하기 위하여 Christensen과 Waals¹⁰⁾의 접근 방법을 사용한다. 이 방법에 의하면 랜덤 방향 분포의 섬유가 응력 대 변형률 비 σ'_i/ϵ'_j 에 미치는 영향은 Fig.2에서와 같이 고정축에 대하여 모든 가능한 방향에 대한 σ'_i/ϵ'_j 의 방향 평균값을 구하는 것과 동일하다는 것이다. 2-D 문제인 경우에 이 방향 평균은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\left(\frac{\sigma'_i}{\epsilon'_j}\right)_{\text{random}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\sigma'_i}{\epsilon'_j} d\phi \quad (15)$$

기준축 i 로부터 각 ϕ 만큼 회전한 축 j' 에 대한 응력 대 변형률 비는 응력과 변형률에 대한 텐서 변환으로부터 구할 수 있다. 먼저 응력 텐서에 대한 변환은 다음과 같다.

$$\sigma'_{ij} = q_{ik} q_{jl} \sigma_{kl} \quad (16)$$

여기서 q_{ij} 는 i' 축과 j 축 사이의 방향 코사인이며 다음과 같은 성분을 갖는다.

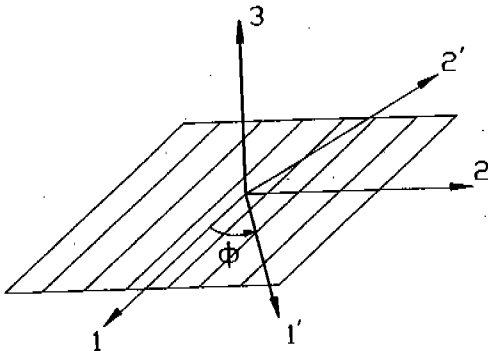


Fig.2 Composite with fibers aligned along the x_1 direction. The x'_1 and x'_2 axes are rotated an angle ϕ with respect to the x_1 and x_2 axes.

$$q_{ij} = \begin{bmatrix} \cos\phi & \sin\phi & 0 \\ -\sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

식 (16)의 변환에서 완전 첨자 표시(full subscript notation) 대신에 통상의 단축 첨자(abbreviated subscript)를 사용하면 다음과 같이 행렬 형태로 간단하게 표시할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \sigma'_1 \\ \sigma'_2 \\ \sigma'_3 \\ \sigma'_4 \\ \sigma'_5 \\ \sigma'_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2\phi & \sin^2\phi & 0 & 0 & 0 & 2\cos\phi\sin\phi \\ \sin^2\phi & \cos^2\phi & 0 & 0 & 0 & -2\cos\phi\sin\phi \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\phi & -\sin\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin\phi & \cos\phi & 0 \\ -\cos\phi\sin\phi & \cos\phi\sin\phi & 0 & 0 & 0 & \cos^2\phi - \sin^2\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (18)$$

마찬가지로 변형률 텐서에 대한 변환은 다음과 같고

$$\epsilon_{ij} = q_{ki} q_{lj} \epsilon'_{kl} \quad (19)$$

응력에서처럼 단축 첨자를 사용하여 행렬 형태로 표시할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2\phi & \sin^2\phi & 0 & 0 & 0 & -\cos\phi\sin\phi \\ \sin^2\phi & \cos^2\phi & 0 & 0 & 0 & \cos\phi\sin\phi \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\phi & \sin\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 2\cos\phi\sin\phi & -2\cos\phi\sin\phi & 0 & 0 & 0 & \cos^2\phi - \sin^2\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon'_1 \\ \epsilon'_2 \\ \epsilon'_3 \\ \epsilon'_4 \\ \epsilon'_5 \\ \epsilon'_6 \end{bmatrix} \quad (20)$$

기준축에 대한 응력-변형률 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= C_{11}\epsilon_1 + C_{12}\epsilon_2 + C_{12}\epsilon_3 \\ \sigma_2 &= C_{12}\epsilon_1 + C_{22}\epsilon_2 + C_{23}\epsilon_3 \\ \sigma_3 &= C_{12}\epsilon_1 + C_{23}\epsilon_2 + C_{22}\epsilon_3 \\ \sigma_4 &= 1/2(C_{22} - C_{23})\epsilon_4 \\ \sigma_5 &= C_{66}\epsilon_6 \\ \sigma_6 &= C_{66}\epsilon_6 \end{aligned} \quad (21)$$

응력 대 변형을 σ'_i/ε'_i 는 1'축에 다음 조건을 만족하는 변형률을 부과하면 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \varepsilon'_1 &\neq 0 \\ \varepsilon'_i &= 0, \quad i \neq 1 \end{aligned} \quad (22)$$

텐서 변환식 (18), (20)과 응력-변형률 관계식 (21)으로부터 다음을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma'_1 &= \sigma_1 \cos^2 \theta + \sigma_2 \sin^2 \theta + 2\sigma_6 \cos \theta \sin \theta \\ \frac{\sigma_1}{\varepsilon'_1} &= C_{11} \cos^2 \theta + C_{12} \sin^2 \theta \\ \frac{\sigma_2}{\varepsilon'_1} &= C_{12} \cos^2 \theta + C_{22} \sin^2 \theta \\ \frac{\sigma_6}{\varepsilon'_1} &= -2C_{66} \cos \theta \sin \theta \end{aligned} \quad (23)$$

식 (22)로부터 다음 식을 얻고

$$\begin{aligned} \frac{\sigma'_1}{\varepsilon'_1} &= C_{11} \cos^4 \theta + 2C_{12} \cos^2 \theta \sin^2 \theta + C_{22} \sin^4 \theta \\ &\quad + 4C_{66} \cos^2 \theta \sin^2 \theta \end{aligned} \quad (24)$$

식 (14)에 정의된 방향 평균을 취하면 i' 축에 관한 강성 텐서 성분 Q_{ii} 을 구할 수 있다.

$$Q_{11} = \left(\frac{\sigma'_1}{\varepsilon'_1} \right)_{\text{random}} = \frac{1}{8} (3C_{11} + 2C_{12} + 3C_{22} + 4C_{66}) \quad (25)$$

마찬가지 방법으로 횡방향 등방성 재료에 대한 다른 4개의 독립 성분을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_{12} &= \left(\frac{\sigma'_2}{\varepsilon'_1} \right)_{\text{random}} = \frac{1}{8} (C_{11} + 6C_{12} + C_{22} - 4C_{66}) \\ Q_{13} &= \left(\frac{\sigma'_3}{\varepsilon'_1} \right)_{\text{random}} = \frac{1}{2} (C_{12} + C_{23}) \\ Q_{33} &= \left(\frac{\sigma'_3}{\varepsilon'_3} \right)_{\text{random}} = C_{22} \\ Q_{44} &= \left(\frac{\sigma'_4}{\varepsilon'_4} \right)_{\text{random}} = \frac{1}{4} (C_{22} - C_{23} + 2C_{66}) \end{aligned} \quad (26)$$

이들 강성 성분으로부터 아래와 같은 다른 공학 적 상수를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} E_{11} &= E_{22} = Q_{11} + \frac{Q_{13}^2(Q_{11} - Q_{12}) + Q_{12}(Q_{12}Q_{33} - Q_{13}^2)}{Q_{13}^2 - Q_{11}Q_{33}} \\ G_{12} &= \frac{(Q_{11} - Q_{12})}{2} \\ \nu_{12} &= \nu_{21} = \frac{Q_{13}^2 - Q_{12}Q_{33}}{Q_{13}^2 - Q_{11}Q_{33}} \\ E_{33} &= Q_{33} - \frac{2Q_{13}^2}{Q_{11} + Q_{12}} \\ \nu_{31} &= \nu_{32} = \frac{Q_{13}}{Q_{11} + Q_{12}} \end{aligned} \quad (27)$$

여기서 E_{11} , G_{12} , ν_{12} 는 각각 면내 Young 계수, 전단 탄성계수 및 Poisson 비를 나타내며, E_{33} 와 ν_{31} 은 두께 방향의 Young계수와 Poisson 비를 나타낸다.

4. 실험

4.1 면내 방향 인장 특성 평가

SMC 복합재료의 인장 특성은 Young 계수, Poisson 비, 파단 변형률, 인장 강도 등으로 구성되며, 이들은 ASTM D 638M-89의 시험 방법에 의해 평가하였다. 이때 사용한 시편은 Fig. 3에서와 같이 길이가 150mm, 게이지부의 길이와 폭이 각각 50mm와 10mm, 두께가 5mm인 도그본(dog bone) 형상으로 되어 있다. SMC 복합재료는 단섬유 형태의 유리 섬유를 폴리에스터 수지에 분산시킨 형태로서 면내 방향으로 등방성 거동을 한다고 가정할 수 있지만 본 연구에서는 사용된 시편의 이방성 정도를 조사하기 위해 시편 제작시 평판의 임의 한 방향을 기준으로 주축 방향(0°)과 주축에 수직인 방향(90°)을 설정하여 시편을 채취하였다.

2mm/min의 변위 제어로써 하중을 추가하였으며, Young 계수와 Poisson 비는 하중-변형률 선도의 초기 선형부 기울기로부터 다음 식을 이용하여 각각 구하였다.

$$E_{11} \text{ or } E_{22} = \frac{\Delta P}{A \Delta \epsilon} \quad (28)$$

$$\nu_{12} = - \frac{\Delta \epsilon_2}{\Delta \epsilon_1} \quad (29)$$

여기서 A는 게이지부의 단면적, ΔP 와 $\Delta \epsilon$ 은 각각 하중-변형을 선도에서의 초기 선형부 하중증분과 변형을 증분, $\Delta \epsilon_1$ 과 $\Delta \epsilon_2$ 는 각각 초기 선형부의 하중-변형을 선도에서의 하중 작용 방향과 하중 작용에 수직인 방향의 변형을 증분을 나타낸다. Fig.3는 인장 시험 후에 파단된 시편의 모습을 보여준다.

4.2 전단 특성 평가

SMC 복합재료의 전단 특성은 전단 탄성계수와 전단 강도 등으로 구성되며, 이들은 현재 섬유강화 복합재료의 전단특성을 평가하기 위해 널리 적용되고 있는 Iosipescu 시험에 의해 측정하였다. Fig.4(a)에는 Iosipescu 시험에 적용된 시험 장치와 시편의 형상이 나와 있다. 여기서 보면 전단시험 치구를 통해 압축 하중이 작용할 때 시편 중앙부에는 작용된 압축 하중과 동일한 전단 하중이 작용하며, 시편 중앙부의 위쪽과 아래쪽에 형성된 90° 노치 사이의 게이지부에는 보형태의 전단 시편에서와는 달리 균일한 전단응력이 생성된다.

전단 탄성 계수를 평가하기 위해서는 작용 하중에 대한 시편 게이지부의 두께 변형을 성분이

필요하며, 이를 위해 3축 스트레인 게이지를 사용하였다. 전단 특성의 평가에 사용된 시편은 인장 특성의 평가에서와 같이 평판의 임의 한 방향을 기준으로 주축 방향과 주축에 수직인 방향을 설정하여 시편을 채취하였다.

1mm/min의 변위 제어 상태를 적용하였으며, 하중-변형을 선도로부터 전단 탄성 계수를 다음 식으로 구하였다.

$$G_{12} = \frac{\Delta P}{2(\Delta \epsilon_1 - \Delta \epsilon_2)A} \quad (30)$$

여기서 A는 게이지부의 단면적, ΔP 는 하중-변형을 선도에서의 초기 선형부 하중 증분, $\Delta \epsilon_1$ 과 $\Delta \epsilon_2$ 는 각각 초기선형부 하중-변형을 선도

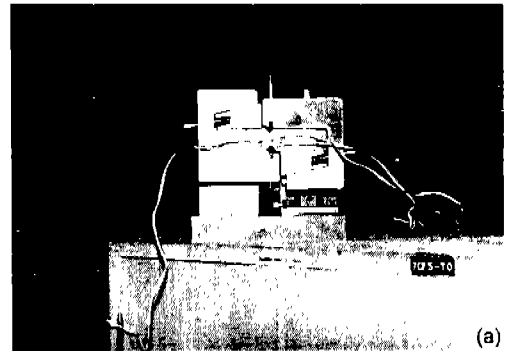


Fig.4(a) Configuration of Iosipescu shear test

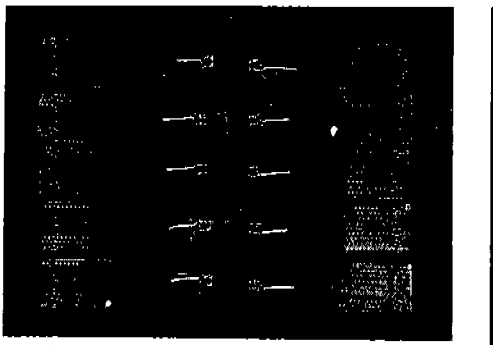


Fig.3 Fracture modes of in-plane tensile specimens.

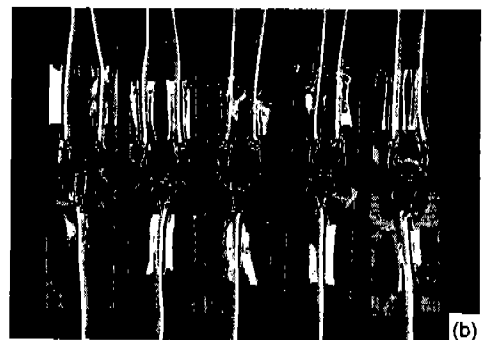


Fig.4(b) Fracture modes of in-plane shear specimens.

에서의 두 변형을 성분이다. Fig.4(b)는 파단된 시편의 모습을 보여준다.

4.3 두께 방향의 인장 특성 시험

SMC 복합재료의 두께 방향의 인장 특성은 두께 방향의 Young 계수, Poisson 비, 파단변형을, 인장 강도 등으로 이들을 평가하기 위한 표준화된 시험 방법은 제시되어 있지 않지만 가능한 시편의 게이지부에 균일한 응력 및 변형을 분포를 얻을 수 있도록 Fig.5와 같은 형상을 적용하였다. 이때 사용한 SMC 복합재 시편은 가로 13mm, 세로 13mm, 두께 5mm이며, 시편에 하중을 가하기 위해 알루미늄 블록으로 만든 길이 60mm의 어댑터를 접착제를 이용하여 시편의 양쪽 끝에 부착하였다.

하중의 부가는 1mm/min의 변위 제어 상태를 적용하였으며, 하중-변형을 선도로부터 두께 방향은 Young 계수와 Poisson 비를 식 (28), (29)로부터 구하였다. Fig.5에는 파단된 시편의 모습이 나와 있는데 어댑터와 시편 끝의 접착부에서 파단된 시편은 측정 값에서 제외시켰다.

5. 결과 및 토의

5.1 이론 예측

Table 1에 나와 있는 SMC 복합재료의 구성 요소에 대한 물성값을 3절에서 유도한 유효 성질 계산식에 대입하여 구한 결과를 Table 2에

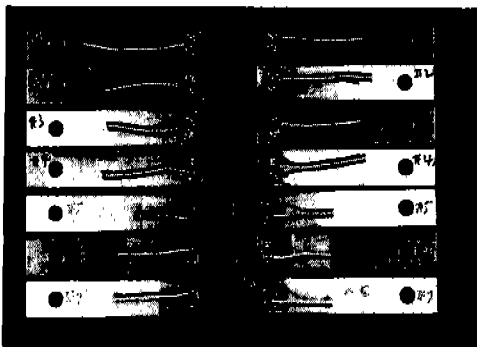


Fig.5 Configuration and fracture modes of out-of-plane tensile specimens.

요약하였다. 또한 Table 2에는 본 연구에서 사용한 SMC 복합재료의 면내 방향의 인장 및 전단 특성과 두께 방향의 인장 시험 결과가 나와 있다. 실험값은 5~7개의 시편으로부터 측정된 값의 평균을 나타낸다.

먼저 이론 모델에 의해 계산한 면내 탄성계수 값(E_{11} , G_{12} , ν_{12})은 실험값과 아주 잘 일치한다. 그러나 두께방향의 계산값(E_{33} , ν_{31})은 실험값과 큰 차이를 보이고 있다. SMC 복합재의 면내 성질은 주로 보강 섬유에 의해 결정되나 두께 방향 성질은 수지에 의해 지배된다. 시편의 미시구조를 살펴보면(Fig.6, 7) 많은 양의 기공이 수지내에 발생하고 있다. 따라서 이 기공이 이론모델에서는 그 영향을 고려하지 않고 계산한 두께방향의 성질을 크게 저하시킨 주된 이유로 생각된다.

Table 2의 실험 결과를 살펴보면, SMC 복합재료의 면내 성질은 면내에서 주축 방향(0°)과 주축에 수직인 방향(90°)으로 채취된 시편에 무관하게 거의 동일하며, 따라서 단섬유 형태의 유리 섬유는 폴리에스터 수지내에 랜덤한 방향으로 균일하게 분산되어 이방성을 거의 나타내지 않음을 알 수 있다. 따라서 이와 같은 경우 임의 방향을 주축 방향으로 설정하여 평가한 기계적 특성은 사용재료의 전형적인 성질로 간주할 수 있다.

Table 2 Comparison of predicted and measured elastic properties of SMC composite

Property	Calculated values	Measured values
E_{11} (GPa)	12.8	12.3* 12.2**
G_{12} (GPa)	4.86	4.53* 4.58**
ν_{12}	0.317	0.311* 0.316**
E_{33} (GPa)	9.3	5.16
ν_{31}	0.240	0.197

* 면내 주축 방향(0°) 측정 값

** 면내 주축에 수직인 방향(90°) 측정 값

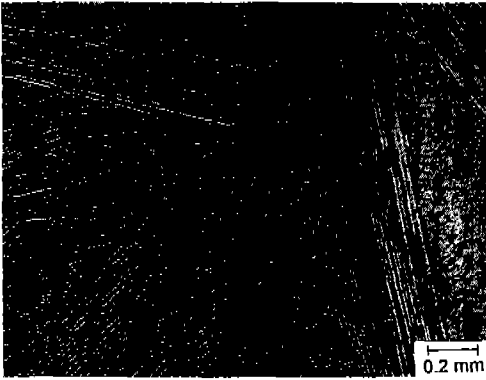


Fig.6 Photomicrograph of in-plane section through the chopped glass fiber/polyester resin SMC showing fiber bundles and voids.



Fig.7 Photomicrograph of out-of-plane section through the chopped glass fiber/polyester resin SMC showing fiber bundles and voids

Fig.6에는 시편의 면내 단면의 현미경 사진을 보여 주고 있다. 단섬유 형태의 유리섬유는 비교적 랜덤한 배향 상태를 가지며 시편내에서 균일하게 분포되어 있음을 알 수 있다. 또한 기공도 내재하고 있다. Fig.7은 Fig.6의 단면에 수직한 단면에 대한 현미경 사진이다. 여기서도 유리 섬유의 랜덤 방향성을 알 수 있으며 수지가 풍부한 곳에 다양한 크기의 기공이 많이 존재하고 있다. 또한 유리 섬유 다발은 납작한 타원형 단면을 보여주고 있다.

6. 결 론

폴리에스터 수지에 CaCO_3 충전제와 유리 섬유가 보강된 3상 SMC 복합체의 유효 성질을 이론 해석 및 실험을 통하여 구하였으며 그 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 미시구조 분석 결과 유리 섬유는 비교적 균일한 분포를 하고 있었으며, 면내에서 랜덤한 분포를 가정할 수 있었다. 그리고 수지가 풍부한 영역에서 기공이 내재하였다.
- 2) 실험 결과에 의하면 면내 등방성의 가정은 타당하였으며, 이론 예측값과 잘 일치하였다.
- 3) 두께 방향의 측정 결과는 이론값과 많은

차이를 보였는데 그 이유는 이론 해석에서 실제 복합체에 존재하는 기공의 영향을 고려하지 않았기 때문이다. 보다 정확한 두께 방향의 성질을 예측하기 위해서는 이론 모델에서 기공의 영향을 포함시켜야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. R. M. Christensen, Mechanics of Composite Materials, Krieger Publishing Company, Malabar, FL., pp. 124~151, 1991.
2. Z. Hashin, "Analysis of Composite Materials-A Survey", Journal of Applied Mechanics, Vol. 50, pp. 481~505, 1983.
3. Z. Hashin, "The Elastic Moduli of Heterogeneous Materials", Journal of Applied Mechanics, Vol. 29, pp. 143~150, 1962.
4. Z. Hashin and S. Shtrikman, "A Variational Approach to the Theory of the Elastic Behavior of Multiphase Materials", Journal of Mechanics and Physics of Solids, Vol. 11, pp. 127~140, 1963.
5. G. J. Weng, "Some Elastic Properties of Reinforced Solids with Special Reference to Isotropic Ones Contating Spherical In-

- clusions", *International Journal of Engineering Science*, Vol. 22, pp. 845~856, 1984.
6. J. D. Eshelby, "The Determination of the Elastic Field of an Ellipsoidal Inclusion, and Related Problems", *Proc. R. Soc. A.*, Vol. 241, pp. 376~396, 1957.
 7. H. Jeong, D. K. Hsu, R. E. Shannon and P. K. Liaw, "Characterization of Anisotropic Elastic Constants of Silicon Carbide Particulate Reinforced Aluminum Metal Matrix Composites: Part II. Theory", *Trans. Metall. Materials*, Vol. 25A, pp. 801~809, 1994.
 8. R. Hill, "Theory of Mechanical Properties of Fibre-Strengthened Materials: I. Elastic Behavior", *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 12, pp. 199~212, 1964.
 9. Z. Hashin, "On Elastic Behavior of Fibre Reinforced Materials of Arbitrary Transverse Phase Geometry", *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 13, pp. 119~134, 1965.
 10. R. M. Christensen and F. M. Waals, "Effective Stiffness of Randomly Oriented Fibre Composites", *Journal of Composite Materials*, Vol. 6, pp. 518~532, 1972.
 11. G. J. Weng, "The Theoretical Connection between Mori-Tanaka's Theory and the Hashin-Shtrikman-Walpole Bounds", *Int. J. Engng. Sci.*, Vol. 28, pp. 1111~1120, 1990.
 12. T. Mori and K. Tanaka, "Average Stress in Matrix and Average Elastic Energy of Materials with Misfitting Inclusions", *Acta Metallurgica*, Vol. 21, pp. 571~574, 1973.