

## CFRP 적층판의 동적 층간파괴인성의 평가법

### A Study on the Estimation of Dynamic Interlaminar Fracture Toughness on CFRP Laminates Plates

김 지 훈\*, 김 영 남\*, 阪部 直規\*\*, 양 인 영\*\*\*  
J. H. Kim, Y. N. Kim, 阪部 直規, I. Y. Yang

#### ABSTRACT

In this paper, the estimation of dynamic interlaminar fracture toughness on fracture mode II in CFRP(carbon fiber reinforced plastics) laminates is made.

Dynamic ENF(End Notched Flexure) apparatus used in this paper is manufactured by using Split Hopkinson Pressure Bar.

The static and impact load history in the CFRP specimen is measured by using manufactured dynamic ENF tester and 3-point bending test is carried out to find the load history. Also, dynamic interlaminar fracture toughness can be found by using the  $\int$  integral obtained from dynamic analysis in consideration of inertia-force effect.

주요기술용어 : CFRP(탄소섬유강화 복합재), Dynamic Fracture Toughness(동적파괴인성), Split Hopkinson Pressure Bar(Split Hopkinson 붕법),  $\int$  Integral( $\int$  적분), Dynamic End Notched Flexure apparatus(동적 ENF시험장치), 3-Point Bending Test(3점 굽힘시험)

#### 1. 서 론

탄소섬유 강화 플라스틱(CFRP, Carbon Fi-

ber Reinforced Plastics)은 비강도 및 비강성이 높아 구조 경량화가 요구되는 우주항공 분야에 널리 이용되고 있다. 일반적으로 CFRP는 항공기의 외판등 적층판으로 이용되는 경우가 많고, 낮은 에너지의 충돌시에도 표면에서는 거의 관찰할 수 없는 계면간의 층간박리, 모재크랙 등

\* 조선대학교 대학원

\*\* 동경공업대학 대학원

\*\*\* 정희원, 조선대학교 기계공학과

의 내부손상을 일으킨다. 이와 같은 손상은 섬유로서 강화된 CFRP 적층판 면내의 강도와 비교하여 층간 강도가 현저히 낮게 되는 원인이 된다. 또 충격손상을 받은 부분이 압축하중을 받으면 층간박리부에서 국소적인 좌굴이 발생하여 파괴에 이른다. 따라서 충격후의 압축파괴 응력으로 정의되는 충격후의 압축강도(CAI : Compression After Impact)의 평가가 설계에 있어서 중요하게 된다. CAI를 파괴역학의 관점에서 고려하면, 동적부하에 있어서 층간박리의 균열전파로 고려할 수 있다. 즉 CAI를 지배하고 있는 기본적 특성이 층간파괴인성으로 생각되며, 이와 같은 의미에서 층간파괴인성치가 중요한 역학적 특성의 하나로 볼 수 있다.<sup>1)</sup> 이 층간파괴인성치를 구할 때에 층간박리를 균열로 간주하여 해석하고, 파괴역학 파라메타인 응력 확대계수, 에너지 해방률 등을 구하여 그 임계치에 의해 층간파괴치를 평가하고 있다. 각각의 변형양식에 대하여 CFRP적층판에 정하중이 작용할 경우의 층간파괴인성치를 구하는 대표적인 시험방법<sup>2)</sup>으로는, DCB 시험(Double Cantilever Beam : 모드 I) 및 CLS시험(Crack Lap shear : 모드 I 및 II의 복합 모드)<sup>3,4)</sup>, ENF 시험(End Notched Flexure : 모드 II)<sup>4,5)</sup>, Arcan 복합모드시험(모드 I 과 II의 복합 모드) 및 EDT 시험(Edge Delamination Test)이 있다.

그러나, 실제로 구조물에 CFRP적층판을 사용할 경우 정하중만이 작용하는 것이 아니고 충돌하중이 작용하게 되며, 충돌하중이 작용할 경우의 층간파괴인성 평가법의 확립은 대단히 중요한 과제이다. 특히, 층간박리를 갖는 CFRP 적층판에 충돌하중이 작용할 경우 층간박리의 진전은 모드 II가 지배적이라고 알려져 있다.<sup>6)</sup>

따라서 본 연구에서는 모드II에 대한 CFRP 적층판의 동적 층간파괴인성치를 동적 ENF시험장치를 이용하여 구하는 방법을 제안하는 것을 목적으로 한다.

연구방법으로는 동적 ENF시험을 하기 위한 Split Hopkinson봉법을 이용한 시험장치를 설계, 제작한 후, 동적ENF시험을 행하고, 판성력의 효과를 고려한 동적해석에 의해 구한 적분

의 값에 의해 동적층간파괴인성치를 구한다. 또한, 정적 ENF시험에 의해 구한 층간파괴인성치와 비교하므로써 동적효과의 영향에 관하여 검토한다.

## 2. CFRP 적층판의 Mode II에 대한 적분

### 2.1 ENF 시험편의 변위 방정식

ENF시험편을 Fig.1과 같은 보로 근사시켜 판성력을 고려한 동적고전이론에 기초를 두고 응력의 평형방정식으로부터 ENF시험편의 변위의 방정식을 구한다. 이때 ENF시험편은 층간박리가 있는 부분( $0 \leq x \leq a$ )과 층간박리가 없는 부분( $a \leq x \leq 2L$ )이 존재하므로 2개의 부분으로 나누어서 변위방정식을 구한다. 이때 Fig.2에 나타난 바와같이 층간박리의 선단에서 3개의 요소로 분할한 모델을 생각한다. 변위방정식은 응력의 평형조건식에 응력과 변형률의 관계식을 대입하고 ENF시험편의 두께방향 요소는 평행이동과 회전만을 하며 신축하지 않는 것으로 다음식을 대입하여 구한다.

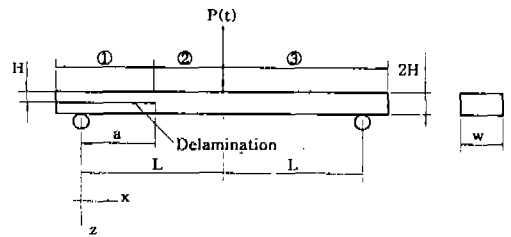


Fig.1 Geometry of dynamic and notched flexure (ENF) specimen

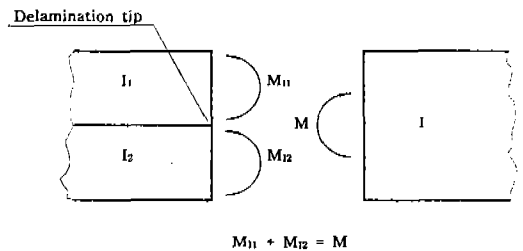


Fig.2 Beam elements at the tip of delamination

$$u_x(x, z, t) = U_x(x, t) - z \frac{\partial u_z(x, z, t)}{\partial x},$$

$$u_z(x, z, t) = U_z(x, t) \quad (1)$$

여기서,  $u_x(x, z, t)$ ,  $u_z(x, z, t)$ 는  $x$ ,  $z$ 축방향 변위이며,  $U_x(x, t)$ ,  $U_z(x, t)$ 는 중앙면의  $x$ ,  $z$  축방향변위,  $t$ 는 시간이다.

식(1)의 첫째식의 제1항은 평형이동, 제2항은 회전과 관계하는 것을 나타내고 있다. 또 두 번째 식은 두께방향의 변위  $u_z$ 가 신축하지 않는다고 가정하고 있으므로  $z$ 축 방향의 변위만으로 된다. 다음에 굽힘모우먼트의 평형으로부터 중간박리가 있는 부분과 없는 부분과의 굽힘강성의 관계를 구해 층간박리의 영향을 고려한다.

이상과 같이하여 구한 고전 보이론에 의한 ENF시험편의 변위방정식은 다음과 같다.

$$0 \leq x \leq a: -\frac{1}{4} EI \frac{\partial^4 U_z}{\partial x^4} + q = 2\rho w H \frac{\partial^2 U_z}{\partial t^2}$$

$$a \leq x \leq 2L: -EI \frac{\partial^4 U_z}{\partial x^4} + q = 2\rho w H \frac{\partial^2 U_z}{\partial t^2} \quad (2)$$

여기서  $w$ 는 ENF시험편의 폭, EI는 굽힘강성계수,  $q = w[\sigma_z]_{-H}^{-H}$ ,  $2H$ 는 두께,  $\rho$ 는 밀도,  $U$ 는 변위를 나타낸다.

## 2.2 수치라프라스변환

2.1절에서 구한 ENF 시험편의 변위 방정식의 해를 구함으로써 ENF시험편의 변위를 구할 수 있으나 변위의 방정식은 좌표 및 시간의 편미분 방정식이므로 해석적으로 푸는 것은 곤란하다.

따라서 변위의 방정식을 초기조건을 고려하면서 라프라스 변환하고 라프라스변환 영역에서 경계조건을 고려하여 변위를 구한다. 얻어진 해에 대해서 라프라스 역변환하면 시간영역의 변위를 구할 수 있다.

먼저, 구간①( $0 \leq x \leq a$ )에 대하여 해석을 행한다.

변위방정식(2)의 일반해를 구하기 위해  $q=0$ 으로 하고, 좌표  $x$  및 시간  $t$ 에 관하여 무차원화하면 다음식이 된다.

$$\frac{\partial^4 U_{z1}}{\partial \xi^4} + 4 \frac{\partial^2 U_{z1}}{\partial \tau^2} = 0 \quad (3)$$

여기서,  $\xi = \frac{x}{H}$ ,  $\tau = C_b t$  ( $C_b^2 = \frac{E}{3\rho H^2}$ )이며 첨자의 숫자는 구간을 표시한다.

또, 시간  $t=0$ 에서 시험편은 변형하지 않는 것으로 하면, 초기조건은 다음과 같다.

$$t=0: U_{z1} = \frac{\partial U_{z1}}{\partial \tau} = 0 \quad (4)$$

초기조건 식(4)를 고려하여 식(3)를 라프라스 변환하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial^4 \bar{U}_{z1}}{\partial \xi^4} + 4s^2 \bar{U}_{z1} = 0 \quad (5)$$

여기서,  $\bar{f}(s) = \int_0^\infty f(\tau) \exp(-s\tau) d\tau$ 이다.

식(5)와 일반해는 다음식<sup>7)</sup>과 같다.

$$\bar{U}_{z1} = \sum_{j=1}^4 A_j \exp(\eta_j \xi) \quad (6)$$

여기서,  $\eta_1 = \sqrt{2a}$ ,  $\eta_2 = -\sqrt{2a}$ ,  $\eta_3 = i\sqrt{2a}$ ,  $\eta_4 = -i\sqrt{2a}$ ,  $A_j$ 는 미정계수이다.

다음에 구간②( $a \leq x \leq L$ ), 구간③( $L \leq x \leq 2L$ )에서도 앞에서와 같은 방법으로 일반해를 구하면 다음식과 같다.

$$\bar{U}_{z2} = \sum_{j=5}^8 A_j \exp(\eta_j \xi), \quad \bar{U}_{z3} = \sum_{j=9}^{12} A_j \exp(\eta_j \xi) \quad (7)$$

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

일반해의 미정계수를 경계조건에 의해 결정하므로서 라플라스 변환영역에 있어서 변위를 구한다. 경계조건은, 지지점에서는 단순지지조건, 층간박리선단에서는 연속조건, 중앙점에서는 충격하중  $P(t)$ 를 고려한 연속조건으로 한다. 이와 같이하여 구해진 라플라스 변환영역의 변위를 라플라스역변환하면 변위를 구할 수 있으나 해석적으로 라플라스 역변환하는 것은 곤란하므로 고속푸리에변환(FFT)을 이용한다.

본 연구에서는 수치계산할 때 본 연구에서 이용한 실제 시험편의 재원으로서 지점간거리  $2L = 60\text{mm}$ , 두께  $2H = 2.5\text{mm}$ , 폭  $w = 10\text{mm}$ , 박리길이  $a = 15\text{mm}$ , 탄성계수  $E = 134[\text{GPa}]$ , 밀도  $\rho = 1.6 \times 10^3 [\text{kg}/\text{m}^3]$ 을 이용했다.

### 2.3 J 적분

본 연구에서는 보이론을 이용하므로 크랙선단에서 응력의 특이성의 분포는 해석할 수 없다. 따라서 J적분을 이용해서 파괴인성치를 구하기로 한다. 외력의 작용계를 포함한 계 전체의 역학적 에너지를 포텐셜에너지 라고 하고  $\Pi$ 로 하면

$$\Pi = \overline{W} + \Pi^* \quad (8)$$

로 쓸 수가 있다.

여기서  $\overline{W}$ 는 탄성체중의 변형률에너지,  $\Pi^*$ 는 외력 작용계의 포텐셜에너지이다. 크랙을 갖는 탄성체에서 크랙이 진전하면 이 역학계의 포텐셜에너지는 크랙진전을 위한 일 등으로 사용되어 해당되며 이 에너지해방은 크랙선단부에서 일어나므로 탄성체의 포텐셜에너지의 변화는 크랙 선단부를 포함한 임의의 영역 A로 정의되는 포텐셜에너지의 변화와 같다.

따라서 크랙선단 근방에 주목하여 Fig.3과 같은 곡선  $\Gamma$ 로 둘러 쌓인 부분을 떼어내어, 미소 요소  $dc$ 에 외부로부터 작용하는 분포력의 벡터를  $T_{dc}$ , 그점의 변위 벡터를  $u$ 로 하면

$$J = \frac{-\partial \Pi}{\partial A} \equiv \oint_A \left[ W dz - T \frac{\partial u}{\partial x} dc \right]$$

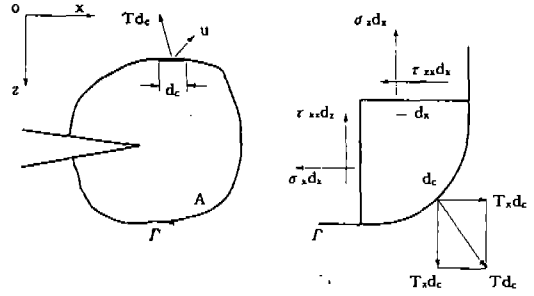


Fig.3 Contour of J-integral

$$= \oint_{\Gamma} \left\{ W - \left( \sigma_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + \tau_{xy} \frac{\partial u_y}{\partial x} + \tau_{xz} \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) dz + \left( \tau_{xz} \frac{\partial u_x}{\partial x} + \tau_{zy} \frac{\partial u_y}{\partial x} + \sigma_z \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) dx \right\} \quad (9)$$

로 쓸 수가 있는 것이 이미 알려져 있다.<sup>8)</sup> 이 우변의 적분을 J적분이라고 한다.

그러나 본 연구에서와 같이 물체의 관성력의 영향을 무시할 수 없는 경우는 J적분으로는 불충분하다. 따라서 관성력의 영향도 포함하도록 확장한 J적분으로서 다음과 같은  $\hat{J}$  적분이 정의되어 있다.<sup>8)</sup>

$$\hat{J} = J + \int_A \rho \left( \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) dA \quad (10)$$

여기서,  $u_x, u_y, u_z$ 는 x, y, z 축방향변위, A는 Fig.3의 적분회로  $\Gamma$ 로 둘러쌓인 면적이다.

적분회로를 ENF시험편의 층간박리 선단을 포함하도록 설정하여 모드II의  $\hat{J}$ 적분  $\hat{J}_{II}$ 을 구하므로서 CFRP 적층판의 모드II에 대한 동적 층간파괴인성치를 구할 수가 있다.

$\hat{J}$ 적분과 포텐셜에너지 해방률은 같은 의미이므로 이상의 과정으로부터 에너지해방률이 구해진다. 본 연구에 있어서는 식(10)의  $\hat{J}$ 적분을 ENF 시험편에 적용, 모드II의  $\hat{J}$ 적분  $\hat{J}_{II}$ 을 동적해석에 의해 구하고, 이값에 의해 CFRP적층판의 모

드II에 대한 동적충간파괴인성치를 평가하기로 한다.

### 3. 동적 ENF 시험장치의 설계

본 장에서는 동일한 부하 제어를 하는 Slit Hopkinson봉법(Split Hopkinson Pressure bar : SHPB)을 이용한 동적 ENF 시험장치를 설계, 제작하여 CFRP적층재의 ModeII에 대한 동적 충간파괴 인성치를 구한다.

#### 3.1 입력봉 및 출력봉의 설계

Fig.4에 Split Hopkinson봉법을 이용한 동적 ENF 시험장치의 개요를 나타낸다.

공기압에 의해 가속된 충격봉( $L_i$ )을 입력봉( $L_i$ )에 충돌시키면 입력봉속을 1차원 응력파가 전파하여 2개의 충격봉( $L_o$ )에 의해 지지된 시험편에 하중이 작용한다. 이 시험편 중앙에 작용하는 하중 및 지지반력의 측정을 행한다.

설계할 때 문제가 되는 것은 시험을 행할 때의 측정시간, 측정하중 및 하중을 측정하기 위해 각 봉에 부착하는 스트레인게이지의 감도이다. 측정시간과 측정하중은 충간박리가 진전을 개시하기 까지의 시간 및 하중에 의해 결정된다.

또, 각 봉은 연강을 이용하였고 탄성계수 E는 206[GPa], 밀도  $\rho$ 는  $7.86 \times 10^3$ [kg/m<sup>3</sup>], 응력파의 전파속도  $c_0$ 는 5,120[m/s]를 설계시 이용한다.

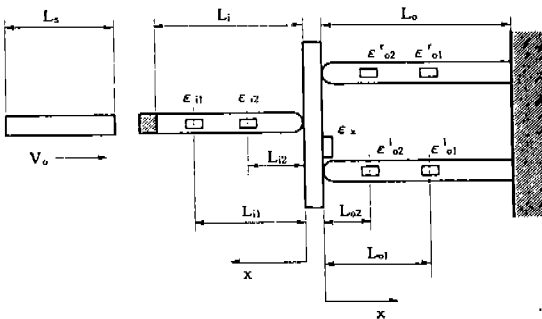


Fig.4 Dynamic ENF test apparatus using split Hopkinson pressure bar

입력봉 및 출력봉의 길이( $L_i$ ,  $L_o$ )는 하중점 및 지지점에 타단으로부터의 반사파가 도달하기 전에 측정을 완료하는 것이 바람직하다. 따라서, 각봉에 이용된 연강의 파동전파속도를 고려하여 계산하면 다음식이 바람직하다.

$$L_i, L_o \geq \frac{c_0 t_{max}}{2} \quad (11)$$

식(11)에 봉의 재료정수를 고려하면 약 1,300mm 이상이 적절했다.

다음에 입력봉 및 출력봉의 단면형상을 결정할 때 시험시 하중을 측정하는 방법은 각봉에 부착된 스트레인게이지의 출력으로부터 환산한다. 본 연구에서는 반도체 게이지를 이용하기 때문에 감도를  $\epsilon_{min} = 5.0 \times 10^{-6}$ 으로 하고, 이 감도로서 측정 가능한 하중을  $P_{min} \geq 100N$ 으로 하여 단면형상을 결정한다.

먼저 입력봉에 관해 계산을 한다. 입력봉을 직경  $d_i$ 인 원형단면으로 하면 다음식으로 한다.

$$P_{min} \geq \frac{\pi d_i^2 E \epsilon}{4}, \quad d_i \leq \sqrt{\frac{4P_{min}}{\pi E \epsilon}} \quad (12)$$

다음에 출력봉에 관해 계산한다. 출력봉에 의해 측정된 하중은 입력봉의 절반 정도이므로 입력봉과 같은 원형단면으로 접촉길이를 같게하면 다음식과 같다.

$$\frac{P_{min}}{2} \geq w_0 h_0 E \epsilon_{min}, \quad w_0 \leq \frac{P_{min}}{2 h_0 E \epsilon_{min}} \quad (13)$$

#### 3.2 충격봉의 설계

Fig.5에 충격봉 및 입력봉의 개략을 나타낸다. 충격봉은 공기압 Pa에 의해 거리 La만큼 가속되므로서 속도  $V_0$ 가 얻어지면 입력봉에 충돌할 때 발생하는 하중을 구한다.

충돌면이 접촉하고 있는 동안 변형속도는 같게 되므로, 속도의 연속조건으로부터 입력봉에 발생하는 하중  $P_i$ 는 다음식으로 된다.

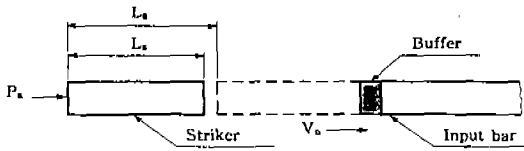


Fig.5 Schematic diagram of striker and input bar

$$P_i = \frac{EA}{2c_0} V_0 \quad (14)$$

여기서, A는 충격봉과 입력봉의 단면적이다.

다음에 충격봉을 질점으로 생각하여 속도  $V_0$ 를 결정한다. 공기압에 의해 충격봉에 작용하는 힘과 관성력의 조합으로부터 다음식이 구해지며

$$\rho AL_s \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = p_a A \quad (15)$$

충격봉의 속도  $V_0$ 는 다음식으로 된다.

$$V_0 = \sqrt{\frac{2P_a}{\rho} \left( \frac{L_a}{L_s} \right)} \quad (16)$$

식(16)을 식(14)에 대입하므로써 공기압  $P_a$ 로 거리  $L_a$ 가속할 때에 입력봉에 발생하는 하중  $P_i$ 를 구한다.

다음에 시험편에 작용하는 하중을 구하기 위해 입력봉과 시험편이 접하는 하중점은 자유단의 상태에 가까우므로 입력봉에서 시험편에의 투과율<sup>9)</sup>을 5%로 가정하면 다음식으로 된다.

$$P(t) = 0.05P_i = 0.05 \sqrt{\frac{EA^2 p_a}{2} \left( \frac{L_a}{L_s} \right)} \quad (17)$$

본 연구에서는 공기압을 0~0.3MPa 범위로 하였으며, 충격봉의 가속거리와 충격봉의 길이는  $L_a/L_s=1.0$ 으로 한다.

이상과 같은 사항을 고려하여 ENF시험장치의 치수를 Table 1과 같이 결정하였다.

Table 1 Dimension of dynamic ENF test apparatus using SHPB

Striker	Input Bar	Output Bar
$L_s=750$ [mm]	$L_i=1,500$ [mm]	$L_o=1,500$ [mm]
$d_s=10$ [mm]	$d_i=10$ [mm]	$W_0 \times h_0=3 \times 10$ [mm]

### 3.3 충격하중 측정시스템

시험편 중앙에 작용하는 하중  $P(t)$ 와 지점반력  $R_{i,r}(t)$ 를 구하기 위해 2 게이지법을 이용했다. Fig.6과 같이 입력봉 및 출력봉의 각봉의 2개소의 변형율을 측정하여 경계조건으로 하여 1차원 파동전파이론에 의해 각각의 하중을 구한다.

시험편 중앙에 작용하는 하중과 지점반력의 산출식은 다음과 같다.<sup>10)</sup>

$$f = AE \left\{ \varepsilon_1 - \varepsilon_2 H \left( t + \frac{l_1}{2c_0} \right) - \varepsilon_2 H \left( t - \frac{l_1}{2c_0} \right) \right\} \quad (18)$$

여기서,  $H(t)$ 는 헤비사이드의 스텝함수이다.

식(18)에서와 같이 파동의 중첩에 의해  $x=0$ 에서 하중, 즉 시험편중앙에 작용하는 하중  $P(t)$ , 및 지점반력  $R_{i,r}(t)$ 를 구할 수 있다. Table 2에 입출력봉의 스트레인게이지를 부착위치를 나타냈으며 Table 3에 반도체 스트레인게이지의 사

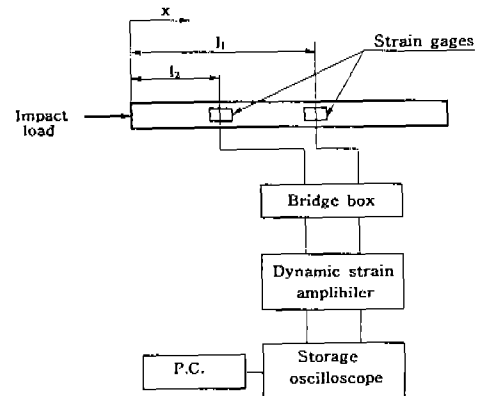


Fig.6 Measuring system of impact load

Table 2 Position of strain gages in input and out put bar

Position of strain gages	Input Bar	Output Bar
1 <sub>1</sub>	1,000 [mm]	240 [mm]
1 <sub>2</sub>	500 [mm]	120 [mm]

Table 3 Specification of semiconductor strain gages

Maker	Kyowa(Japan)
Type	KSP-2-120-E4
Gage length	2 [mm]
Gage resistance	120.5±2%
Gage factor	127±3%

양을 나타냈다.

충격속도는 충격봉이 가속관으로부터 발사된 직후의 2점간의 통과시간을 측정하여 충격봉의 속도를 구하였으며 본 실험장치에서는 가속거리 La는 635mm로 하였다.

실험에 의해 구한 충격봉의 속도  $V_0$ 와 공기

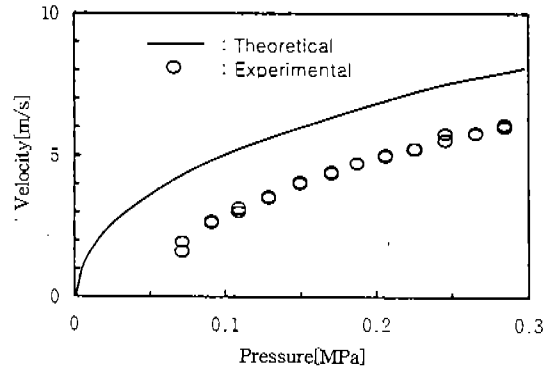


Fig.7 Relationship between impact velocity and air pressure

압  $p_a$ 의 관계를 Fig.7에 나타냈다.

Fig.7중의 실선은 충격봉을 질점으로 생각하므로서 구한 식(16)의 충격봉속도의 계산결과를 나타낸다. Fig.7로부터 실험결과와는 이론값에 비해 전반적으로 약 1.3~1.4m/s 정도 저하하고 있음을 알 수 있다. 이는 충격봉의 외경과 가속관의 내경에 차가 있기 때문에 공기압이 저하하기 때문이며, 충격봉과 가속관의 마찰등이 원인

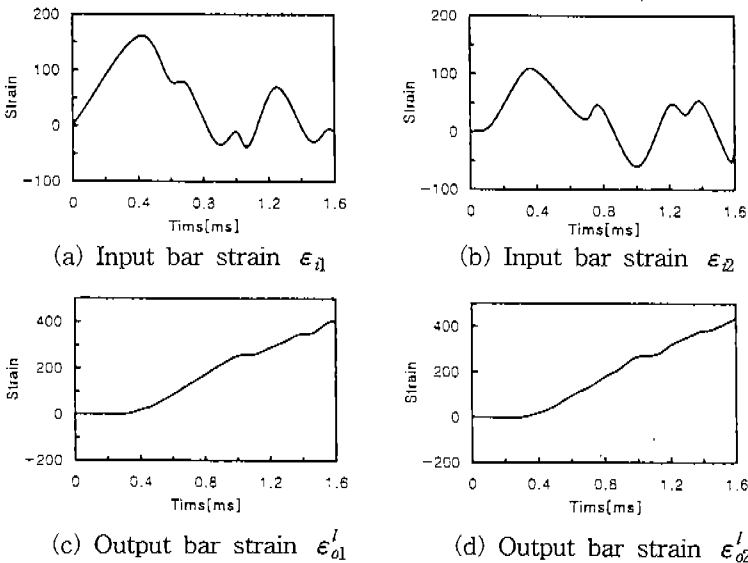


Fig.8 Strain history of strain gage output ( $P_a=0.25Mpa$ )

이라 생각된다.

Fig.8에 Split Hopkinson봉법을 이용한 동적 3점 굽힘시험에 의해 얻은 입력봉의 변형을  $\epsilon_{i1}(t)$ ,  $\epsilon_{i2}(t)$  및 출력봉의 변형을  $\epsilon'_{o1}(t)$ ,  $\epsilon'_{o2}(t)$  을 나타낸다. 단, 횡축은 입력봉의  $x = l_1$ (Fig.4 참조)인 위치에 접착된 스트레인게이지에 충격봉의 충돌에 의해 입력봉에 발생하는 응력파가 도달한 시간을 원점으로 하고 있다.

이와같이 2게이지법을 이용하므로써 입력봉 및 출력봉의 변형율을 측정하므로써 시험편 중앙에 작용하는 하중점 및 지점반력을 계산할 수 있다.

## 4. CFRP적층판의 층간파괴 인성치 측정법

### 4.1 ENF 시험편

본 연구에서 이용한 시험편은 탄소섬유 에폭시 수지(TORAY T300/#3631)인 일방향 프리프레그를 적층하여 제작하였으며, 일방향 프리프레그를  $[0_{20}^{\circ}]$ 으로 적층한 후 오토크레브로 성형했다. 이때 초기 층간박리를 도입하기 위해 FRP 필름을 2매 절단하여 10층째와 11층째의 중앙에 삽입하며, 성형후 다이아몬드 커터로 절단했다. 더욱이 층간박리를 커터날로 손으로 약 10mm 진전시켜 시험편치수 대로 다이아몬드 커터로서 절단하였다. 층간박리 길이를 정확히 측정하기 위해 시험편의 측면을 연마페이퍼 #1500으로 경면상으로 사상하였으며 시험편의 측면을 실체현미경을 이용하여 관찰하고, 층간박리를 측정한다. Table 4에 본 연구에서 이용한 CF/EPOXY 프리프레그의 재료특성을 나타낸다.

### 4.2 정적 ENF 시험

하중점과 지지점에는 반경 3mm인 환봉을 이용하였다. 재료시험기는 SHIMATU 재료시험기를 이용하였으며, 하중점의 변위속도는 0.05, 0.5,  $5 \times 10^{-3}$ m/s에 대하여 변위제어로 실험을 행하였다.  $0.5 \times 10^{-3}$ m/s의 변위속도로 변위제어 실험한 대표적인 입력하중이력 실험결과의 예를

Table 4 Characteristics of CFRP prep

	0°	90°
Tensile strength[MPa]	1,764	78.4
Tensile modulus[GPa]	132.3	7.84
Breaking elongation[%]	1.3	1.0
Compressive strength[GPa]	1.568	·
Compressive modulus[GPa]	127.4	·
Poisson ratio	0.34	·

Fig.7에 나타냈다. Fig.9에서 하중이 임의시간에 급격히 감소하는데 이것은 층간박리 진전의 순간으로 보면, 층간박리 진전이 개시하는 임계하중  $P_c$ 가 구해지고, J적분의 평가식에 대입하면 에너지해방률의 정의에 따라 고전보이론에 기초를 두고 얻어진 평가식  $G_{II}$ 와 같은 층간파괴 인성치<sup>11)</sup>  $J_{IIc}$ 가 구해진다.

$$J_{IIc} = \frac{9P_c^2 a^2}{16Ew^2 H^3} \quad (19)$$

여기서 a는 박리길이이다.

본 연구에 있어서는 임계하중을 결정하는 방법으로서 시험편 중앙에 작용하는 하중만을 측정하고 있으므로, 그 측정된 하중이 극대치로 되는 시간을 층간박리가 진전을 개시하는 시간  $t_c$

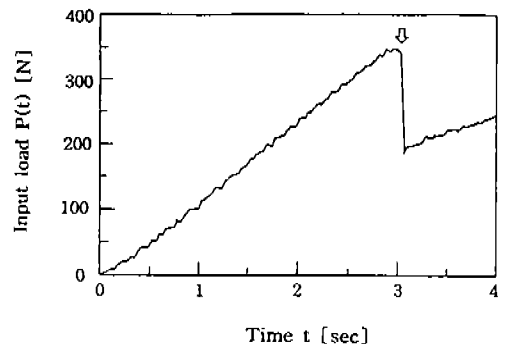


Fig.9 Input load history in static ENF test (displacement velocity :  $0.5 \times 10^{-3}$ m/sec)



로 하고, Fig.9에서  $\Downarrow$ 표로 나타냈다. 또 그 시간에서의 하중을 임계하중  $P_c = P(t_c)$ 로 하여 충간파괴인성치를 구하기로 한다.

### 4.3 동적 ENF 시험

실제, 제작한 부하제어를 행하는 Split Hopkin-son 붕법을 이용한 시험장치에 의해 동적 ENF 시험을 행했다. ENF시험편에 작용하는 하중 및 지지반력의 산출은 동적 3점굽힘 시험을 행해 입력봉 및 출력봉의 스트레인을 측정하여 2 개 이지법에 의해 구하였다. 동적 굽힘시험에 의해 측정된 시험편 이면의 스트레인과 수치계산에 의해 구한 스트레인을 비교하므로써 경계조건으로서 지지반력을 이용해서 해석조건을 만족하는 가를 확인하였고,  $\int$  적분을 수치계산에 의해 구할때의 해석조건을 결정하였다. 파괴인성치의 계산은 구해진 입력봉 및 출력봉의 하중을 경계조건을 이용하여 ENF시험편의 변위의 방정식을 풀면 변위의 라플라스 변환해 특히,  $\int$  적분의 이력이 구해진다. 시험편의 충간박리가 진전할 때의 시간 즉, 하중이 급격히 감소할 때의  $\int$  적분의 값으로부터 시험편의 파괴인성치가 구해진다. 파괴인성치를 도출할 때  $\int$  적분과 포텐셜에너지 해방률은 같은 의미이며 모드II에서 에너지해방률은 다음식과 같다.

$$g_{II} = \frac{K_{II}^2}{E} \quad (20)$$

여기서 E는 시험편의 영률로서 134GPa이다.

## 5. 실험결과 및 고찰

충격봉을 약 0.25MPa로 시험편에 충돌시켰을 때의 동적 ENF시험 및 해석결과를 Fig.10~11에 나타낸다. 본 연구에서는 하중이력을 정확히 파악하기 위하여 버퍼에 고무를 이용하여 충격 실험을 행했다. 공기압  $p_a = 0.25MPa$ 에서 충격봉을 가속하고, 충격속도  $V_0 = 5.75m/s$ 에서 완충제를 매개로하여 입력봉에 충돌시켰으며 충간

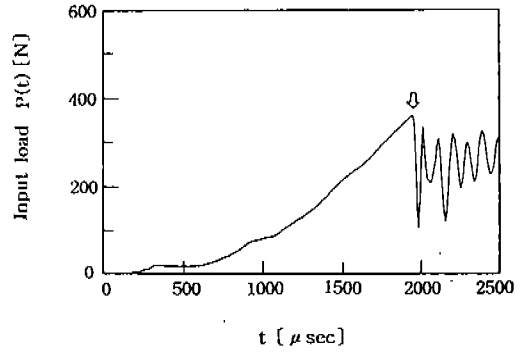


Fig.10 Input load history in dynamic ENF test

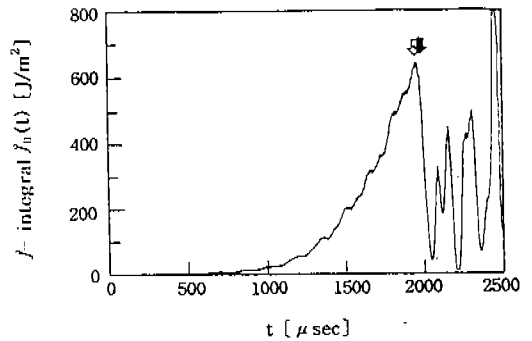


Fig.11  $\int_{II}$ -integral history in dynamic ENF test

박리가 진전할 때의 하중점 변위속도는 약 6~9m/s였다.

Fig.10에 충격봉을 충돌시킬 때의 입력하중이력을 나타냈고, 충간박리가 진전한 시간  $t_c$ 를  $\Downarrow$ 표로 그림중에 나타냈다. Fig.11에 입력하중 및 출력하중이력의 결과로부터 구한  $\int$  적분  $\int_{II}(t)$ 를 나타냈으며 시험편 중앙에 하중이 작용한 시간을 원점으로 했다.

또한 이들의 결과에는 10kHz의 로패스필터 (low pass filter)를 이용해서 고주파진동을 제거한 결과이다.

파괴인성치를 결정하기 위해서 먼저 입력하중이력이 극대치로 되는 시간을 충간박리가 진전하는 시각  $t_1$ 으로 해서 Fig.10에  $\Downarrow$ 표로 나타

났다. 또  $\int$  적분이 극대치로 되는 시각을  $t_2$ 로 해서 Fig.11에  $\downarrow$ 로 나타냈다.  $t_1$ 과  $t_2$  사이에는 약간의 차이가 보여진다.

어느쪽 시각의  $\int$  적분의 값을 이용해서 파괴인성치를 구할 것인가에 대해서는 의견이 있었지만  $\int$  적분을 도출하는 식은 박리진전의 수치를 이용하고 있으며  $t_2$ 에서는 박리가 이미 진전하고 있으므로 식의 조건에 적합하지 않다고 생각되며 공학적인 견지에서 안전성을 고려할 때  $\int$  적분을 높게 평가하는 것은 위험하다.

따라서 본 연구에서는 시각  $t_1$ 에서  $\int$  적분의 값을 이용해서 파괴인성치를 구했다.

파괴인성치를 도출할 때  $\int$  적분과 포텐셜에너지 해방률은 같은 의미이며 모드II에서 에너지해방률 식(20)에 본 연구에서 얻은  $\int_{II}(t)$ 값으로 약  $630 [J/m^2]$  과 시험편의 영률  $134GPa$ 을 대입하면 파괴인성치는 약  $9.19 [MN/m^{3/2}]$ 였다.

또한, 동적 ENF 시험시 박리가 도입된 지점 및 박리가 도입되지 않은 지점에서의 하중이력을 측정해 보면 양지점의 지점반력은 거의 같고, Fig.10에서와 같은 시험편 중앙에 작용하는 하중의 약 1/2이었으나 시험편 중앙에 작용하는 하중과 비교하면 상수에 지연이 발견되었다. 또, 지점반력이 급격히 감소하는 시간도 Fig.10에서 구한 시간과 거의 같다는 것을 알 수 있었다.

정적ENF 시험에서 구한 층간파괴 인성치  $J_{IIc}$ 와 동적 ENF시험에서 구한 층간파괴 인성치  $\hat{J}_{IIc}$ 를 비교하여, 층간파괴 인성치에 미치는 동적효과에 대하여 검토하기 위해서는 그 특성을 나타낸 파라메타를 정의할 필요가 있다. 본 연구에서는 파라메타는 다음식<sup>12)</sup>과 같은 층간박리가 진전한 시간의 층간전단변형 속도  $\dot{\gamma}_{xz}$ 를 이용한다.

$$\dot{\gamma}_{xz} = \frac{3H^2}{2L^3 + 3a^3} \frac{E_x}{G_{xz}} \delta \quad (21)$$

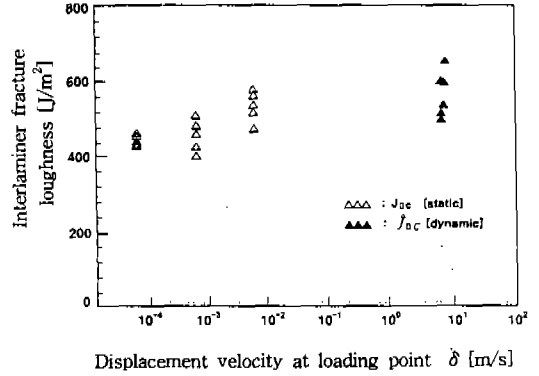


Fig.12 Relationship between interlaminar fracture toughness of modeII and displacement velocity at loading point

여기서,  $E_x$ 는 시험편의 섬유방향 종탄성계수,  $G_{xz}$ 는 횡탄성계수이다. 식(21)에서, 이들은 하중점의 변위속도  $\delta$ 의 일차함수로 되기 때문에 본 연구에서는 층간박리가 진전한 시간의 동적효과를 나타내는 파라메타로 하여 하중점 변위속도  $\dot{\delta}(t)$ 를 구했다. 하중점의 변위속도는 다음식에서 구해진다.

$$\dot{\delta}(t) = \left. \frac{\partial U_{x2}}{\partial t} \right|_{x=L} \quad (22)$$

Fig.12에 정적 ENF시험에 의해 구한 층간파괴 인성치  $J_{IIc}$  및 동적 ENF시험에 의해 얻어진 층간파괴 인성치  $\hat{J}_{IIc}$ 가 층간박리가 진전할 때의 하중점의 변위속도에 따라 어떻게 변화하는가를 나타냈다. 하중점 변위속도 범위에서 약간의 오차는 있지만 하중점 변위속도가 증가함에 따라 층간 파괴 인성치 역시 증가하는 경향이 발견된다.  $\int$  적분에 관해서는 10kHz, 하중점의 변위속도에 관해서는 20kHz의 로페스 필터를 이용하여 고주파 진동을 제거한 결과이다. 또한, Fig.10에서 구한 층간박리가 진전한 시간  $t_c$ 에서  $\int$ 적분값을 급격히 감소하고 있음을 알

수 있는데 이는 층간박리가 진전할 때 에너지가 해방되기 때문이라 생각된다. 이 층간박리가 진전한 시간  $t_c$ 에 있어서  $\hat{J}$  적분값  $\hat{J}_{0c}$ 가 층간 파괴 인성치로 된다.

## 6. 결 론

본 연구는 CFRP적층판의 동적 파괴인성의 평가방법을 제안한 논문으로 정적 ENF시험 및 본 연구에서 설계 제작한 Split Hopkinson 붕법을 이용한 동적 ENF시험을 행하여 CFRP적층판의 모드II에 대한 층간파괴 인성치를 구했고 동적 영향에 관하여 검토하였다.

주요 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 하중점 변위속도가 증가함에 따라 층간파괴 인성치는 증가하는 경향이 보여진다.
- 2) 동적 고전보 이론을 기초로 ENF시험편의 변위방정식을 도출할 때 층간박리 영향은 층간박리가 도입되어 있는 부분의 굽힘강성을 층간박리가 도입되지 않는 부분의 굽힘강성의 1/4로 하여 고려할 수 있었다.
- 3) 충격력을 측정하는 경우 하중점 및 지지점에 타단으로 부터의 반사파가 도달하기 전에 충격력 측정을 완료하는 것이 바람직하므로 입력봉 및 출력봉의 길이 ( $L_i$ ,  $L_o$ )는 파동전파속도를 고려하여 다음식의 범위가 바람직하다.

$$L_i, L_o \geq \frac{c_0 t_{\max}}{2}$$

- 4)  $\hat{J}$  적분이 극대치로 되는 시각과 입력하중이 극대치가 되는 시각 사이에는 약간의 오차가 발생하나 파괴인성치를 구할때는  $\hat{J}$  적분이 극대치로 되는 시각은 박리가 이미 진전하고 있으므로 입력하중이 극대치가 되는 시각을 기점으로 구하는 것이 적절하였다.
- 5) 2개이저법을 이용하므로써 입력봉 및 출력봉의 변형률을 측정하므로써 시험편중앙에

작용하는 충격하중과 지점반력을 산출할 수 있다. 하중이력은 양지점의 반력과 거의 같고 시험편중앙에 작용하는 하중의 약 1/2이었으나 시험편 중앙에 작용하는 하중과 비교하면 상승에 약간의 지연이 발견된다.

## 후 기

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구조성비(기계공학: ME96-C-22)에 의해 연구되었습.

## 참 고 문 헌

1. 影山和郎, "破壊力學の 応用における 新しい 展開3. 高分子材料の 強度評価への応用", 材料, 39-438, p. 325, 1990.
2. L. A. Carlsson and R. B. Pipes, "Experimental characterization of advanced composite materials", Englewood Cliffs, N. J., 1987.
3. D. J. Wilkin., J. R. Eisenmann, R. A. Camin, W. S. Margolis and R. A. Benson, "Characterizing Delamination Growth in Graphite-Epoxy", Damage in Composite Materials, ASTM STP775, p. 168, 1982.
4. A. J. Russell and K. J. Street, "Moisture and Temperature Effects on the Mixed-Mode Delamination Fracture of Unidirectional Graphite/Epoxy", Delamination and Debonding of Materials, ASTM STP876, p. 349, 1985.
5. L. A. Carlsson, J. W. Gillespie, Jr. and R. B. Pipes, "On the Analysis and Design of the End Noched Flexure(ENF) Specimen for Mode II testing", Journal of Composite Material, 20, 1986, 20, p. 594, 1986.
6. H. Raza and A. S. Kobayashi, "Delamination in cross-ply laminated com-

- posite subjected to low-velocity impact", AIAA Journal, 31, p. 1498, 1993.
7. 小泉曉, 松本浩之, "工學のにめの數理解析 I", 實教出版, 1975.
  8. 林卓夫, 田中吉之助, "衝擊工學", 日刊工業新聞社, 1988.
  9. 日下貴之, 黒川知明, 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.
  10. S. Ujihashi, "An intelligent method to determine the mechanical properties of composites under impact loading", composite structures, 23, pp. 149~163, 1993.
  11. A. J. Russel and K. N. Street, "Moisture and temperature effects on the mixed-mode delamination fracture of unidirectional Graphite/Epoxy", ASTM STP 876, p. 349, 1985.
  12. H. Maikuma, J. W. Gillespie, Jr. and D. J. Wilkins, "Mode II Interlaminar Fracture of the Center Notch Flexural Specimen under Impact Loading", Journal of Composite Materials, 24, p. 124, 1990.