

論文

인장 및 굽힘 복합재료 시험편의 커플링 완화 방안

정일섭*

Reduction of Coupling in Tensile and Flexure Composite Specimens

Ilsep Chung*

ABSTRACT

The mechanical properties of generally orthotropic materials are conventionally measured by performing off-axis tensile and flexure tests. However, the inevitable coupling between tension and shear in case of tensile test or bending and twisting in flexure test case induces nonuniform displacement and stress fields. Consequential stress concentration along the boundary of specimens would result in inaccurate modulus and underestimated strength. This paper proposes the variation of specimen geometry in terms of appropriate obliquity of loaded boundary. For the purpose, classical lamination theory is transformed into skewed coordinate, and characteristic equations for both of unidirectional and laminated composite specimens are formulated. Finite element analysis is employed to show the validity of the skewedness in tensile and bending test specimens.

초 록

일반적 직교이방성 복합재료의 기계적 성질을 측정하기 위한 간단한 실험방법으로 편축시험편에 대한 인장시험 또는 굽힘시험이 흔히 사용된다. 이때 재료의 특성상 인장시험편에서는 전단변형이 발생할 수밖에 없으며, 굽힘시험편에서는 비틀림변형을 피할 수 없다. 그러나, 시험장치의 그립 또는 지지대에서의 구속은 커플링에 의한 변형을 수용할 수 없고, 따라서 이에 따른 응력집중을 유발한다. 결과적으로 불균일한 변형장과 응력장을 낳게되어 측정값의 정확도를 저하시키며, 조기 파손으로 인한 복합재료 강도의 과소평가를 가져오게 된다. 본 연구에서는 이를 완화하기 위한 방안으로 시험편 경계면 형상의 변화를 제안한다. 이를 위하여 경사좌표계에서의 적층이론을 유도하며, 각 시험조건에 대한 특성방정식을 구한다. 유한요소해석을 수행하여 특성방정식을 이용하여 수정된 시험편 형상의 유용성을 보인다.

1. 서 론

강화섬유의 방향에 따른 복합재료의 특성, 즉 강성계수, 강도 및 비선형 거동 등을 측정하기 위하여 편축(Off-axis) 시험편이 흔히 사용된다. 이는 ASTM D3039에 규정된 바와 같이 판형 시험편을 일정 폭과

길이를 절단하여 여기에 스트레인 게이지 등의 변형 측정장치를 부착하고 일반적인 재료시험기에서 인장을 가하는 단순한 실험방법이다. 따라서 시험편의 제작과 시험방법이 간단하다는 장점을 가지고 있다. 이때, 일반적으로 재료 주좌표축(material principal coordinate)이 하중축과 일치하지 않으므로 주좌표축에 대하여 3가지

평면응력성분 즉 σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} 가 모두 발생되며, 이를 이용하여 복합재료의 양축하중(biaxial load)하의 거동을 규명하기 위한 목적으로 사용되기도 한다.

단순한 형상의 시험편을 사용하여 재료의 여러 가지 특성을 측정하는데 있어서 중요한 요구조건은 시험편 내의 변형장과 응력장이 균일하여야 한다는 점이다. 그러나, 직교이방성을 갖는 복합재료의 특성상 피할 수 없는 현상은 재료 주좌표축이 하중축에 어긋날 경우 일반적 이방성(anisotropy)재료의 특성을 보인다는 것이다. 즉, 편축방향의 인장하중 또는 변형에 대하여 하중 방향의 인장변형과 여기에 수직인 방향으로의 포아송비 효과에 따른 수축 뿐만 아니라, 전단변형이 함께 발생된다. 시험편의 모든 경계가 자유로워 이와 같은 전단변형을 구속하지 않는다면 문제가 없겠으나, 시험편에 하중을 가하기 위한 인장시험기의 그립(grip)은 시험편의 끝단에서 재료의 변형을 완전히 구속하므로 이를 허용하지 못하며, 이로 인하여 응력의 집중과 불균일한 응력장 및 변형장이 발생된다[1].

이와 같은 인장과 전단응력의 커플링 현상을 완화하기 위한 여러 가지 방법이 연구, 제안되었다. 먼저 시험편의 형상은 폭에 비하여 비교적 긴 길이를 가지도록 하는 것이 바람직하다고 알려져 있다. 또한, 시험편 끝단의 완전구속 경계조건을 완화하기 위한 방법으로는 Richards 등[2]과 Pipes와 Cole[3]은 길이가 길고 테이퍼형 단면형상을 갖는 탭(tab)의 사용을 제안하였다. Chang 등[4]은 시험 끝단에 구멍을 뚫고 여기에 핀(pin)을 사용하여 하중을 부과함으로써 커플링을 완화하고 완전 구속조건인 시험편에 비하여 높은 파손강도를 측정할 수 있었다. 그러나, Rizzof[5]는 유한요소해석을 통하여 핀을 사용한 하중부과시에는 핀 구멍 주변에 역시 커다란 응력의 집중을 가져오게 되며, 이는 조기 파손을 유발하여 복합재료의 강도를 과소평가하게됨을 보인 바 있다. Sun과 Berreth[6]는 탭을 유연(flexible)하게 함으로써 시험 끝단의 전단변형을 일부 수용할 수 있도록 실리콘 고무를 기지재료로 하는 유리섬유 복합재료를 제작, 사용하여 비교적 균일한 변형장을 얻을 수 있었다. 그러나 탭을 위한 별도의 복합재료를 제작하여야 함은 경제적이지 못할 뿐만 아니라, 시험편제작이 간편한 편축 시험의 장점을 크게 감소시킨다. 또한 높은 온도에서는 탭이 파손되는 단점을 보고한 바 있다.

Sun과 Chung[7]은 일방향(unidirectional) 편축 시험편내의 변형장을 해석적 방법으로 구하고 이로부터

터 그립의 완전구속조건을 유지하는 동시에 인장/전단 커플링을 제거할 수 있도록 하였다. 그 결과 탭의 형상이 ASTM에서 규정하고 있는 직사각형이 아니라, 일정 기울기를 갖는 사다리꼴 형상이 될 경우, 매우 균일한 변형장과 응력장을 구현할 수 있음을 유한요소해석과 실험적 고찰을 통하여 보인 바 있다.

본 논문에서는 Sun과 Chung[7]의 개념을 사용하여 일방향 복합재료 뿐만 아니라, 적층판 시험편의 인장/전단 커플링을 제거하기 위한 방안을 연구하였다. 또한, 일반적인 복합재료 굽힘시험편에서 발생하는 굽힘/비틀림 커플링을 제거하기 위한 방안도 아울러 살펴보았다. 이를 위하여 2차원 텐서(tensor)식을 사용하여 복합재료의 평면내 응력-변형률관계를 경사(skewed)좌표계에서 구하고, 이로부터 수정된 고전 적층판 이론(CLT)을 유도하였다. 여기에 편축시험과 굽힘시험에서 시험편내에 발생되기를 원하는 변형장 조건을 부과함으로써, 커플링을 제거할 수 있는 경계조건, 즉 탭의 형상 또는 그립의 방향을 구하기 위한 특성방정식을 유도하였다. 유한요소해석을 사용하여 지금까지 사용되어 온 시험방법의 문제점을 보이고, 이와의 비교를 통하여 본 연구에서 구하여진 경계조건인 유용성을 입증하였다.

2. 경사좌표계를 사용한 고전 적층판 이론

이방성 재료의 변형률-응력 관계는 아래와 같은 텐서식으로 표현될 수 있으며, 직교 이방성일 경우 유연도(flexibility) 계수 S_{ijlm} 은 9개의 독립적인 상수를 가지게 된다. 또한, 응력과 변형률 텐서는 좌표계에 무관하게 각각의 지수(index)에 대하여 대칭적이다.

$$\epsilon_{lm} = S_{ijlm} \sigma^{ij} \quad (i, j, l, m = 1, 2, 3) \quad (1)$$

식 (1)의 관계를 $\sigma^3 = 0$ 즉 평면응력(plane stress) 조건에 대하여 줄이고, 이를 응력-변형률 관계로 변환하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\sigma^{\alpha\beta} = \overline{C}^{\alpha\beta\gamma} \epsilon_{\delta\gamma} \quad (\alpha, \beta, \delta, \gamma = 1, 2) \quad (2)$$

적층판의 각 층(layer)은 서로 다른 방향성과 물성치를 가지므로 이를 지수 k 로 구별하며, 굽힘에 의한 면내(in-plane) 변형률과 처짐의 관계를 고려하면 응력은 아래와 같이 표현된다. 여기서 $\epsilon_{\delta\gamma}^k$ 는 적층판의 중립

면에서 발생하는 면내 변형률이며, z 는 중립면으로부터의 수직방향 좌표값, w 는 중립면의 수직방향 변위를 나타낸다. 또한, $w|_{\delta\gamma}$ 는 w 의 2차 covariant 미분으로 적층판의 굽힘 곡률(curvature)을 의미한다. 본 연구에서 사용하고자 하는 경사좌표계에서는 기본벡터(base vector)가 위치에 대하여 일정하므로, 모든 Christoffel 기호값이 0이 되어 위의 covariant 미분은 $w, \delta\gamma$ 와 동일하다.

$$\sigma^{\alpha\beta} = \overline{C}_{(k)}^{\alpha\beta\gamma} (\epsilon_{\delta\gamma}^o + zw|_{\delta\gamma}) \quad (3)$$

경사좌표계의 covariant 기본벡터를 g_γ ($\gamma=1,2$), 이들에 수직방향 기본벡터를 g_3 라 할 때, 적층판 모서리(edge)에서 $dx^\gamma g_\gamma$ 와 dzg_3 로 이루어지는 미소 면적요소에 작용하는 면내 하중성분과 응력의 관계는 다음과 같다. 여기서 $e_{\gamma\delta}$ 는 metric 텐서로 이루어진 행렬식(determinant)과 같은 크기를 가지는 순환(permutation) 텐서이다.

$$dF^\beta g_\beta = \sigma^{\alpha\beta} e_{\alpha\gamma} dx^\gamma dzg_\beta \quad (4)$$

위 식 (4)를 적층판의 두께에 대하여 적분하면

$$\int_{-h/2}^{+h/2} dF^\beta g_\beta = e_{\alpha\gamma} dx^\gamma N^{\alpha\beta} g_\beta \quad (5)$$

$$N^{\alpha\beta} = \int_{-h/2}^{+h/2} \sigma^{\alpha\beta} dz \quad (6)$$

직교좌표계에서는 $N^{\alpha\beta}$ 가 단위 길이당 모서리에 작용하는 면내하중을 의미하나, 경사 좌표계에서는 순환텐서의 크기가 곱해져야 물리적인 하중값을 나타내게 된다. 식 (3)을 (6)에 대입하면 다음과 같은 관계를 얻는다.

$$N^{\alpha\beta} = A^{\alpha\beta\gamma\delta} \epsilon_{\delta\gamma}^o + B^{\alpha\beta\delta\gamma} w, \delta\gamma \quad (7)$$

$$A^{\alpha\beta\gamma\delta} = \sum_k \overline{C}_{(k)}^{\alpha\beta\gamma\delta} (z_k - z_{k-1}) \quad (8)$$

$$B^{\alpha\beta\gamma\delta} = \frac{1}{2} \sum_k \overline{C}_{(k)}^{\alpha\beta\gamma\delta} (z_k^2 - z_{k-1}^2) \quad (9)$$

중립면에 대하여 위의 미소 면적요소에 작용하는 하중에 의한 모멘트는 아래와 같다.

$$zg_3 \times dF^\beta g_\beta = e_{\alpha\gamma} e_{\beta\delta} dx^\gamma \sigma^{\alpha\beta} dzg^\delta \quad (10)$$

위 식 (10)을 적층판의 두께에 대하여 적분하면

$$\int_{-h/2}^{+h/2} dF^\beta z e_{\beta\delta} g^\delta = e_{\alpha\gamma} e_{\beta\delta} dx^\gamma M^{\alpha\beta} g^\delta \quad (11)$$

$$M^{\alpha\beta} = \int_{-h/2}^{+h/2} \sigma^{\alpha\beta} z dz \quad (12)$$

직교좌표계에서는 $M^{\alpha\beta}$ 가 단위 길이당 모서리에 작용하는 굽힘 모멘트를 의미하나, 경사 좌표계에서는 순환텐서의 크기의 제곱과 covariant 기본벡터 g^δ 의 크기가 곱해져야 물리적인 굽힘 모멘트값을 나타내게 된다. 식 (3)을 (12)에 대입하면 다음과 같은 관계를 얻는다.

$$M^{\alpha\beta} = B^{\alpha\beta\delta\gamma} \epsilon_{\delta\gamma}^o + D^{\alpha\beta\delta\gamma} w, \delta\gamma \quad (13)$$

$$D^{\alpha\beta\gamma\delta} = \frac{1}{3} \sum_k \overline{C}_{(k)}^{\alpha\beta\gamma\delta} (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (14)$$

식 (7), (8), (9)와 식 (13), (14)가 경사 좌표계에 대하여 적용할 수 있는 고전 적층이론식이며, 직교좌표계로 변환할 경우 흔히 사용되는 고전 적층이론식과 동일한 결과를 낳는다.

3. 편축 시험편

편축 시험편은 하중 방향에 대하여 일반적인 이방성을 가지므로 인장/전단의 커플링이 발생됨은 전술한 바와 같다. 본 절에서는 먼저 기존의 편축시험방법을 사용할 경우, 시편내의 응력장과 변형장이 균일하지 못함을 유한요소해석을 통하여 확인한다. 또한, 앞 절의

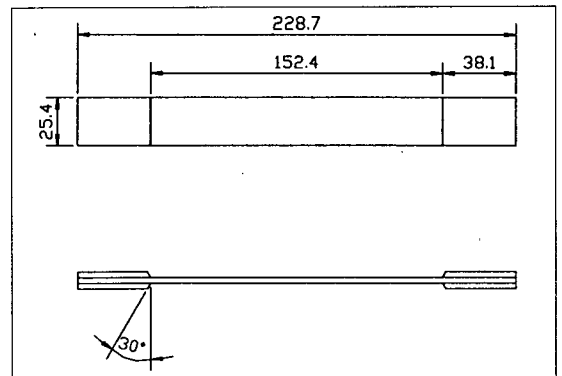


Fig. 1. Geometry of Off-axis Specimen (in mm)

Table 1. Properties of T300 15k/976 at 22°C

Stiffness (in GPa)		Strength (in MPa)	
E ₁	135.1	X _t	1454
E ₂	9.239	Y _t	39.02
G ₁₂	6.274	S	76.53
ν ₁₂	0.318	X _c	1296
		Y _c	206.8

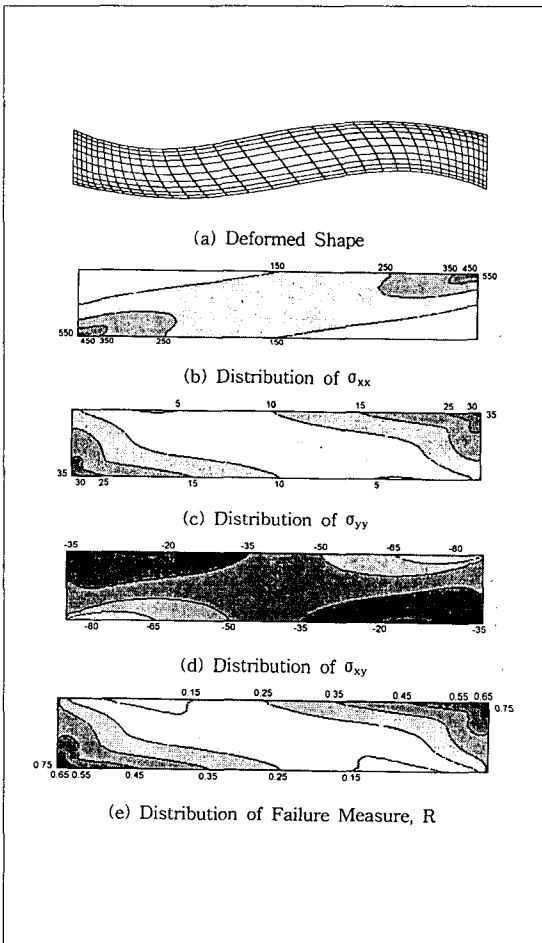


Fig. 2. FE Analysis Result for 15° Off-axis Tensile Specimen (stress in MPa)

경사좌표계 고전적층이론을 이용하여 바람직한 경계조건을 찾아보고, 이를 적용한 유한요소해석 결과를 통하여 그 유용성을 보이고자 한다.

ASTM에서 규정하고 있는 편축 시험편의 형상은 그림 1과 같다. 여기에 20° 편축각을 가지는 T300 15k/976 일방향(unidirectional) 편축 시험편에 대하여 ABAQUS를 사용하여 유한요소해석을 수행하였다. 얇은 쉘 요소(S4R) 340개로 시험편의 측정부위(gage section)를 모델링하였으며, 재료시험기의 그림이 측정부위 양쪽 끝단의 모든 자유도를 억제한다는 조건을 적용하여 해당 절점을 구속하였다. 하중부과 방법으로는 평균 변형률이 0.3%가 되도록 변위를 가하였으며, 여기에 사용된 재료의 물성치는 표 1과 같다 [8]. 그림 2는 해석결과를 보인다. 끝단의 전단변형 구속으로 인하여 발생하는 모멘트에 의하여 시편이 면내 굽힘하중을 받게 되며, 이에 따라 변형장이 균일하지 못함을 보이고 있다. 또한 응력장도 불균일하여 양쪽 끝단에서 심한 응력집중이 발생됨을 알 수 있다. 그림 2의 (e)는 표 1의 강도값으로부터 최대응력파손이론(maximum stress criteria)을 적용할 경우, 파손지수

$$R = \max \left(\frac{\sigma_{11}}{X}, \frac{\sigma_{22}}{Y}, \left| \frac{\sigma_{12}}{S} \right| \right)$$

의 분포를 보이며, 부가 하중의 약 1/0.75배에서 끝단 구석부위의 파손이 유발됨을 보이고 있다.

동일한 해석을 [35/5/35] 적층판에 대하여 수행하였으며, 그림 3은 먼저 파손이 발생될 것으로 예상되는 35° 층의 응력분포를 나타낸다. 일방향 시편의 경우와 마찬가지로 그림부위에서 응력의 집중이 발생되며, 부가 하중의 약 1/0.8배에서 파손이 유발됨을 알 수 있다.

따라서 기존의 편축시험에 의하여 측정된 강도는 실제 복합재료의 강도에 비하여 과소평가될 것으로 예상되며, 또한 변형률의 측정시 스트레인 게이지의 위치가 정확히 시편의 중앙부에 위치하여야 할 뿐 아니라, 가능한 한 소형의 게이지를 사용하여야 함을 알 수 있다.

3.1 일방향 편축시험편의 커플링 제거방안

그림 2의 해석 결과에 나타난 응력과 변형장의 불균일을 제거하기 위하여 Sun과 Chung이 제안한 방안은 그림 4와 같은 사다리꼴 형상의 탭을 사용함으로써 완전구속되는 경계면을 하중 방향에 대하여 90°가 아닌 적절한 각도Φ로 기울이는 것이다[7]. 본 절에서는 그림 4에 표시한 경사좌표계(1-2)를 사용하여 탭의 경사

각 Φ 를 구하고자 한다.

만약 시편이 균일하게 변형한다면, 축 1' 방향의 변위 u_1' 이 축 2의 좌표값에 무관하게 동일한 값을 가져야 하며, 축 2' 방향의 변위 u_2' 이 축 1에 무관하게 균일 수축되어야 할 것이다. 이들 조건을 수학적으로 표현하면 아래와 같다.

$$u_{1',2} = 0 \quad u_{2',1} = 0 \tag{15}$$

직교좌표계에서의 변위를 경사좌표계로 변환하고, 이를 식 (15)에 대입하면 다음의 결과를 얻는다.

$$u_{1,2} = 0 \quad u_{2,1} = \cos\phi u_{1,1} \tag{16}$$

변형률 텐서의 정의를 이용하면 위 (16) 식은 아래와 같이 표현된다.

$$\epsilon_{12} = \frac{1}{2} \cos\phi \epsilon_{11} \tag{17}$$

편축 시험편에서는 σ^{II} 을 제외한 모든 응력 성분이 0 이므로 (17)식은 아래와 같이 표현할 수 있으며, 이를 이용하여 위의 변형장을 갖기 위한 경사각 ϕ 를 구할 수 있다.

$$S_{II12} = \frac{1}{2} \cos\phi S_{II11} \tag{18}$$

그림 5는 강화섬유 방향의 편축각 θ 의 변화에 따라 균일 응력장을 생성하기 위한 탭의 경사각 ϕ 를 구하여 도기한 결과이다. 그림 6은 15° 편축시험편 양 끝단의 완전구속 경계면이 식(18)로부터 계산된 26.3°의 경사각을 가지도록 하여 수행한 유한요소해석의 결과를 보인다. 시편의 양쪽 끝단에서 하중 수직방향으로의 자유도가 구속됨으로 인하여 u_2 은 균일하지 않으나, u_1 은 축 2의 방향에 대하여 매우 균일한 값을 나타냈으며, 원하는 대로 그림 2(a)에 나타난 굽힘현상을 효과적으로 방지할 수 있었다. 그림 2와 비교할 때 응력의 분포도 매우 균일할 뿐 아니라, 파손지수도 낮아 기존의 편축시험편에 비하여 높은 파손강도를 가질 것으로 예측된다.

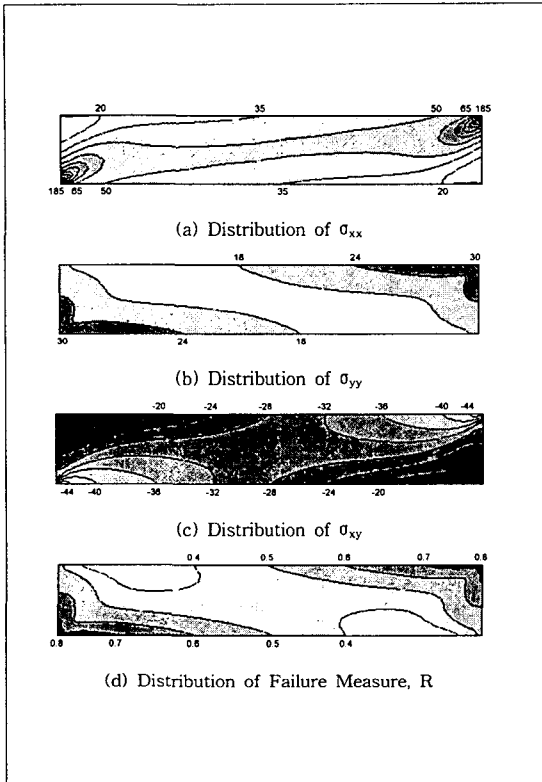


Fig. 3. FE Analysis Result for 35° Ply in [35/15/35] Laminate Tensile Specimen (stress in MPa)

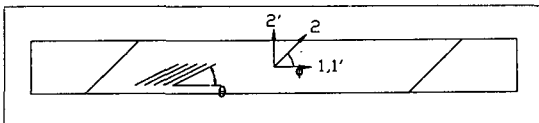


Fig. 4. Geometry of Off-axis Specimen with Skewed Tab

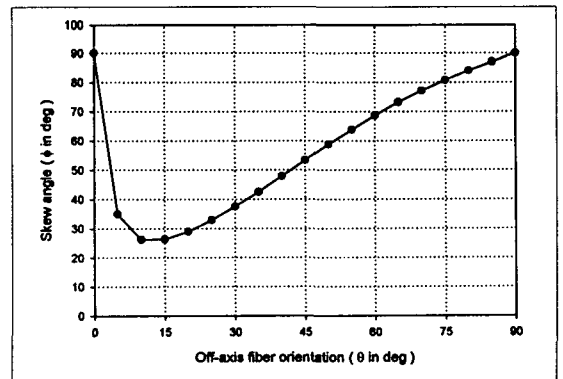


Fig. 5. Skew Angle for Unidirectional Off-axis Tensile Specimen

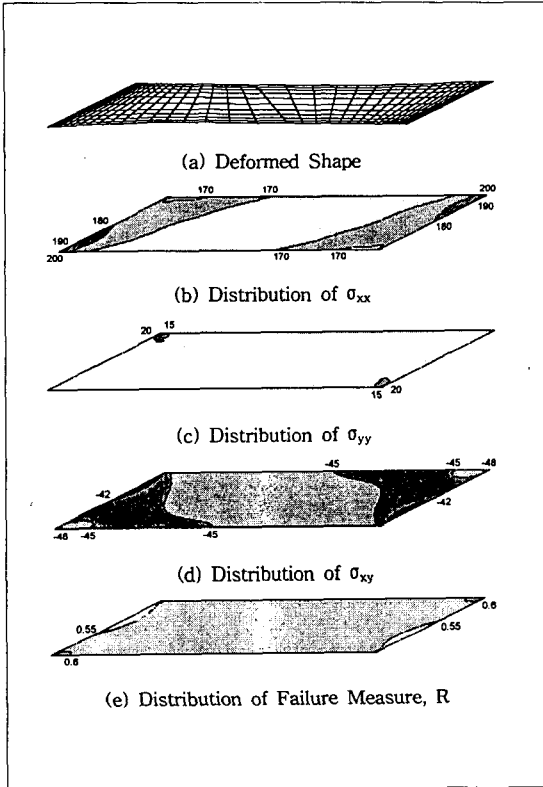


Fig. 6. FE Analysis Result for 15° Off-axis Tensile Specimen with Skewed Tab (stress in MPa)

3.2 적층판의 커플링 제거 방안

그림 3에서 살펴보았듯이 적층판의 경우에도 인장/전단 커플링은 불균일 변형의 문제점을 야기시킨다. 본 절에서는 이러한 적층판에서의 커플링을 제거하기 위한 시험편의 경계 형상을 구하고자 한다.

면내 하중에 따른 적층판의 거동은 식 (7)을 사용하여 계산할 수 있다. 특히, 중립면에 대하여 대칭인 적층판에 대하여는 $B^{\alpha\beta\gamma\delta}$ 가 모두 0이 되므로, 면내 하중과 변형의 관계는 아래 식과 같다.

$$N^{\alpha\beta} = A^{\alpha\beta\gamma\delta} \epsilon_{\delta\gamma}^0$$

편축 시험의 경우에 있어서는 N^{11} 를 제외한 면내 하중이 0이므로

$$\begin{aligned} N^{22} = 0 &= A^{2211} \epsilon_{11}^0 + A^{2222} \epsilon_{22}^0 + A^{2212} \epsilon_{12}^0 \\ N^{12} = 0 &= A^{1211} \epsilon_{11}^0 + A^{1222} \epsilon_{22}^0 + A^{1212} \epsilon_{12}^0 \end{aligned}$$

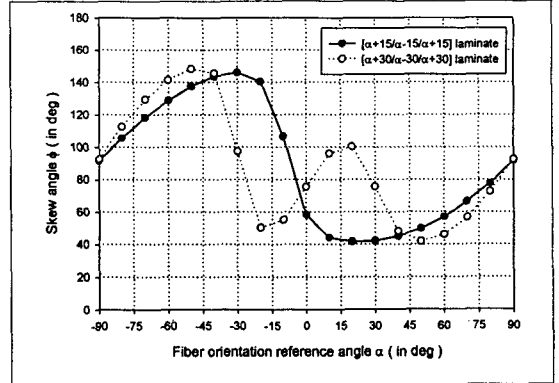


Fig. 7. Skew Angle for Laminate Tensile Specimen

이다. 여기에 편축시험편내의 균일한 변형장을 의미하는 식 (17)을 대입하고, 변형률이 동시에 0이 아니라는 조건(non-trivial solution)을 적용하면 식 (19)를 얻는다. 이를 이용하여 경사각 ϕ 를 구할 수 있으며, 특히 일방향 인장시험편에 대하여는 식 (18)과 동일한 결과를 가짐을 확인하였다.

$$\begin{aligned} \left(A^{2211} + \frac{1}{2} \cos\phi A^{2212} \right) A^{1222} \\ - \left(A^{1211} + \frac{1}{2} \cos\phi A^{1212} \right) A^{2222} = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

그림 7은 $[\alpha+15/\alpha-15/\alpha+15]$ 및 $[\alpha+30/\alpha-30/\alpha+30]$ 적층판에 대하여 식 (19)로부터 계산된 사다리꼴 탭의 경사각을 보인다. 그림 8은 $[35/5/35]$ 적층판에 대하여 수행한 유한요소해석의 결과중 35° 층의 응력분포를 보인다. 그림 3에 비하여 매우 균일한 응력 분포를 보이고 있으며, 파손지수 R도 균일한 분포인 동시에 그 최대치가 작아서 높은 파손강도를 얻게 됨을 알 수 있다.

4. 굽힘 시험편

복합재료 적층판의 굽힘 강성 및 강도는 ASTM 790에 규정된 바와 같이 3점 또는 4점 굽힘시험을 통하여 측정한다. 그러나 일반적인 적층판의 경우 한쪽 모서리에 작용하는 굽힘모멘트 M_{xx} 에 의하여 발생하는 굽힘은 $w_{,xx}$ 뿐만이 아니라 이에 수직인 방향으로의

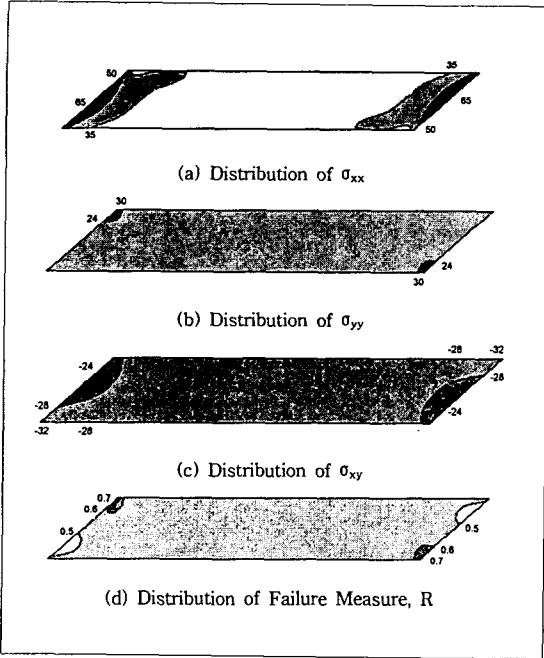


Fig. 8. FE Analysis Result for 35° Ply in [35/15/35] Laminate Tensile Specimen with Skewed Tab (stress in MPa)

굽힘 $w_{,yy}$ 및 비틀림 $w_{,xy}$ 를 수반한다. 따라서 이들 굽힘시험으로부터 측정되는 강도 및 강성을 설계 데이터로 활용하려면 적층판 이론을 통한 주의깊은 재해석이 필요한 어려움이 있다.

그러므로 보통 이들 시험은 설계 목적보다는 상대적

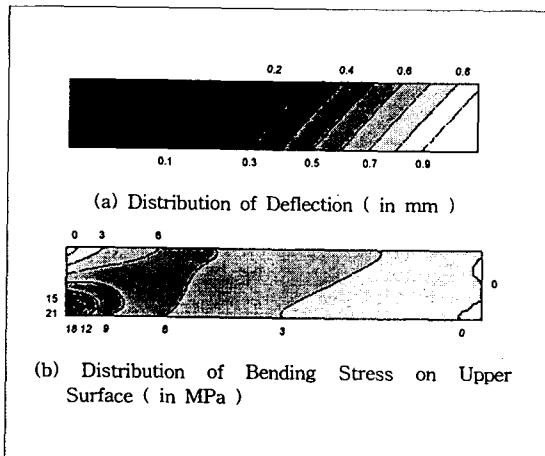


Fig. 9. FE Analysis Result for 15° UD Laminate Bending Specimen

인 비교를 통한 품질 관리 측면으로 활용될 뿐이며, 0° 또는 90°의 일방향 적층판외에는 굽힘시험은 바람직하지 않은 것으로 알려져 있다[9]. 그림 9는 두께가 2mm인 15° 일방향 적층판 시험편의 좌측단을 클램핑(clamping)하고 우측단의 중심점에 평면수직방향으로 1mm의 변위를 가하였을 때 발생하는 처짐과 시험편 윗면에 발생하는 굽힘응력분포를 보이고 있다. 비틀림의 발생으로 우측단 모서리의 처짐은 수평면에 평행하지 않으며, 이로 인하여 클램프된 좌측단 구석에서의 응력집중현상을 관찰할 수 있다.

본 연구에서는 편축시험의 경우에서와 같이 시험편의 경계면의 형상을 변화시킴으로써, 굽힘시험의 유용성을 제한하는 굽힘/비틀림 커플링을 제거하기 위한 방안을 찾아보고자 한다. 굽힘시험에서는 면내 하중이 발생되지 않으므로 대칭 적층판의 경우 모멘트와 곡률의 관계식은 식 (13)으로부터 아래와 같이 표현된다.

$$M^{\alpha\beta} = D^{\alpha\beta\delta\gamma} w_{,\delta\gamma} \quad (20)$$

굽힘시험편의 굽힘 모멘트 성분은 M^{11} 을 제외하고는 모두 0이며, 좌측단의 클램프 경계면을 ϕ 만큼 기울였을 때, 경사좌표계에서의 비틀림 즉 $w_{,12}$ 가 0이라 하면 다음의 식을 얻는다.

$$M^{22} = 0 = D^{2211} w_{,11} + D^{2222} w_{,22}$$

$$M^{12} = 0 = D^{1211} w_{,11} + D^{1222} w_{,22}$$

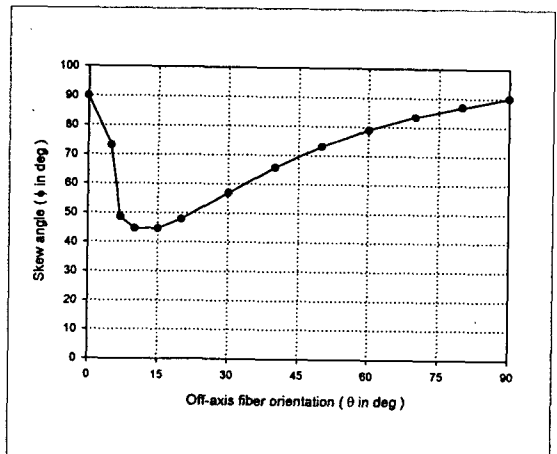


Fig. 10. Skew Angle for Unidirectional Bending Specime

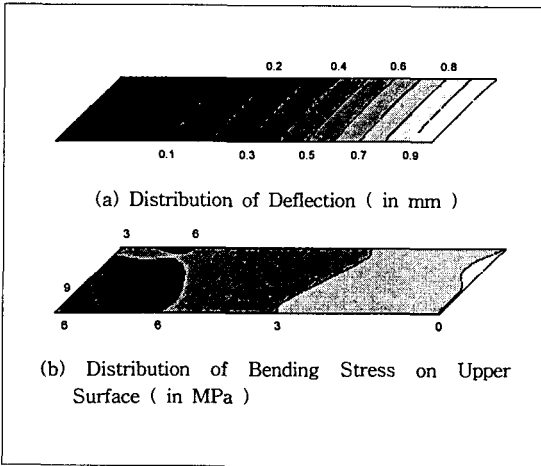


Fig. 11. FE Analysis Result for 15° UD Laminate Bending Specimen with Skew Clamp

여기서 $w_{,11}$ 과 $w_{,22}$ 가 동시에 0이 되지 않는다는 조건으로부터 구하여지는 특성방정식은 아래와 같다.

$$D^{2211}D^{1222} - D^{1211}D^{2222} = 0 \tag{20}$$

그림 10은 두께가 일방향 편축 적층판에 대하여 식 (20)으로부터 구하여진 ϕ 값을 나타낸다.

15° 적층판에 대하여 구하여진 경사각은 44.6°이며, 이를 유한요소 모델링하여 계산한 결과는 그림 11과 같다. 이때 적층판의 두께는 2mm로 하였다. 그림 9와 비교할 때, 경사좌표값 x_2 방향으로 매우 균일한 처짐 값을 나타내었으며, 클램프 부근의 응력집중 현상을 크

게 완화할 수 있었다. 따라서 굽힘 시험의 지지대 (support)와 하중선(load line)을 식 (20)에서 구한 클램프의 경사각만큼 기울일 경우 신뢰성 있는 굽힘 강성과 강도값을 측정할 수 있을 것으로 사료된다. 그림 12는 각 층의 두께가 0.38mm인 $[\alpha+15/\alpha-15/\alpha+15]$ 및 $[\alpha+30/\alpha-30/\alpha+30]$ 적층판에 대하여 식 (20)으로부터 계산된 클램프 경계면의 경사각을 보인다.

5. 결론

복합재료의 인장 및 굽힘 시험편에서 발생하는 인장/전단 및 굽힘/비틀림 커플링 현상이 인장시험기의 그림이나 굽힘 시험장치의 지지대 부근에서 구속됨으로 인하여 심한 응력집중을 유발한다. 이는 불균일한 변형장과 응력분포를 초래하므로, 스트레인 게이지의 위치와 크기가 부적절할 경우 복합재료 강성의 정확한 측정을 어렵게 할 뿐만 아니라, 조기 파손 등을 유발하여 복합재료의 강도를 과소평가하는 원인이 된다.

본 연구에서는 시험편 경계면을 경사각 ϕ 만큼 기울임으로써 기존의 편축시험편이나 굽힘시험편에 비하여 이와 같은 커플링 현상을 크게 감소시킬 수 있음을 보였다. 경사좌표계를 이용하여 고전 적층 이론을 수정하였으며, 여기에 적절한 경계조건을 부과함으로써 일방향 및 적층판의 인장시험편과 굽힘시험편에 대한 특성방정식을 각각 유도하였다. 이로부터 각 시험편에 필요한 경사각을 구하였으며, 유한요소해석을 통하여 그 유용성을 보였다.

여기서 구한 특성방정식은 모두 선형 탄성영역에서 유효한 것으로서, 파손에 이르기까지 비선형성을 보이지 않는 재료 또는 시험 조건에서 그 효과를 보일 것으로 기대되며, 향후 이에 대한 실험적 연구가 수반되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 '98 과학기술기초 중점연구(과제번호:1998-018-E00086) 결과의 일부이며, 이에 한국학술진흥재단 및 관계자께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Pagano, N.J. and Halpin, J.C., "Influence of

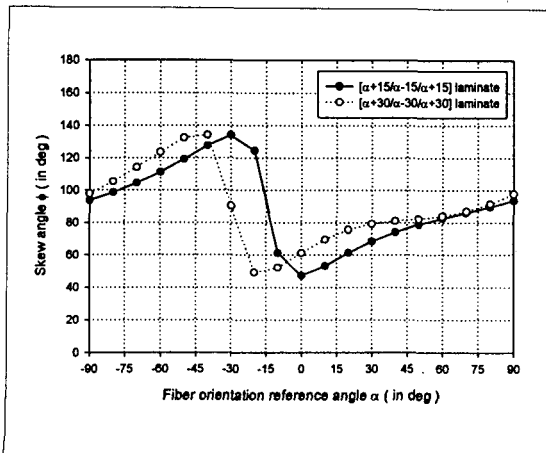


Fig. 12. Skew Angle for Laminate Bending Specimen

End Constraints in the Testing of Anisotropic Bodies," *Journal of Composite Materials*, Vol. 2, 1968, pp. 18-31.

2. Richards, G.L. Airhart, T.P. and Ashton, J.E., "Off-axis Tensile Coupon Testing," *Journal of Composite Materials*, Vol. 3, 1969, pp. 586-589.

3. Pipes, R.B. and Cole, b.W., "On the Off-axis Strength Test for Anisotropic Materials," *Journal of Composite Materials*, Vol. 7, 1973, pp. 246-256.

4. Chang, B.W., Huang, P.H. and Smith, D.G., "A Pinned-end Figure for Off-axis Testing," *Exptl. Tech.*, June 1984, pp. 28-30.

5. Rizzo, R.R., "More on the Influence of End Constraints in the Testing of Anisotropic Bodies," *Journal of Composite Materials*, Vol. 3, 1969, pp. 202-219.

6. Sun, C.T. and Berreth, S.P., "A New End Tab Design for Off-axis Tension Test of Composite Materials," *Journal of Composite Materials*, Vol. 22, 1988, pp. 766-779.

7. Sun, C.T. and Chung, I., "An Oblique End Tab Design for Testing Off-axis Composite Specimens," *Composites*, Vol. 24, 1993, pp. 619-623.

8. MIL-HDBK-17-2D, *Polymer Matrix Composites*, Vol. 2 Material Properties, 1996.

9. Pipes, R.B., *Delaware Composites Design Encyclopedia*, Vol. 6 Test Methods, Technomic Publishing Co. Inc., Lancaster, PA, USA, 1990. pp 19-58.