

일방향 CFRP적층판의 모드II 동적 층간파괴인성 평가

김지훈[†] · 정태훈* · 이 현** · 양인영*** · 조규재*** · 심재기***

조선대학교 기계설계공학과 · *조선대학교 정밀기계공학과

조선대학교 수송기계부품 공장자동화 연구센터 · *조선대학교 기계공학부

(1999. 9. 11. 접수 / 2000. 10. 10. 채택)

Evaluation of Mode II Dynamic Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional CFRP Laminates

Ji-hoon Kim[†] · Tae-hoon Jeong* · Hyun Lee** · In-young Yang***

Gyu-Jae Cho*** · Jae-Ki Sim***

Department of Mechanical Design Engineering, Chosun University

*Department of Precision Mechanical Engineering, Cousun University

Regional Research Center, Chosun University · *Division of Mechanical Engineering, Chosun University

(Received September 11, 1999 / Accepted October 10, 2000)

Abstract : In this paper, an investigation was performed on the Mode II dynamic interlaminar fracture toughness of unidirectional CFRP laminates. The stacking sequences used in this experiment are two kinds of $[0_{20}]$ and $[0_{10}/F_2/0_{10}]$. In the experiments, Split Hopkinson's Bar test was applied 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 results, the specimen $[0_{10}/F_2/0_{10}]$ appears greater than that of $[0_{20}]$ for the \hat{J} -integral and displacement velocity at a measuring point within the range of experiment.

Key Words : CFRP, dynamic interlaminar fracture toughness, split hopkinson's bar, integral ENF(End Notched Fracture)

1. 서 론

탄소섬유강화복합재료(CFRP:Carbon Fiber Reinforced Plastics)는 금속재료나 기타 다른 재료에 비하여 비강도가 높음으로서 고속화 및 경량화가 중요시되는 항공기, 우주 구조물이나 스포츠 용구 등에 폭넓게 적용되고 있다. 한편, CFRP는 일반적으로 적층판으로 이용되지만 이 CFRP적층판은 저사이클 충격시에도 비교적 쉽게 층간박리 등의 내부 손상이 발생한다.¹⁾

또한 층간박리가 발생한 CFRP적층판에 다시 하

중이 작용하면 박리가 진전하여 구조물 전체의 파괴에 이르는 경우가 있다. 따라서, 이와 같은 파괴를 예측하기 위해서는 층간박리의 진전을 파괴역학적 관점에서 균열의 전파로 간주하고 응력확대계수나 에너지해방율을 구해야 하며 특히, 충격하중이 작용하는 경우 층간파괴인성치의 파악이 중요하다.

또한, 충격하중이 작용할 경우의 층간박리진전은 모드II가 지배적이라고 밝혀지고 있기 때문에²⁾ 모드II에 대한 층간파괴인성치를 예측하기 위해서는 ENF(End Notched Fracture)시험이 주로 이용되고 있다.³⁾

예를 들면 계측 데이터에서 파괴인성치를 구하기 위해서는 준정적인 하중이 작용하는 경우의 정

[†]To whom correspondence should be addressed.
daisu@hanmail.net

적에너지 해방률에 대한 운동에너지의 영향을 보정하는 방법⁴⁾, 혹은 유한요소법에 의해 동적 에너지 해방률을 구하는 방법등^{5,6)}이 있다. 그러나 충격 하중이 작용할 경우는 준정적 하중이 작용한 경우와는 달리 시험편의 변형모드 및 응력분포가 다르게 나타나고, 유한요소법에 의한 방법에서는 번잡한 수치계산을 하지 않으면 안된다는 문제가 있다.

따라서 본 연구에서는 탄소섬유/PEEK 프리프레그를 단일방향으로 적층한 시험편을 1종류, 탄소섬유/PEEK 프리프레그에 인터리브 PEEK 필름을 삽입하여 단일방향으로 적층한 시험편을 1종류, 계 2종류의 시험편에 대해 스프릿·홉킨슨봉 법에⁷⁻⁹⁾ 의한 시험장치를 이용하여 동적 ENF 시험을 행하고 모드II에 대한 동적 층간파괴인성치를 구함과 더불어 인터리브층이 층간파괴인성치에 미치는 영향을 검토하고자 한다.

2. 이론해석

2.1. 변위의 산출

적층구성이 $[0_{20}]_1, [0_{10}/F_2/0_{10}]_2$ 인 두 종류의 ENF 시험편을 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 층간박리를 포함하는 요소 I과 박리를 포함하지 않는 요소 II, III로 분리하여 나타낸다.

요소 I은 층간박리부의 상하로 분할하여 각각 굽힘 강성을 D_1^+ , D_1^- 인 두 개의 요소로 생각하여 굽힘모멘트 식을 이용하면 다음의 굽힘강성 D_1 을 얻는다.

$$D_1 = 2D_1^+ \quad (1)$$

Z축상에서 중립축 위치를 Z_0 라 하면 Z_0 는 다음과 같다.

$$Z_0 = \frac{E_1(h^2 - l^2) + E_2l^2}{4(E_1(h-l) + E_2l)} \quad (2)$$

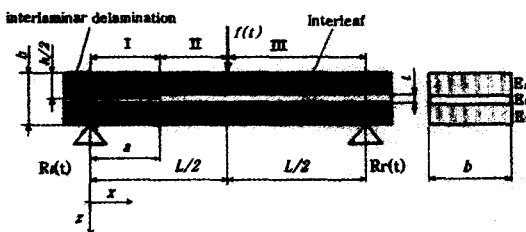


Fig. 1. ENF specimen

변형률 ϵ_x 가 Z축 방향의 변화(w)를 선형으로 가정하여 σ_x 를 구하면 다음과 같다.

$$\sigma_x = \begin{cases} -E_2(Z-Z_0) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} & (0 \leq z \leq \frac{l}{2}) \\ -E_1(Z-Z_0) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} & (\frac{l}{2} \leq z \leq \frac{h}{2}) \end{cases} \quad (3)$$

굽힘모멘트를 구하여 굽힘강성 D_1 을 구하면 다음과 같다.

$$D_1 = \frac{2b}{3} \left[E_2 \left\{ \left(\frac{l}{2} - z_0 \right)^3 + z_0^3 \right\} + E_1 \left\{ \left(\frac{h}{2} - z_0 \right)^3 - \left(\frac{l}{2} - z_0 \right)^3 \right\} \right] \quad (4)$$

그리고, 층간박리가 도입되지 않은 요소 II, III에 대한 굽힘강성 D_{II} , D_{III} 는 다음과 같다.

$$D_{II, III} = \frac{b(E_1(h^3 - l^3) + E_2l^3)}{12} \quad (5)$$

또한, ENF 시험편을 Fig. 1과 같이 3구간으로 나누어 구간 I ($0 \leq x \leq a$)에 대한 고전보이론에 의한 관성력을 고려한 처짐방정식을 구하면 다음과 같다.

$$D_1 \frac{\partial^4 w_1}{\partial x^4} + \phi b \frac{\partial^2 w_1}{\partial t^2} = 0 \quad (6)$$

$$(\phi = \rho_1(h-l) + \rho_2l)$$

단, ρ_1 , ρ_2 는 각각 APC-2/AS4와 인터리브 PEEK 필름의 밀도이며, (6)식을 무차원화하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial^4 w_1'}{\partial \xi^4} + \frac{D_{II}}{D_1} \frac{\partial^2 w_1'}{\partial \tau^2} = 0 \quad (0 \leq x \leq a) \quad (7)$$

여기서 $w' = \frac{D_{II}}{f_0 L^3} w$, $\xi = \frac{x}{L}$, $\tau = C_b t$ ($C_b = \sqrt{\frac{D_1}{\phi b L^4}}$)이다.

또한 $t=0$ 에서 시험편은 변형하지 않는 것으로 하면 초기조건은 다음 식과 같다.

$$t=0 : w_1 = \frac{\partial w_1}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

초기조건 (8)을 토대로 (7)을 라플라스변환하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial^4 \bar{w}_1}{\partial \xi^4} + \frac{D_{II}}{D_I} s^2 \bar{w}_1 = 0 \quad (9)$$

식 (9)의 일반해는 다음과 같다.

$$\bar{w}_1 = \sum_{j=1}^4 A_j \exp(\eta_j \xi) \quad (0 \leq x \leq a) \quad (10)$$

여기서 $s^2 = -a^4$ 이라면 $\eta_1 = 4\sqrt{\frac{D_{II}}{D_I}} a$, $\eta_2 = -4\sqrt{\frac{D_{II}}{D_I}} a$, $\eta_3 = i4\sqrt{\frac{D_{II}}{D_I}} a$, $\eta_4 = -i4\sqrt{\frac{D_{II}}{D_I}} a$ 이고, A_j 는 미정계수이다.

또한 구간II ($a \leq x \leq \frac{L}{2}$), 구간III ($\frac{L}{2} \leq x \leq L$)에서도 동일 수순에 의해 일반해를 구하면 다음과 같다.

$$\bar{w}_2 = \sum_{j=5}^8 A_j \exp(\eta_j \xi) \quad \left(a \leq x \leq \frac{L}{2}\right) \quad (11)$$

$$\bar{w}_3 = \sum_{j=9}^{12} A_j \exp(\eta_j \xi) \quad \left(\frac{L}{2} \leq x \leq L\right) \quad (12)$$

여기서 $\eta_{5,9} = a$, $\eta_{6,10} = -a$, $\eta_{7,11} = ia$, $\eta_{8,12} = -ia$ 이다.

이상과 같이 라프라스변환 영역에서 ENF시험편의 변위식을 구한 후, 다음에 일반해의 미정계수는 경계조건에 의해 결정하여 라프라스변환 영역에서의 변위를 구한다.

여기서 지지점에서 시험편의 변위는 없으나 실제 동적 ENF시험에서는 지지점 변위가 발생한다고 阪의 연구⁷⁾에서 밝혀졌으므로 지점반력 $R_x(t)$, $R_x(t)$ 를 경계조건, 층간박리선단, 하중점의 연속조건으로 하여 무차원화하면 다음과 같다.

$$\xi=0 \text{ 일 경우} \quad \frac{\partial^2 \bar{w}_1}{\partial \xi^2} = 0, \quad \frac{\partial^3 \bar{w}_1}{\partial \xi^3} = -\frac{D_{II}}{D_I} \frac{\bar{R}_x(s)}{f_0} \quad (13)$$

$$\xi=0.25 \text{ 일 경우} \quad \begin{cases} \bar{w}_1 - \bar{w}_2 = 0, & D_I \frac{\partial^2 \bar{w}_1}{\partial \xi^2} - D_{II} \frac{\partial^2 \bar{w}_2}{\partial \xi^2} = 0 \\ \frac{\partial \bar{w}_1}{\partial \xi} - \frac{\partial \bar{w}_2}{\partial \xi} = 0, & D_I \frac{\partial^3 \bar{w}_1}{\partial \xi^3} - D_{II} \frac{\partial^3 \bar{w}_2}{\partial \xi^3} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

$\xi=0.50$ 일 경우

$$\begin{cases} \bar{w}_2 - \bar{w}_3 = 0, & \frac{\partial^2 \bar{w}_2}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2 \bar{w}_3}{\partial \xi^2} = 0 \\ \frac{\partial \bar{w}_2}{\partial \xi} - \frac{\partial \bar{w}_3}{\partial \xi} = 0, & \frac{\partial^3 \bar{w}_2}{\partial \xi^3} - \frac{\partial^3 \bar{w}_3}{\partial \xi^3} = -\frac{\bar{f}(s)}{f_0} \end{cases} \quad (15)$$

$\xi=1.0$ 일 경우

$$\frac{\partial^2 \bar{w}_3}{\partial \xi^2} = 0, \quad \frac{\partial^3 \bar{w}_3}{\partial \xi^3} = \frac{\bar{R}_x(s)}{f_0} \quad (16)$$

식(10), (11), (12)의 일반해의 미정계수는 식(13), (14), (15), (16)의 경계조건을 이용하여 구한다. 이와 같이 하여 구한 라프라스변환영역에서의 변위를 라프라스 역변환하면 시간영역에서의 변위를 구할 수가 있다. 이때 수치라프라스변환은⁸⁾ 고속 푸리에변환(FFT)를 이용하여 실시간 해를 구한다.

또한, ENF시험편에 정적하중이 작용할 경우의 시험편 중앙의 변위는 해석적으로 다음식과 같이 구한다.

$$w^s = \frac{f}{12} \left\{ \frac{(D_{II} - D_I)a^3}{D_I D_{II}} + \frac{L^3}{4D_{II}} \right\} \quad (17)$$

2.2. J적분에 의한 파괴인성치의 계산

ENF시험편의 파괴인성치를 계산하기 위해 Fig. 2에 나타낸 박리선단을 둘러싼 경로 Γ 에 따른 J적분을 고려한다.^{8,9)} ENF시험편을 평면응력 조건으로 가정하면 J적분은 다음과 같다.

$$J = \oint_{\Gamma} \left\{ \bar{W} - \left(\sigma_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + \tau_{xz} \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) + \tau_{xz} \frac{\partial u_x}{\partial x} dx \right\} dz \quad (18)$$

여기서 \bar{W} 는 변형에너지 밀도이다.

고전보이론을 기초로 적분경로 Γ 에 관한 적분을 하면 x축 방향 변위 u_x 에 관한 항은 소실되고 최

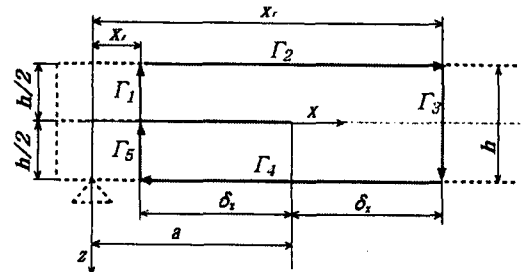


Fig. 2. Counter of ENF specimen

종적으로 다음과 같은 식이 된다.

$$J = \frac{D_I}{2b} \left\{ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 - 2 \left(\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} \Bigg|_{x=x_i} - \frac{D_{II}}{2b} \left\{ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 - 2 \left(\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} \Bigg|_{x=x_r} \quad (19)$$

다음에 시험편 중앙에 작용하는 관성력의 영향에 의한 에너지해방률 J^K 는 다음과 같다.

$$J^K = \int_{x_i}^{x_r} \phi \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \frac{\partial w}{\partial x} \right) dx \quad (20)$$

$[\phi = \rho_1(h-l) + \rho_2 l]$

따라서 적분경로 $\delta\Gamma$ 에 둘러싸인 부분에 대한 시험편의 관성력을 고려한 동적 ENF 시험에 대한 \dot{J} 적분의 평가식은 다음과 같다.

$$\dot{J} = \dot{J} + \dot{J}^K \quad (21)$$

다음에 ENF 시험편에 정적하중이 작용할 경우의 J 적분을 구하면 다음과 같다.

$$J^S = \frac{a^2 \dot{F}^2 (D_{II} - D_I)}{8bD_I D_{II}} \quad (22)$$

3. 시험장치 및 시험편

Fig. 3은 스피릿훅킨슨봉에 의한 시험장치의 개략도이며, 공기압으로 가속된 충격봉을 입력봉에 충돌시켜 입력봉 내부를 1차원 응력파가 전파하여 시험편 중앙에 하중을 작용시킬 수가 있다. 입력 및 출력봉인 연강의 재료특성 및 제원은 Table 1과 같다.

ENF 시험편은 APC-2/AS4를 $[0_{20}]$ 로 적층한 것 과 중앙에 인터리브 PEEK 필름 두매를 삽입한 $8[0_{10}/F_2/0_{10}]$ 두 종류의 일방향 적층판을 이용하였다.

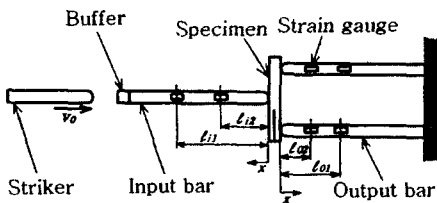


Fig. 3. Schematic of dynamic ENF test equipment (Split Hopkinson's Bar)

Table 1. Specification of dynamic ENF test equipment

Bar type	Strike Bar	Input Bar	Output Bar
Length(mm)	750	1500	1500
Size(mm)	∅10	∅10	3×10
Young's Modulus	207GPa		
Density	$7.86 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$		
Stress Wave Velocity	5120 m/s		

Table 2. Specification of ENF specimens

	$[0_{20}]$	$[0_{10}/F_2/0_{10}]$
Length(mm)	70	70
Support Span(mm)	60	60
Thickness(mm)	2.77	2.88
Delamination Length(mm)	15	15
Width(mm)	10	10
Interleaf thickness(mm)	-	0.12

Table 3. Material properties of ENF specimens

	APC-2/AS4	PEEK
Young's Modulus	120GPa	3.6GPa
Density	$1.60 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	$1.30 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

ENF 시험편에 박리를 도입하기 위해 적층판 중앙에 칩턴필름을 삽입한 후에 성형하고 시험편을 만들기 위해 다이아몬드 커타로 절단하여 연마한 후에 예리한 커타날로 층간박리를 5mm정도 진전시켜 박리선단을 만든다. 인터리브층의 두께는 광학현미경으로 측정하여 평균치로 하였다. 시험편의 사양은 Table 2, 재료특성은 Table 3에 나타낸다.

4. ENF 시험편의 층간파괴인성치 측정 및 고찰

4.1. 준정적 ENF 시험

3점 굽힘 치구를 이용하여 3종류의 ENF 시험을 실시하였으며, 하중점의 변위속도는 5×10^{-5} , 5×10^{-4} , $5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 로 변위제어를 하였다. 이들 결과 얻어진 하중이력의 일례를 Fig. 4, Fig. 5에 나타낸다. 그림은 일정속도에 따른 하중과 시간과의 관계로 시간에 대한 하중이 거의 일정한 경사로 상승한

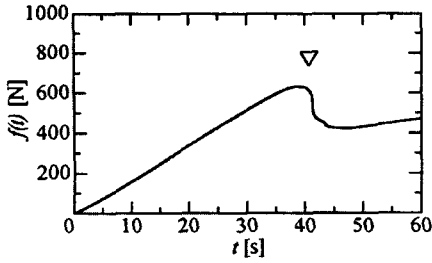


Fig. 4. Load history in static ENF test ($[0_{20}]$) $\dot{w} = 5 \times 10^{-5} (m/s)$

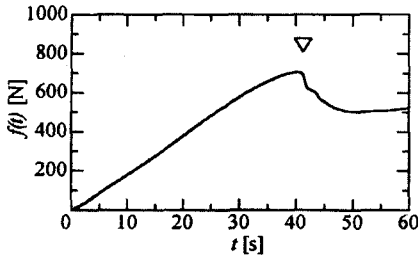


Fig. 5. Load history in static ENF test ($[0_{10}/F_2/0_{10}]$) $\dot{w} = 5 \times 10^{-5} (m/s)$

후 어느 시간에 급격히 감소하고 있다. 이때의 시간을 층간박리가 진전한 시점으로 보면 층간박리의 진전이 개시하는 임계하중을 f_c 로 하고 이 f_c 를 (22)식의 \dot{J} 에 대입하여 준정적 층간파괴인성치를 구하여 Table 4에 나타냈다. 이러한 결과로부터 인터리브층을 삽입한 시험편이 임계하중, 층간파괴인성치가 증가함을 알 수 있다.

Table. 4. Critical load (f_c) and fracture toughness(\dot{J}) in static ENF test

Stacking Sequence	0_{20}		$[0_{10}/F_2/0_{10}]$	
	f_c	\dot{J}	f_c	\dot{J}
5×10^{-5}	544.7	1258	752.7	2571
	632.5	1715	726.0	2261
	545.7	1277	706.9	1964
5×10^{-4}	533.3	1117	758.4	2523
	645.9	1693	700.2	2151
	605.8	1489	697.4	2232
5×10^{-3}	628.7	1471	717.4	2136
	614.4	1435	732.7	2253
	596.3	1367	853.8	3128

4.2. 동적 ENF 시험

Fig 6, 7은 적층구성이 $[0_{20}]$ 인 ENF시험편을 이용한 동적 실험에서 입력하중 및 지점반력의 이력을 나타내고 또한 이들 입력하중 및 지점반력에 의해 구한 \dot{J} 적분 및 하중점의 변위속도 이력을 Fig 8, 9, 10, 11에 나타낸다.

이들 결과는 10 KHz의 Low Pass Filter로 고주파진동을 제거한 것으로 충격봉의 발사압력을 적층구성이 $[0_{20}]$ 인 시험편은 0.3 MPa, $[0_{10}/F_2/0_{10}]$ 인 시험편은 0.44 MPa로 시험했다.

Fig 6, 7에서 시험편에 완만하게 상승하는 하중을 작용시키는 것이 가능하고 입력하중, 지점반력 모두 어느 시간에서 급격히 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 이 시간을 층간박리가 진전한 시간으로 그림 중에 ∇ 표로 나타냈다.

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

또한 Fig. 8, 9, 10, 11의 \dot{J} 적분 및 하중점의 변위속도이력도 입력하중과 지지반력의 경우와 같이 층간박리가 진전한 시간에서 값이 급격히 감소하고 이 시간에서 \dot{J} 적분값이 동적층간파괴인성치로 된다. 어느 쪽의 이력도 다소 진동하면서 증가하고 인터리브층을 삽입한 시험편이 삽입하지 않는 시험편의 \dot{J} 적분과 하중점 변위속도 이력을 비교하

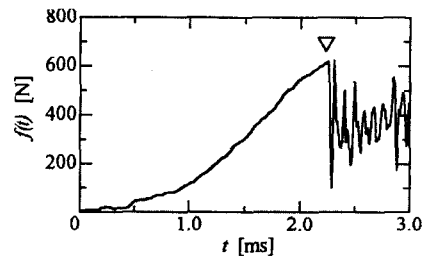


Fig. 6. Input load history in dynamic ENF test($[0_{20}]$)

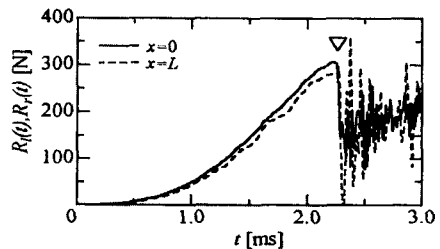


Fig. 7. Support reaction in dynamic ENF test($[0_{20}]$)

면 인터리브층을 삽입한 편향의 진폭이 약간 큼을 알 수 있다. 이것은 변형과정에서 하중점의 처짐속도가 크기 때문에 관성력의 영향이 크게 나타나기 때문이라 생각된다.

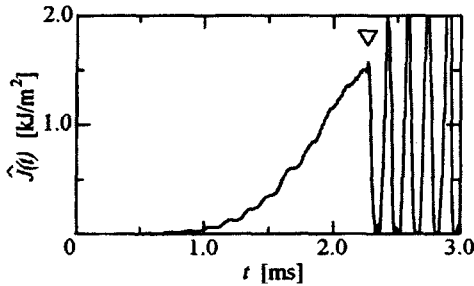


Fig. 8. \hat{J} -Integral history in dynamic ENF test ($[0_{20}]$)

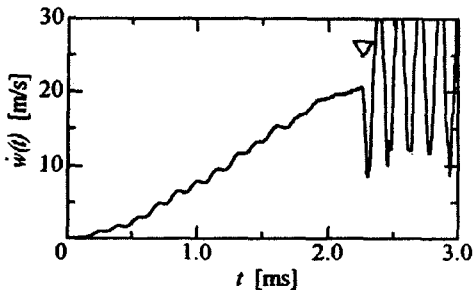


Fig. 9. Deflection velocity in dynamic ENF test ($[0_{20}]$)

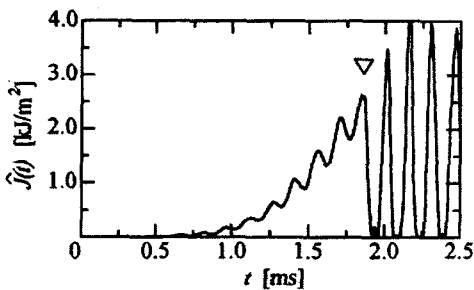


Fig. 10. \hat{J} -Integral history in dynamic ENF test ($[0_{10}/F_2/0_{10}]$)

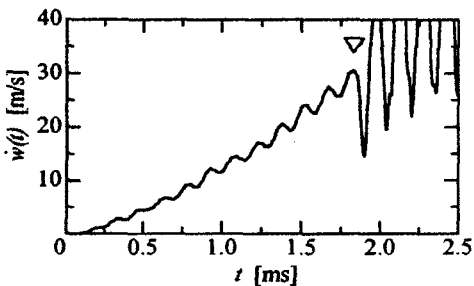


Fig. 11. Deflection velocity in dynamic ENF test ($[0_{10}/F_2/0_{10}]$)

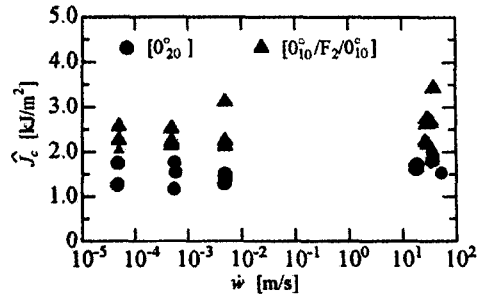


Fig. 12. Between deflection velocity and fracture toughness at a loading point (quasi-static method)

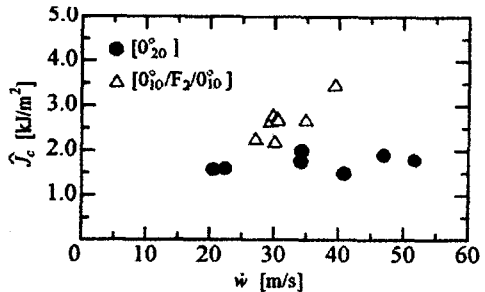


Fig. 13. Between deflection velocity and dynamic fracture toughness at a loading point (dynamic method)

4.3. 하중점의 변위속도에 의한 동적 효과

준정적 및 동적 ENF 시험에서 얻어진 임계하중에서 산출한 층간파괴인성치와 층간박리가 진전하는 시간에서 하중점 변위속도와 관계를 Fig. 12, 13에 나타낸다. 시험편에 따라 각 하중점 변위속도에 따른 층간파괴인성치에 다소 scattering이 있기는 하지만 하중점의 변위속도가 증가함에 따라 준정적인 경우는 층간파괴인성치의 변화가 적으나 동적인 경우는 층간파괴인성치가 증가하며 특히 인터리브가 삽입된 $[0_{10}/F_2/0_{10}]$ 의 시험편이 파괴인성치 증가가 크다. 이와 같은 scattering의 원인은 시험편의 제작상의 치수오차, 커터날로 층간박리를 도입시에 박리형태나 박리길이오차 등의 미묘한 차이로 생각된다. 또한 인터리브가 존재하는 경우가 그렇지 않은 경우보다 높은 층간파괴인성치를 나타내는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 인터리브층을 갖는 일방향 CFRP 적층판을 이용하여 동적 ENF 시험을 행했다. 본 연구에서 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 시험편에 작용하는 하중이 극대가 되는 시간 인 층간박리진전 개시시간 t_c 를 통해 임계하중 f_c 를 알 수 있고 f_c 를 이용하여 층간파괴인성치를 구하는 것이 가능하다.

2) 적층구성이 $[0_{20}]$ 인 경우보다 중앙에 인터리브 PEEK 필름을 삽입한 경우인 $[0_{10}/F_2/0_{10}]$ 의 경우가 모든 변위속도에서 층간파괴인성치가 크다.

3) 적층구성이 $[0_{20}]$ 의 경우에 변위속도 증가에 따른 층간 파괴인성치는 준정적인 경우나 동적인 상태 모두 변위속도에서는 변위속도에 따른 파괴인성치가 약간 증가한다.

4) 적층구성이 $[0_{10}/F_2/0_{10}]$ 인 경우 변위속도 증가에 대한 층간파괴인성치가 준정적인 경우는 변화가 적지만 동적인 상태에서는 크게 증가한다. 이는 인성과 탄성이 큰 인터리브 PEEK의 관성력효과가 증가하기 때문으로 생각된다.

감사의 글 : 이 논문은 1998년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참고문헌

1) H. Morita., T. Adachi, Y. T. Ateishi, and H. Matsumoto, "Characterization of Impact Damage Resistance of CF/PEEK and CF/Toughened Epoxy Laminates under Low and High Velocity Impact Tests", Journal of Reinforced Plastics and Composites,

16-2, pp. 131 ~ 143, 1997.
 2) H. Razi, and A. S. Kobayashi, "Delamination in Cross-Ply Laminated Composite Subjected to Low-Velocity Impact", AIAA Journal, 31-8, pp. 1498 ~ 1502, 1993.
 3) L. A. Carlsson, J. W. Gillespie, and R. B. Pipes, "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.
 4) A. J. Smiley, and R. B. Pipes, "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.
 5) J. W. Gillespie, L. A. Carlsson, and R. B. Pipes, "Finite Element Analysis of the End Notched Flexure Specimen for Measuring Mode II Fracture Toughness", Composites Science and technology, 27, pp. 177 ~ 197, 1986.
 6) 日下貴之, 黒川知明, 山内良昭, "CFRP의 모드 II 층간파괴인성치의 속도 의존성", 材料, 43-487, p. 445, 1994.
 7) 阪部直規, FRP積層板의 모드 II 동적 층간파괴인성치의 평가法, 東京工業大學 修士論文, 1994.
 8) 足立忠晴, 荒井政大, 阪部直樹, 松本浩之, "一方向CFRP積層板의 동적 파괴인성치의 평가", 機論, 63-616, A, pp. 2568 ~ 2574, 1997.
 9) 김지훈, 김영남, 양영, 심재기, "선진복합재료 적층판의 동적 층간 파괴 인성평가", 한국산업안전학회지 Vol. 13, No. 4, pp. 41 ~ 48, 1998.