

<論 文>

# 간헐적인 층간접착을 이용한 Graphite/Epoxy 복합재료의 파괴 인성 개선

林 昇 奎\* · 洪 昌 善\*

(1984年 4月 10日 接受)

## Fracture Toughness Improvement of Graphite/Epoxy Composite by Intermittent Interlaminar Bonding

Seung Gyo Lim and C. S. Hong

### Abstract

The concept of intermittent interlaminar bonding is investigated as a means of improving the fracture toughness of cross-ply *Gr/Ep* composites without significant loss of tensile strength and modulus. The concept of linear elastic fracture mechanics (LEFM) is used to study the effects of strong bonded area and bonding composites. The experimental results indicate that the fracture toughness and notch strength of intermittent interlaminar bonded composites are improved and the tensile strength only decreased by 3~8% in comparison to those of the fully bonded composites. Damage zones around the crack tip are detected by the modified X-Ray non-destructive testing technique and the fractography. The improvement of toughness is explained based on the damage zones. The mechanisms of damage zone are shown to be caused by subcrack along the fiber on the 0° ply, matrix cracking along the fiber on the 90° ply, interlaminar delamination, and ply pull-out of the 0° ply.

### 1. 서 론

최근 복합재료의 경량구조에 대한 응용이 증가함에 따라 복합재료의 연구가 활발히 진행되고 있다. 복합재료는 높은 비강도 및 비강성의 장점을 갖고 있으나, 그 구성재료인 섬유와 기지의 취성으로 인하여 충격이나 균열에 대한 저항을 나타내는 파괴인성(fracture toughness)이 낮아서 이를 극복하려는 연구가 필요하

다. 이러한 파괴인성을 증가 혹은 개선하기 위하여 제시된 방법들로서는 하이브리드 복합적층 개념(hybrid composite concepts)을 이용하는 방법, 균열진전 억제 띠 개념(crack-arrestment strip concepts)을 이용하는 방법 및 간헐적인 접착(intermittent bonding) 방법이 있다. 이 중에서 앞의 두가지 방법은 어느정도 파괴인성의 증가를 얻을 수 있으나 그 대신 구조의 강성 및 강도의 저하를 수반하고 있다.

복합재료에 있어서 파손안전(fail safe)에 대한 효과적인 방법은 급작스런 균열진전(unstable crack growth)을 저지하는 방법이다. 대부분 기존재료의 균열진

\* 정회원, 한국과학기술원

전 억제(crack growth resistance)의 효과는 재료의 파괴인성으로 표현된다. 기존 금속의 경우는 균열선단에서 항복이 일어나서 균열선단 주위의 응력집중을 완화시키고 파괴에너지를 흡수하는 소성영역(plastic zone)이 발생한다. 섬유강화 복합적층판에서도 금속의 소성영역과 유사한 기능을 하는 손상영역(damage zone)이 균열선단 주위나, 자유선단에서 존재함이 밝혀졌다<sup>(4-5)</sup>. 섬유강화 복합적층판에서의 손상영역은 개개의 적층(ply) 내에서 섬유방향에 평행하게 발생, 성장하는 부균열(subcrack), 기지의 균열(matrix cracking), 섬유와 기지간의 분리현상(fiber & matrix debonding), 섬유의 절단(fiber breakage), 층간분리(interlaminar delamination) 등으로 구분된다.

근래에 이런 손상영역의 발생과 성장을 조절함으로써 취성의 탄소섬유강화 복합재료의 파괴인성을 증가시키기 위한 방법들이 개발되었다. 이 중에서 가장 효과적인 방법은 간헐적인 층간 접착방법(intermittent interlaminar bonding method)이라 하겠다<sup>(4-7)</sup>. 이 방법은 규칙적인 조그마한 구멍이 뚫어진 얇은 두께의 폴리에스테르 필름(일명 Mylar 필름)을 복합적층판 제작시 각 층사이에 넣어 각 층간의 접착강도를 부분적으로 떨어뜨려서 손상영역을 크게하여 층간 마찰일을 유발시키는 ply pull-out 현상, 층간분리현상이나 상당한 량의 새로운 자유표면을 형성함으로써 파괴에너지를 흡수하여 파괴인성의 증가를 가져올 수 있는 방법이다. 이 방법에서 적층판의 파괴인성을 변화시킬 수 있는 변수로서는 접착면의 비율(strong bonded area/total bonded area), 폴리에스테르 필름의 두께, 각 단층의 두께(thickness of lamina), 각 단층의 섬유방향(fiber orientation of lamina), 적층판의 적층순서(stacking sequence), 폴리에스테르 필름의 구멍의 형상(bonding shape) 등이 있겠으나 본 연구에서는  $[0^\circ/90^\circ]_2$ ,  $Gr/Ep$  복합 적층판에 대해서 접착면의 비율과 폴리에스테르 필름의 구멍의 형상이 적층판의 인장성질과 파괴인성에 미치는 영향에 대한 실험적인 결과를 얻고자 한다.

## 2. 복합적층판에서의 응력확대계수

균열이 있는 재료가 모드 I의 하중을 받을 때, 균열선단 부근의 응력분포는

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} f_{ij}(\theta) \quad (1)$$

가 된다. 여기서  $K_I$ 은 모드 I의 응력확대계수라 정

의하고 이 값은 외부에서 받는 하중상태, 균열길이, 균열이 있는 재료의 형상으로부터 결정된다.

등방성 재료의 한 쪽 노치(SENT, Single-Edge-Notched Tensile) 파괴시험편에 대한  $K_I$ 은 시편의 크기를 고려하여

$$K_I = \sigma_\infty a^{1/2} Y(a/W) \quad (2)$$

로 표시할 수 있다. 여기서  $\sigma_\infty$ 는 시편에 가해진 응력  $a$ 는 균열길이,  $Y$ 는 응력확대계수의 유한폭 수정계수( $K$ -calibration factor)이다. 한 쪽 노치(SENT) 파괴시험편에 대한 유한 폭 수정계수,  $Y$ 는  $0 \leq a/W \leq 0.6$ 에 대해서 Srawley[10]의 수정계수인 식 (3)을 사용하고

$$Y(a/W) = 1.99 - 0.41(a/W) + 18.70(a/W)^2 - 38.48(a/W)^3 + 53.85(a/W)^4 \quad (3)$$

$0.6 \leq a/W$ 에 대해서 Orange[10]의 수정계수인 식(4)를 사용한다.

$$Y(a/W) = \frac{1}{2} \cdot (a/W)^{1/2} \cdot (1-a/W)^{-3/2} \cdot (1+3 \cdot a/W) \quad (4)$$

J.F. Mandell<sup>(11)</sup> 등은  $Gr/Ep$  적층판의 한쪽 노치(SENT) 파괴시험편을 유한요소법으로 해석한 결과,

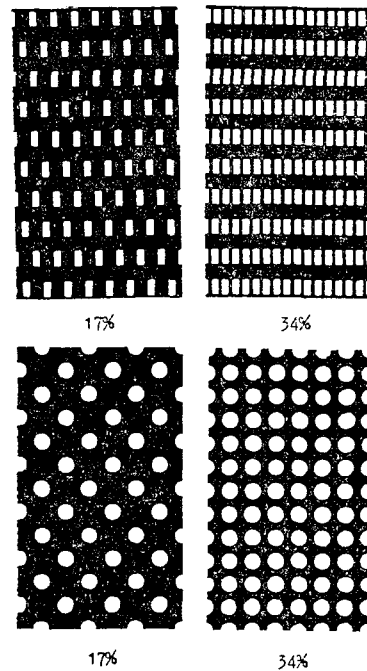


Fig. 1 Shapes of perforated polyester film

본 연구에서 채택한 크로스-플라이 Gr/Ep 적층판의 경우에 등방성 재료의 유한 폭 수정계수를 사용함으로써 응력확대계수가 거의 같은 값을 가짐을 보였다. 따라서  $[0^\circ/90^\circ]_{2s}$ 의 경우에도 등방성 재료의 수정계수를 사용하는 것이 가능함을 알 수 있다.

### 3. 실험

#### 3.1. 실험방법 및 재료

준비된 필름은 두께 0.015mm의 폴리에스테르 필름인데 필름의 구멍은 컴퓨터 펀치카드를 이용해서 카드 펀치기와 제작한 펀치를 사용해서 뚫었다. 뚫어진 구멍의 형상은 Fig. 1에서 보여주고 있다.

실험에 사용된 시험편은 일본 Toray 회사의 Gr/Ep S305 프리프레그(prepreg)를 사용하여 제공된 제작과정에 따라서 열간성형기(hot press)를 이용하여 제작한  $[0^\circ/90^\circ]_{2s}$  적층판으로부터 제작하였다. 적층판은 접착

**Table 1** Material properties of unidirectional laminates of torayca Gr/Ep composite

$E_{11}$ (GPa)	$E_{22}$ (GPa)	$G_{12}$ (GPa)	$\nu_{12}$
124.3	8.9	3.6	0.31

면 비율과 접착면 형상에 따라 각각 4가지(0%, 17%, 34%, 100%), 2가지를 준비하였다. 여기서 0%라 함은 구멍이 없는 폴리에스테르 필름은 각 층사이에 넣은 적층판을 말하면 100%는 폴리에스테르 필름을 넣지 않은 적층판을 말한다. 사용된 프리프레그의 재료상수는 Table 1에서 보여주고 있다.

각 적층판의 인장성질을 측정, 비교하기 위해서 인장시험편을 준비하였는데 방법은 ASTM에 명시된 방법을 채택하였다<sup>(13)</sup>. 또한 파괴거동을 조사하기 위해서 파괴시험편을 준비하였는데 각 경우당 노치깊이 대 폭의 비,  $a/W$ 는 0.15, 0.25, 0.35, 0.45의 4가지로 하였으며 각 경우당 4개의 시험편을 준비하였다(Fig. 2 참조).

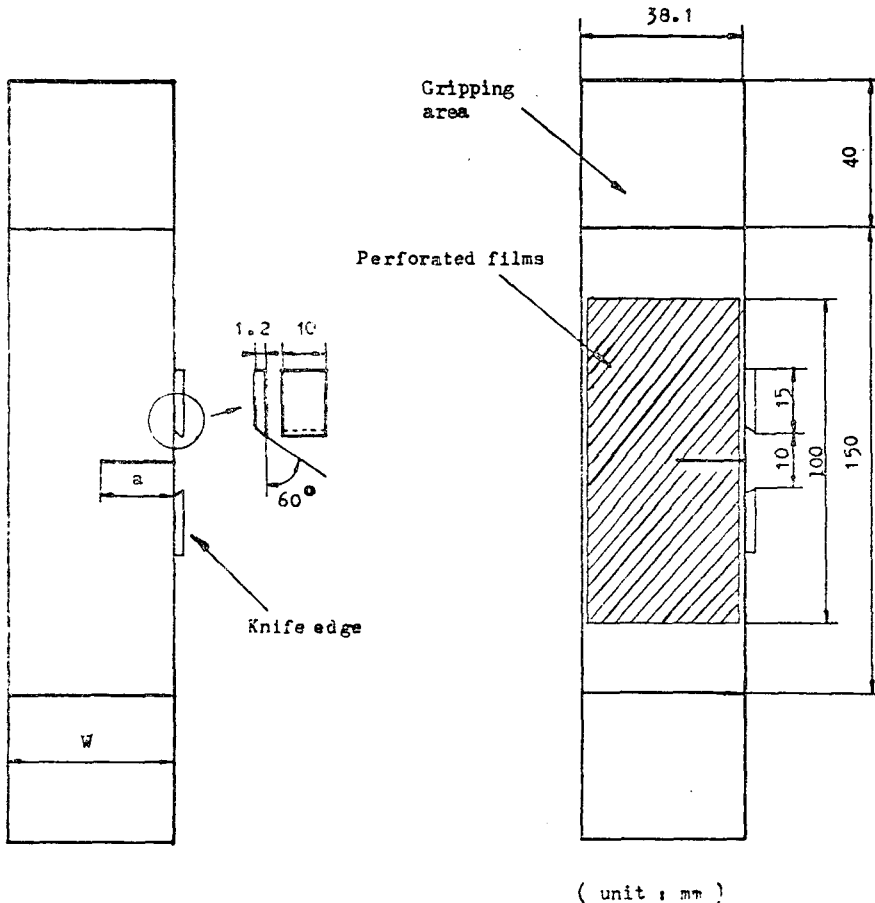


Fig. 2 Configuration of SENT specimen

인장시험편, 파괴시험편 모두 그립(grip)에 들릴부분은 시편을 보호하기 위해서 두께 2mm의 알루미늄탭(tab)을 만들어 예폭시 접착제를 사용하여 붙였다.

인장시험은 1.5mm/min의 변위제어 하에서 실시하였으며 동시에 시편에 부착된 스트레인 게이지와 X-Y 기록기를 이용하여 하중-스트레인 곡선을 그려서 적층판의 인장성질을 얻었다. 파괴시험은 동적영향을 줄이기 위해서 0.25mm/min의 변위제어 하에서 실시하였으며 동시에 시편에 부착된 아크릴조각(즉 knife edge)를 이용하여 COD 게이지를 걸어서 하중-COD 곡선을 X-Y 기록기를 이용하여 그렸다. 인장시험, 파괴시험 모두 하중 변환기의 최대 용량이 10 ton인 인스트론(Instron) 재료시험기를 사용하였다.

손상영역 검출은 일본 Toshiba 회사 제품인 EX-260 GH, X-Ray 장비를 사용하였다. X-Ray 촬영은 전압 160 kV 하에서 X-Ray 머리(head)는 시편으로부터 140 cm 떨어져 있고, 사용된 필름은 Fuji #100이며, 노출시간은 10초를 주었다. 그러나  $Gr/Eb$  복합재료는 X-Ray 투과성이 좋기 때문에 보통 사용되는 X-Ray 촬영방법으로는 손상영역 검출이 불가능하다. 그러나 테트라브로모에탄(tetrabromoethane, TBE)을 손상영역이 존재하는 적층판에 칩투시킴으로써 X-Ray 이미지 형성을 향상시킬 수 있다<sup>(12)</sup>. 파단면 관찰은 Olympus 광학현미경을 사용하여 50배의 배율하에서 실시하였다.

### 3.2. 파괴인성 및 노치강도 결정

각 시험조건의 파괴거동을 비교하기 위해서 파괴인성,  $K_I$ ,  $K_{max}$ ,  $(K_R)_c$ ,  $(\Delta a)_c$ 와 노치강도  $\sigma_N/\sigma_t$ ,  $\sigma_F/\sigma_t$ 를 다음과 같이 결정한다.

(1) 파손 응력확대 계수(failure stress intensity factor),  $K_I$

파손 응력확대계수는 초기 노치길기와 Fig. 3과 Fig. 4의 하중-COD 곡선의 점 B에서 팝인(pop-in) 현상이 일어나려고 하는 하중으로부터 결정된다. 이 점은 Figs. 5, 6에서 보여주는 X-Ray 결과에서 알 수 있듯이 파괴시험편의 0°층에서의 부균열이 발생하거나, 90°층에서의 섬유방향을 따른 기지균열이 발생하여 손상영역을 형성하거나 혹은 전 두께에 걸친 작은량의 주균열(main crack)이 발생하는 점이다. 즉 노치를 갖는 적층판의 파손(failure)이 시작되는 점이다.

(2) 최대 응력확대계수(maximum stress intensity factor),  $K_{max}$

최대 응력확대계수는 초기 노치길기와 파괴시험편이

완전히 파괴될 때의 하중으로부터 결정된다. 이 값은 폴리에스테르 필름을 넣은 적층판이 필름을 넣지 않은 적층판에 비해서 어느 정도의 파괴에너지를 흡수하는지를 보여주고 있다.

(3) 임계 균열진전 저항치(critical crack growth resistance),  $(K_R)_c$ .

임계 균열진전 저항치는 파괴시험편이 완전히 파괴될 때의 하중과 손상영역을 고려한 Irwin의 균열길이 즉 컴플라이언스- $a/W$  곡선으로부터 구한 완전히 파괴될 때의 유효균열길이(effective crack length)로 결정된다. 이 값은 폴리에스테르 필름을 넣은 적층판에서의 접착강도 감소효과의 파괴에너지 흡수효과와 안정된 균열성장효과를 복합적으로 보여주고 있다.

(4) 완전히 파괴될 때까지의 유효균열길이 성장량,  $(\Delta a)_c$ .

완전히 파괴될 때까지의 유효균열길이 성장량은 완전히 파괴될 때까지의 손상영역을 고려한 Irwin의 균열길이, 즉 컴플라이언스- $a/W$  곡선으로부터 구한 완전히 파괴될 때의 유효균열길기와 가공된 초기 노치길이로부터 결정된다. 이 값은 폴리에스테르 필름을 넣은 적층판에서의 접착강도 감소효과가 안정된 균열성장효과에 미치는 영향을 보여주고 있다.

(5) 노치강도,  $\sigma_N/\sigma_t$ ,  $\sigma_F/\sigma_t$

노치강도는 각각 파괴시험편의 파손하중(failure load)과 완전히 파괴될 때의 하중(total fracture load)을 파괴시험편의 전 단면적으로 구한 응력을 각 시험편의 인장강도로 나눈 값으로써 노치민감도(notch sensitivity)를 나타내고 있다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1. 인장시험

인장시험은 필름을 넣고 복합적층판을 제작함으로써 생기는 접착강도 감소효과가 적층판의 인장강도, 탄성계수, 파단변형률에 어느정도 영향을 주는가를 검토하는데에 있다. Table 2에서 보여주는 바와같이 인장강도는 필름을 넣고 제작한 시험편, 즉 접착면 비율이 감소할수록 떨어지는(3~8%정도) 결과를 보여주고 있다. 다시 말해서 이 결과는 적층판의 접착강도 감소효과가 적층판의 인장강도에는 큰 영향을 주지못함을 알 수 있다. 이런 결과는 적층판의 적층순서에 그 이유가 있다고 할 수 있다. 즉 크로스 플라이(cross-ply) 적층판이 하중을 받으면 작은 하중 하에서 90°층에서의 파

**Table 2** Experimental and theoretical results of the tensile properties of  $[0^\circ/90^\circ]_{2n}$ , Gr/Ep composites (Using the rule of mixture)

$\alpha$ (%)	Composite thickness $T_c$ (mm)	Experimental fracture strain $\epsilon_f$ (%)	Tensile strength $\sigma_t$ (MPa)		Elastic modulus $E_c$ (GPa)	
			Theory	Expt.	Theory	Expt.
100	1.04	1.19±.05	793	775±49	66.58	64.5±1.9
<sup>a</sup> C-34	1.10	1.20±.05	724	751±29	60.35	62.8±1.5
<sup>b</sup> R-34	1.11	1.21±.06	730	746±40	60.35	62.2±1.0
C-17	1.12	1.20±.05	724	727±29	60.30	60.3±0.9
R-17	1.12	1.24±.06	748	750±41	60.30	60.3±1.5
0	1.14	1.19±.09	717	711±60	60.25	60.4±1.6

$a_c$ : Laminates with perforated polyester films of circular hole

$b_R$ : Laminates with perforated polyester films of rectangular hole

$c$ : Refer to Ref. (6)

손(failure)이 발생하게 된다. 따라서 적층판의 인장강도까지의 하중은 파손(failure)이 발생하지 않은  $0^\circ$ 층이 지탱하게 된다. 따라서  $90^\circ$ 층의 영향을 받지 않게 된다. 즉 층간응력의 영향을 받지 않게 된다. 따라서 적층판의 접착강도 감소효과가 적층판의 인장강도에 큰 영향을 주지 못하고 있다.

탄성계수는 필름을 넣음으로써 3~7%정도 감소하는 결과를 보여주고 있다. 이 결과는 폴리에스테르 필름이 적층판에서 제2의 상(phase)을 형성하고 있다는 가정을 잘 설명하고 있다.

파단변형률은 작 조건에 관계없이 1.2%로 거의 일정함을 보여주고 있다. 이런 이유로 파괴기준으로 최대변형률 이론을 사용해도 무방함을 알 수 있다.

또한 탄소(graphite) 섬유는 1.08% 내지 1.24%의 인장 변형률에서 파단되므로, 이 결과는  $0^\circ$ 층의 파단이 적층판의 완전 파단을 야기시킴을 보여주고 있다.

#### 4.2. 파괴실험

파괴실험은 필름을 넣고 복합적층판을 제작함으로써 생기는 접착강도 감소효과가 노치를 갖는 적층판의 파괴인성과 노치강도에 어느정도 영향을 주는가를 검토하기 위해서 한쪽노치(SENT) 파괴시험에 대해서 파괴실험을 수행하였다. Table 3, 4에서 보여주는 바와 같이 접착면 비율( $\alpha$ )에 따른 파괴인성과 노치강도를 살펴보면 다음과 같다.

파손 응력확대계수,  $K_f$ 는 초기 노치길이에 관계없이  $\alpha$ 가 감소할수록 약간 증가하는 경향을 보이나 실험 오차를 고려해 볼 때 이 결과는 무시할 수가 있겠다. 따라서  $\alpha$ 에는 무관하다고 볼 수 있다. 즉 노치를 갖는 크로스 플라이(cross-ply) 적층판의 파손하중은 접착강

도 감소효과의 영향을 받지 않고 있음을 알 수 있다. 그러나 초기 노치길이가 증가함에 따라, 즉 노치선단이 자유선단(unnotched free edge)에 가까울수록  $K_f$ 가 증가하는 경향을 보여주고 있다. 그 이유는 노치선단이 자유선단에 가까울수록 응력이 집중된 부분이 상대적으로 많기 때문에 손상영역이 많이 생김으로써 보다 많은 파괴에너지를 흡수하여 증가하는 것으로 보여진다.

최대 응력확대계수,  $K_{max}$ 에 대해서는  $\alpha$ 의 최적조건을 결정할 수가 없으나  $\alpha$ 가 감소할수록, 초기 노치길이가 증가할수록 20~30% 정도 증가하는 경향을 보여주고 있다. 즉 접착강도 감소효과가 손상영역의 성장을 유발시킴으로써 파괴에너지를 흡수를 용이하게 하고 있음을 알 수 있다.

임계 균열진전 저항치,  $(K_{Rc})$ 는  $K_{max}$ 와 동일하게  $\alpha$ 의 최적조건을 결정할 수가 없으나  $\alpha$ 가 감소할수록 초기 노치길이가 증가할수록 50~65% 정도 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이런 경향은 Fig. 4에서도 유추해낼 수도 있다. 즉 Fig. 4에서 보여주는 것과 같이 폴리에스테르 필름을 넣은 시편에서는 손상영역과 주 균열이 발생함으로써 생기는 팝인(pop-in) 현상이 많이 생김으로써 유효균열 길이와 파괴하중(total fracture load)이 증가함으로써  $(K_{Rc})$ 도 증가하게 된다.

완전히 파괴될 때까지의 유효균열길이 성장량( $\Delta a_c$ )는  $(K_{Rc})$ 와 유사한 경향을 보여주고 있다. 즉  $\alpha$ 가 감소할수록 90~160% 정도 증가하는 경향을 보여주고 있다. 따라서 폴리에스테르 필름을 넣음으로써 균열진전억제효과(crack growth resistance)를 얻을 수 있다. 노치강도,  $\sigma_N/\sigma_t$ ,  $\sigma_R/\sigma_t$ 는  $\alpha$ 가 감소할수록 각각 30~90%, 10~25% 정도 증가하는 경향을 보여주고 있다.

**Table 3** Comparison of fracture test results of laminates with perforated polyester films of circular hole for various  $a/W$  and strong bonded area ( $\alpha$ )

(A)  $a/W=0.15$

$\alpha$ (%)	$K_f$ (MPa. $\sqrt{m}$ )	$K_{max}$ (MPa. $\sqrt{m}$ )	$(K_R)c$ (MPa. $\sqrt{m}$ )	$(\Delta a)c$ (mm)
100	25±2	34±4	36	0.97
34	30±2	40±6	45	1.01
17	29±3	37±3	47	1.83
0	29±4	44±5	59	2.30

(B)  $a/W=0.25$

$\alpha$ (%)	$K_f$ (MPa. $\sqrt{m}$ )	$K_{max}$ (MPa. $\sqrt{m}$ )	$(K_R)c$ (MPa. $\sqrt{m}$ )	$(\Delta a)c$ (mm)
100	33±4	48±7	58	1.85
34	32±4	43±3	51	1.39
17	36±4	46±4	77	4.86
0	37±3	57±10	89	3.94

(C)  $a/W=0.35$

$\alpha$ (%)	$K_f$ (MPa. $\sqrt{m}$ )	$K_{max}$ (MPa. $\sqrt{m}$ )	$(K_R)c$ (MPa. $\sqrt{m}$ )	$(\Delta a)c$ (mm)
100	42±1	50±5	61	1.83
34	34±6	54±4	87	4.35
17	44±6	64±5	97	3.75
0	39±4	58±13	80	2.89

(D)  $a/W=0.45$

$\alpha$ (%)	$K_f$ (MPa. $\sqrt{m}$ )	$K_{max}$ (MPa. $\sqrt{m}$ )	$(K_R)c$ (MPa. $\sqrt{m}$ )	$(\Delta a)c$ (mm)
100	48±4	62±3	78	1.90
34	45±6	67±13	83	1.93
17	49±2	79±6	121	3.67
0	47±2	63±2	87	2.35

따라서 폴리에스테르 필름을 넣음으로써 생기는 접착 강도 감소효과가 노치강도 증가에 큰 영향을 끼칠 수 있다.

Table 5에서 보여주고 있는 접착면 형상에 따른 파괴인성과 노치강도의 실험적 결과를 살펴보면, 파손 응력확대계수는  $\alpha$ 에 무관하게 원형의 구멍이 뚫린 필름이 든 적층판이 10~35% 정도 큰 결과 보여주고 있으며, 최대 응력확대계수는 원형의 구멍이 뚫린 필름이 든 적층판이 20~35% 정도 큰 결과를 보여 주고 있다. 노치강도( $\sigma_N/\sigma_t$ )는 원형의 구멍이 뚫린 필름이 든 적층판이 15~50% 정도 증가하는 결과를 보

**Table 4** Comparison of notch sensitivity of laminates with perforated polyester films of circular hole for various  $a/W$  and strong bonded area ( $\alpha$ )

(A)  $a/W=0.15$

$\alpha$ (%)	$\sigma_F/\sigma_t$	$\sigma_N/\sigma_t$
100	0.188±.011	0.258±.027
34	0.237±.015	0.312±.048
17	0.237±.025	0.302±.024
0	0.238±.031	0.364±.037

(B)  $a/W=0.25$

$\alpha$ (%)	$\sigma_F/\sigma_t$	$\sigma_N/\sigma_t$
100	0.165±.019	0.235±.035
34	0.163±.023	0.222±.019
17	0.187±.012	0.239±.021
0	0.202±.019	0.312±.057

(C)  $a/W=0.35$

$\alpha$ (%)	$\sigma_F/\sigma_t$	$\sigma_N/\sigma_t$
100	0.140±.002	0.168±.016
34	0.119±.018	0.189±.015
17	0.155±.022	0.229±.017
0	0.145±.012	0.214±.046

(D)  $a/W=0.45$

$\alpha$ (%)	$\sigma_F/\sigma_t$	$\sigma_N/\sigma_t$
100	0.110±.008	0.144±.006
34	0.107±.015	0.156±.029
17	0.118±.006	0.191±.012
0	0.111±.010	0.158±.004

여주고 있다. 따라서 간헐적인 층간 접착 적층판의 파괴인성과 노치강도는 접착면 형상의 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

### 4.3. 파괴인성기구 검출

앞서 설명된 바와 같이 층간 접착강도 감소효과가 노치를 갖는 복합적층판의 파괴인성과 노치강도의 증가에 커다란 영향을 끼칠 수 있다. 그 주된 기구(mechanisms)가 노치선단에서 발생, 성장하는 손상영역이라는 보고가 발표되었다<sup>(4-7)</sup>. Figs. 5,6은 파손된 파괴시편을 X-선을 투과시켜서 찍은 파괴시편의 사진이다.

**Table 5** Comparison stress intensity factors and notch sensitivity for various  $a/W$  and strong bonding shape

(A)  $a/W=0.15$

$\alpha(\%)$	$K_I(\text{MPa}\sqrt{m})$	$K_{\max}(\text{MPa}\sqrt{m})$	$\sigma_F/\sigma_t$	$\sigma_N/\sigma_t$
*C-34	30±2	40±6	0.237±.015	0.312±.048
R-34	22±3	29±4	0.156±.032	0.232±.035
C-17	29±3	37±3	0.238±.025	0.302±.024
R-17	23±4	38±5	0.177±.031	0.298±.045

(B)  $a/W=0.25$

$\alpha(\%)$	$K_I(\text{MPa}\sqrt{m})$	$K_{\max}(\text{MPa}\sqrt{m})$	$\sigma_F/\sigma_t$	$\sigma_N/\sigma_t$
C-34	32±4	43±3	0.163±.023	0.222±.019
R-34	28±6	45±6	0.148±.027	0.235±.027
C-17	36±4	46±4	0.187±.012	0.239±.021
R-17	29±4	45±5	0.147±.023	0.229±.022

(C)  $a/W=0.35$

$\alpha(\%)$	$K_I(\text{MPa}\sqrt{m})$	$K_{\max}(\text{MPa}\sqrt{m})$	$\sigma_F/\sigma_t$	$\sigma_N/\sigma_t$
C-34	34±6	54±4	0.119±.018	0.189±.015
R-34	37±5	54±10	0.128±.013	0.188±.034
C-17	44±6	64±5	0.155±.022	0.229±.017
R-17	37±8	50±2	0.129±.029	0.174±.004

(D)  $a/W=0.45$

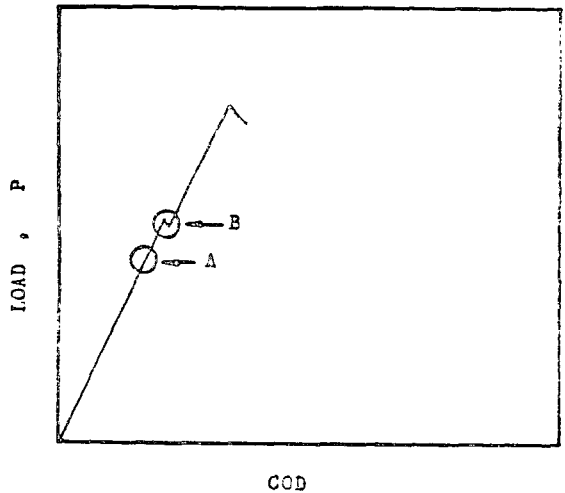
$\alpha(\%)$	$K_I(\text{MPa}\sqrt{m})$	$K_{\max}(\text{MPa}\sqrt{m})$	$\sigma_F/\sigma_t$	$\sigma_N/\sigma_t$
C-34	45±6	67±13	0.107±.015	0.157±.029
R-34	48±5	62±3	0.113±.011	0.146±.004
C-17	49±2	79±6	0.118±.006	0.191±.012
R-17	45±2	66±4	0.103±.005	0.153±.008

\*C : Laminates with perforated polyester films of circular hole

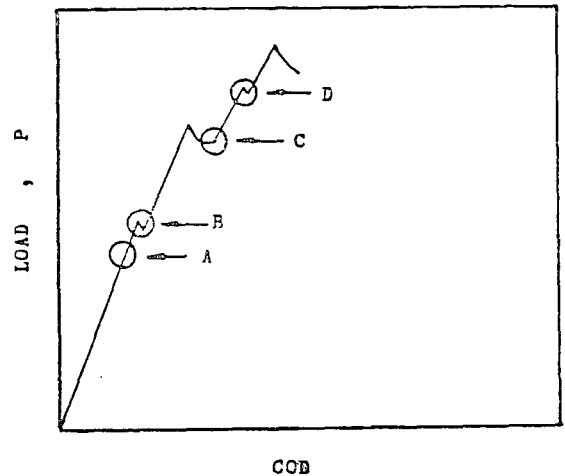
R : Laminates with perforated polyester films of rectangular hole

Fig. 5의 (a)는 Fig. 3의 점 A에서 제하(unloading)한 시편이고, (b), (c)는 점 B에서 제하한 시편이다. Fig. 5에서 보여주는 바와 같이 완전 접착된 적층판의 파괴거동을 살펴보면, 노치선단에서 0°층과 90°층에서의 기지파손(matrix failure)에 이어서 0°층에서의 부균열과 90°층에서의 섬유를 따른 기지균열을 동반한 작은 손상영역을 형성함을 알 수 있다. 이런 급작스런 손상영역을 형성하면서 Fig. 3의 점 B와 같은 작은 팝인(pop-in) 현상이 일어난다. 이 손상영역은 더

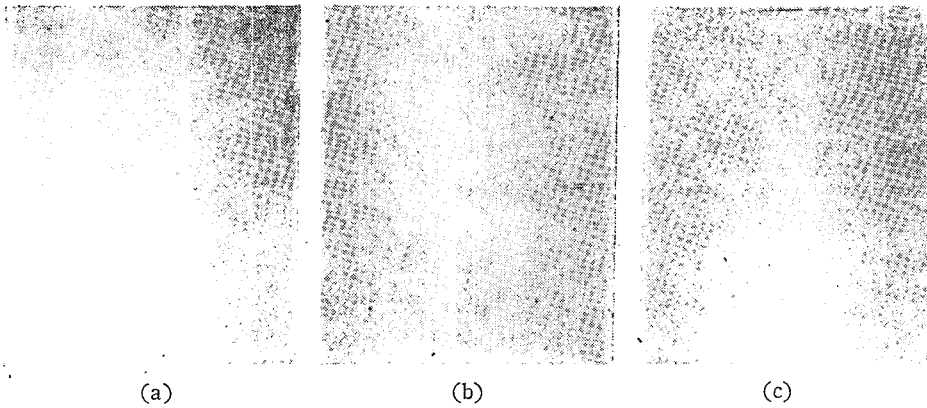
이상 성장하지 않기 때문에 어떤 임계하중에 도달하던 0°층의 섬유절단을 동반한 급작스런 불안정 균열 진전이 발생한다. Fig. 6의 (a)는 Fig. 4의 점 A에서 제하한 시편이고, (b)는 점 B에서, (c), (d)는 점 C에서, (e)는 점 D에서 각각 제하한 시편이다. 간헐적인 층간 접착 적층판의 파괴거동을 살펴보면 노치선단에서의 0°층과 90°층의 기지파손과 0°층의 작은 부균열과 90°층의 기지균열을 동반한 작은 손상영역 발생에 이어서 더 큰 손상영역을 형성하며 Fig. 4의 점 B와 같은 팝인(pop-in) 현상을 일으킨다. 이때 (b)에서 보여주는 바와 같이 0°층에서의 상당한 량의 부균열과 90°층



**Fig. 3** Typical load-COD curve for fully bonded laminates

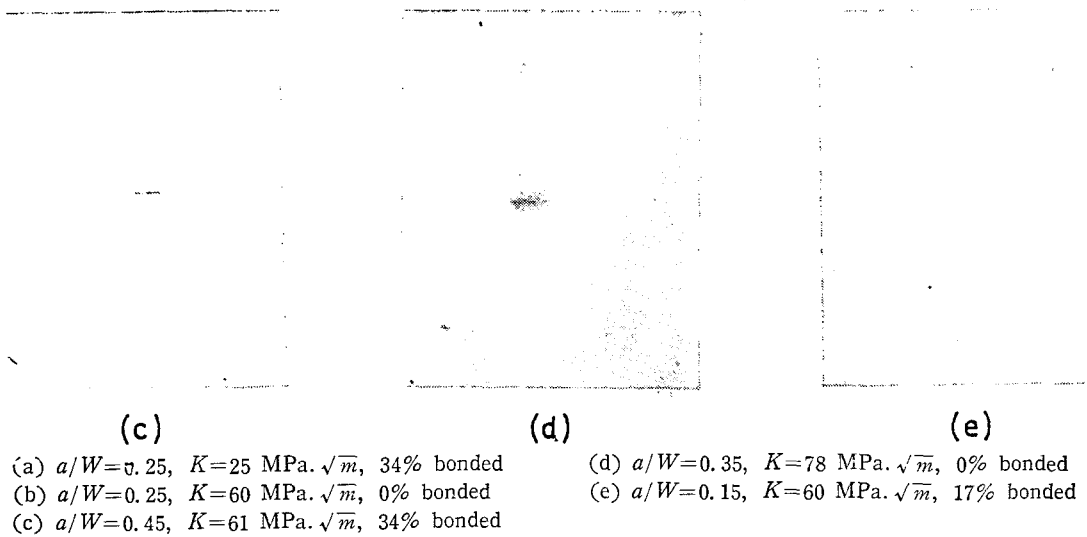
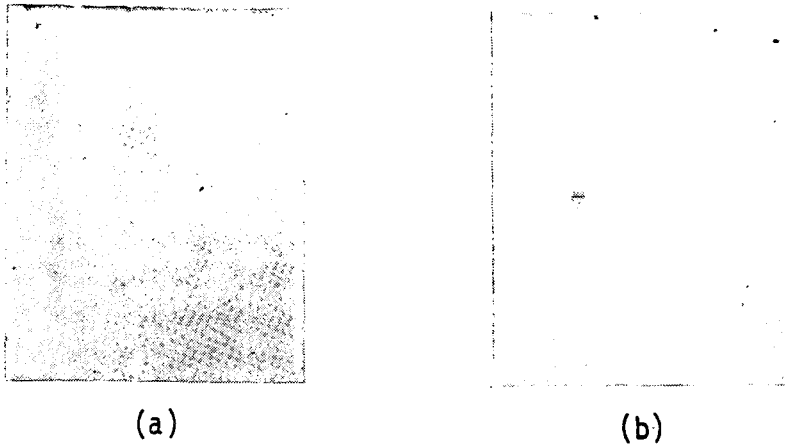


**Fig. 4** Typical load-COD curve for intermittent interlaminar bonded laminates



(a)  $a/W=0.25$ ,  $K=32 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$ , (b)  $a/W=0.15$ ,  $K=27 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$ , (c)  $a/W=0.35$ ,  $K=47 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$

Fig. 5 Radiographic results for fully bonded laminates



(a)  $a/W=0.25$ ,  $K=25 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$ , 34% bonded

(b)  $a/W=0.25$ ,  $K=60 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$ , 0% bonded

(c)  $a/W=0.45$ ,  $K=61 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$ , 34% bonded

(d)  $a/W=0.35$ ,  $K=78 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$ , 0% bonded

(e)  $a/W=0.15$ ,  $K=60 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$ , 17% bonded

Fig. 6 Radiographic results for intermittent interlaminar bonded laminates with perforated polyester films of circular hole



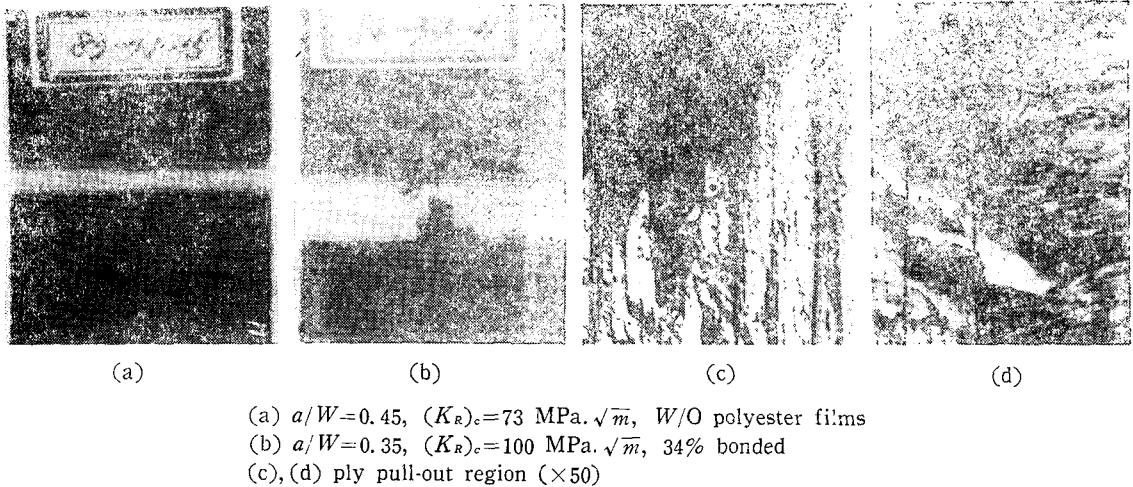


Fig. 7 Fracture surfaces of intermittent interlaminar bonded laminates with perforated polyester films of circular hole

에서의 섬유를 따른 기지균열과 층간 분리현상이 손상 영역을 형성하고 있음을 알 수 있다. 하중이 증가하면 (c)와 같이 새로운 큰 손상영역을 형성하거나 (d)와 같이 손상영역이 성장함으로써 파괴에너지를 흡수하여 급작스런 불안정 균열진전을 억제한다. 이때 Fig. 4에서와 같이 큰 팝인(pop-in) 현상이 일어난다. 하중이 더 이상 증가하면 (e)에서와 같이 0°층에서 발생하는 섬유절단과 부균열에 의한 0°층의 ply pull-out 현상을 일으킴으로써 새로운 자유표면을 형성하여 파괴에너지를 흡수하거나 불안정 균열진전이 발생한다.

Fig. 7은 파괴된 파괴시편과 파단면을 찍은 사진이다.

사진에서 보는 바와 같이 접착강도를 떨어뜨림으로써 ply pull-out 현상과 많은 량의 새로운 자유표면을 형성함을 알 수 있다. 따라서 파괴에너지를 흡수를 용이하게, 즉 파괴인성의 증가를 가져올 수 있다. 또한(c), (d)는 광학현미경으로 찍은 파단면 사진인데 0°층에서의 ply pull-out 영역내의 섬유방향의 부균열의 생성을 관찰할 수 있다.

5. 결 론

간헐적인 층간 접착방법을 채택하여 [0°/90°]<sub>2s</sub>, Gr/Ep 복합적층판을 실험한 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 간헐적인 층간 접착 적층판의 인장강도는 3~8% 정도, 탄성계수는 3~7% 정도 감소하는 반면, 파단변형률은 1.2%로 거의 일정하였다.

(2) 간헐적인 층간 접착 적층판을 제작함으로써 보다 많은 손상영역과 자유표면을 형성하여 파괴인성과 노치강도의 증가를 가져올 수 있다. 따라서 노치를 갖는 적층판의 불안정 균열진전 억제효과를 얻을 수 있다.

(3) 손상영역을 X-선 투과법으로 검출하였는데, 그 구성원은 다음과 같다. 0°층에서의 섬유를 따른 부균열, 90°층에서의 섬유를 따른 기지균열, 0°층의 ply pull-out 현상, 층간분리현상 등으로 구성되어 있다. 그리고 자유표면을 광학현미경으로 관찰하였는데 0°층의 ply pull-out 영역에서 섬유를 따른 부균열의 성장을 관찰할 수 있다.

후 기

본 연구의 일부는 한국과학재단의 지원에 의한 것으로 관계자께 심심한 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

(1) J.F. Mandell, S.S. Wang, and F.J. McGarry, "The Extension of Crack Tip Damage Zones in Fiber Reinforced Plastic Laminates", J. Composite Materials, Vol. 9, pp.266~287, 1975  
 (2) S. Gaggar and L.J. Broutman, "Crack Growth Resistance of Random Fiber Composites", J. Composite Materials, Vol. 9, pp.216~227, 1975

- (3) S.S. Wang, J. F. Mandell, and F.J. McGarry, "Three Dimensional Solution for a Through Thickness Crack in a Cross-Plied Laminates", ASTM STP 593, pp.61~85, 1975
- (4) W. Elber, "Toughening of Graphite-Epoxy Composite by Interlaminar Perforated Mylar Films", NASA Technical Memorandum 78643, March, 1978
- (5) L.C. Jea and D.K. Felbeck, "Increased Fracture Toughness of Graphite-Epoxy Composite Through Intermittent Interlaminar Bonding", J. Composite Materials, Vol. 14, pp.245~259, 1980
- (6) Y.W. Mai, B. Cotterell, and R. Lord, "On Fiber Composites with Intermittent Interlaminar Bonding", Progress in Science and Engineering of Composite, ICCM-IV, Tokyo, pp.271~277, 1982
- (7) S.S. Lee, "Effects of Intermittent Interlaminar Bonding on Toughening of *Gr/Ep* Composite", M.S. Thesis, KAIST, 1983
- (8) R.M. Jones, "*Mechanics of Composite Materials*", McGraw-Hill, 1975
- (9) B.D. Agarwal and L.J. Broutman, "*Analysis and Performance of Fiber Composite*", Wiley, 1980
- (10) T.W. Orange, "Some Effects of Experimental Error in Fracture Testing", ASTM STP 560, pp.122~133, 1974
- (11) J.F. Mandell, F.J. McGarry, S.S. Wang, and J. Im, "Stress Intensity Factors for Anisotropic Fracture Test Specimens of Several Geometries", J. Composite Materials, Vol. 8, pp.106~116, 1974
- (12) F.H. Chang, J.C. Coughman, J.R. Eisenman, and B.G.W. Yee, "Application of a Special X-Ray Nondestructive Testing Technique for Monitoring Damage Zone Growth in Composite Laminates", ASTM STP 580, pp.176~190, 1975
- (13) "Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber-Resin Composite", ASTM Designation: D3039-76