

선진복합재료 적층판의 동적 층간 파괴 인성평가

A study on the fracture toughness of dynamic interlaminar for CFRP composite laminates

김지훈* · 김영남* · 양인영** · 심재기**

J.H. Kim · Y.N. Kim · I.Y. Yang · J.K. Sim

(1998년 6월 15일 접수, 1998년 12월 11일 채택)

ABSTRACT

In this paper, an investigation was performed on the dynamic interlaminar fracture toughness of CFRP(carbon fiber reinforcement plastics) composite laminates. Composite laminates used in this experimentation are CF/EPOXY and CF/PEEK laminated plates.

In the experiments, Split Hopkinson's Bar(SHPE) 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 result, the vibration amplitude of CF/PEEK laminates appear more than that of CF/EPOXY laminates for the \dot{J} -integral and displacement velocity at a measuring point. Also, it is thought that the dynamic fracture toughness of two kind specimens(CFRP/EPOXY and CF/PEEK) with the increase of displacement velocity becomes a little greater at a measuring point within the range of measurement.

1. 서론

탄소 섬유 강화 플라스틱(CFRP)은 금속재료나 기타재료에 비하여 비강도, 비강성이 우월하

여 고속화 및 경량화가 중요한 항공기, 우주구조물이나 스포츠 용구등의 적용화가 기대되고 있다. 특히 압축강도에 우수한 일방향 CFRP 프리프레그 적층구조는 항공우주 분야에 이용되는

* 조선대학교 기계설계공학과

** 조선대학교 기계공학부

경우가 많다. 그러나 일방향 프리프레그에 의한 구조재는 섬유방향에 대해서는 높은 강도를 기대할 수 있는 반면 그와 직교하는 방향의 인장강도와 전단강도는 현저히 열악하다. 따라서 적층판이 면외방향의 부하를 받을 경우 내부층간에 박리가 생기기 쉽다. 특히 제트엔진의 터빈 날개의 배드 샷(bed shot)문제¹⁾에 대표되는 바와같이 충격적인 부하가 작용할 경우의 내부 손상평가가 중요한 과제로 되어있다. 충격하중이 작용하는 경우의 층간박리진전은 모드 II가 지배적이라는 것이 알려져 있기 때문에 층간파괴인성치를 평가하는 것은 중요하다²⁻⁶⁾.

따라서 이와같은 경우, 스프리트 홉킨슨봉법을 이용한 동적 ENF(end notched fracture)시험이 자주 이용된다. 계측 데이터에서 파괴인성치를 구하기 위해 준정적 하중을 작용시키는 정적에너지해방율에 대하여 운동에너지 영향을 보정하는 방법^{2,3)}, 혹은 유한요소법에 의해 동적에너지해방율을 구하는 방법⁴⁾등이 있으나 충격하중이 작용하는 경우와 준정적하중이 작용하는 경우와는 시험편의 변형모드와 응력분포도가 다르고 유한요소법에 의한 수치계산의 번거로움이 문제로 된다. 따라서 본 연구에서는 ENF시험편에 대하여 동적 고전보이론을 토대로 고속프리에 변환(FFT)을 이용하여 수치라플라스 변환을 이용하는 것에 의해 관성력의 효과를 고려한 동적해석에서 f 적분을 구하고 이 f 적분의 값에 의해 동적효과를 고려한 층간 파괴인성치를 구한다. 시험재료로는 탄소섬유/EPOXY, 탄소섬유/PEEK인 2종류의 시험편에 대해 홉킨슨봉법에 의한 동적 ENF시험을 하여 모드 II에 대한 충격점 하중 및 지점반력을 구하여 관성력의 효과를 고려한 동적해석에 의한 f 적분값에 의해 동적층간파괴인성치를 구하고 정적시험에 의해 구한 층간파괴인성치와 비교하여 동적영향을 검토한다.

2. 이 론

2.1 변위의 산출

Fig. 1에 표시한 바와같이 층간박리를 도입한

시험편을 3점굽힘시험하기로 한다. 박리가 도입된 부분과 그외의 부분을 나누어서 각각의 구간에 대해 고전보이론을 적용한다. 층간박리부는 두께 H인 동일한 보가 중립된 것으로 고려하면 구간1($0 \leq x \leq a$), 구간2($a \leq x < L$) 및 구간3($L \leq x \leq 2L$)의 각부분에 있어서 처짐에 관한 방정식은 다음과 같다.

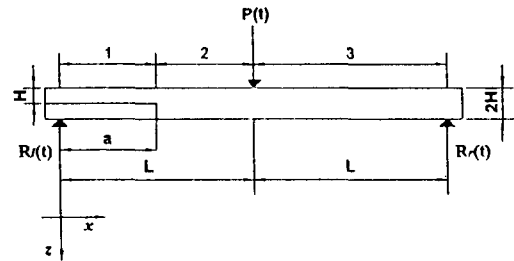


Fig. 1 ENF specimen

$$EI \frac{\partial^4 U_z}{\partial x^4} + 2pwH \frac{\partial^2 U_z}{\partial t^2} = 0 \quad \dots\dots (1)$$

- 단 $0 \leq x \leq a : \alpha = 1/4$
- $a < x < L : \alpha = 1$
- $L \leq x \leq 2L : \alpha = 1$

이때 ρ, I, E 및 t 는 밀도, 단면2차모멘트, 영률 및 시간을 나타내고 기타 기호는 Fig. 1과 같다.

먼저 구간 ($0 \leq x \leq a$)에 대해 식(1)을 무차원화하면 다음과 같다. 단 첨자숫자는 구간을 나타낸다.

$$\frac{\partial^4 U_{z1}}{\partial \xi^4} + \beta \frac{\partial^2 U_{z1}}{\partial \tau^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기서 $0 \leq x \leq a : \beta = 4$

$$\xi = \frac{x}{H}, \quad \tau = c_b t \left(c_b = \frac{E}{3\rho H^2} \right) \text{ 이다.}$$

또한, $t=0$ 에서 시험편은 변형하지 않는다면 초기조건은 다음과 같다.

$$t=0 \quad U_{z1} = \frac{\partial U_{z1}}{\partial \tau} = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

초기조건식 (3)을 고려하여 식(2)을 라플라스 변환하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial^4 \bar{U}_{z1}}{\partial \xi^4} + 4s^2 \bar{U}_{z1} = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

이다. 식(4)의 일반해는 다음과 같다.

$$\bar{U}_{z1} = \sum_{j=1}^4 A_j \exp(\eta_j \xi) \dots\dots\dots (5)$$

여기서 $S^2 = -a^4$ 으로 하면 $y_1 = \sqrt{2}a$, $y_2 = -\sqrt{2}a$, $y_3 = i\sqrt{2}a$, $y_4 = -i\sqrt{2}a$ 또, A_j 는 미정계수이다.

다음에 구간2($a \leq x \leq L$), 구간3($L \leq x \leq 2L$)로 동일한 수순에 의해 일반해를 구하면 다음과 같다.

$$\bar{U}_{z2} = \sum_{j=5}^8 A_j \exp(\eta_j \xi) \dots\dots\dots (6)$$

$$\bar{U}_{z3} = \sum_{j=9}^{12} A_j \exp(\eta_j \xi) \dots\dots\dots (7)$$

여기서 $y_{5,9} = a$, $y_{6,10} = -a$, $y_{7,11} = ia$, $y_{8,12} = -ia$ 이다. 일반해의 미정계수를 경계조건에 의해 결정하여 라플라스 변환영역에서의 변위를 구한다. ENF시험편의 경계조건은 다음과 같다.

$$x=0 \left\{ \begin{array}{l} -\frac{1}{4} EI \frac{\partial^2 \bar{U}_{z1}}{\partial x^2} = 0 \\ -\frac{1}{4} EI \frac{\partial^3 \bar{U}_{z1}}{\partial x^3} = \bar{R}_l \end{array} \right. \dots\dots\dots (8)$$

$$x=2L \left\{ \begin{array}{l} -EI \frac{\partial^2 \bar{U}_{z1}}{\partial x^2} = 0 \\ -EI \frac{\partial^3 \bar{U}_{z3}}{\partial x^3} = -\bar{R}_r \end{array} \right. \dots\dots\dots (9)$$

여기서 \bar{R}_l , \bar{R}_r 는 $x=0$ 및 $2L$ 에서 지지반력의 Laplace변환형을 나타낸다. 또한 박리선단($x=0$)과 하중점($x=L$)에서의 경계조건은 다음과 같다.

$$x=a \left\{ \begin{array}{l} \bar{U}_{z1} = \bar{U}_{z2} \\ \frac{\partial \bar{U}_{z1}}{\partial x} = \frac{\partial \bar{U}_{z2}}{\partial x} \\ -\frac{1}{4} EI \frac{\partial^2 \bar{U}_{z1}}{\partial x^2} = -EI \frac{\partial^2 \bar{U}_{z2}}{\partial x^2} \\ -\frac{1}{4} EI \frac{\partial^3 \bar{U}_{z1}}{\partial x^3} = -EI \frac{\partial^2 \bar{U}_{z2}}{\partial x^3} \end{array} \right. \dots\dots\dots (10)$$

$$x=L \left\{ \begin{array}{l} \bar{U}_{z2} = \bar{U}_{z3} \\ \frac{\partial \bar{U}_{z2}}{\partial x} = \frac{\partial \bar{U}_{z3}}{\partial x} \\ -EI \frac{\partial^2 \bar{U}_{z2}}{\partial x^2} = -EI \frac{\partial^2 \bar{U}_{z3}}{\partial x^2} \\ -\frac{1}{4} EI \frac{\partial^3 \bar{U}_{z2}}{\partial x^3} + EI \frac{\partial^3 \bar{U}_{z3}}{\partial x^3} = \bar{p} \end{array} \right. \dots\dots\dots (11)$$

실험에 의해 측정된 충격하중 $p(t)$, 지지반력 $R_l(t)$, $R_r(t)$ 를 수치 Laplace변환한 후에 식(8)~(10)의 경계조건은 적용하여 식(5)~(7)의 미정계수 A_j 를 결정하면 구간1,2,3의 Laplace변환 영역에서의 처짐 \bar{U}_z 를 구하고 나서 \bar{U}_z 를 수치 Laplace 역변환하여 시간영역의 처짐 $U_z(t)$ 를 산출할 수 있다. 이 경우에 해석적으로 라플라스 역변환하기 곤란하므로 고속푸리에 변환(FFT)을 이용한 수치적 방법에 의해 행한다.

2.2 파괴인성치의 계산

ENF시험편의 파괴인성치를 계산하기 위해 Fig. 2에 나타낸 박리선단을 둘러싼 경로 Γ 에 따른 J 적분에 대해 고려한다. ENF시험편을 평면응력 조건으로 가정하면 J적분은 다음과 같이된다.

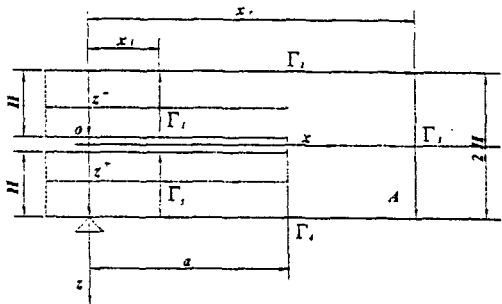


Fig. 2 Counter of ENF specimen

모드 II의 J적분을 J_{II} 로 표시하면

$$J_{II} = \int_{\Gamma} \left[\left\{ W - \left(\sigma_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + \tau_{xz} \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) dz + \tau_{xz} \frac{\partial U_x}{\partial x} dx \right\} \right] \dots\dots\dots (12)$$

와 같다.

단, W 는 변형에너지 밀도이다. 고전보이론을 기초로 적분경로 Γ 에 관한 적분을 하면, x 축 방향 변위 U_x 에 관한 항은 소실되고 최종적으로 다음식으로 된다.

$$J_{II} = \frac{EH^3}{12} \left[\left\{ \left(\frac{\partial^2 U_z}{\partial x^2} \right)^2 - 2 \left(\frac{\partial^3 U_z}{\partial x^3} \right) \left(\frac{\partial U_z}{\partial x} \right) \right\}_{x=x_1} - 4 \left\{ \left(\frac{\partial^2 U_z}{\partial x^2} \right)^2 - 2 \left(\frac{\partial^3 U_z}{\partial x^3} \right) \left(\frac{\partial U_z}{\partial x} \right) \right\}_{x=x_2} \right]$$

..... (13)
 로 된다. 또한 적분경로 Γ 에 둘러싸인 부분에 대한 시험편의 관성력을 고려하면 동적 ENF시험에 대한 f 적분의 평가식을 얻는다.

$$J_{II} = J_{II} + \int_{x_i}^{x_r} \rho \left(\frac{\partial^2 U_z}{\partial t^2} \cdot \frac{\partial U_z}{\partial x} \right) 2H dx \dots (14)$$

로 된다. 식(14)의 적분을 이산화하면 다음과 같다.

$$\hat{J}_{II} = J_{II} + 2H\rho \sum_{k=1}^N \frac{\partial^2 U_x}{\partial t^2} \frac{\partial U_z}{\partial x} \Big|_{x=x_{i,k}} \dots (15)$$

단 $\Delta x = (x_r - x_i)/N$ 이다.

3. 시험장치 및 시험편

Fig. 3은 스플릿 홉킨슨봉에 의한 시험장치의 개략도이다.

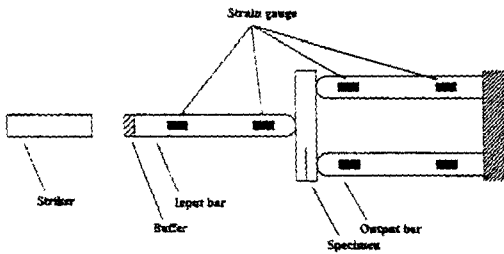


Fig. 3 Schematic of dynamic ENF test equipment

충격봉을 압축공기에 의해 가속시켜서 입력봉에 충돌시켜 양단이 지지된 시험편 중앙에 충격하중이 작용하도록 한다. 입력봉과 2개의 출력봉에 Fig. 3과 같이 각각 2매씩의 반도체 게이지(共和電業: KSP-2-120-E4)를 부착시켜 동적 strain변동을 얻고 1차 파동전파이론을 적용하여 봉 선단의 하중치를 계산한다.

Table 1 Specification of strike impact and output bar

	Strike Bar	Input Bar	Output Bar
Length	750	1500	1500
Size	φ 10	φ 10	3 × 10
Young's Modulus	207GPa		
Density	7.86 × 10 ³ kg/m ³		

Table 1은 충격봉, 입력봉, 출력봉의 재원을

나타낸다. ENF 시험편은 탄소섬유/EPOXY (TORAY T300/#2500)과 탄소섬유/PEEK(ICI APC-2/AS4)인 두종류로 된 프리프레그를 20층을 적층한 1방향적층판을 이용하였다. ENF시험편에 박리를 도입하기 위해 적층판 중앙에 FEP 필름을 삽입한 후, 오토크레브로 가압 성형하였다. 성형된 적층판의 FEP필름이 삽입된 중앙부를 다이아몬드 커터로 절단하여 박리부를 커터날로 약간 크랙을 진전시켜 시험편을 만들고 박리부 길이는 초음파탐상기를 이용하여 초기 박리길이를 측정하였다. 시험편의 사양은 Fig. 2와 같다.

Table 2 Specification of ENF specimens

	T300/#2500	APC-2/AS4
Length(2L ₀)	70	70
Support span(2L)	60	60
Thickness(2H)	2.7	2.74
Delamination Length(a)	15	15
width(w)	10	10
Young's Modulus E[GPa]	113	137
Density ρ [kg/m ³]	1.60 × 10 ³	1.60 × 10 ³

4. 층간파괴 인성치의 측정

4.1 정적 ENF시험

동적 ENF 시험에 앞서 3점 굽힘치구를 이용하여 정적 ENF시험을 행했다. 지점간 거리는 60mm이고 중앙의 하중점과 지지점에는 직경 6mm의 환봉을 이용하였다. 시험기는 SHIMA-DZU사 만능재료시험기 A-100KNE를 이용하고 하중점 변위속도는 5 × 10⁻⁵, 5 × 10⁻⁴, 5 × 10⁻³ m/s로 변위제어에 의해 시험을 행했다. 하중 P(t)는 인장압축형 고정도하중계 TCLZ-500KA(東京測器)에 의해 측정하였다.

Fig. 4~Fig. 5는 일정속도에 따른 하중과 시간과의 관계의 한 예를 나타내며 그림에서 알 수 있는 바와같이 시간에 대한 하중이 거의 일정한 경사로 상승한 후에 어느 시간에 급격히 감소하고 있다. 이 시간을 층간박리가 진전한 시간으로 보면 층간박리의 진전이 개시하는 임계 하중 P_c로 하고 단순보의 처짐 U_z를 식(13)에 대입하여 층간파괴인성치 J_{II}를 구하면 다음과

같다.

$$J_{II} = \frac{9P_c^2 a^2}{16Ew^2H^3} \dots\dots\dots (16)$$

본 연구에서는 시험편 중앙에 작용하는 하중이 최대치가 되는 지점을 충격박이의 진입 개시 시간 t_c 로 하고 그림에서 ▽로 표시하였다.

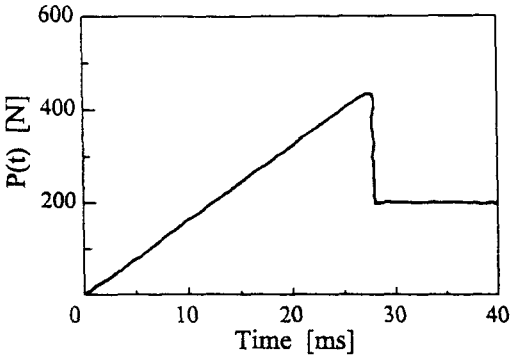


Fig. 4 Impact load history in static ENF test (T300/#2500, $\delta = 5 \times 10^{-5}$)

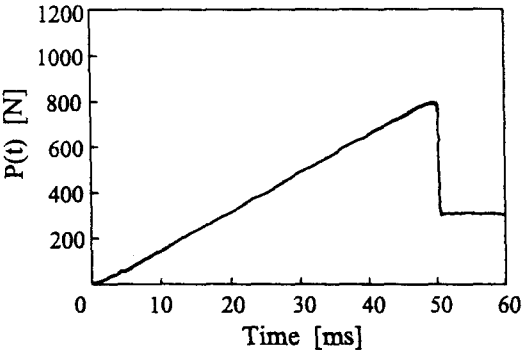


Fig. 5 Input load history in static ENF test (APC-2/AS4, $\delta = 5 \times 10^{-5}$)

4.2 동적 ENF시험

Fig. 6~Fig. 8은 탄소섬유/EPOXY(T300/#2500)인 시험편에 발사압력 $P_a=0.34$ Mpa로 할 경우 입력하중과 지지반력 이력의 일례로 시험편 중앙에 하중이 작용한 시간을 원점으로 하였다.

Fig. 6에서 Buffer효과에 의해 완만하게 상승하는 하중을 시험편에 작용시킬 수 있고 어느 시간에 급격히 감소하고 있는 것을 알 수 있다.

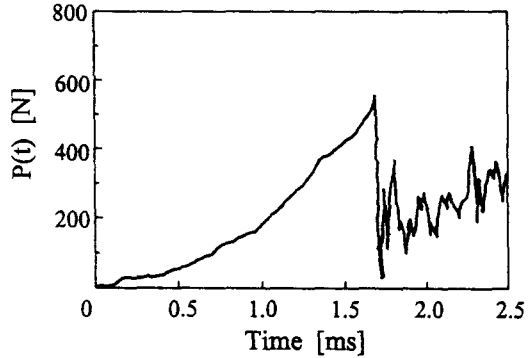


Fig. 6 Input load history in dynamic ENF test (T300/#2500, $P_a=0.34$)

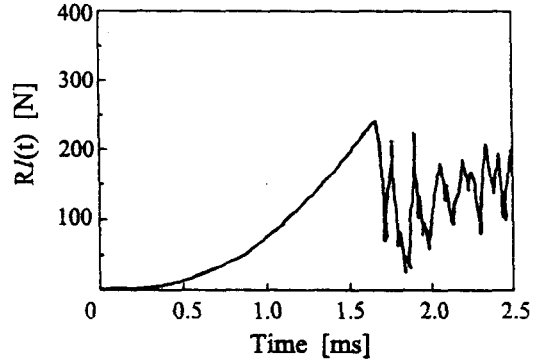


Fig. 7 Support reaction history in dynamic ENF test (T300/#2500, $P_a=0.34$) (left)

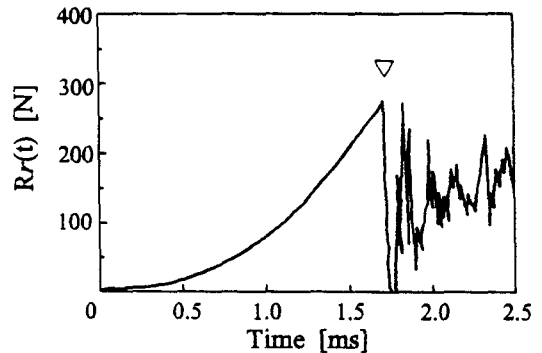


Fig. 8 Support reaction history in dynamic ENF test (T300/#2500, $P_a=0.34$) (right)

이 시간을 박리가 진전한 시간 t_c 로서 ▽표로 그림중에 나타냈다. Fig. 7, 8에서 입력하중과 비교

하여 지지점 반력의 상승이 지연되는 것이 보이며 시간 t_c 에서 지지반력은 입력하중의 약 1/2임을 알 수 있고 박리가 도입된 부분의 지점반력이 도입되지 않은 지점반력보다 약 10%정도 작게 됨을 알 수 있다. 이와같이 측정된 입력하중 및 지지반력을 경계조건으로 J적분 $\hat{J}_u(t)$ 와 하중점의 변위속도 $\dot{\delta}(t)$ 를 구해 Fig. 9, 10에 나타낸다.

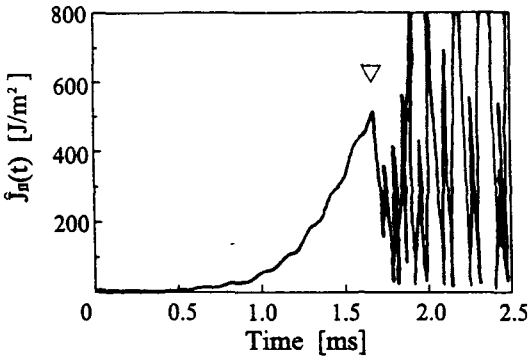


Fig. 9 J-integral history in dynamic ENF test (T300/#2500, $P_a=0.34$ Mpa)

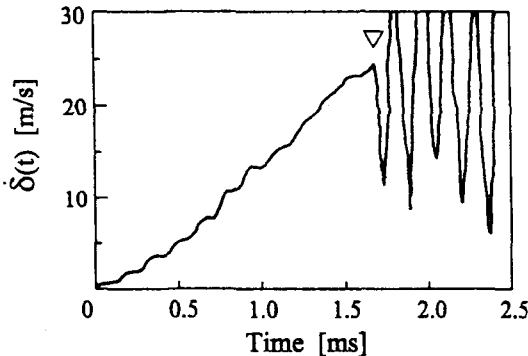


Fig. 10 Deflection velocity history at the center of ENF test

Fig. 10의 하중점 변위속도는 다음식에서 구한다.

$$\dot{\delta}(t) = \frac{\partial U_2}{\partial t} \Big|_{x=L} = C_b \mathcal{L}^{-1} \left\{ s \sum_{j=5}^8 \left(\eta_j \frac{L}{H} \right) \right\}$$

..... (17)

Fig. 9에서 J적분은 입력하중과 비교해서 상승

이 지연되며 시간 t_c 에서 J적분값이 급격히 감소하고 있다. 이것은 층간박리가 진행할 때 에너지가 해방되기 때문이며 시간 t_c 에서 J적분의 극대치의 \hat{J}_{uc} 가 층간파괴 인성치로 된다. Fig. 10에서 하중점 변위속도의 상승형태가 입력하중과 거의 동일한 양상이며 시간 t_c 에서 하중점의 변위속도도 급격히 감소함을 보인다. Fig. 11은 탄소섬유/PEEK(APC-2/AS4)인 시험편에 발사압력 $P_a=0.4$ Mpa인 경우 입력하중 이력을 나타내며 탄소섬유/EPOXY(T300/#2500)의 결과와 거의 같은 경향을 보인다. Fig. 12, 13은 \hat{J} 적분 및 하중점 변위속도를 나타내며 탄소섬유/EPOXY(T300/#2500)와 비슷한 양상의 경향을 보이지만 반면 진동의 진폭이 크게 됨을 알 수 있다. 이것은 탄소섬유/PEEK(APC-2/AS4)가 인성과 탄성이 크기 때문에 박리진전까지 이르는 하중점의 변위 가속도가 크게되어 관성력효과가 증가되기 때문이라 생각된다.

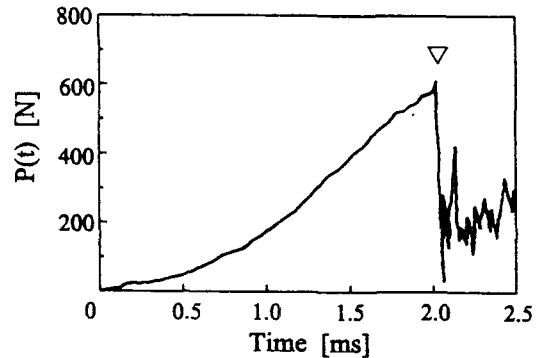


Fig. 11 Input load history in dynamic ENF test (APC-2/AS4, $P_a=0.4$ Mpa)

4.3 하중점의 변위속도에 의한 동적효과

정적 ENF시험에서 구한 층간파괴인성치 J_{nc} 와 동적 ENF시험에서 구한 층간파괴 인성치 \hat{J}_{nc} 를 비교하여 층간파괴 인성치에 미치는 동적 효과에 대해 검토해 보기로 한다.

여기서 동적층간파괴 인성치의 평가를 위해 하중점의 변위속도를 파라메타로 하였다.

Fig. 14, 15는 탄소섬유/EPOXY(T300/#2500)와 탄소섬유/PEEK(APC-2/AS4)에 대한 층간파괴인

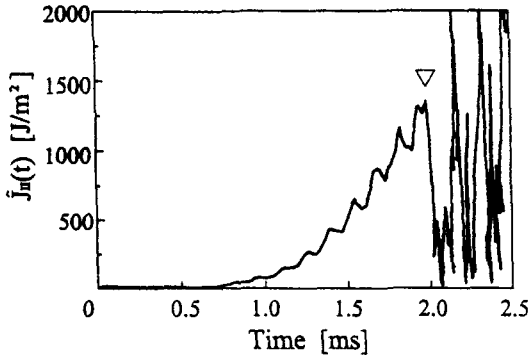


Fig. 12 \hat{J} -Integral history in dynamic ENF test (APC-2/AS4, $P_a=0.4$ Mpa)

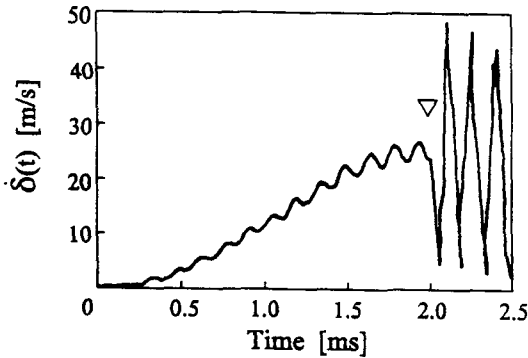


Fig. 13 Deflection velocity history at the center of ENF test (APC-2/AS4, $P_a=0.4$ Mpa)

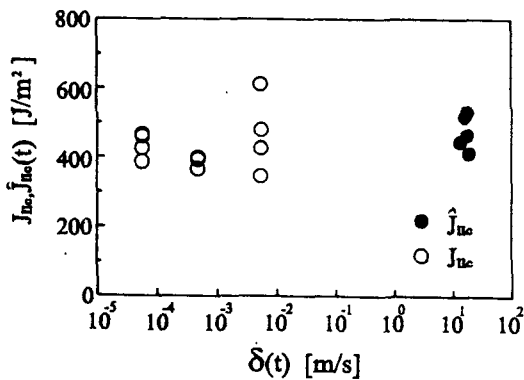


Fig. 14 Relation between fracture toughness and deflection velocity (T300/#2500)

성치와 하중점 변위속도와의 관계를 나타낸다. 동적 ENF시험에서 충격봉 발사압력도 T300/

#2500은 0.12~0.40Mpa, 탄소섬유/PEEK(APC-2/AS4)는 0.28~0.40Mpa로 하였다. Fig. 14, 15에서 모두 scattering이 꽤 크기는 하지만 하중점의 변위속도의 증가와 더불어 층간 파괴 인성치가 증가하는 경향이 보인다. 또한 이러한 오차(scattering)의 원인으로는 시험편 재질이 갖는 오차, 커터로 층간박리를 도입시킬 때 박리형태와 길이 오차등의 미묘한 차이때문이라 생각한다. 또한 T300/#2500에 비하여 탄소섬유/PEEK(APC-2/AS4)의 시험편이 변위속도의 증가에 대해 층간파괴인성치의 증가비율이 약간 크게되는 경향이있고 또한 높은 인성치를 나타내는 것을 알 수 있다.

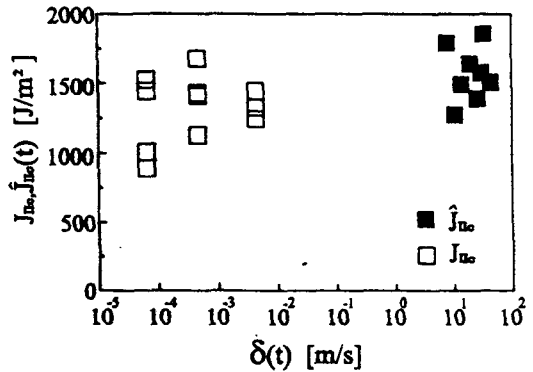


Fig. 15 Relation between fracture toughness and deflection velocity (APC-2/AS4)

5. 결 론

본 연구에서는 수지가 다른 탄소섬유/EPOXY, 탄소섬유/PEEK인 두중류의 일방향 CFRP적층 시험편에 대해 정적 ENF시험 및 스플릿홈켄슨 방법에 의한 동적 ENF시험을 하여 모드II층간 파괴인성치를 구하여 동적효과의 영향을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 시험편에 작용하는 하중이 극대가 되는 시간인 층간박리 진전개시 시간 t_c 를 통해 임계하중 P_c 를 알 수 있고 P_c 를 이용하여 층간파괴인성치를 구하는 것이 가능함을 알 수 있다.
- 2) 탄소섬유/PEEK(APC-2/AS4)가 탄소섬유/EPOXY(T300/#2500) 시험편보다 \hat{J} 적분 및 하중점 변위속도의 진동 진폭이 큼을 알 수 있

다. 이는 탄소섬유/PEEK(APC-2/AS4)가 탄소섬유/EPOXY(T300/#2500) 보다 인성과 탄성이 크기 때문에 박리진전까지 이르는 하중점의 변위가속도가 크게 되어 관성력효과가 증가되기 때문이라 생각한다.

- 3) 본 논문의 측정범위에서는 2종류시험 모두 하중점 변위속도의 증가와 더불어 동적 충간 파괴 인성치가 증가함을 알 수 있었다.
- 4) T300/#2500에 비하여 탄소섬유/PEEK(APC-2/ AS4)의 시험편이 변위속도의 증가에 대한 충간파괴 인성치의 증가율이 약간 큼을 알 수 있다.

이 논문은 1997년도 조선대학교 교수 해외파견 연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참 고 문 헌

- 1) 阪部直規, “FRP積層板のモードⅡ動的層間破壊靱性評價法”, 東京工業大學修士論文, February, 1994.
- 2) L.A. Carlsson, J.W. Gillespie, Jr. and R.B. Pipes. “On the Analysis and Design of the End Notched Flexure(ENF) Specimen for ModeⅡ Testing”, Journal of Composite Materials, Vol. 20, p. 594, 1986.
- 3) A.J. smiley and R.B. Pipes. “Rate Sensitivity of ModeⅡ Interlaminar Fracture Toughness in Graphite/Epoxy and Graphite/PEEK Composite Materials”, Composite Science and Technology, Vol. 29, p. 1, 1987.
- 4) 日下貴之, 黒天知明, 山内良昭, “CFRPのモードⅡ層間破壊じん性のひずみ速度依存性”, 材料43-487, p. 445, 1994.
- 5) L.A. Carlsson, R.B. Pipes著, 福田博, 高雄善祐, 影山和郎譯 “高性能複合材料の實驗的評價”, 古今書院, 1990.
- 6) 阪部直規, 足立忠晴, 松本浩之, “FRPの動的ENF試験のためのJ積分の近似解析”, 機講論 No. 940-37B, p. 246, 1994.