

인터리브가 삽입된 CFRP 적층판의 층간파괴 인성평가

김지훈*, 강태식**, 한길영***, 김재열***, 심재기***

Evaluation of fracture toughness of dynamic interlaminar for CFRP laminate plates inserted interleaf

Ji-hoon Kim*, Tae-sik Kang**, Gil-young Han***, Yae-yeol Kim***, Jae-Ki Sim***

Abstract

In this paper, an investigation was performed on the dynamic interlaminar fracture toughness of CFRP(carbon fiber reinforcement plastics). Specimens used in this experiment are CF/PEEK laminated plates. In this experiments, Split Hopkinson's Bar(SHPE) test was apply to dynamic and notched flexure test. The mode II fracture toughness of each unidirectional CFRP was estimated by the analyzed deflection of the specimen and J-integral with the measured impulsive load and reactions at the supported points. As an experimental result the vibration amplitude of $[0_{10}^{\circ} / F_4 / 0_{10}^{\circ}]$ laminates appear more than that of $[0_{10}^{\circ} / F_2 / 0_{10}^{\circ}]$ laminates for the \hat{J} -integral and displacement velocity at a measuring point. Also, it is thought that the dynamic fracture toughness of two kind specimen(CF/PEEK) with the in crease of displacement velocity becomes great at a measuring point with in the range of measurement.

Key Words : CFRP(탄소섬유강화플라스틱), SHPE(Split Hopkinson 방법), J-integral(J적분), Fracture toughness(파괴인성)

1. 서 론

탄소섬유 강화 플라스틱(CFRP : Carbon Fiber Reinforced Plastics)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 프

리프레그 적층구조는 항공분야에 이용되는 경우가 많다. 그러나 일방향 프리프레그에 의한 구조부재는 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 배드 샷(bed shot) 문제에 대표되는 바와 같이 충격하중이 작

* 조선대학교 대학원 기계설계공학과(daisu@hanmail.net)

** 조선대학교 대학원 정밀기계공학과

*** 조선대학교 기계공학부

용하는 경우의 내부 손상평가가 중요한 과제로 되어 있다. 충격하중이 작용하는 경우의 박리 진전은 모드 II가 지배적이라는 것이 알려졌기 때문에 층간 파괴인성치를 평가하는 것이 중요하다. 따라서 이와 같은 경우, 스포르트 흡킨스봉법을 이용한 동적 ENF(End Notched Flexure)시험이 자주 이용된다.⁽¹⁾ 계측데이터에서 파괴인성치를 구하기 위해 준정적 하중을 작용시키는 정적에너지 해방율에 대하여 운동에너지 영향을 보정하는 방법,⁽²⁾ 혹은 유한요소법에 의해 동적에너지 해방율으로 구하는 방법⁽³⁾ 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 \hat{J} 적분을 구하고 \hat{J} 적분값에 의해 동적효과를 고려한 층간파괴인성치를 구한다. 본 연구에서는 탄소/peek 시험편에 대해 흡킨스봉법^(4,5)에 의한 동적 ENF 시험을 하여 모드 II에 대한 동적파괴인성치를 실험적으로 구한다. 또한 수치가 층간파괴인성치에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 시험편 중간에 인터리브층을 삽입하고 준정적 시험 및 관성력의 효과를 고려한 동적 해석에 의해 \hat{J} 적분값에 의해 동적층간파괴인성치를 구하고 인터리브층 두께에 따른 동적층간파괴인성치를 비교하여 인터리브층이 층간파괴인성치에 미치는 영향에 관하여 고찰한다.

2. 실험 방법

적층구조는 $[0_{10}^{\circ}/F_2/0_{10}^{\circ}]$ 과 $[0_{10}^{\circ}/F_4/0_{10}^{\circ}]$ 인 두 종류의 ENF시험편을 이용하여 고전보 이론을 기초로 한 파괴인성평가를 한다. 층간박리는 시험편선단 중앙에 도입하였으며 폭이 b인 시험편으로 Fig. 1과 같이 3구간으로 나누어 고전보이론을 토대로 한 이론해석에 실험값을 적용해 층간파괴인성치를 구한다.

시험편에 이용한 재료는 탄소섬유/peek (APC-2/AS4) 일방향 프리프레그로서 적층구조를 $[0_{10}^{\circ}/F_2/0_{10}^{\circ}]$, $[0_{10}^{\circ}/F_4/0_{10}^{\circ}]$ 로 하여 섬유방향이 시험편의 길이방향이 되도록 적층하고 오토크레이브로 성형한다. F는 인터리브 PEEK 필름이다. 이때 초기 층간박리를 도입하기 위해 캡톤필름을 삽입하고 다이아몬드 컷터로 절단하여 연마포지와 알루미나저립을 이용 연마후 컷터날로 층간박리를 약 5mm

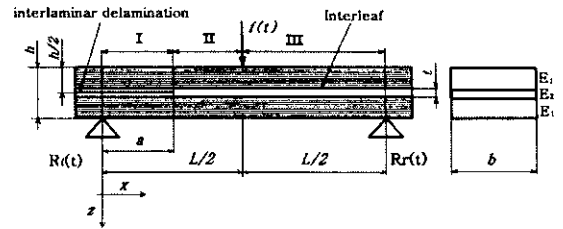


Fig. 1 ENF Specimen

Table 1 Material properties of ENF specimens

	APC-2/AS4	PEEK
Young's modulus(E)	120GPa	3.6 GPa
Density(ρ)	$1.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	$1.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

진전시켜 예리한 박리선단을 만든다. ENF시험편은 Fig. 1과 같고 시험편 두께는 평균치로 하였다. 또한 시험편의 재료특성은 Table 1과 같다.

2.1 준정적 시험

3점 굽힘치구는 지점간 거리가 60mm이고 지점에는 반경 3mm의 환봉을 이용하였으며 만능재료시험기를 이용하여 하중점 변위속도를 5×10^{-3} , 5×10^{-4} 로써 변위 제어 방식에 의해 시험을 행한다. 이때 시험편 중앙에 작용하는 하중을 크로스헤드에 붙어있는 4,900N load cell 의해 측정했다. 측정된 하중은 하중이 급격히 감소하는 시간을 ENF시험편의 박리가 진전할 순간으로 보고 층간박리가 진전할 경우의 시험편 중앙처짐은 해석적으로 다음식과 같이 구한다.

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

로 된다. 여기서 D_I 은 박리구간의 강성계수, D_{II} 는 박리가 도입되지 않은 구간의 강성계수이다.

2.2 동적 실험

스포츠흡킨스봉법을 이용한 동적 ENF 시험장치를 구성하는 각 봉의 재원 및 재료정수를 Table 2, 장치의 개략도를 Fig. 2에 나타냈다.

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

	Strike bar	Input bar	Output bar
Length	750	1500	1500
Size	φ 10	φ 10	3×10
Young's modulus(E)	206GPa		
Density	7.86×10 ³ kg/m ³		
Stress wave velocity(C ₀)	5120m/s		

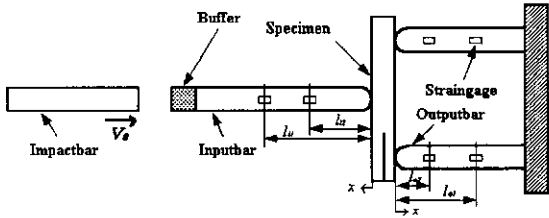


Fig. 2 Schematic of dynamic ENF test equipment

공기압으로 가속된 충격봉을 입력봉에 충돌시켜서 입력봉을 따라 일차원 응력파가 전파하여 시험편에 하중을 가한다. 입력봉 및 출력봉에 Fig. 2와 같이 스트레인게이지를 부착하고 동스트레인게이지와 PC를 통해 스트레인 변동으로 변환시킨다. 측정된 입력봉과 출력봉의 스트레인을 이용하여 시험편 중앙에 작용하는 하중 $f(t)$ 지점반력 $R_r(t)$ 과 $R_l(t)$ 를 구한다.

봉의 지배방정식은 일차원 파동전파이론을 이용하여 $l_2 = l_1/2$ 인 게이지 위치를 설정할 경우 하중식은 다음과 같다.

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

여기서 $H(t)$ 는 Haeviside step함수이다.

ENF시험편의 변위를 구하기 위해 지지반력 $R_r(t)$, $R_l(t)$ 의 경계조건도 포함하여 라플라스변환영역에서의 경계조건을 취하면 다음과 같다.

$\xi = 0$ 에서

$$\frac{\partial^2 \bar{w}_1}{\partial \xi^2} = 0, \quad \frac{\partial^3 \bar{w}_1}{\partial \xi^3} = -\frac{D_{11}}{D_1} \frac{\bar{R}_l(s)}{f_0}$$

$\xi = 0.25$ 에서

$$\bar{w}_1 - \bar{w}_2 = 0, \quad D_1 \frac{\partial^2 \bar{w}_1}{\partial \xi^2} - D_{11} \frac{\partial^2 \bar{w}_2}{\partial \xi^2} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{w}_1}{\partial \xi} - \frac{\partial \bar{w}_2}{\partial \xi} = 0, \quad D_1 \frac{\partial^3 \bar{w}_1}{\partial \xi^3} - D_{11} \frac{\partial^3 \bar{w}_2}{\partial \xi^3} = 0$$

$\xi = 0.50$ 에서

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

$$\frac{\partial \bar{w}_2}{\partial \xi} - \frac{\partial \bar{w}_3}{\partial \xi} = 0, \quad \frac{\partial^3 \bar{w}_2}{\partial \xi^3} - \frac{\partial^3 \bar{w}_3}{\partial \xi^3} = \frac{\bar{f}(s)}{f_0}$$

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

또한 \hat{J} 적분에 의한 동적충간파괴인성치를 구하기 위해 岸本 등이 제안한 J 적분을 이용하여 구하면 다음과 같다.⁽⁶⁾

$$J = \frac{D_1}{2b} \left\{ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 - 2 \left(\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} \Bigg|_{x=x_1} - \frac{D_{11}}{2b} \left\{ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 - 2 \left(\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} \Bigg|_{x=x_2} \quad (4)$$

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

$$\hat{J} = J + \int_{x_1}^{x_2} \Phi \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial w}{\partial x} \right) dx \quad (5)$$

여기서 $\Phi = \rho_1(h-l) + \rho_2 l$

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

$$\dot{w}(t) = \frac{\partial w_2}{\partial t} = \frac{f_0 L^3 C_b}{D_{11}} \alpha^{-1} \left\{ s \sum_{j=5}^8 A_j \exp(\eta_j) \right\} \quad (6)$$

3. CFRP 층간파괴인성치의 측정 및 고찰

3.1 준정적 실험

제작된 2종류의 ENF 시험편을 이용하여 하중점의 변위 속도를 5×10^5 , 5×10^4 로써 준정적 실험을 했다. 그 결과 얻어진 하중이력을 Fig. 3, Fig. 4에 나타낸다. 이들 결과에서 하중점 변위속도 \dot{w} 가 5×10^5 m/s인 경우는 100Hz, 5×10^4 m/s인 경우는 1kHz의 lowpass filter를 이용 고주파진동을 제거하였다.

Fig. 3에서 임계하중 f_c 는 박리가 진전한다고 생각된 점의 하중치로 ∇ 로 표시하였으며 하중이 급락하는 점에서의 극대치이다. 그러나 Fig. 4에서는 하중이 급격히 감소

하지 않으며 층간박리가 한번에 진전하지 않고 서서히 진전함을 알 수 있으며 이는 인성이 큰 인터리브 PEEK층이 두껍기 때문이라 생각된다.

3.2 동적시험

제작된 두 종류의 ENF 시험편을 이용하여 동적시험을 행했다. 얻어진 입력하중 및 지지반력의 이력을 Fig. 5, Fig. 6에 나타낸다.

또한 입력하중 및 지지반력에서 구한 \dot{w} 적분 및 하중점의 변위속도이력을 Fig. 7, Fig. 8에 나타낸다. 이들 결과는 10kHz의 lowpass filter 고주파 진동을 제거한 것이며 두 시험편 모두 0.44MPa로 충격봉에 발사압력을 가해 시험하였다. 두 시험편 모두에서 완만하게 상승하는 하중을 작용시키는 것이 가능하고 입력하중, 지지반력 모두에서 임의시간에 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 이 시간을 층간박리가 진전한 시간으로 그림 중에 ∇ 표로 나타냈다. 지지반력은 입력하중과 비교해서 상승작용이 지연되는 것

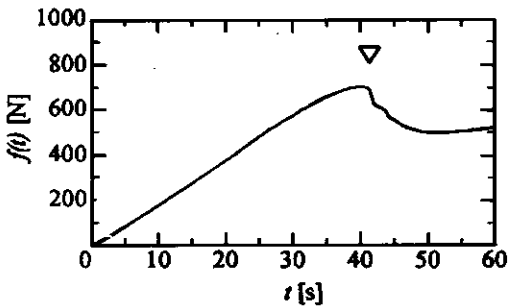


Fig. 3 Load history in static ENF test
 $([0_{10}^\circ / F_2 / 0_{10}^\circ]) \dot{w} = 5 \times 10^5$ m/s)

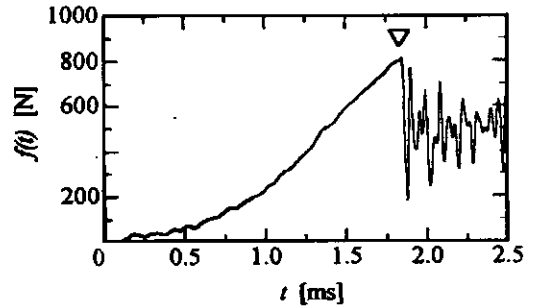


Fig. 5 Input load history in dynamic ENF test
 $([0_{10}^\circ / F_2 / 0_{10}^\circ])$

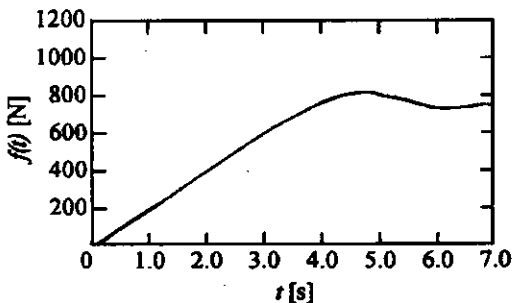


Fig. 4 Load history in static ENF test
 $([0_{10}^\circ / F_4 / 0_{10}^\circ]) \dot{w} = 5 \times 10^4$ m/s)

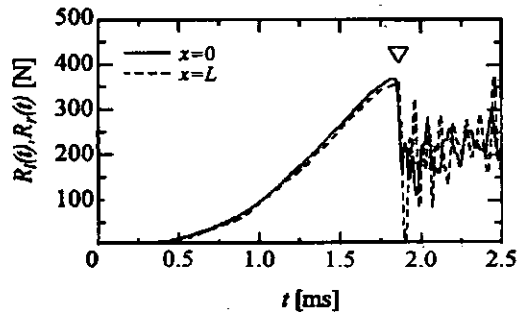


Fig. 6 Support reaction history dynamic in ENF test
 $([0_{10}^\circ / F_2 / 0_{10}^\circ])$

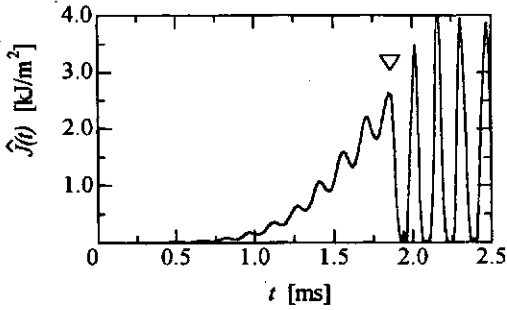


Fig. 7 \hat{j} integral history in dynamic ENF test
 ($(0_{10}^{\circ} / F_2 / 0_{10}^{\circ})$)

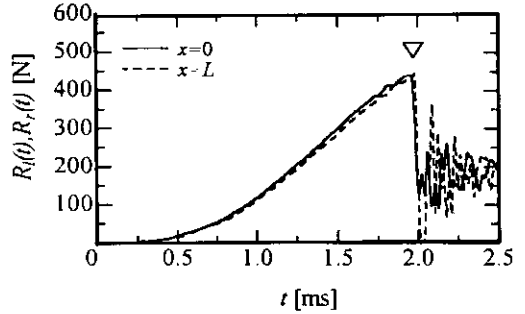


Fig. 10 Support reaction history in dynamic ENF test
 ($(0_{10}^{\circ} / F_4 / 0_{10}^{\circ})$)

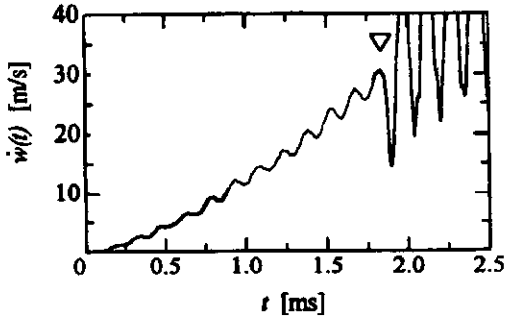


Fig. 8 Deflection velocity history at the center of ENF test
 ($(0_{10}^{\circ} / F_2 / 0_{10}^{\circ})$)

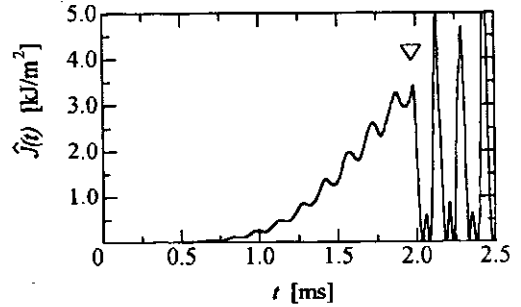


Fig. 11 \hat{j} integral history in dynamic ENF test
 ($(0_{10}^{\circ} / F_4 / 0_{10}^{\circ})$)

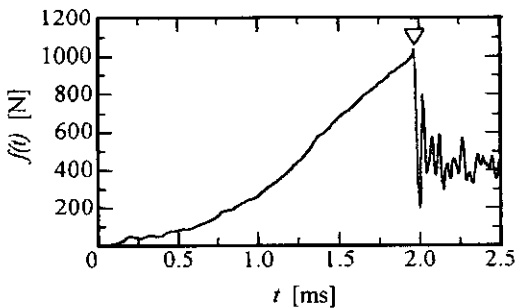


Fig. 9 Input load history in dynamic ENF test
 ($(0_{10}^{\circ} / F_4 / 0_{10}^{\circ})$)

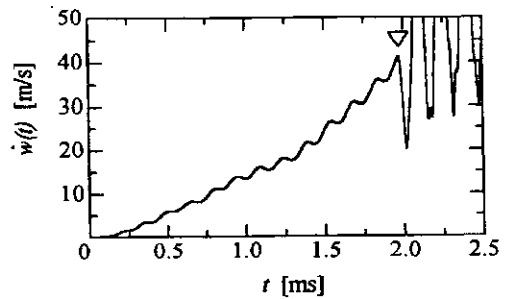


Fig. 12 Deflection velocity at the center of ENF test
 ($(0_{10}^{\circ} / F_4 / 0_{10}^{\circ})$)

을 보이고 층간바리가 진전한 시간에서 지지반력값은 하중의 절반정도임을 알 수 있다. 또한 적층구성이 $[0_{10}^{\circ} / F_4 / 0_{10}^{\circ}]$ 인 경우가 $[0_{10}^{\circ} / F_2 / 0_{10}^{\circ}]$ 인 경우, 즉 인터리브층이 두꺼울수록 층간바리가 진전한 경우의 하중값이 증가하고 있음을 알 수 있다.

또한 Fig. 7, Fig. 8 및 Fig. 11, Fig. 12에서 \hat{j} 적분 및 하중점의 변위속도이력도 입력하중 및 지지반력과 마찬가지로 층간바리가 진전한 시간에서의 값이 급격히 감소하고 이 시간에서 \hat{j} 적분값이 동적층간파괴인성치로 된다. 2종류의 시험편 모두 진동이 나타나며 이것은 변형과정

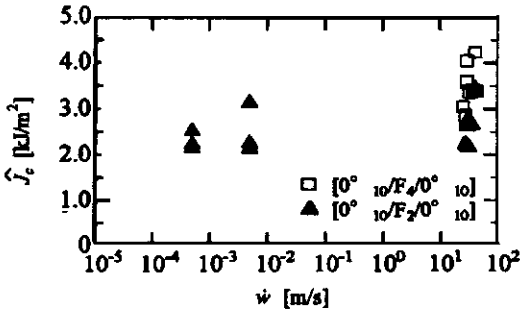


Fig. 13 Relation between fracture toughness and deflection velocity

에 있어서 하중점의 변위속도가 크기 때문에 관성력의 영향이 크게 나타난다고 생각된다.

Fig. 13은 두 시험편의 \dot{J} 적분이력에서 구한 층간파괴인성치와 층간박리가 진전한 시간에있어서의 하중점 변위속도와의 관계를 나타낸다. 각 시험편 모두 층간파괴인성치에 다소의 오차는 있기는 하지만 하중점의 변위속도가 증가함에 따라 층간파괴인성치가 증가하는 경향이 보이며 $[0_{10}^{\circ}/F_2/0_{10}^{\circ}]$ 보다 인터리브층이 두꺼운 $[0_{10}^{\circ}/F_4/0_{10}^{\circ}]$ 시험편이 층간파괴인성치가 큼을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 인터리브가 삽입된 CFRP적층판의 ENF 시험을 행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 시험편에 작용하는 하중이 극대가 되는 시간인 층간 박리진전 개시시간 t_c 를 통해 임계하중 f_c 를 알 수 있고 f_c 를 이용하여 층간파괴인성치를 구하는 것이 가능했다.
- (2) 인터리브층이 두꺼운 $[0_{10}^{\circ}/F_4/0_{10}^{\circ}]$ 시험편이 층간 박리가 한번에 진전하지 않고 서서히 진전함을 알 수 있으며 이는 인터리브층에 따라 층간파괴인성치가 다름을 알 수 있으며 변위속도에도 영향을 받을 수 있었다.
- (3) 시험편 모두 층간파괴인성치에 다소의 오차는 있기는 하지만 하중점의 변위속도가 증가함에 따라 층간파괴인성치가 증가하는 경향이 보이며 $[0_{10}^{\circ}/F_2/0_{10}^{\circ}]$ 보다 인터리브층이 두꺼운 $[0_{10}^{\circ}/F_4/0_{10}^{\circ}]$ 시험편이 층간파괴인성치가 큼을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 1999년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) Carlsson, L.A., Gillepie, J.W. and Pipes, R.B., 'On the Analysis and Design of the End Notched Flexure(ENF) Specimen for Mode II Testing', *Journal of Composites Materials*, 20, pp. 594~604, 1986.
- (2) Smiley, A.J. and Pipes, R.B., 'Rate Sensitivity of Mode II Interlaminar Fracture Toughness in Graphite/Epoxy and Graphite/PEEK Composite Materials', *Composites Science and Technology*, 29, pp. 1~15, 1987.
- (3) 日下貴之, 黒川知明, 山内良昭, 'CFRP의 모드 II 層間破壊じん性値のひずみ速度依存性', *材料*, 43-487, p. 445, 1994.
- (4) 足立忠晴, 荒井政大, 阪部直樹, 松本浩之, '一方向CFRP積層板の動的破壊靱性値の評價', *機論*, 63-616, A, pp. 2568~2574, 1997.
- (5) 김지훈, 김영남, 양인영, 심재기, '선진복합재료 적층판의 동적 층간 파괴 인성평가', *한국산업안전학회지* 제 13권 제 4호, pp. 41~48, '98년 12월.
- (6) 岸本喜久廣佳, 青木繁, 坂田勝, 'き裂の進展挙動を記述するための破壊力學パラメータについて' *機論*, 46-410, A, pp. 1049~1061, 1980.