

# CFRP 적층판의 수지함량이 층간파괴인성치에 미치는 영향

강태식\*(조선대 대학원 정밀기계공학과), 김지훈(조선대 대학원 기계설계공학과)  
 심재기(조선대 기계공학부)

## Interlaminar Fracture Toughness of CFRP Laminate Plates by Resin Content

T. S. Gang(Mech. Prec. Eng. Dept., CSU), J. H. Kim(Mech. Design Eng. Dept., CSU)  
 J. K. Sim(Mech. Eng. Dept., CSU)

### 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/EPOXY laminated plates. In this 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 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  $\dot{J}$ -integral and displacement velocity at a measuring point. Also, it is thought that the dynamic fracture toughness of two kind specimen with the increase of displacement velocity becomes great at a measuring point with in the range of measurement.

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

### 1. 서론

탄소섬유강화복합재료(CFRP)는 금속재료나 다른 재료와 비교하여 비강도 및 비강성이 높고 우수하며 내식성, 내약품성 등이 높아 고속화 및 경량화가 중요시되는 항공기, 우주 구조물이나 스포츠 용구, 그리고 의료용기 등에 폭넓게 적용되고 있다. CFRP는 그 특성상 일반적으로 적층판으로 이용되는데 이 CFRP 적층판은 저사이클 충격시에 있어서도 비교적 쉽게 층간박리나 모재크랙 등의 내부손상이 발생한다.

또한, 층간박리를 갖는 CFRP 적층판에 다시 하중을 가하면 박리가 전파하여 구조전체의 파괴에 이르는 경우가 있다. 그러므로 이와 같은 파괴를 예측하기 위해서 층간박리의 전파를 파괴역학적 관점에서 균열의 전파로 간주하고 응력확대계수와 에너지 해방률 등을 구해 그 임계치를 정하고 충격하중에 대한 층간파괴 인성치를 파악하는 것이 중요하다.

다 그래서 정하중 뿐만 아니고 충격에 대한 층간 파괴 인성치의 계산방법에 관해서도 연구가 행해지고 있다.

예를 들면 제측 데이터에서 파괴인성치를 구하는 데는 준정적인 하중이 작용하는 경우의 정적에너지 해방률에 대해 운동에너지의 영향을 보정하는 방법, 혹은 유한요소법에 의한 동적 에너지 해방률을 구하는 방법등이 있다. 그러나 충격하중이 작용할 경우와 준정적 하중이 작용한 경우와는 시편의 변형모드가 다르고 응력분포도 다르게 된다고 생각된다. 또한 유한요소법에 의한 방법에서는 변질한 수치계산을 하지 않으면 안된다는 문제가 있다. 따라서  $\dot{J}$  적분값에서 동적 층간파괴 인성치를 구할 경우 동적효과를 고려한 검토와 인터리브층에 수지함량이 층간파괴 인성치에 미치는 영향을 고려해 볼 필요가 있다.

따라서 CFRP 적층판에 인터리브 수지층을 삽입하여 단일방향으로 적층한 각각의 시편에 대해 스프

릿·홉킨슨법을 이용하여 동적 ENF시험을 행하고자 한다

ENF 시험을 보로 근사하여 동적해석을 행하는 것에 의해  $\int$ 적분 값에서 동적 충전파괴 인성치를 간편하게 구하고 동적효과에 관해 검토하며, 이와 더불어 인터리브층과 각 시편의 수지함량이 충전파괴 인성에 미치는 영향을 명확히 하고자 한다

## 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 충전박리는 시험편전단 중앙에 도입하였으며 폭이  $b$ 인 시험편으로 Fig. 1과 같이 3구간으로 나누어 고전보이론을 토대로 한 이론해석에 실험값을 적용해 충전파괴인성치를 구한다

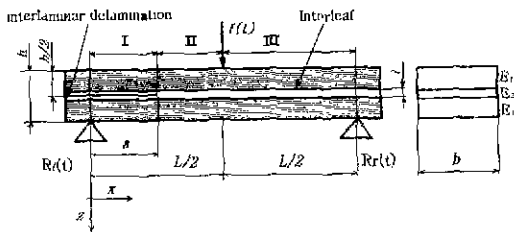


Fig 1 ENF Specimen

### 2.1 준정적 시험

3점 굽힘치구는 지점간 거리가 60mm이고 지점에는 반경 3mm의 환봉을 이용하였으며 만능계로시험기를 이용하여 하중점 변위속도를  $5 \times 10^{-5}$ ,  $5 \times 10^{-4}$ ,  $5 \times 10^{-3}$  m/s 로써 변위제어 방식에 의해 시험을 행한다. 이때 시험편 중앙에 작용하는 하중을 크로스헤드에 붙어있는 4,900N load cell 의 해 측정했다 측정된 하중은 하중이 급격히 감소하는 시간을 박리가 진전한 순간으로 보고 충전박리가 진전할 경우의 시험편 중앙처짐은 해석적으로 하여 다음과 같다.

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

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

### 2.2 동적 실험

스프릿홉킨슨법을 이용한 동적 ENF 시험장치를 Fig 2에 나타냈다.

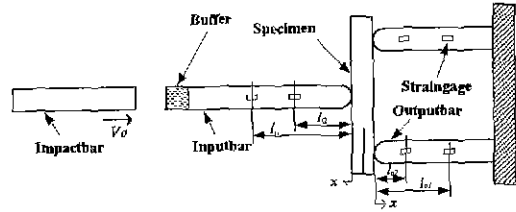


Fig. 2 Schematic of dynamic ENF test equipment

공기압으로 가속한 충격봉을 입력봉에 충돌시켜서 입력봉을 따라 일차원 응력파가 전파하여 시험편에 하중을 가한다. 측정된 입력봉과 출력봉의 스트레인을 이용하여 시험편 중앙에 작용하는 하중  $f(t)$  지점반력  $R_L(t)$ 과  $R_R(t)$ 를 구한다 봉의 지배방정식은 일차원 파동전파이론을 이용하여  $l_2 = l/2$ 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 Heaviside step함수이다.

또한  $\int$ 적분에 의한 동적충전파괴인성치를 구하기 위해 岸本등이 제안한  $\int$ 적분을 이용하여 구하면 다음과 같다.

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

또한 충격적인 외력을 받는 물체는 관성력의 영향을 포함한 경우를 고려하면 총 충전파괴인성치  $\int$ 는 다음과 같다

$$\int = J + \int_{x_1}^{x_2} \phi \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial w}{\partial x} \right) dx \quad (4)$$

여기서  $\phi = \rho_1(h-l) + \rho_2 l$

$\int$  적분이 급격히 감소하는 시간을 충전박리가 진전한 시간으로 보던 이때의  $\int$ 의 극대값이 충전파괴인성치이고 이때 하중점의 변위속도는 다음식과 같다.

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

## 3. CFRP 충전파괴인성치의 측정 및 고찰

### 3.1. 준정적 실험

제작된 2종류의 ENF시험편을 이용하여 하중점의 변위속도를  $5 \times 10^{-5}$ ,  $5 \times 10^{-4}$ ,  $5 \times 10^{-3}$  m/s 로써

준정적 실험을 했다 그 결과 얻어진 하중이력을 Fig 3, Fig. 4에 나타낸다.

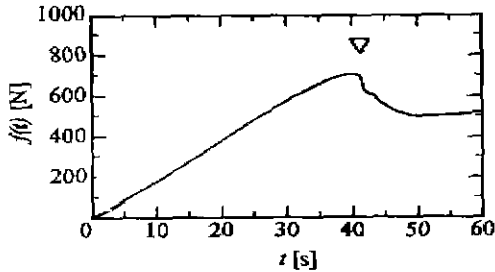


Fig. 3 Load history in static ENF test  
( $[0_{10}^{\cdot}/F_2/0_{10}^{\cdot}] \quad \dot{w}=5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ )

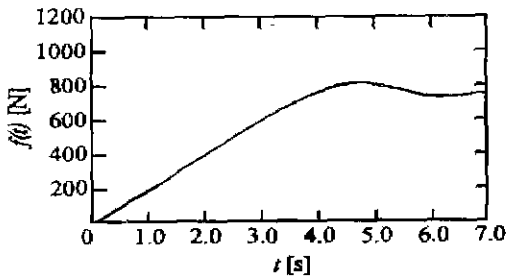


Fig. 4 Load history in static ENF test  
( $[0_{10}^{\cdot}/F_4/0_{10}^{\cdot}] \quad \dot{w}=5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ )

Fig. 3에서 임계하중  $f_c$ 는 박리가 진전한다고 생각된 점의 하중치로  $\nabla$ 로 표시하였으며 하중이 급락하는 점에서의 극대치이다. 그러나 Fig 4에서는 하중이 급격히 감소하지 않으며 층간박리가 한번에 진전하지 않고 서서히 진전함을 알 수 있으며 이는 인성이 큰 인터리브 수지층이 두껍기 때문이라 생각된다

### 3. 2 동적시험

제작된 두 종류의 ENF 시험편을 이용하여 동적시험 후 입력하중 및 지지반력에서 구한  $\hat{J}$ 적분 및 하중점의 변위속도이력을 Fig 5~Fig 8에 나타낸다.

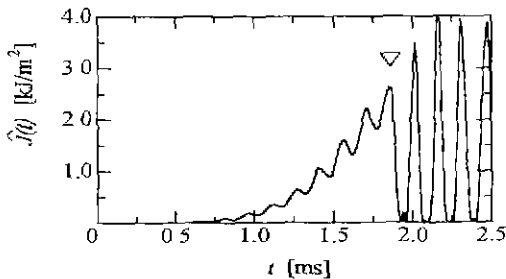


Fig 5  $\hat{J}$  integral history in dynamic ENF test  
( $[0_{10}^{\cdot}/F_2/0_{10}^{\cdot}]$ )

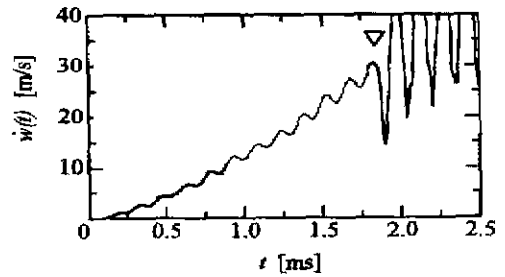


Fig. 6 Deflection velocity history at the center of ENF test  
( $[0_{10}^{\cdot}/F_2/0_{10}^{\cdot}]$ )

지지반력은 입력하중과 비교해서 상승작용이 지연되는 것을 보이고 층간박리가 진전한 시간에서 지지반력값은 하중의 절반정도임을 알 수 있다. 또한 적층구성이  $[0_{10}^{\cdot}/F_4/0_{10}^{\cdot}]$ 인 경우가  $[0_{10}^{\cdot}/F_2/0_{10}^{\cdot}]$ 인 경우, 즉 인터리브 수지층이 두꺼울수록 층간박리가 진전한 경우의 하중값이 증가하고 있음을 알 수 있다

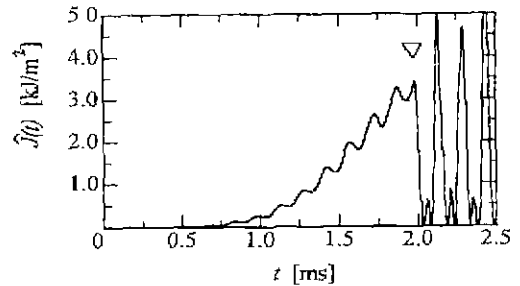


Fig 7  $\hat{J}$  integral history in dynamic ENF test  
( $[0_{10}^{\cdot}/F_4/0_{10}^{\cdot}]$ )

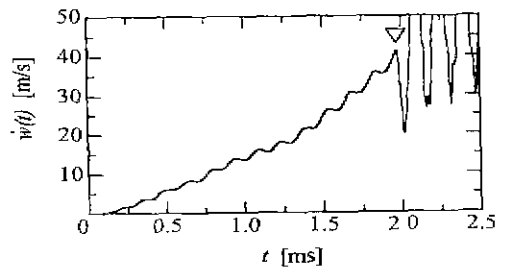


Fig 8 Deflection velocity at the center of ENF test  
( $[0_{10}^{\cdot}/F_4/0_{10}^{\cdot}]$ )

또한 그림에서  $\hat{J}$ 적분 및 하중점의 변위속도이력도 입력하중 및 지지반력과 마찬가지로 층간박리가 진전한 시간에서의 값이 급격히 감소하고 이 시간에서  $\hat{J}$ 적분값이 동적층간과피인성치로 된다. 2종류의 시험편 모두 진동이 나타나며 이것은 변형

과정에 있어서 하중점의 변위속도가 크기 때문에 관성력의 영향이 크게 나타나기 때문이라고 생각된다.

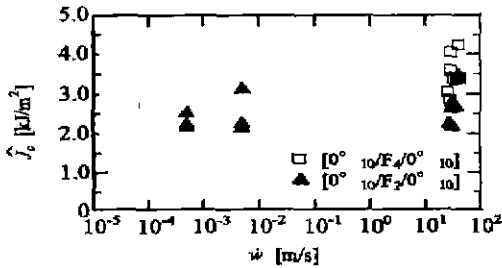


Fig. 9 Relation between fracture toughness and deflection velocity

Fig 9는 두 시험편의  $\dot{J}$  적분하중에서 구한 층간 파괴인성치와 층간박리가 진전할 시간에 있어서의 하중점 변위속도와와의 관계를 나타낸다. 각 시험편 모두 층간파괴인성치에 다소의 오차는 있기는 하지만 하중점의 변위속도가 증가함에 따라 층간파괴인성치가 증가하는 경향이 보이며  $[0_{10}/F_2/0_{10}]$ 보다 인터리브 수지층이 두꺼운  $[0_{10}/F_4/0_{10}]$  시험편이 층간파괴인성치가 큼을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 인터리브가 삽입된 CFRP 적층판의 ENF 시험을 행하여 다음과 같은 결과를 얻었다

- (1) 시험편에 작용하는 하중이 극대가 되는 시간인 층간박리진전 개시시간  $t_0$ 를 통해 임계하중  $f_c$ 를 알 수 있고  $f_c$ 를 이용하여 층간파괴인성치를 구하는 것이 가능했다
- (2) 인터리브층 수지층이 두꺼운  $[0_{10}/F_4/0_{10}]$  시험편이 층간박리가 한번에 진전하지 않고 서서히 진전함을 알 수 있으며 이는 인터리브층에 따라 층간파괴인성치가 다름을 알 수 있으며 변위속도에도 영향을 받음을 알 수 있었다.
- (3) 준정적인 경우나 동적인 경우 모두 수지함량이 증가할수록 임계하중 및 층간파괴인성치가 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서 CFRP 적층판의 층간파괴인성치를 결정하는 중요 인수는 수지함량에 따른 영향임을 알 수 있다

#### 참 고 문 헌

1 Carlsson, L.A., Gillespie, 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, p.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, p.1-15, 1987.
- 3 日下貴之, 黒川知明, 山内良昭, 'CFRP의 모드 II 層間破壞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의 動的破壞靱性値의 評價', 機論, 63-616, A, p.2568-2574, 1997.
- 5 김지훈, 김영남, 양인영, 심재기, '선진복합재료 적층판의 동적 층간 파괴 인성평가', 한국산업안 전학회지 제 13권 제4호, p.41-48, '98년 12월
- 6 阪部直規, 'FRP 積層板의 모드 II 動的層間破壞靱性値의 評價法', 東京工業大學 修士論文, 1994. 2
- 7 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, p.1049-1061, 1980