

CFRP 적층복합재료의 층간분리 평가

강기원*, 김정규**

An Analysis for Delaminations in CFRP Laminates

Ki-Weon Kang and Jung-Kyu Kim

Key Words : CFRP Laminates(CFRP 적층복합재료), Delamination(층간분리), Probabilistic analysis (확률론적 해석), Arrest toughness(정지인성)

Abstract

In this study, model for arrest toughness is proposed in consideration of fracture behavior of composite materials. Also, the probabilistic model is proposed to describe the variability of arrest toughness due to the nonhomogeneity of material. For these models, experiments were conducted on the Carbon/Epoxy composite plates with various thickness using the impact hammer. The elastic work factor used in J -Integral is applicable to the evaluation of energy release rate. The fracture behavior can be described by crack arrest concept and the arrest toughness is independent of the delamination size. Additionally, a probabilistic characteristics of arrest toughness is well described by the Weibull distribution function. An increasing of thickness raises a variation of arrest toughness.

1. 서론

섬유강화 복합재료는 두께방향 강화의 부족으로 인하여 외부 물체의 충격(foreign object impact)으로 인한 손상의 발생 가능성이 매우 크다는 단점을 가지고 있다.⁽¹⁾ 따라서 충격손상에 대한 보다 신뢰성 있고 안전한 설계방안을 확립하기 위해서는 이에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

충격손상의 대표적 양상인 층간분리는 대부분 에너지해방률(energy release rate, G)로서 평가되고 있다. 예를 들면, Maikuma 등⁽²⁾은 편측균열굽힘(end notch flexural) 시험편 등을 이용하여 일방향 적층재료(unidirectional laminates)의 모드 II 임계 에너지해방률을 평가하였으며 Xiao 등⁽³⁾은 이중외팔보(double cantilever beam) 시험편에 대한 모드 I 임계에너지해방률을 구하였다. 또한 Rhee 등⁽⁴⁾은 CLS(cracked lap specimen) 시험편에 대한 전에너지해방률을 평가함과 동시에 복합재료의 층간분리 현상에 대한 J 적분의 적용가능성을 제

시하였다. 그러나 이상의 평가방법은 제한된 형상의 층간분리에 대한 것이 대부분으로서 보다 일반적인 형상의 층간분리 평가에 적용하기에는 한계가 있다.

한편 복합재료는 이의 특유한 불균질성으로 인하여 손상 및 강도에 많은 흠여짐 현상(scattering)을 보이고 있다. 이를 고려하기 위하여 정적 및 피로특성평가에서는 Weibull 분포와 잔류강성 및 잔류강도 모델 등의 결합을 통한 다수의 확률론적인 해석이 수행되고 있다.^(5,6) 그러나 충격손상 평가에 대해서는 복합재료 자체의 변동성에 충격 특성 측정 시 발생하는 불확실성⁽⁷⁾이 복합되어 이를 고려한 설계방안은 쉽지 않다.

본 연구에서는 적층복합재료 구조물의 보다 안전하고 신뢰성 높은 설계방안을 마련하기 위하여 이의 대표적 충격손상인 층간분리의 진전거동을 지배하는 정지인성 평가 모델을 제시하고 또한 정지인성의 확률적 특성을 평가하였다.

2. 이론해석

2.1 J -적분과 에너지해방률

Rhee 등⁽⁴⁾은 층간분리에 대한 J -적분의 적용성을 평가하기 위하여 선형탄성적인 파괴거동의 경

* 한양대학교 대학원

** 회원, 한양대학교 기계공학부

우 J -적분과 에너지해방률 G 는 동일하다는 점을 바탕으로 다음의 관계를 구하였다.

$$J = G = \frac{1}{Bd} \eta_{el} U_{el} \quad (1)$$

여기서 B 와 d 는 각각 CT 시험편의 두께 및 리가멘트이다. 또한 η_{el} 는 탄성작용계수(elastic work factor)를, U_{el} 은 탄성변형률에너지를 의미하며 이는 하중과 변위의 항, $P\delta/2$ 로 표현된다. 또한 식 (1)을 통하여 균열이 있는 부재의 J -적분 또는 에너지해방률 평가를 위해서는 먼저 변형률 에너지와 에너지해방률 등의 관계를 규정하는 탄성작용계수를 구해야 한다. 이를 위해 식 (2)의 에너지해방률에 대한 관계식을 식 (1)에 대입하면 식 (3)의 탄성작용계수에 대한 식을 얻을 수 있다.

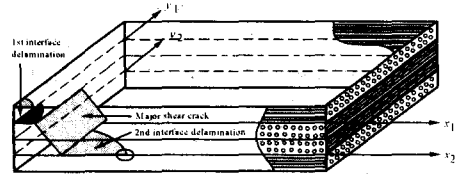
$$G = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da_{CT}} \quad (2)$$

$$\eta_{el} = \frac{d}{C} \frac{dC}{da_{CT}} \quad (3)$$

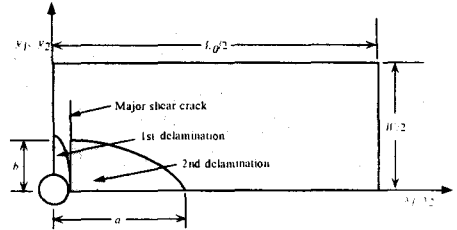
여기서 C 와 a_{CT} 는 각각 시험편의 컴플라이언스 및 균열길이를 의미한다.

Rhee 등⁽⁴⁾은 식 (1)과 (3)을 적층복합재료의 CLS 시험편에 적용하여 탄성작용계수가 층간분리만의 함수이며 또한 전에너지해방률의 평가에 유용함을 보고하였다. 그러나 이는 제한된 형상의 층간분리에 적용된 것으로서 횡방향 충격에 의한 층간분리와 같이 보다 일반적인 형상을 갖는 층간분리에 대한 적용여부는 불확실하다. 따라서 일반적인 형상의 층간분리에 적용하기 위하여 식 (1)과 식 (3)에 대한 재검토가 필요하다.

Fig. 1(a)는 CT 시험편과 적층복합재료의 상사성(analogy)을 검토하기 위하여 $[0_N/90_{2N}/0_N]$ 적층복합재료의 일반적인 충격손상의 1/4 모델을 나타낸 것이다. 여기서 충격손상은 모재균열, 섬유파단 및 층간분리로 구성되지만 이 중 주된 손상기구로 보고⁽⁸⁾되고 있는 층간분리에 주목하면 이의 선단은 CT 시험편의 균열선단에 대응된다고 가정할 수 있다. 이를 보다 명확히 검토하기 위하여 xy 평면에 투영한 충격손상을 Fig. 1(b)에 나타내었다. 이를 식 (3)과 함께 검토하면 CT 시험편의 작용계수는 리가멘트 면적에 작용하는 에너지를 J -적분으로 변환시켜 주는 인자이며, Fig. 1(b)의 층간분리가 일어나지 않는 면적은 CT 시



(a) Damage model and CT specimen



(b) Projected delamination area model

Fig. 1 A quarter damage model

험편의 리가멘트 면적에 해당됨을 알 수 있다. 따라서 충격을 받은 복합재료의 층간분리를 지배하는 J -적분 또는 에너지해방률은 다음과 같이 간단히 표현될 수 있다.

$$J = G = \frac{1}{(L_0 \cdot W - S)} \eta_{el} U_{el} \quad (4)$$

여기서 L_0 와 W 는 복합재료 판의 치수이며 S 는 전체 층간분리 면적이다.

한편 식 (4)를 이용하여 충격에 의한 층간분리의 J -적분 또는 에너지해방률을 구하기 위해서는 탄성작용계수를 평가해야 하므로 이를 위하여 충격으로 인한 층간분리의 진전속도는 충격체의 속도보다 매우 빠르다는 실험적인 관찰⁽⁹⁾을 이용한다. 즉, 층간분리가 진전하는 동안 적층복합재료는 거의 변형하지 않으므로 파괴는 처짐일정 조건에서 발생된다고 볼 수 있으며 이 경우의 에너지해방률은 다음과 같다.

$$G = \frac{1}{2} \frac{\delta^2}{C^2} \frac{dC}{dS} \quad (5)$$

따라서 식 (4)와 식 (5)를 통하여 다음과 같은 적층복합재료의 탄성작용계수를 얻을 수 있다.

$$\eta_{el} = \frac{(L_0 \cdot W - S)}{C} \frac{dC}{dS} \quad (6)$$

이상의 적층복합재료의 탄성작용계수는 층간분리의 함수로 정의되는 형상의존 파라미터로서 층

간분리가 일어나지 않는 면적에 작용하는 에너지와 에너지해방률의 관계를 규정하는 파라미터이며 또한 이를 이용하면 식 (4)의 에너지해방률 평가가 매우 용이해짐을 알 수 있다.

2.2 층간분리 정지인성

충격으로 인한 적층복합재료의 층간분리는 일 정크기로 불안정하게 진전한 후 정지되므로 이의 크기는 균열정지기구에 의해 지배된다고 보고되고 있다.¹⁷⁾ 즉 층간분리의 불안정 파괴와 균열정지는 균열진전력을 나타내는 에너지해방률 G 와 이의 한계값인 층간분리 정지인성 G_{arr} 의 관계를 통하여 설명된다. 따라서 정지인성의 정량화는 층간분리의 정지기구 평가에 매우 중요하다.

이러한 층간분리 정지인성은 충격에 의한 층간분리의 발생 및 정지가 처짐일정상 상태에서 발생한다는 조건을 이용하여 평가할 수 있다. 즉 층간분리 정지시의 처짐량 δ_{arr} 을 식 (4)에 도입하면 다음의 층간분리 정지인성 G_{arr} 에 대한 관계식을 구할 수 있다.

$$J_{arr} = G_{arr} = \frac{1}{(L_0 \cdot W - S)} \eta_{el} U_{el, arr} \quad (7)$$

여기서 $U_{el, arr}$ 는 층간분리 정지시의 변형률에너지로서 $\delta_{arr}^2/2C$ 로 표현된다.

3. 실험방법

3.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용한 재료는 Carbon/Epoxy 적층복합재료로서 일방향 프리프레그 시트(prepreg sheet)를 적층하여 오토클레이브방법으로 제작하였다. 이에 사용된 적층복합재료의 기계적 특성은 ASTM D3039-93⁽¹⁰⁾의 규정에 의거한 단축인장 시험으로부터 구하였으며 그 값은 Table 1과 같다. 푸아송비 ν_{xy} 는 $0^\circ/90^\circ$ 로 직교된 스트레인 게이지를 이용하여 구하였으며, G_{xy} 는 $\pm 45^\circ$ 스트레인 게이지법을 사용하여 구하였다.

시험편의 형상은 Fig. 2와 같이 판폭 $W=40\text{mm}$, 길이 $L=250\text{mm}$ 이며, 두께의 영향을 고려하기 위해 $[0_x/90_x/0_x]$, $N=3, \dots, 6$ 의 4가지 시험편을 사

Table 1 Mechanical properties of laminae

E_{xx} (GPa)	E_{yy} (GPa)	G_{xy} (GPa)	ν_{xy}
116.04	7.69	4.92	0.204

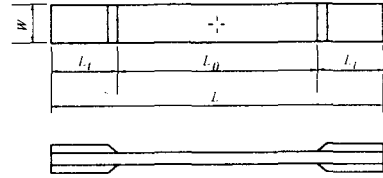


Fig. 2 Configuration of specimen

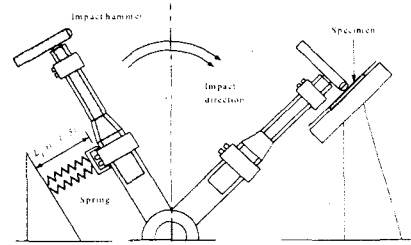


Fig. 3 Apparatus for impact test

용하였다.

3.2 충격 및 3점굽힘시험

충격시험은 Fig. 3의 시험장치를 사용하여 수행하였다. 임팩트해머(PCB Electronics, 086B03, 2.3 mV/N)는 회전원점에 부착된 막대에 고정하였으며 부착된 스프링의 길이를 5단계(충격위치 L_i , $i=1..5$)로 변화시켜 충격량의 크기를 조절할 수 있게 하였다. 충격하중은 증폭기와 아날로그 디지털 변환기를 통해 100kHz의 속도로 PC에 기록되었다. 또한 충격손상은 초음파현미경(Scanning Acoustic Microscope, Sonix HS1000 HiSPEED™, 15MHz)을 사용하여 촬영하였다.

한편 층간분리가 생성된 시험편의 컴플라이언스를 측정하기 위하여 3점굽힘시험을 수행하였다. 시험은 Instron model 1332를 사용하였으며 모든 경계조건과 부하장치는 충격시험과 동일하게 설정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 충격손상 평가

일반적으로 적층복합재료의 충격손상은 모재균열, 층간분리 및 매우 높은 충격에너지에서 주로 발생하는 섬유파단임이 보고되고 있다.⁽⁸⁾ Fig. 4는 초음파 현미경으로 촬영한 충격손상의 예로서 $[0_x/90_x/0_x]$ 적층복합재료의 두 번째 경계면을 촬영한 것이다. 그림에서 Carbon/Epoxy 적층복합재

료의 충격손상은 충격점 반대편 경계면에서 발생한 층간분리가 가장 지배적임을 알 수 있으며 이러한 경향은 본 연구에서 고려한 모든 두께의 적층복합재료에 대해 동일하였다.

또한 적층복합재료의 층간분리는 땅콩 또는 타원 형상을 띄고 있으며 그 크기는 최하층의 적층방향과 동일한 종방향(longitudinal)으로의 길이와 횡방향(transverse)길이를 특징 지을 수 있음을 알 수 있다. Fig. 5는 $[0_3/90_6/0_3]$ 의 층간분리의 크기를 충격위치에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 종방향으로의 층간분리 길이가 횡방향길이에 비하여 상당히 크며 양자 모두 충격위치에 따라 점차 증가하는 경향을 보이고 있다.

4.2 층간분리 정지인성

충격으로 인한 적층복합재료의 층간분리는 불안정하게 진전한 후 정지된다고 보고되고 있다.⁽⁷⁾ 따라서 층간분리 정지 시의 파괴에너지를 의미하는 정지인성의 정량화는 층간분리의 정지기구 및 크기 평가에 매우 중요하다고 할 수 있다.

임의의 층간분리가 있는 적층복합재료의 정지인성 평가를 위해서는 식 (6)과 (7)에서 알 수 있

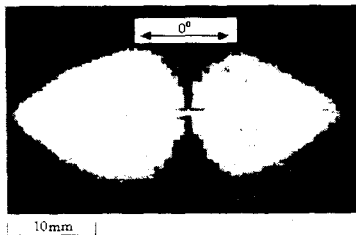


Fig. 4 Impact damage in $[0_6/90_{12}/0_6]$ laminate

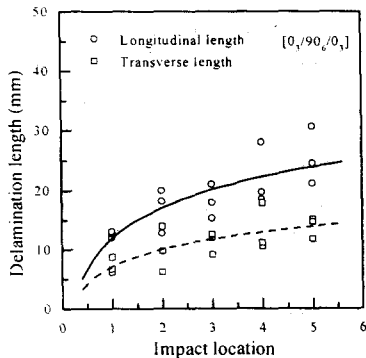


Fig. 5 Delamination length in $[0_3/90_6/0_3]$ laminate

듯이 층간분리 면적 S , 컴플라이언스 C , 탄성작용계수 η_{el} 및 변형률에너지 $U_{el, arr}$ 를 결정하여야 한다. 여기서 층간분리 면적은 비파괴검사를 통하여 구하며 컴플라이언스는 3점굽힘 시험을 통하여 얻을 수 있다. Fig. 6은 이상에서 구한 컴플라이언스와 층간분리 면적과의 대표적 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 컴플라이언스는 층간분리 면적에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 Wang 등⁽⁷⁾이 3점굽힘시험 및 유한요소해석을 통하여 보고한 결과와 유사하다.

또한 Fig. 7은 탄성작용계수를 층간분리 면적에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 탄성작용계수는 전체적으로 층간분리 면적의 증가에 따라 지속적으로 감소하는 경향을 보이고 있으며 또한 두께가 가장 얇은 $[0_3/90_6/0_3]$ 적층복합재료의 탄성작용계수는 다른 두께의 경우에 비해 상당히 낮게 평가되고 있음을 알 수 있다. 이를 통하여

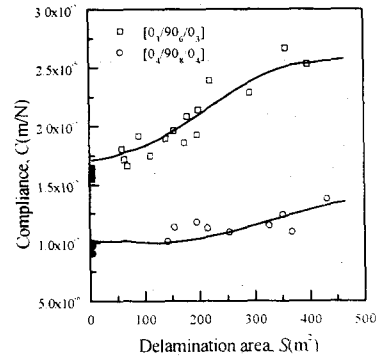


Fig. 6 Compliance vs delamination area

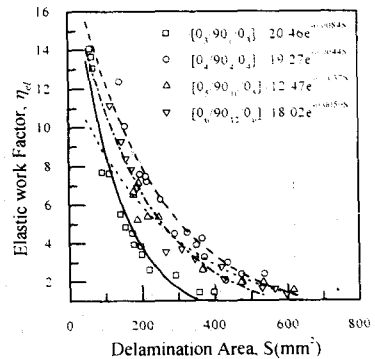


Fig. 7 Work factor vs delamination area

본 연구의 탄성작용계수는 층간분리의 함수로 표현되며 J -적분 또는 에너지해방률의 평가에 유용하다고 할 수 있다. 또한 $[0_3/90_6/0_3]$ 의 탄성작용계수가 그 이상의 두께를 가진 복합재료의 그것과 상이한 것은 이의 충격손상기동이 다른 두께의 경우와 다르기 때문이라고 판단된다.

이상의 결과를 토대로 층간분리 정지인성의 평가를 위해서는 식 (7)에서 알 수 있듯이 $U_{el, arr}$ 또는 층간분리 정지시의 처짐량 δ_{arr} 을 구해야 하지만 이의 실험적인 측정은 매우 어렵다고 알려져 있다.⁽⁷⁾ 따라서 충격시험에서 측정되는 하중-시간 곡선으로부터 간접적으로 측정하는 방법을 사용한다. 즉 충격으로 인한 층간분리는 최대충격하중의 시점에서 정지된다는 실험적인 관찰⁽¹¹⁾을 근거로 하여 최대 충격하중에 해당되는 변위를 계산한다. 이를 Fig. 7의 탄성작용계수와 함께 고려하면 최종적으로 층간분리 정지인성을 구할 수 있다. Fig. 8은 $[0_3/90_6/0_3]$ 와 $[0_6/90_{12}/0_6]$ 적층복합재료에 대한 층간분리 정지인성을 층간분

Table 2 Delamination arrest toughness

	12ply	16 ply	20 ply	24 ply
Mean (kJ/m ²)	8.605	4.562	3.226	3.653

Table 3 Weibull parameters

	12 ply	16 ply	20 ply	24 ply
α	8.19	7.11	5.48	3.96
β (kJ/m ²)	9.09	4.86	3.48	3.81

리의 면적에 대하여 나타낸 것이다. 층간분리 정지인성은 다소의 흠어짐 현상이 존재하지만 층간분리의 면적에 관계없이 일정한 영역의 값을 나타내고 있으며 Table 2는 모든 적층복합재료에 대한 인성의 평균값을 정리한 것이다.

4.3 정지인성의 확률론적 특성

층간분리 진전거동을 지배하는 역학적 인자인 정지인성의 정확한 평가는 구조물의 안전성 및 신뢰성 향상을 위해 매우 중요하다. 그러나 Fig. 8에서 알 수 있듯이 정지인성은 복합재료의 특성과 충격현상 자체의 변동성으로 인하여 흠어짐이 클 수 있다. 따라서 층간분리 정지인성의 변동성을 묘사하기 위해서는 이에 대한 확률론적인 해석이 요구된다.

적층복합재료의 정적 및 피로특성은 주로 대수 정규 또는 와이블 분포를 따르는 것으로 보고되고 있으므로 이러한 정지인성의 확률론적 특성을 평가하기 위하여 다음과 같은 2모수 와이블 분포를 적용하였다.

$$F_{G_{arr}}(x) = P[G_{arr} \leq x] = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (8)$$

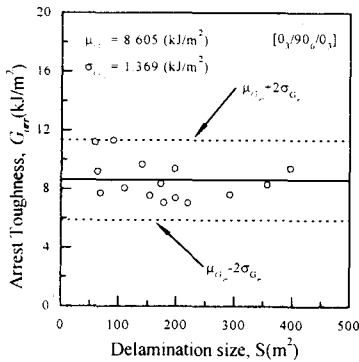
여기서 $F_{G_{arr}}(x)$ 는 파손확률, α 와 β 는 형상 및 척도계수이다. 이들 계수는 선형회귀법에 의하여 평가되었으며 Table 3은 이의 결과이다.

Fig. 9는 형상 및 척도계수를 이용하여 구한 층간분리 정지인성의 누적 분포함수와 식 (9)로 정의된 중앙순위 (median rank)를 이용하여 파손확률로 환산된 실험값을 나타낸 것이다.

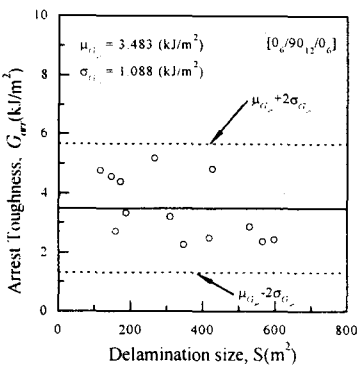
$$F_{G_{arr}}(x_i) = \frac{x_i - 0.3}{m + 0.4} \quad (9)$$

여기서 m 은 사용된 시험편의 수를, x_i 는 파손된 순서를 의미한다.

그림에서 층간분리 정지인성은 와이블 분포에



(a)



(b)

Fig. 8 Delamination arrest toughness

잘 근사되고 있으며 이를 통하여 정지인성의 통계적 특성은 2모수 와이블 분포에 의해 묘사됨을 알 수 있다.

한편 Fig. 9에서와 같이 $[0_6/90_{12}/0_6]$ 의 분포곡선이 $[0_3/90_6/0_3]$ 의 그것보다 산포가 심하게 나타나고 있으며 이는 전자의 경우가 정지인성의 변동폭이 크기 때문이라고 판단된다. 이를 보다 명확히 평가하기 위하여 다음과 같은 와이블 분포의 변동계수(coefficient of variance) C_v 를 도입하였다.

$$C_v = \left[\frac{\Gamma\left(\frac{2}{a} + 1\right)}{\Gamma^2\left(\frac{1}{a} + 1\right)} - 1 \right] \quad (10)$$

여기서 Γ 는 감마함수이다. Fig. 10은 이의 결과로서 두께가 증가함에 따라 변동계수는 지수적으로 증가하고 있다. 이러한 현상은 복합재료의 특성상 이의 적층수가 증가함에 따라 시험편의 불균질성이 더욱 증가하기 때문이라고 판단된다.

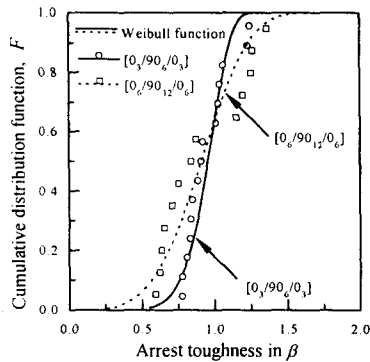


Fig. 9 CDF of arrest toughness

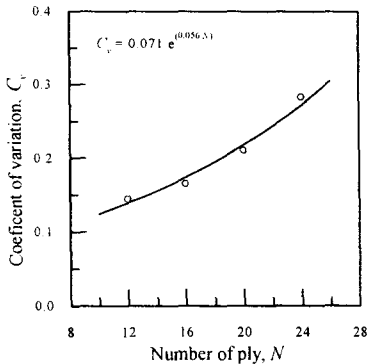


Fig. 10 COV according to thickness

6. 결론

본 연구에서는 Carbon/Epoxy 적층복합재료의 층간분리를 지배하는 정지인성 평가 모델을 제안하였으며 와이블 분포를 도입하여 정지인성의 변동성을 평가하였다. 이에 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 1) Carbon/Epoxy 적층복합재료의 충격손상은 충격점 반대편 경계면의 층간분리가 지배적이었으며 이의 형상은 횡방향 및 종방향 손상길이를 규정될 수 있었다.
- 2) 탄성작용계수는 시험편 두께와 관련되어 층간분리 면적의 함수로 나타낼 수 있었으며 또한 충격손상거동의 변화를 묘사할 수 있었다.
- 3) 탄성작용계수를 이용하여 구한 층간분리 정지인성은 재료의 불균질성으로 인하여 변동성을 나타내고 있으며 이는 2모수 와이블 분포함수에 의하여 잘 근사될 수 있었다.
- 4) 두께에 따른 층간분리 정지인성의 변동폭은 두께가 두꺼울수록 커지고 있다. 이는 두께의 증가에 따라 재료의 불균질성 역시 증가하기 때문이라고 판단된다.

참고문헌

- (1) Abrate, S., 1991, *Applied Mechanics Rev.* vol. 44, no 4, pp 155~190
- (2) Maikuma, H., Gillespi, Jr, J. W. and Whitney, J. M., 1989, *Journal. of Composite Materials*, vol. 23, August, pp. 757~785
- (3) Xiao, X.R. and Vu-Khanh, 1993, *Journal. of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 6, October, pp 323~341
- (4) Rhee, K. Y. and Ernst, H.A., 1992, *Journal. of Composite Materials*, vol. 26, no.14, pp. 2029~2043
- (5) 심봉식, 성낙원, 오장우, 1991, 대한기계학회논문집 A권, 제 15권, 제 6호, pp. 1908~1918
- (6) Kress, G. R. and Stinchcomb, W. W., 1985, *ASTM STP 864*, pp. 173~196
- (7) Wang, H. and Vu-khanh, T., 1995, *Journal. of Composite Materials*, vol. 29, no.2, pp. 157~178

= 이하생략 =