복합재료의 층간파괴 실험법

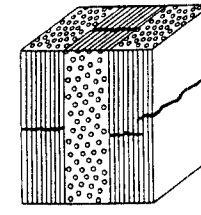
홍 창 선
한국과학기술원 항공공학과 교수

●1944년생
●複合材料力學을 專攻하였으며, 현재는 複合積層構造物의 破壞力學, 挫屈解析, 最適設計 및 低速衝擊, 擧動解析 등에 관심을 가지고 있다.

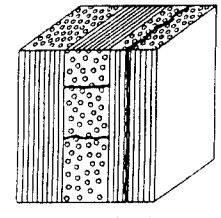
1. 머 리 말

복합재료(composites)는 화학적으로 성질이 다른 두가지 이상의 구성물이 거시적으로 서로 결합되어 개개의 구성물이 갖는 장점뿐 아니라 결합됨으로 인해 특유의 장점을 갖는 소재를 칭한다. 이와 같은 복합재료의 종류는 강화재료의 종류, 강화재료의 형태, 강화재료의 방향성 등에 따라 여러가지로 구분할 수 있지만 크게는 섬유강화 복합재료(fiber reinforced composite)와 입자강화 복합재료(particle reinforced composite)로 구분된다. 이 중 섬유강화 복합재료는 실제 구조물에 널리 사용되는 대표적인 복합재료의 형태로서 에폭시, 폴리이미드 등과 같은 기지(matrix)에 유리섬유, 탄소섬유, 아라미드섬유 등과 같은 강화섬유(reinforced fiber)를 함침시킨 형태로 구성되어 있다. 복합적층구조물은 강화섬유의 배열상태에 따라 심한 이방성을 나타내며 기존의 등방성재료에서는 볼 수 없는 연계특성(coupling property)이 존재하여 복잡한 역학적 거동과 층간분리와 같은 파손 및 파괴현상이 나타난다.

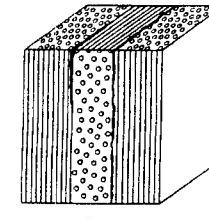
섬유강화 복합적층구조물이 실제 구조물에 적용될 때에는 복합적층구조물의 제작 및 가공시에 존재할 수 있는 일차 결함 또는 실제 사용시에 유발될 수 있는 이차 결함 등이 재료 자체가 갖는 취성의 영향과 복합적으로 작용하여 결함이 없는 구조물에서보다 훨씬 낮은 하중상태에서 급작스러운 균열진전이 발생될 가능성이 있다. 일반적으로 섬유강화 복합적층구조물에서의 파괴현상을 거시적 관점에서 보면 그림 1과 같이 강화섬유에 수직한 방향으로 파괴가 발생하는 섬유의 횡방향 파단(translaminar fracture), 층내에서 강화섬유에 평행하게 기지를 따라 파괴가 발생하는 층내 파단(intralaminar fracutre/transverse cracking) 그리고 층과 층사이의 경계면에서 파괴가 발생하는 층간 파단(interlaminar fracture)으로 구분할 수 있으며 기존의 등방성재료와는 달리



(a) 섬유의 횡방향 파단



(b) 층내 파단



(c) 층간 파단

그림 1 복합적층구조물에서의 파단 양상

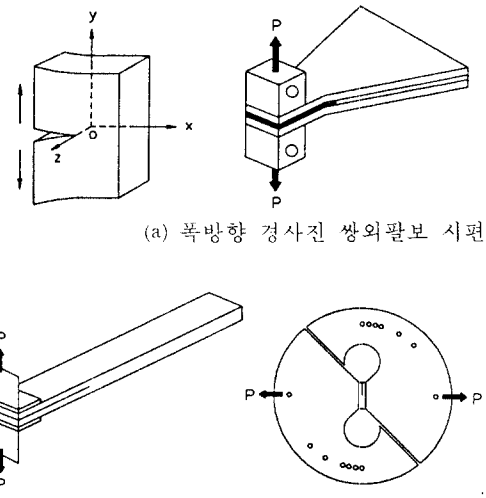
기지의 균열, 강화섬유와 기지의 접착분리, 강화섬유의 파단 등과 같은 여러가지 파괴양상들이 복합적으로 결합되어 발생한다. 특히 강화섬유에서보다 훨씬 낮은 하중지지 능력을 가진 층간면은 복합적층구조물에서 가장 취약한 부분으로 이러한 층간면에 대한 손상허용 평가는 중요한 의미를 가진다. 그러나 이와 같은 층간면에 대한 손상허용 평가의 중요성에 불구하고 아직 신뢰성있는 평가방법이 정립되어 있지 않으며 섬유강화 복합재료의 층간파괴 특성에 대한 인식 부족으로 인하여 일차구조 재료로서의 응용에 제약을 받고 있다. 따라서 섬유강화 복합재료의 층간파괴 실험법들을 정리해 보고 층간파괴 특성을 고찰하고자 한다.

2. 층간파괴인성의 평가방법

일반적으로 층간파괴를 유발하는 파손형태는 모우드 I 변형에 의한 경우가 지배적이며 모우드 II 변형에 의해 층간파괴가 발생하기도 한다. 그러나 실제의 복합적층구조물에서는 모우드 I과 모우드 II 변형의 결합인 혼합모우드 변형에 의해 층간파괴가 발생하게 된다. 따라서 각 파괴모우드에 대한 층간파괴인성을 평가할 수 있는 적절한 방법이 제시되어 각 파괴모우드에 대한 층간파괴인성의 측정뿐 아니라 층간파괴 거동의 규명이 행해져야 한다. 이때 층간파괴인성이란 층간균열진전에 대한 저항정도를 나타내는 척도로서 층간파괴가 발생하였을 때의 응력강도계수나 에너지방출률에 의해 정의된다.

2.1 모우드 I 층간파괴인성의 평가

모우드 I 층간파괴인성은 섬유강화 복합재료에서 발생하는 층간균열진전의 하한계를 제시해 준다는 점에서 중요하며 주로 그림 2(a)와 같은 폭방향 경사진 쌍외팔보 시편(width tapered double cantilever beam specimen)을 이용한 방법, 그림 2(b)와 같은 쌍외팔보 시편(double cantilever beam specimen)을 이용한 방법, 그림 2(c)와 같은 층간균열시편이 부착된 비대칭형상의 실험장치를 이용한 방법 등에 의해 평가되고 있다. 폭방향 경사진 쌍외팔보 시편을 이용한 방법은 시편의 형상이 층간균열진전에 필요한 파괴에너지가 균열길이에 무관하도록 결정되기 때문에 균열진전이 발생할 때의 임계하중을 알면 임계에너지방출률을 평가할 수 있다. 쌍외팔보 시편을 이용한 방법은 시편의 형상이 폭방향 경사진 쌍외팔보 시편에 비해 간단하므로 시편의 제작이 용이하여 모우드 I 층간파괴인성의 평가에 널리 사용되고 있다[1]. 이때 모우드 I 에너지방출률의 평가식은 선형탄성 보이론과 선형탄성 파괴이론을 적용하면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.



(a) 폭방향 경사진 쌍외팔보 시편

(b) 쌍외팔보 시편 (c) 층간균열시편 부착된 비대칭형상의 실험장치

그림 2 모우드I 층간파괴 실험을 위한 여러가지 시편

$$G_{IC}=\frac{P^2a^2}{wEI} \tag{1}$$

여기에서 P는 파괴가 발생할 때의 임계하중, a는 균열길이, w는 시편의 폭 그리고 EI는 시편의 한쪽 보 굽힘강성을 나타낸다. 이와 같은 층간균열을 가진 보형태의 시편은 안정한 균열진전 양상을 나타내므로 균열진전길이의

조절이 가능하여 한 시편으로 반복실험을 행할 수 있다.

층간균열시편이 부착된 비대칭형상의 실험장치를 이용한 방법은 층간균열시편이 부착된 비대칭형상의 시편고정장치에 하중각도가 90도인 하중을 작용하여 층간파괴인성을 평가한다[2]. 모우드 I 응력강도계수는 식 (2)와 같이 파괴가 발생할 때의 임계하중과 실험장치의 기하학적 형상에 의해 나타난다.

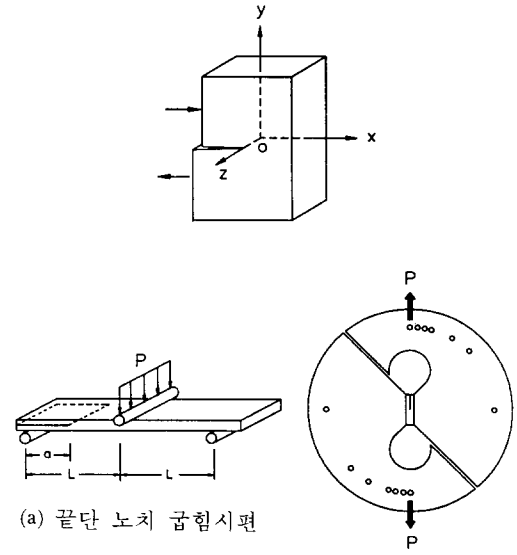
$$K_{IC}=\frac{P}{ct}\sqrt{(\pi a)}\,Y_I(a/c) \tag{2}$$

여기에서 P는 파괴가 발생할 때의 임계하중, c는 시편의 길이, t는 시편의 두께, a는 균열길이 그리고 $Y_I(a/c)$는 모우드 I 수정계수를 나타낸다. 또한 모우드 I 에너지방출률은 식 (3)과 같이 모우드 I 응력강도계수와 사용한 재료의 재료상수들에 의해 결정된다.

$$G_{IC}=K_{IC}^2\left(\frac{1}{2E_1E_3}\right)^{1/2}\left[\left(\frac{E_1}{E_3}\right)^{1/2}-\nu_{13}+\frac{E_1}{2G_{13}}\right]^{1/2} \tag{3}$$

2.2 모우드 II 층간파괴인성의 평가

모우드 II 층간파괴인성은 모우드 II 변형에 의한 층간파괴뿐 아니라 혼합모우드 변형에 의한 층간파괴 거동을 예측할 수 있는 정보를 제시해 준다는 점에서 중요하다. 그러나 모우드 I 층간파괴인성의 평가와는 달리 층간균열이 존재할 시편부위에 균일한 순수전단응력 영역이 형성되고 균열선단이 이 영역안에 존재되어야 한다는 제한조건을 만족시켜야 한다. 모우드 II 층간파괴인성은 주로 그림 3(a)와 같은 끝단 노치 굽힘시편(end notched flexure specimen)을 이용한 방법과 그림 3(b)와 같은 층간균열시편이 부착된 비대칭형상의 실험장치를 이용한 방법에 의해 평가되고 있다. 끝단 노치 굽힘시편을 이용한 경우의 층간파괴인성은 선형탄성 보이론과 선형탄성 파괴이론을 적용하면 식 (4)와 같은 관계식을 얻을 수 있다[3,4].



(a) 끝단 노치 굽힘시편

(b) 층간균열시편 부착된 비대칭형상의 실험장치

그림 3 모우드II 층간파괴 실험을 위한 여러가지 시편

$$G_{IIC}=\frac{9P^2a^2\delta}{2w(2L^3+3a^3)} \tag{4}$$

여기에서 P는 균열진전이 발생할 때의 임계하중, a는 균열길이, w는 시편의 폭, L은 시편의 스팬 그리고 δ는 하중작용점에서의 처짐변위를 나타낸다.

층간균열시편이 부착된 비대칭형상의 실험장치를 이용한 방법은 층간균열시편이 부착된 비대칭형상의 시편고정장치에 하중각도가 0도인 하중을 작용하여 층간파괴인성을 평가한다[2]. 모우드 II 응력강도계수는 식 (5)와 같이 파괴가 발생할 때의 임계하중과 실험장치의 기하학적 형상에 의해 나타난다.

$$K_{IIC}=\frac{P}{ct}\sqrt{(\pi a)}\,Y_{II}(a/c) \tag{5}$$

여기에서 P는 파괴가 발생할 때의 임계하중, c는 시편의 길이, t는 시편의 두께, a는 균열길이 그리고 $Y_{II}(a/c)$는 모우드 II 수정계수를 나타낸다. 또한 모우드 II 에너지방출률은 식

(6)과 같이 모우드 II 응력강도계수와 사용한 재료의 재료상수들에 의해 결정된다.

$$G_{IIC}=K_{IIC}^2\frac{1}{\sqrt{2}E_1}\left[\left(\frac{E_1}{E_3}\right)^{1/2}-\nu_{13}+\frac{E_1}{2G_{13}}\right]^{1/2} \quad (6)$$

2.3 혼합모우드 층간파괴인성의 평가

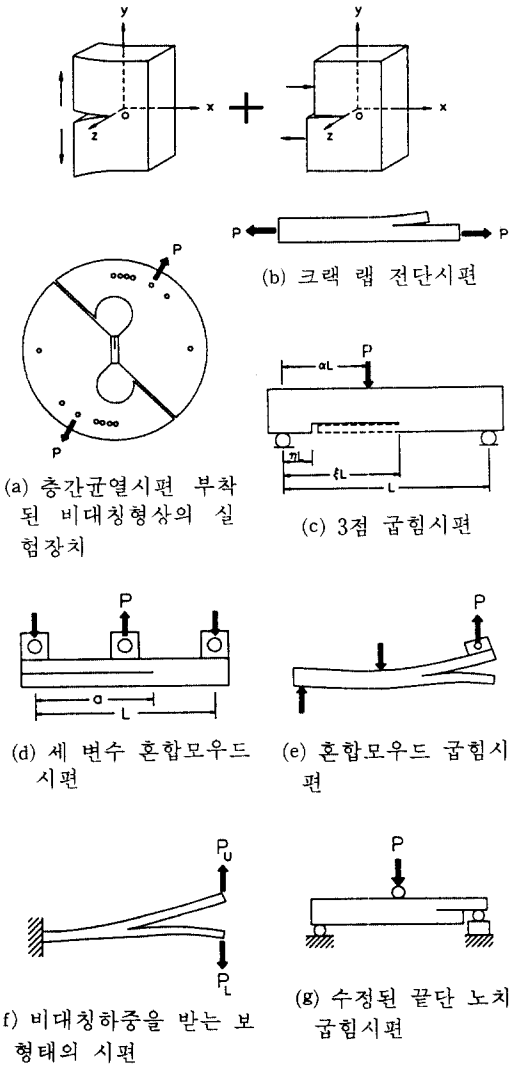
혼합모우드 층간파괴인성은 실제 복합적층 구조물에서 발생하는 층간파괴 거동을 예측할 수 있는 정보를 제공해 준다는 점에서 중요하며 정량적인 평가를 위해 여러가지 평가방법들이 제시되어 있다.

그림 4(a)와 같은 층간균열시편이 부착된 비대칭형상의 실험장치를 이용한 방법은 층간균열시편을 비대칭형상의 시편고정장치에 부착한 다음 규정된 하중각도에 따라 하중을 가함으로써 균열선단에 혼합모우드 변형을 유발시키는 방법이다[2]. 이와같은 평가방법은 작용한 하중각도에 따라 여러가지 상태의 혼합모우드 변형을 얻을 수 있기 때문에 다양한 혼합모우드 층간파괴인성의 평가가 가능하다. 혼합모우드 응력강도계수는 혼합모우드 하중을 받아 파괴가 발생하였을 때의 임계하중, 실험장치의 기하학적 형상 그리고 작용된 하중상태를 알면 식(7)에 의해 평가할 수 있다.

$$K_I=\frac{P}{ct}\sin\theta\sqrt{(\pi a)}\,Y_I(a/c)$$
$$K_{II}=\frac{P}{ct}\cos\theta\sqrt{(\pi a)}\,Y_{II}(a/c) \quad (7)$$

여기에서 P는 파괴가 발생하였을 때의 임계하중, c는 시편의 길이, t는 시편의 두께, θ는 하중각도, a는 균열길이, $Y_I(a/c)$는 모우드 I 수정계수 그리고 $Y_{II}(a/c)$는 모우드 II 수정계수를 나타낸다. 또한 혼합모우드 에너지방출률은 파괴가 발생하였을 때의 혼합모우드 응력강도계수와 사용한 재료의 재료상수들에 의해 식(8)과 같이 나타난다.

$$G_I=K_I^2\left(\frac{1}{2E_1E_3}\right)^{1/2}\left[\left(\frac{E_1}{E_3}\right)^{1/2}-\nu_{13}+\frac{E_1}{2G_{13}}\right]^{1/2}$$
$$G_{II}=K_{II}^2\frac{1}{\sqrt{2}E_1}\left[\left(\frac{E_1}{E_3}\right)^{1/2}-\nu_{13}+\frac{E_1}{2G_{13}}\right]^{1/2} \quad (8)$$



(a) 층간균열시편 부착된 비대칭형상의 실험장치

(b) 크랙 랩 전단시편

(c) 3점 굽힘시편

(d) 세 변수 혼합모우드 시편

(e) 혼합모우드 굽힘시편

(f) 비대칭하중을 받는 보 형태의 시편

(g) 수정된 끝단 노치 굽힘시편

그림 4 혼합모우드 층간파괴 실험을 위한 여러가지 시편

그림 4(b)와 같은 크랙 랩 전단시편(cracked lap shear specimen)을 이용한 방법은 층간파괴가 발생할 때의 임계하중과 시편의 컴플라이언스에 의해 전체에너지방출률을 평가하는 방

법이다[5]. 그러나 이와 같은 방법은 전체에너지방출률에 대한 모우드 I 에너지방출률과 모우드 II 에너지방출률 성분이 분리되어 있지 않아서 혼합모우드 층간파괴 거동에 대한 정보를 얻기가 곤란하며 전체에너지방출률에 대한 모우드 I 에너지방출률의 비가 특정한 경우의 혼합모우드 층간파괴인성 평가만이 가능하다. 따라서 전체에너지방출률에 대한 모우드 I 에너지방출률과 모우드 II 에너지방출률 성분의 분리를 위해서는 유한요소해석과 같은 이차적 해석이 행해져야 한다.

그림 4(c)와 같은 3점 굽힘시편(3 point bend specimen)을 이용한 방법은 하중작용점과 균열삽입 위치에 따라 균열선단에 여러가지 상태의 혼합모우드 변형을 유발시키는 방법으로 층간파괴가 발생할 때의 임계하중과 시편의 컴플라이언스에 의해 전체에너지방출률을 평가하게 된다[6]. 이와 같은 평가방법도 혼합모우드 층간파괴 거동에 대한 정보를 얻기 위해서는 전체에너지방출률에 대한 모우드 I 에너지방출률과 모우드 II 에너지방출률 성분의 분리를 위한 이차적 해석이 행해져야 하며 시편의 제작도 용이하지 않아 실험에 적용하기가 어렵다.

그림 4(d)와 같은 새 변수 혼합모우드 시편(new variable mixed mode specimen)을 이용한 방법은 균열길이와 하중작용점을 변화시킴에 따라 균열선단에 혼합모우드 변형을 유발시키는 방법이다[7]. 이와 같은 평가방법은 하중작용을 위해 하중부하장치(loading block)의 부착이 필요하며 이러한 하중부하장치의 부착으로 인한 여러가지 문제점이 발생하게 된다. 따라서 실험에 적용하기 위해서는 하중부하장치의 부착으로 인한 실험오차 유발요인들에 대한 연구가 행해져야 한다.

그림 4(e)와 같은 혼합모우드 굽힘시편(mixed mode flexure specimen)을 이용한 방법은 모우드 II 층간파괴인성의 평가에 사용되는 끝단 노치 굽힘시편의 윗쪽 보에만 하중을 작용시켜 균열선단에 혼합모우드 변형을 유발시키는 방법이다[5]. 이와 같은 평가방법은 윗쪽 보와 아랫쪽 보의 두께비를 변화시킴으로써 균열선단에 여러가지 상태의 혼합모우드 변형을 얻을 수 있지만 그림 4(d)와 같이 하중작용을 위해 부착시킨 하중부하장치는 실험시에 실험오차의 유발요인이 되므로 실험에 적용하기 위해서는 이에 대한 연구가 행해져야 한다.

그림 4(f)와 같은 비대칭 하중이 작용되는 보형태의 시편(asymmetrically loaded split specimen)을 이용한 방법은 모우드 I 층간파괴인성의 평가에 사용되는 쌍외팔보 시편의 윗쪽 보와 아랫쪽 보에 각각 다른 크기의 하중을 작용시켜 균열선단에 혼합모우드 변형을 유발시키는 방법이다[8]. 이와 같은 평가 방법은 이론적인 관점에서는 윗쪽 보와 아랫쪽 보에 작용되는 하중의 크기를 변화시키면 균열선단에 다양한 상태의 혼합모우드 변형의 유발이 가능하지만 실험적인 관점에서는 윗쪽 보와 아랫쪽 보에 크기가 다른 하중을 작용시킨다는 것은 그리 용이하지 않으며 실험의 수행을 위해서는 유발될 수 있는 실험오차를 최소화시킬 수 있는 특별한 시편고정장치가 요구된다.

그림 4(g)와 같은 수정된 끝단 노치 굽힘시편(modified end notched flexure specimen)을 이용한 방법은 층간균열면에서의 아랫쪽 보가 절단된 형태로 층간균열면에서의 보 두께비의 변화에 따라 균열선단에 혼합모우드 변형을 유발시키는 방법이다[9]. 이와 같은 수정된 끝단 노치 굽힘시편은 시편의 형상이 비교적 간단하고 시편의 제작이 용이할 뿐 아니라 실험방법이 간편하여 쉽게 실험에 적용할 수 있으며 최근 많은 연구의 대상이 되고 있는 열가소성 복합재료(thermoplastic composites)의 혼합모우드 층간파괴 거동의 조사에도 적용이 가능하다. 수정된 끝단 노치 굽힘시편에 3점 굽힘하중이 작용할 때의 모우드 I 에너지방출률과 모우드 II 에너지방출률은 전단변형을 고려한 선형탄성 보이론과 선형탄성 파괴이론에 의해 식(9)와 같이 나타난다.

$$G_I=\frac{3P^2a^2}{16E_1b^2h^3}\ \frac{\Psi}{\xi^3(1+\Psi)}$$

$$\left[1+\frac{kE_1\xi^2(1-\xi)(1+\Psi)h^2}{3G_{13}\Psi a^2}\right]$$

$$G_{II}=\frac{9P^2a^2}{16E_1b^2h^3}\ \frac{1-\xi}{\xi^2}\ \frac{1}{1+\Psi}$$

단 $\Psi=\left(\frac{1-\xi}{\xi}\right)^3$ (9)

여기에서 P는 파괴가 발생할 때의 임계하중, a는 균열길이, b는 시편의 폭, h는 시편전체 두께의 반, ξ는 층간균열면에서의 윗쪽 보두께에 대한 시편전체 두께의 비 그리고 k는 단면에 작용하는 평균전단변형률과 도심에서의 전단변형률의 비를 나타내는 전단계수이다.

탄소섬유강화 복합재료의 층간파괴인성은 온도와 습도 등의 외부환경조건뿐 아니라 하중률 등에 의해서 영향을 받게 된다. 하중률에 따른 층간파괴인성 측정의 연구결과들을 살펴보면 하중률이 느린 경우는 균열선단 부근에서 정의되는 특성길이에서의 변형률이 작아 안정한 균열진전이 발생하며 하중률이 빠른 경우는 특성길이에서의 변형률이 커져 불안정한 균열진전이 발생한다. 층간파괴인성의 관점에서 보면 층간파괴인성은 안정한 균열진전이 발생하는 경우가 불안정한 균열진전이 발생하는 경우에 비해 비교적 높게 나타난다. 최근들어 많은 연구가 진행되고 있는 쌍외팔보 시편을 이용한 모우드 I 층간파괴인성 평가방법은 균열선단 부근에서 정의되는 특성길이에서의 변형률이 매우 작아 비교적 안정한 균열진전이 발생한다. 이와는 달리 층간균열시편이 부착된 비대칭형상의 실험장치를 이용한 모우드 I 층간파괴인성 평가방법은 층간파괴 발생시에 불안정한 균열진전이 발생한다. 따라서 안정한 균열진전이 발생하는 쌍외팔보 시편을 이용하여 평가한 모우드 I 층간파괴인성은 불안정한 균열진전이 발생하는 비대칭형상의 실험장치를 이용하여 평가한 모우드 I 층간파괴인성에 비해 높게 평가될 것으로 사려된다. 그러므로 특정한 조건하에서 평가된 층간파괴인성을 그 재료자체가 갖는 유일한 재료상수로 간주하면 층간파괴 거동이 과대평가 혹은 과소평가를 초래할 오류를 범할 여지가 있다.

3. 혼합모우드 층간파괴특성

복합재료의 혼합모우드 층간파괴 거동을 예측하기 위해서는 혼합모우드 층간파괴조건의 결정이 필요하다. 적절한 혼합모우드 층간파괴조건을 조사하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔지만 일반적으로 혼합모우드 층간파괴조건은 식(10)과 같은 모우드 I 임계응력강도계수와 모우드 II 임계응력강도계수에 의한 경험식에 의해 결정하는 방법이 보편적으로 사용되고 있다.

$$\left(\frac{K_I}{K_{IC}}\right)^m+\left(\frac{K_{II}}{K_{IIC}}\right)^n=1 \quad (10)$$

따라서 혼합모우드 층간파괴 거동을 예측하기 위해서는 재료의 특성에 맞는 적절한 매개변수가 결정되어야 한다. 그림 5는 탄소섬유강화 복합재료의 혼합모우드 층간파괴조건을 결정하기 위해 균열면에서 섬유방향이 [0/0]인 층간균열시편에 대해 층간파괴가 발생하였을 때의 혼합모우드 응력강도계수를 여러가지 하

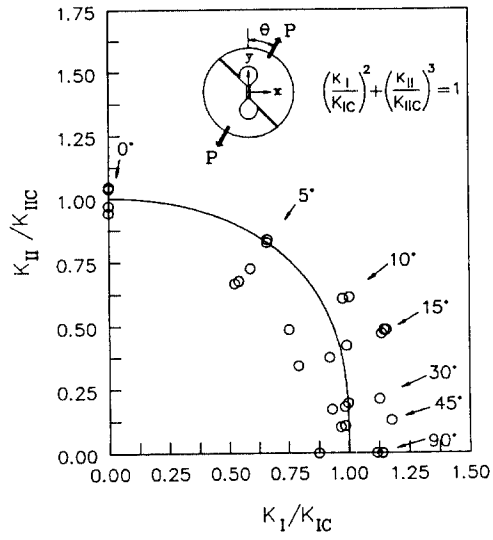


그림 5 혼합모우드 층간파괴조건 결정을 위한 파단선도

I 에너지방출률은 감소하는 경향을 나타낸다. 따라서 보 두께비가 커질수록 모우드 II 변형성분이 파단을 유발하는 요인으로 작용하여 전체에너지방출률은 증가함을 알 수 있다.
중각도에 따라 나타낸 것이다. 이때 혼합모우드 변형하에서의 모우드 I 응력강도계수와 모우드 II 응력강도계수는 식 (7)에 의해 결정하였다. 여기에서 보면 실험적으로 평가된 혼합모우드 응력강도계수는 매개변수 $m=2$와 $n=3$인 혼합모우드 파괴조건에 잘 일치하고 있다.

수정된 끝단 노치 굽힘시편을 이용한 평가방법은 층간균열면에서의 보 두께비에 따라 균열선단에 여러가지 상태의 혼합모우드 변형을 유발시킬 수 있다. 그림 6에는 층간균열면에서의 보 두께비가 다른 수정된 끝단 노치 굽힘시편에 대해 실험적으로 평가한 혼합모우드 층간파괴인성들과 전체에너지방출률에 대한 모우드 I 성분과 모우드 II 성분의 분리된 에너지방출률이 나타나 있다. 층간균열면에서의 보 두께비에 따른 에너지방출률을 조사해 보면 보 두께비가 커질수록 전체에너지방출률에 대한 모우드 II 에너지방출률은 급격히 증가하며 모우드

4. 파단면의 미시적 고찰

그림 7에 보인 바와 같이 파단된 층간파단면을 전자현미경을 이용하여 미시적으로 관찰하여 보면 파단을 유발한 하중상태에 따른 특유의 파단면 양상을 볼 수 있으며 층간파괴메카니즘에 대한 정보를 얻을 수 있다[10]. 파단면 양상에 의한 파괴메카니즘의 미시적 연구는 1950년대부터 시작되어 주로 금속과 같은 등방성재료에 대해 균열형성의 근원, 균열진전의 방향, 파단면 양상과 파단을 유발시킨 작용하중과의 상호관계 등에 관한 여러가지 정보들이 규명되어졌다. 이와 같은 파단면 관찰을 통해 얻어진 정보들은 파괴가 발생한 구조물에 적용시킴으로써 파단의 원인규명이 가능하며 이를 설계자에게 제시해 줌으로써 설계의 기초자료로 활용할 수 있다. 탄소섬유강화 복합재료는 강화섬유의 배열방향에 따라 이방성의 정도가 달라지며 강화섬유와 기지의 상호작용, 작용된 하중상태 등의 영향으로 인해 파괴양상은 매우 복잡하게 나타난다. 특히 층과 층의 경계면인

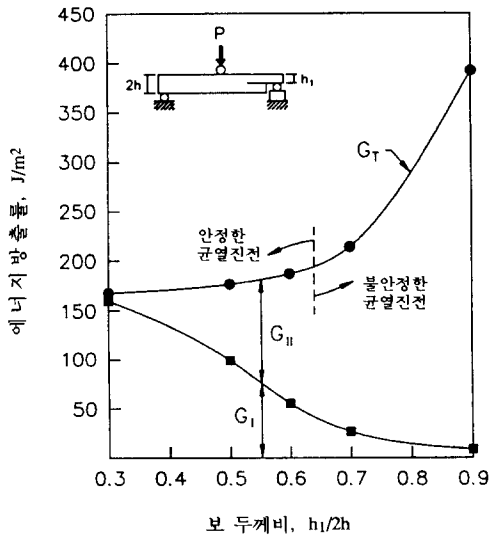


그림 6 보 두께 비에 따른 모우드 I 에너지방출률과 모우드 II 에너지방출률의 변화

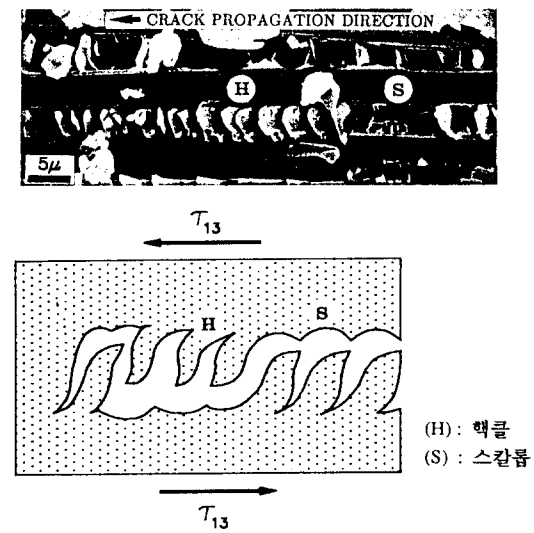


그림 7 전단변형하에서의 층간파단면 양상과 핵클형성 메카니즘

층간면, 섬유과 기지의 경계면 등은 작용된 하중상태에 따라 다양한 기지 변형이 발생하는 영역으로 하중상태에 따른 이 영역에서의 파단면 관찰은 층간파괴특성의 규명에 중요한 정보를 제공해 준다.

5. 맺 음 말

섬유강화 복합재료는 기존의 등방성재료에 비해 비강성과 비강도가 높고 충격특성, 피로특성 그리고 내부식성 등이 매우 우수하여 항공기뿐 아니라 자동차, 쾌속선, 스포츠용품 등에 널리 사용되고 있으며 높은 X선 투과성과 치수안정성 등의 특성을 이용하여 의료용기기, 대규모집적회로기판, 정밀계측기기 등에 까지 응용분야가 넓어져 가고 있다. 최근에는 설계를 지원하기 위한 데이타베이스의 체계화와 실제 구조물이 요구하는 특성의 효율적인 만족을 위해 구조물의 안전성 관점에서 본 손상허용 평가가 요구되고 있다. 이를 위해 섬유강화 복합재료의 층간파괴인성을 평가할 수 있는 기존의 실험법들을 소개하고 섬유강화 복합재료의 층간파괴 특성을 고찰하여 보았다. 섬유강화 복합재료를 실제 구조물에 응용하기 위해서는 설계에 대한 중요한 정보인 각 파괴모우드에 대한 층간파괴인성들을 일관성있게 정량적으로 평가할 수 있는 방법이 제시되어 각 파괴모우드에 대한 층간파괴인성의 측정뿐 아니라 층간파괴 거동의 규명이 행해져야 한다.

참 고 문 헌

(1) Wilkins, D.J., Eisenmann, J.R., Camin, R. A., Margolis, W.S. and Benson, R.A., 1982, "Characterizing Delamination Growth in Graphite-Epoxy", Damage in Composite Materials, ASTM STP 775, pp. 168～183.

(2) 윤성호, 1990, "탄소섬유강화 복합재료의 혼합모우드 층간파괴특성에 관한 연구", 박사학위논문, 한국과학기술원.

(3) Russell, A.J. and Street, K.N., 1982, "Factors Affecting the Interlaminar Fracture Energy of Graphite/Epoxy Laminates", ICCM-IV, Tokyo, pp.279～286.

(4) 심재열, 1988, "ENF실험을 이용한 탄소섬유강화 복합적층판의 층간전단 파괴인성치 특성", 석사학위논문, 한국과학기술원.

(5) Russell, A.J. and Street, K.N., 1985, "Moisture and Temperature Effects on the Mixed-Mode Delamination Fracture of Unidirectional Graphite/Epoxy", Delamination and Debonding of Materials, ASTM STP 876, pp.349～370.

(6) Gustafson, C-G., Jilkên, L. and Gradin, P. A., 1985, "Fatigue Thresholds of Delamination Crack Growth in Orthotropic Graphite/Epoxy Laminates", Delamination and Debonding of Materials, ASTM STP 876, pp.200～216.

(7) Hashemi, S., Kinloch, A.J. and Williams, J.G., 1987, "Interlaminar Fracture of Composite Materials", ICCM-VI, London, pp. 254～264.

(8) Bradley, W.L. and Cohen, R.N., 1985, "Matrix Deformation and Fracture in Graphite-Reinforced Epoxies", Delamination and Debonding of Materials, ASTM STP 876, pp. 389～410.

(9) 윤 성호, 홍 창선, 1989, "보 형태의 굽힘 시편을 이용한 적층복합재료의 혼합모우드 층간파괴인성 평가", 대한기계학회논문집, 제13권, 제5호, pp. 911～920.

(10) 윤 성호, 홍 창선, 1988, "탄소섬유강화 복합재료의 혼합모우드 층간파단면 고찰", 한국복합재료학회지, 제 1 권, 제 1 호, pp. 1～9.