

## 수지함량에 따른 CFRP 적층판의 층간파괴 인성평가

김지훈\*, 양인영<sup>+</sup>, 심재기<sup>+</sup>  
(논문접수일 2003. 4. 14, 심사완료일 2003. 6. 4)

### Evaluation of Fracture Toughness of Dynamic Interlaminar for CFRP Laminate Plates by Resin Content

Ji-hoon Kim\*, In-young Yang<sup>+</sup>, Jae-Ki Sim<sup>+</sup>

#### Abstract

This research work has been carried out for finding  $\dot{J}$ -integral in mode II of CFRP(carbon fiber reinforced plastics) laminate plates based on the classical bar theory in dynamic conditions with consideration of the effect of inertia forces, eventually to lead to finding the dynamic inter-layer fracture toughness. Dynamic inter-layer fracture toughness was found by a self-made ENF(End Notched Flexure) experimental apparatus using Split Hopkinson's Bar(SHPB), and also observed the variation of the fracture toughness having different resin contents and fiber arrangements of CFRP specimen(  $[0_3^\circ/90_3^\circ/0_6^\circ/90_3^\circ/0_3^\circ]$ ,  $[0_{20}^\circ]$ ,  $[0_5^\circ/90_{10}^\circ/0_5^\circ]$  ). As an experimental result, in either cases of quasi-static or dynamic load condition, the critical load and the inter-layer fracture toughness increased sharply depending on the increase of resin contents. Therefore, it could, be concluded that the effect by resin contents is the major factor determining the inter-layer fracture toughness in the CFRP laminate plates.

**Key Words** : CFRP(탄소섬유강화플라스틱), SHPB(Split Hopkinson-봉법), J-integral(J적분), Fracture Toughness(파괴인성)

## 1. 서론

탄소섬유강화플라스틱(CFRP)은 금속 재료나 기타재료에 비하여 비강도, 비강성이 우수하여 고속화 및 경량화가

중요한 항공기, 우주구조물이나 스포츠 용구 등의 적용화가 기대되고 있다. 특히 압축강도에 우수한 특성을 보이는 일방향 CFRP 프리프레그 적층구조는 항공분야에 이용되는 경우가 많다. 그러나 일방향 프리프레그에 의한 구조부

\* 주저자, 조선대학교 수송기계부품 공장자동화 연구센터 (daisu@hanmail.net)

주소: 광주광역시 동구 서석동 375

+ 조선대학교 기계공학부

재는 섬유 방향에 대해서는 높은 강도를 기대할 수 있는 반면 그와 직교하는 방향의 인장강도와 전단강도는 현저히 열악하다.

따라서 적층판의 면외 방향의 부하를 받을 경우 내부층간에 박리가 생기기 쉽다. 특히 제트엔진의 터빈날개의 베드샷(bed shot) 문제에서 대표되는 바와 같이 충격하중이 작용하는 경우의 내부 손상평가가 중요한 과제로 되어 있다. 충격하중이 작용하는 경우의 박리 진전은 모드 II가 지배적이라는 것이 알려졌기 때문에 층간 파괴인성치를 평가하는 것이 중요하다<sup>(1)</sup>. 따라서 이와 같은 경우, 스프릿트 홉킨스 봉법을 이용한 동적 ENF 시험이 자주 이용된다<sup>(2)</sup>. 계측데이터에서 파괴인성치를 구하기 위해 준정적 하중을 작용시키는 정적에너지 해방율에 대하여 운동에너지 영향을 보정하는 방법<sup>(3)</sup>, 혹은 유한요소법에 의해 동적에너지 해방율로 구하는 방법<sup>(4)</sup> 등이 있으나 충격하중이 작용하는 경우와 준정적 하중이 작용하는 경우와는 시험편의 변형모드와 응력분포도가 다르고 유한요소법에 의한 수치계산의 번거로움이 문제로 된다.

따라서 본 연구에서는 ENF 시험편에 대하여 동적 고전보이론을 토대로 고속 푸리에변환(FFT)을 이용하여 수치라플라스 변환을 이용하는 것에 의해 관성력을 고려한 동적 해석에서  $\dot{J}$  적분을 구하고  $\dot{J}$  적분값에 의해 동적효과를 고려한 층간파괴인성치를 구한다. 본 연구에서는 CFRP/EPOXY 시험편에 대해 홉킨스봉법<sup>(5)</sup>에 의한 동적 ENF 시험을 하여 모드 II에 대한 동적파괴인성치를 실험적으로 구한다. 또한 수치함량 및 적층구성이 층간파괴인성치에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 수치함량이 다른 프리프레그 SHEET를 각각  $[0_{20}]$ ,  $[0_3^{\circ}/90_3^{\circ}/0_6^{\circ}/90_3^{\circ}/0_3^{\circ}]$ ,  $[0_5^{\circ}/90_{10}^{\circ}/0_5^{\circ}]$ 으로 적층하여 준정적 시험 및 관성력의 효과를 고려한 동적 해석에 의한  $\dot{J}$  적분값에 의해 동적층간파괴인성치를 구하고 적층구성에 따른 동적층간파괴인성치를 비교하여 수치함량 및 적층구성이 층간파괴인성치에 미치는 영향에 관하여 고찰한다.

## 2. 실험 방법

수치함량과 적층구성이 층간파괴인성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 EPOXY수지 함량이 각각 37%, 25%인 프리프레그 SHEET를 대상으로 하여 적층구성을 시험편에 대해 길이방향을  $0^{\circ}$ 로 하여 적층의 각도 및 각각의 적층수에 따라  $[0_{20}]$ ,  $[0_3^{\circ}/90_3^{\circ}/0_6^{\circ}/90_3^{\circ}/0_3^{\circ}]$ ,  $[0_5^{\circ}/90_{10}^{\circ}/0_5^{\circ}]$

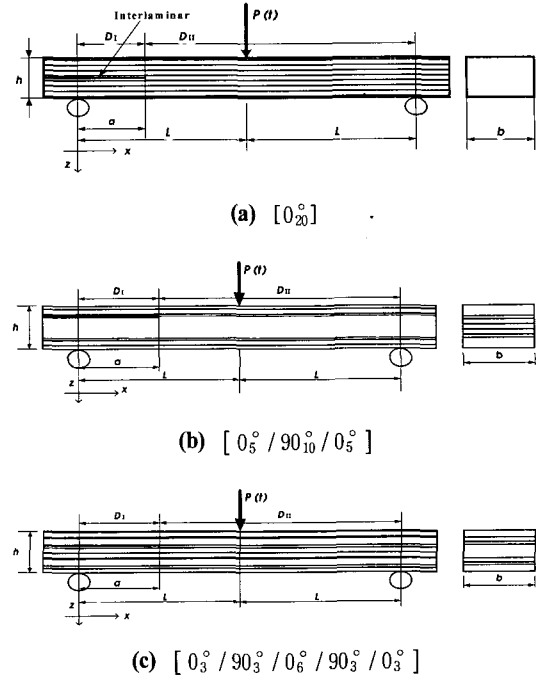


Fig. 1 ENF Specimen

로 적층한 3종류의 ENF 시험편을 이용하여 고전보 이론을 기초로 파괴인성평가를 한다.

층간박리는 Fig. 1과 같이  $[0_{20}]$  시험편은 선단 중앙,  $[0_5^{\circ}/90_{10}^{\circ}/0_5^{\circ}]$  시험편은 1계면과 2계면 사이,  $[0_3^{\circ}/90_3^{\circ}/0_6^{\circ}/90_3^{\circ}/0_3^{\circ}]$  시험편은 2계면과 3계면 사이에 도입하였으며, 그림에서와 같이 2구간으로 나누어 폭이 b인 시험편으로 고전보이론을 토대로 한 이론해석에 실험값을 적용해 층간 파괴인성치를 구한다.

시험편에 이용한 재료는 CFRP/EPOXY 일방향 프리프레그로서 적층구성을  $[0_{20}]$ ,  $[0_5^{\circ}/90_{10}^{\circ}/0_5^{\circ}]$ ,  $[0_3^{\circ}/90_3^{\circ}/0_6^{\circ}/$

Table 1 Material propertis of ENF specimens

	Carbon fiber	Epoxy resin
Density [ $\text{kg/m}^3$ ]	1,750	1,200
Tension strength [GPa]	3.24	0.08
Elastic modulus [GPa]	230	3.2
Elongation [%]	1.5	2.0

90<sub>3</sub>/0<sub>3</sub>]로 하여 최외각 섬유방향이 시험편의 길이방향이 되도록 적층하고 오토크레이브로 성형한다. 이때 초기 층간 박리를 도입하기 위해 켈톤필름을 삽입, 다이아몬드 컷터로 절단하여 연마포지와 알루미늄제립을 이용 연마후 현미경 관찰을 통해 컷터날로 층간박리를 약 5mm 진전시켜 예리한 박리선단을 만든다. ENF시험편은 Fig. 1과 같고 시험편 두께는 평균치로 하였다. 또한 시험편의 재료특성은 Table 1과 같다.

**2.1 준정적 시험**

3점 굽힘시험기는 지점간 거리가 60mm이고 지점에는 반경 3mm의 환봉을 이용하였으며 만능재료시험기(Ston, Hounsfield, UK)를 이용하여 하중점 변위속도를 5×10<sup>-5</sup>, 5×10<sup>-4</sup>m/s 로써 변위제어 방식에 의해 시험을 행한다. 이때 시험편 중앙에 작용하는 하중을 크로스헤드에 붙어있는 4,900N load cell에 의해 측정했다. 측정된 하중은 하중이 급격히 감소하는 시간을 박리가 진전한 순간으로 보고 층간박리가 진전할 경우의 시험편 중앙처짐은 다음과 같다.

$$w^s = \frac{f}{12} \left\{ \frac{(D_{II} - D_I)a^3}{D_I D_{II}} + \frac{L^3}{4D_{II}} \right\} \quad (1)$$

여기서, D<sub>I</sub>은 박리구간의 강성계수, D<sub>II</sub>는 박리가 도입되지 않은 구간의 강성계수이다.

**2.2 동적 실험**

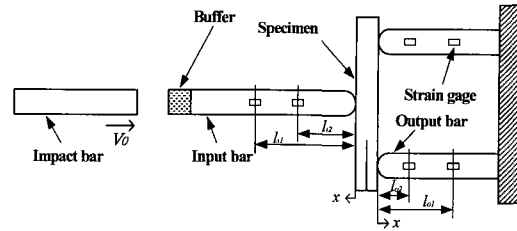
Table 2에 측정시간, 측정하중등을 고려하여 SHPB를 이용한 동적 ENF시험장치의 제원을 나타냈다.

스프릿훅킨슨봉법을 이용한 동적 ENF 시험장치를 Fig. 2에 나타냈다.

공기압으로 가속한 충격봉을 입력봉에 충돌시켜서 입력

**Table 2 Specification of strike impact and output bar(unit:mm)**

	Impact bar	Input bar	Output bar
Length	750	1500	1500
Size	φ10	φ10	3×10
Young's modulus(E)	206GPa		
Density	7.86×10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>		
Stress wave velocity(C <sub>0</sub> )	5120m/s		



**Fig. 2 Schematic of dynamic ENF test equipment**

봉을 따라 일차원 응력파가 전파하여 시험편에 하중을 가한다. 입력봉 및 출력봉에 Fig.2와 같이 스트레인게이지를 부착하고 스트레인게이지와 PC를 통해 스트레인 변동으로 변환시킨다. 측정된 입력봉과 출력봉의 스트레인을 이용하여 시험편 중앙에 작용하는 하중 f(t), 지점반력 R<sub>r</sub>(t)과 R<sub>l</sub>(t)를 구한다.

봉의 지배방정식은 일차원 파동전파이론을 이용하여 l<sub>2</sub> = l/2인 게이지 위치를 설정할 경우 하중식은 다음과 같다<sup>(6)</sup>.

$$f = AE \left\{ \varepsilon_1(t) - \varepsilon_2 \left( t + \frac{l_1}{2C_0} \right) H \left( t + \frac{l_1}{2C_0} \right) - \varepsilon_2 \left( t - \frac{l_1}{2C_0} \right) H \left( t - \frac{l_1}{2C_0} \right) \right\} \quad (2)$$

여기서, H(t)는 Haeviside step함수이다.

ENF시험편의 변위를 구하기 위해 지지반력 R<sub>r</sub>(t), R<sub>l</sub>(t)의 경계조건도 포함하여 라플라스변환영역에서의 경계조건을 취하면 다음과 같다.

ξ = 0에서

$$\frac{\partial^2 \bar{w}_1}{\partial \xi^2} = 0, \quad \frac{\partial^3 \bar{w}_1}{\partial \xi^3} = -\frac{D_{II}}{D_I} \frac{\bar{R}_l(s)}{f_0}$$

ξ = 0.25에서

$$\bar{w}_1 - \bar{w}_2 = 0, \quad D_I \frac{\partial^2 \bar{w}_1}{\partial \xi^2} - D_{II} \frac{\partial^2 \bar{w}_2}{\partial \xi^2} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{w}_1}{\partial \xi} - \frac{\partial \bar{w}_2}{\partial \xi} = 0, \quad D_I \frac{\partial^3 \bar{w}_1}{\partial \xi^3} - D_{II} \frac{\partial^3 \bar{w}_2}{\partial \xi^3} = 0$$

ξ = 0.50에서

$$\bar{w}_2 - \bar{w}_3 = 0, \quad \frac{\partial^2 \bar{w}_2}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2 \bar{w}_3}{\partial \xi^2} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{w}_2}{\partial \xi} - \frac{\partial \bar{w}_3}{\partial \xi} = 0, \quad \frac{\partial^3 \bar{w}_2}{\partial \xi^3} - \frac{\partial^3 \bar{w}_3}{\partial \xi^3} = \bar{f}(s)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{w}_3}{\partial \xi^2} = 0, \quad \frac{\partial^3 \bar{w}_3}{\partial \xi^3} = \frac{\bar{R}_r(s)}{f_0} \quad (3)$$

또한  $J$ 적분에 의한 동적충간파괴인성치를 구하기 위해 岸本 등이 제안한  $J$ 적분을 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$J = \frac{D_I}{2b} \left\{ \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 - 2 \left( \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \right) \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} \Bigg|_{x=x_l}$$

$$- \frac{D_{II}}{2b} \left\{ \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 - 2 \left( \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \right) \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} \Bigg|_{x=x_r} \quad (4)$$

또한 충격적인 외력을 받는 물체는 관성력의 영향을 포함한 경우를 고려하면 총 충간파괴인성치  $\hat{J}$ 는 다음과 같다.

$$\hat{J} = J + \int_{x_l}^{x_r} \Phi \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial w}{\partial x} \right) dx \quad (5)$$

여기서  $\Phi = \rho_1(h-l) + \rho_2 l$

$\hat{J}$ 적분이 급격히 감소하는 시간을 충간박리가 진전한 시간으로 보면 이때의  $\hat{J}$ 의 극대값이 충간파괴인성치이고 이때 하중점의 변위속도는 다음식과 같다.

$$\dot{w}(t) = \frac{\partial w_2}{\partial t} = \frac{f_0 L^3 C_b}{D_{II}} \alpha^{-1} \left\{ s \sum_{j=1}^8 A_j \exp(\eta_j) \right\} \quad (6)$$

### 3. CFRP 충간파괴인성치의 측정 및 고찰

#### 3.1 준정적 실험 결과

제작된 2종류의 ENF시험편을 이용하여 하중점의 변위속도를  $5 \times 10^{-5}$ ,  $5 \times 10^{-4}$  m/s로써 준정적 실험을 했다. 그 결과 얻어진 하중이력을 Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5에 나타낸다. 이들 결과에서 하중점 변위속도  $\dot{w}$ 가  $5 \times 10^{-5}$  m/s인 경우는 100Hz,  $5 \times 10^{-4}$  m/s인 경우는 1kHz의 저주파 필터를 이용 고주파진동을 제거하였다.

Fig. 3~5는 각각의 적층구성 및 수지함유량에 따른 CFRP적층판의 준정적실험에 따른 임계하중  $f_c$ 를 나타냈다. 그림에서 임계하중  $f_c$ 는 박리가 진전한다고 생각된 점의 하중치로 하중이 급격하게 저하하는 점에서의 최대치이다. 수지함유량이 표준인 경우(수지함유량 37%, CU125NS)가 수지함유량이 25%경우(CU125NSL25) 보다 임계하중

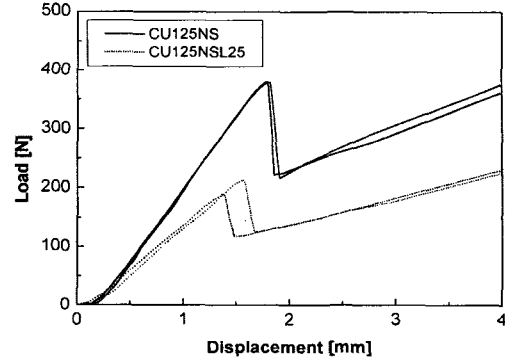


Fig. 3 Input load history in static ENF test [0°/20°]

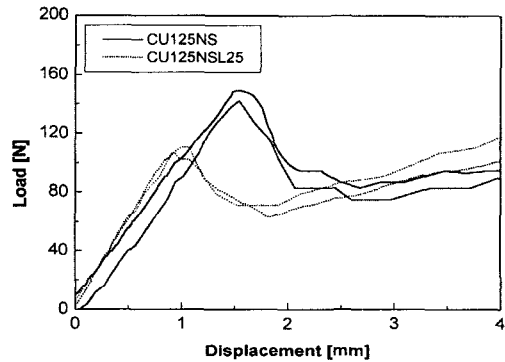


Fig. 4 Input load history in static ENF test [0°/90°/0°/5°]

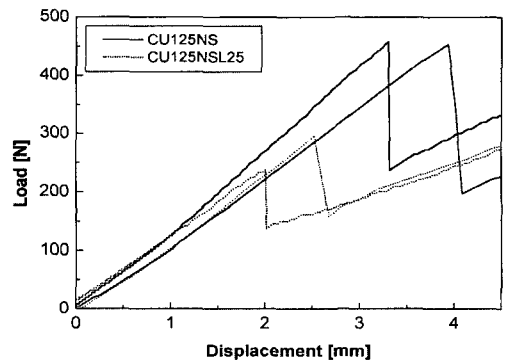


Fig. 5 Input load history in static ENF test [0°/90°/0°/90°/0°/3°]

이 모든 변위속도의 조건에서 현저하게 높게 나타남을 알 수 있다. 또한 적층구성에 따른 임계하중의 차이가 [0°/90°/0°/90°/0°/3°]인 경우를 기준으로 [0°/20°]로 적

충한 경우는 15~30%의 차이를 보이며,  $[0_5^{\circ}/90_{10}^{\circ}/0_5^{\circ}]$  인 경우는 변위속도에 따라 47~66%정도의 차이를 보임을 알 수 있다.

실제 CFRP적층판은 여러 가지 각도로 적층하여 사용되어지고 단일방향 내에서의 층간파괴는 거의 일어나지 않는 점등을 고려하면 계면수가 많을수록 파괴인성치가 크게 나타남을 알 수 있다. 이것은 계면수가 많을수록 각 층간의 복합적인 파괴가 진행되고 상호작용을 통해 파괴인성치가 높게 나타난다고 생각된다.

### 3.2 동적시험

Fig. 6, 7은 적층구성이  $[0_{20}^{\circ}]$  인 ENF시험편을 이용한 동적 실험에서 입력하중 및 지점반력의 이력을 나타내고 또한 이들 입력하중 및 지점반력에 의해 구한  $\hat{J}$ 적분 및 하중점의 변위속도 이력을 Fig. 8, 9에 나타낸다.

이들 결과는 10kHz의 저주파필터로 고주파진동을 제거한 것으로 충격봉의 발사압력을 0.3MPa로 하여 시험했다.

Fig. 6, 7에서 시험편에 완만하게 상승하는 하중을 작용시키는 것이 가능하고 입력하중, 지점반력 모두 어느 시간

에서 급격히 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 이 시간을 층간박리가 진전한 시간으로 그림 중에  $\nabla$ 표로 나타냈다.

Fig. 6, 7에서 지지반력은 입력하중과 비교하여 상승이 지연되고 층간박리가 진전한 시간에서 지지반력값은 입력하중의 절반 정도임을 알 수 있다.

또한 Fig. 8, 9의  $\hat{J}$ 적분 및 하중점의 변위속도이력도 입력하중과 지점반력의 경우와 같이 층간박리가 진전한 시간에서 값이 급격히 감소하고 이 시간에서  $\hat{J}$ 적분값이 동적층간파괴인성치로 된다. 이때 진동이 나타나며 이것은 변형과정에서 하중점의 변위속도에 따른 관성력의 영향이 크게 나타나기 때문이라 생각된다.

Fig. 10, 11은 각각 표준수지함유량(CU125NS, 37%), 저수지함유량(CU125NSL25, 25%)인 CFRP 프리프레그의 적층구성에 따른 시험편의  $\hat{J}$ 적분이력에서 구한 층간파괴인성치와 층간박리가 진전한 시간에 있어서의 하중점 변위속도와와의 관계를 나타낸다. 각 시험편 모두 층간파괴인성치에 다소의 오차는 있기는 하지만 하중점의 변위속도가 증가함에 따라 층간파괴인성치가 증가하는 경향이 보이며  $[0_3^{\circ}/90_3^{\circ}/0_6^{\circ}/90_3^{\circ}/0_3^{\circ}]$ 인 경우가  $[0_{20}^{\circ}]$ ,  $[0_5^{\circ}/90_{10}^{\circ}/0_5^{\circ}]$

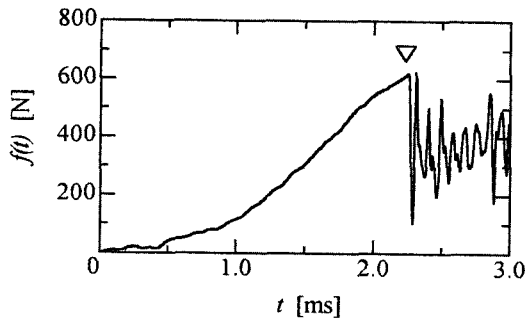


Fig. 6 Input load history in dynamic ENF test  $[0_{20}^{\circ}]$

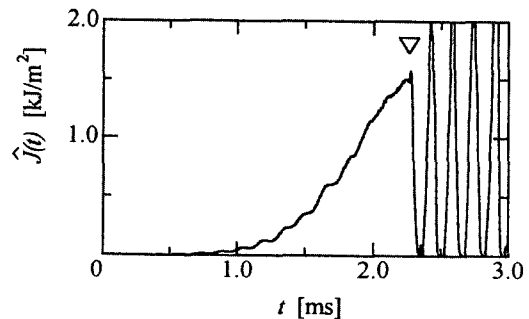


Fig. 8  $\hat{J}$ -Integral history in dynamic ENF test  $[0_{20}^{\circ}]$

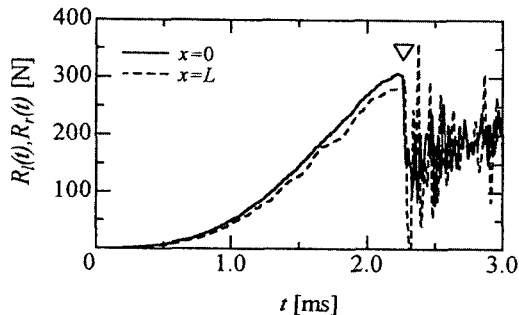


Fig. 7 Support reaction in dynamic ENF test  $[0_{20}^{\circ}]$

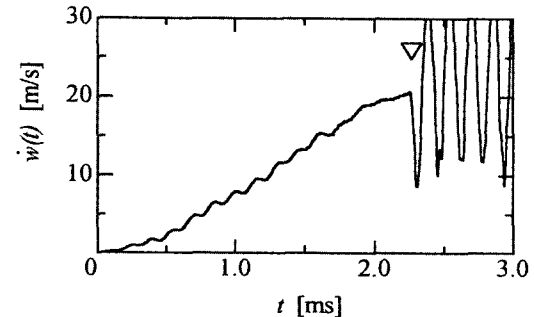


Fig. 9 Deflection velocity in dynamic ENF test  $[0_{20}^{\circ}]$

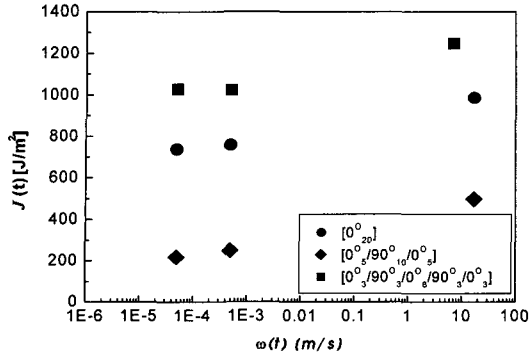


Fig. 10 Relation between fracture toughness and deflection velocity(CU125NS)

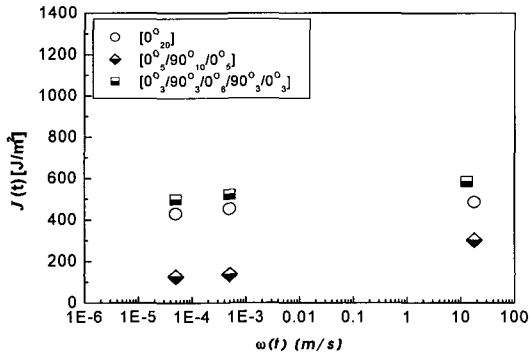


Fig. 11 Relation between fracture toughness and deflection velocity(CU125NSL25)

인 경우보다 층간파괴인성치가 현저하게 높게 나타남을 알 수 있다.

시험편 파면의 hackle을 관찰하여 형상 진행방향등을 고려하면 파괴모드를 예측할 수 있다.

Fig. 12, 13은 수지함유량에 따라  $[0^\circ_{20}]$ 로 적층한 ENF 시험편의 동적 실험후의 층간박리면의 형상을 SEM을 이용하여 관찰한 박리면을 나타낸다. 수지함유량이 적을수록 (CU125NSL25) 수지함유량이 많은 경우(CU125NS)에 비해 파면의 hackle이 작은 크기로 나타나고 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 수지함량에 따른 CFRP적층판의 ENF 시험을 행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 시험편에 작용하는 하중이 극대가 되는 시간인 층간박



Fig. 12 Fracture surface of ENF specimen in dynamic test(CU125NS  $[0^\circ_{20}]$ )



Fig. 13 Fracture surface of ENF specimen in dynamic test(CU125NSL25  $[0^\circ_{20}]$ )

- 리진전 개시시간  $t_c$ 를 통해 임계하중  $f_c$ 를 알 수 있고  $f_c$ 를 이용하여 층간파괴인성치를 구하는 것이 가능했다.
- (2) 준정적인 경우나 동적인 경우 모두 수지함량이 증가할 수록 임계하중 및 층간파괴인성치가 크게 증가함을 알 수 있다. 따라서 CFRP 적층판의 층간파괴인성치를 결정하는 중요 인수는 수지함량에 따른 영향임을 알 수 있었다.
  - (3) 적층구성이  $[0^\circ_3/90^\circ_3/0^\circ_6/90^\circ_3/0^\circ_3]$ 인 경우가  $[0^\circ_{20}]$ ,  $[0^\circ_3/90^\circ_{10}/0^\circ_3]$ 인 경우보다 파괴인성치가 높게 나타남을 알 수 있고, 실제 CFRP적층판의 경우 다양한 배향각으로 적층하여 사용되고 단일 방향내에서는 층간 파괴가 거의 일어나지 않은 점을 고려하면 다층구조 일 수록 파괴인성치가 크게 나타남을 예측할 수 있다.
  - (4) SEM을 통한 파면관찰에서 수지함량에 따라서 수지함량이 적을수록 hackle이 작게 나타나고 수지함량이 많을수록 hackle이 크게 나타나 CFRP적층판의 층간파괴

는 Mode II에 대한 영향이 크게 나타남을 알 수 있다.

## 후 기

이 논문은 2001년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

## 참 고 문 헌

- (1) Razi, H. and Kobayashi, A. S., 1993, "Delamination in Cross-Ply Laminated Composite Subjected to Low-Velocity Impact", *AIAA J.*, Vol. 31, No. 8, pp. 1498~1502.
- (2) Carlsson, L. A., Gillespie, J. W. and Pipes, R. B., 1986, "On the Analysis and Design of the End Notched Flexure(ENF) Specimen for Mode II Testing", *J. of Composites Materials*, Vol. 20, pp. 594~604.
- (3) Smiley, A. J. and Pipes, R. B., 1987, "Rate Sensitivity of Mode II Interlaminar Fracture Toughness in Graphite/Epoxy and Graphite/PEEK Composite Materials", *Composites Science and Technology*, Vol. 29, pp. 1~15.
- (4) Gillespie, J. W., Carlsson, L. A. and Pipes, R. B., 1986, "Finite Element Analysis of the End Notched Flexure Specimen for Measuring Mode II Fracture Toughness", *Composites Science and Technology*, Vol. 27, p. 177~197.
- (5) Kim, J. H., Kim, Y. N., Yang, I. Y. and Sim, J. K., 1998, "A Study on the Fracture Toughness of Dynamic Interlaminar for CFRP Composite Laminates" *Trans. of KIIS*, Vol. 13, No. 4, pp. 41~48.
- (6) Ujihashi, S., 1993, "An Intelligent Method to Determine the Mechanical Properties of Composites under Impact Loading", *Composite Structures*, Vol. 23, pp. 149~163.