

〈論 文〉

횡방향 충격을 받는 적층복합보의 손상에너지에 관한 연구

박근철* · 김남식** · 김문생***

(1990년 9월 10일 접수)

Impact Damage Energy of Laminated Beams Subjected to Transverse Impact

Kun Cheol Park, Nam Sik Kim and Moon Saeng Kim

Key Words : Laminated Composite Beam(적층 복합판), Impact Damage Energy(충격 손상에너지), Contact Force(접촉력), Indentation(압입량), Dynamic Finite Element(동적유한요소)

Abstract

A theoretical attempt is made to measure the damage of the laminated beams which are transversely impacted by a steel ball in terms of the energy dissipated at the contact zone. The dynamic finite element program for impact damage by using the higher-order finite element, the statically measured contact law, and the composite material theory is developed and used in the present study. By assuming a linear stress-strain relation in the unloading path, the total energy imparted to the beams from the projectile and the dissipated energy that causes permanent indentations are computed. The present study is intended to show the effect of the various impact velocity, fiber orientation and beam configuration(thickness, width, and length) on the total energy and the damage energy dissipated at the impact zone. The cantilever glass/epoxy laminated beams are analyzed in this study.

기 호 설 명

a_i : 상수계수 ($i=1, 6$)

E : 종 탄성 계수

F : 접촉력

$\{F\}$: 하중 벡터

G : 횡 탄성 계수

h : 보의 두께

$[K]$: 강성 매트릭스

k : 접촉 계수

$\{k\}$: 요소의 강성 매트릭스

$[M]$: 질량 매트릭스

$\{m\}$: 요소의 질량 매트릭스

m_s : 구의 질량

n : 부하 과정의 접촉 법칙 지수

Q_{ij} : 감소 강성 행렬

\bar{Q}_{ij} : 변환된 감소 강성 행렬

R_s : 강구의 반경

T : 보의 요소에 저장된 운동 에너지

t : 시간 또는 보의 두께

U : 보의 요소에 저장된 위치 에너지

v : 보의 변위

W_T : 총 에너지

W_D : 손상 에너지

W_{RD} : 탄성 회복을 고려한 손상 에너지

w : 구의 변형

Y : 복합재의 횡방향 강도

α : 압입량

* 정회원, 부산대학교 대학원

** 정회원, 부산공업대학 기계설계과

*** 정회원, 부산대학교 공과대학 기계설계공학과

- γ : 전단 변형률
- ϵ_e : 탄성변형률
- ϕ_i : 기울기
- $\{ \Delta \}$: 절점 자유도
- Ω : 보의 양단에서의 일반력에 의한 위치 에너지
- k : 곡률
- ν : 프와송 비
- ρ : 밀도

1. 서 론

복합재료에 대한 관심이 높아지면서 특히 복합재의 충격응답, 응력과 전파 및 충격 손상에 관한 많은 연구가 행해져 왔다. 이러한 충격 문제에 대한 많은 연구는 실험^(1~6)에 의한 것이었으며 이론적 해석은 최근에 Sun⁽⁷⁾을 비롯한 몇몇의 연구^(8~9)에서 시도되었으나 아직도 미비한 실정이다.

충격이 가해질 때 순간적으로 형성되는 큰 응력을 해석하기 위해 먼저 접촉 거동의 정확한 예측이 요구되어진다. Hertz의 고전적 접촉법칙⁽¹⁰⁾이 균질 등방성 재료의 충격거동 해석에 사용되어졌고 이러한 재료의 이론적인 충격응답해석을 위해 Sun⁽¹¹⁾은 고차보 유한요소(higher-order finite element) 이론을 개발했다. 그러나 아주 얇아서 반공간(half space)으로 표현할 수 없는 이질, 이방성 적층 복합보는 김⁽¹²⁾등이 Sun의 고차보 유한요소이론을 복합재료 이론과 Yang⁽¹³⁾과 Tan⁽¹⁴⁾이 정적압입실험(static indentation test)을 통해 밝힌 접촉법칙을 사용하여 충격거동 해석을 하였다.

한편, Husman⁽¹⁵⁾등은 충격하중을 받는 적층복합재의 잔류응력 특성에 관한 연구에서 잔류응력이 복합재의 손상정도를 측정할 수 있는 인자가 되며, 또한 충격으로 인해 복합재에 전달되어진 운동에너지가 잔류응력을 예측할 수 있는 중요한 함수가 됨을 실험적으로 나타냈다. 이와함께 Sun⁽¹⁶⁾은 충격으로 인해 복합재에 전달된 운동에너지를 이론적으로 해석하였다.

투사체로부터 적층재가 받는 운동에너지는 복합재 내에서 두가지 형태로 나뉘어 지는데, 적층재의 변위와 진동을 일으키는 진동에너지(vibration energy)와 충격 영역에서의 영구압입(permanent indentation)과 관련된 에너지는 손상에너지(damage energy)이다.

따라서 본 연구에서는 투사체의 충격으로 인해

복합재에 발생하는 손상을 해석하기 위해 우선 이와 관련이 있는 손상에너지를 구할 수 있도록 동적 유한요소 프로그램을 개발하는데 있으며, 이렇게 구한 결과들을 Husman의 실험결과와 비교함으로써 본 논문의 유한요소 프로그램이 적층복합보에 충격으로 인하여 전달되는 총에너지와 손상에너지를 구하는데 타당한 것인가를 검토하고 이 프로그램을 이용하여 다음과 같은 것들을 해석하였다.

- 보의 재료변화에 따른 보가 받는 손상
- 투사체의 속도변화에 따른 보가 받는 손상
- 보의 fiber orientation (stacking sequence)에 따른 보가 받는 손상
- 보의 형상(두께, 폭, 길이)의 변화에 따른 보가 받는 손상

2. 복합 재료 이론

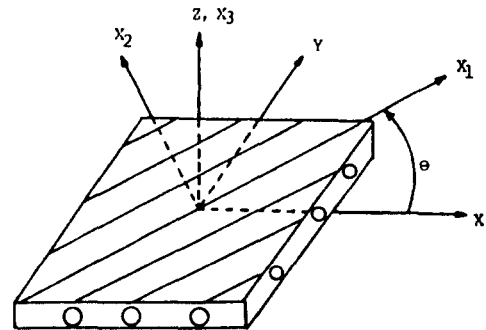
적층 복합재에서 각 단층(lamina)은 직교 등방성(orthotropic)으로 간주되는 섬유보강복합재이다. Fig. 1의 좌표계에서 X_1, X_2, X_3 축은 재료 기준축(lamina reference axes)이고, X, Y, Z 축은 보 기준축(beam reference axes)이다. 단층은 평판이므로 평면 응력 상태로 가정한다면 각 단층에 대한 재료 좌표계의 응력 변형률 관계는

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

이며, 여기서

$$Q_{11} = E_1 / (1 - \nu_{12}\nu_{21})$$

$$Q_{12} = \nu_{12}E_2 / (1 - \nu_{12}\nu_{21}) \quad (2)$$



(X_1, X_2, X_3) : Lamina Reference Axes

(X, Y, Z) : Laminate Reference Axes.

Fig. 1 Laminar and laminate reference axes

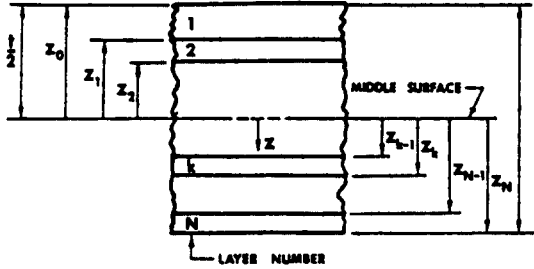


Fig. 2 Geometry of an N-layered laminate

$$Q_{22} = E_2 / (1 - \nu_{12}\nu_{21})$$

$$Q_{66} = G_{12}$$

이다.

좌표 변환에 의하여 재료 좌표계의 식 (1)을 보 좌표계로 변환하면

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & 0 \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

가 되며, 여기서

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= Q_{11}m^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{22}n^4 \\ \bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})m^4 + Q_{12}(m^4 + n^4) \\ \bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})m^3n \\ &\quad + (Q_{12} + Q_{22} + 2Q_{66})mn^3 \\ \bar{Q}_{22} &= Q_{11}n^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{22}m^4 \\ \bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})mn^3 \\ &\quad + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})m^3n \\ \bar{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{11}(m^4 + n^4) \end{aligned} \quad (4)$$

이다.

3. 유한 요소 해석을 이용한 손상 에너지 예측

3.1 접촉법칙

충격 문제를 이론적으로 해석하기 위해 먼저 접촉 거동을 정확히 예측하는 것이 중요하다. Hertz에 의해 유도된 탄성구(elastic sphere)와 탄성 반공간(elastic half-space) 사이의 고전적 접촉 법칙은

$$F = k\alpha^n \quad (5)$$

이고, 여기서 F 는 접촉력이고 α 는 압입량이다. 그리고 접촉 계수 k 는

$$k = \frac{4}{3} \frac{R_s^{1/2}}{(1-\nu_s^2)/E_s + (1-\nu_b^2)/E_b}$$

인데, Willis⁽¹⁷⁾는 강구와 횡방향으로 등방인 반공

간 사이의 접촉에서 $n=3/2$ 이 유효함을 보였다. 그러나 대부분의 적층 복합보는 아주 얇아 반공간으로 표현될 수 없기 때문에 Sun⁽¹⁶⁾은 적층 복합재의 손상 에너지 평가에 관한 연구에서 접촉 계수 k 값을

$$k = \frac{4}{3} \frac{R_s^{1/2}}{(1-\nu_s^2)/E_s + 1/E_T} \quad (6)$$

으로 수정된 값을 사용하여 이에 대한 타당성을 보였다. 이때 E_T 는 섬유 복합재의 횡방향 탄성 계수이다.

3.2 유한 요소 모델

보가 충격을 받을 때 보에 생성되는 탄성 단파(elastic short wave)를 적절히 표현하기 위해 Bernoulli-Euler보 이론을 기초로 유도되어진 절점당 3 자유도인 2 절점 요소의 고차 보 유한 요소로 적층 복합 보를 모델링하는데, 이때 요소 변위 함수는

$$v = a_1 + a_2x^1 + a_3x^2 + a_4x^3 + a_5x^4 + a_6x^5 \quad (7)$$

이며, 각 절점에서의 자유도는 횡방향 변위 v_i , 회전각 ϕ_i 와 곡률 k_i ($i=1,2$)의 3개의 자유도를 가지며 이때 상수 a_i ($i=1,6$)는 요소의 양끝 절점에의 경계 조건으로부터 이들 6개의 절점 변위들에 의해 표현된다.

요소의 운동 방정식을 구하기 위해 Hamilton의 원리를 쓰면

$$\delta \int_{t_0}^t (U - T + \Omega) dt = 0 \quad (8)$$

이며, U 와 T 는 요소에 저장된 위치에너지와 운동 에너지이고, Ω 는 요소의 양단에 작용하는 일반력에 의한 위치에너지로써 식 (7)과 (8)로부터 요소 운동 방정식

$$\{f\} = [m]\{\ddot{\Delta}\} + [k]\{\Delta\} \quad (9)$$

을 얻을 수 있다. 그리고 D'Alembert의 동적평형 조건과 절점에서의 연속조건으로부터 전체 요소에 대한 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\{F\} = [M]\{\ddot{\Delta}\} + [K]\{\Delta\} \quad (10)$$

여기서

$\{F\}$ = 외력 (external loads)

$[K], [M]$ = 보 전체의 강성 행렬 (assembled stiffness matrix) 과 질량 행렬 (assembled mass matrix)

$\{\Delta\}$ = 절점 자유도

이다.

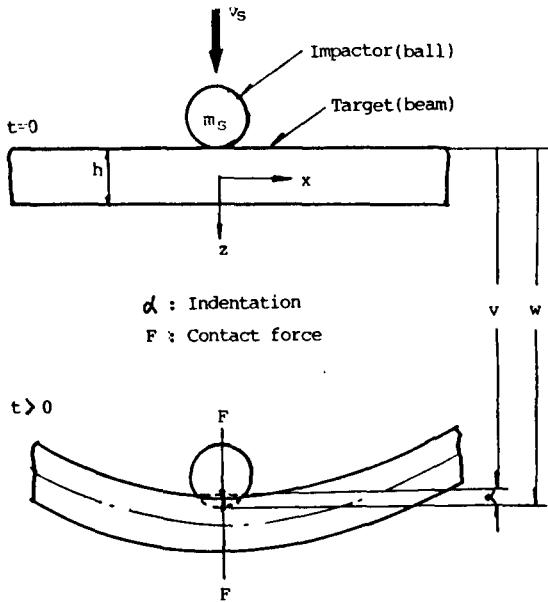


Fig. 3 Central transverse impact of a rigid body

3.2 충격 하중과 시간변수 적분

투사체가 보에 충돌할 때 발생하는 접촉력으로 인해 보는 충격을 받는데 이 접촉력을 구한다는 것은 접촉 지역에서의 국부 변형(local deformation) 즉, 압입량을 알고 있느냐에 달려있다.

이 압입량 α 는 Fig. 3에서 볼 수 있듯이

$$\alpha = w - v(x_0) \quad (11)$$

로 나타낼 수 있는데 w 는 초기 접촉 위치로부터 측정된 투사체의 변위이고 $v(x_0)$ 는 $x=x_0$ 인 접촉점에서의 보의 변위이다. 즉, 투사체와 보는 비선형으로 운동하기 때문에 식 (10)과 식 (11)을 동시에 해석해야 한다. 따라서 본 해석에서는 가속도의 변화는 시간 증분 Δt 에 대해 선형이라고 가정하고 Wilson과 Clough⁽¹⁸⁾이 유한 차분법에 의한 시간 적분을 행하여 Gauss 소거법에 의하여 시간 증분에 따라 단계별로 총 응답과정을 구했다.

3.3 손상에너지

충격의 결과로 복합재는 손상을 입게 되는데, 이러한 충격 손상으로 적층재의 강도(strength)나 피로 수명(fatigue life)등의 감소가 초래된다. 충격으로 인한 손상에는 여러가지 형태가 있는데 보통 국부 압입 손상(local indentation damage)과 굽힘 손상(flexural damage)으로 구분된다. 전자의 경

우에는 투사체와 적층재가 직접 접촉함으로 인해 발생하는 섬유(fiber)나 기지(matrix)의 파손(breakage or crack) 등이 있고, 후자의 경우에는 층간 분리(delamination)처럼 파 운동(wave motion)의 과다 변형으로 인한 파손 등이 있다. 그런데 복합재의 충격 손상의 복잡한 특성때문에 이 양을 정량화한다는 것은 상당히 힘들다. 그렇지만 본 연구에서는 충격으로 인해 적층재가 받는 에너지 중 어느 한 부분이 손상과 관련이 있다고 보고, 관련되는 이 에너지를 접촉 지역에서 소실되는 에너지(dissipated energy)라 간주하였다.

보통 투사체가 한 일은 보에 두가지 형태로 흡수 되는데, 하나는 국부 압입 손상과 관련된 접촉 지역에서 소실되는 에너지이고 다른 하나는 적층보의 운동과 변위의 형태로 저장되는 진동 에너지(vibrational energy)이다. 투사체가 적층보에 비하여 상대적으로 작으면 파 운동으로 인한 손상은 거의 없을 것이므로, 적층보와 투사체 간의 간접 접촉에 의한 국부 압입 손상을 일으킨 에너지를 손상 에너지(damage energy)로 취급한다.

접촉 기간 중에 구로부터 적층재에 가해진 총 에너지는

$$W_T = \frac{1}{2} m_s (\dot{w}_0^2 - \dot{w}_r^2) \quad (12)$$

또는

$$W_T = \int_0^{w_r} F(t) dw(t) \quad (13)$$

이고, 여기서 \dot{w}_0 와 \dot{w}_r 는 각각 구의 초기 속도와 나중 속도이며 w_r 는 접촉이 끝났을 때 강구의 변위이다. 식 (13)을 사용하면 수치적분으로 총에너지를 구할 수 있다. 또한 앞서 언급한 것처럼 투사체로부터 보에 전달되는 총에너지는

$$W_T = W_v + W_D \quad (14)$$

처럼 진동 에너지 W_v 와 손상에너지 W_D 의 합으로 나타낼 수 있는데, 이때

$$W_v = \int_0^{v_r} F(t) dv(t) \quad (15)$$

$$W_D = \int_0^{\alpha_r} F(t) d\alpha(t) \quad (16)$$

이고 v_r 와 α_r 는 각각 접촉이 끝났을 때의 보의 변위와 압입량이다. 물론 식 (13)은 탄성해이므로 충격 영역에서 소실되는 손상 에너지를 계산해주기 위하여 비탄성 특성을 고려해야 하지만 비탄성적 동적 접촉에 적용할 마땅한 접촉 법칙을 구한다는 것이 실제로는 상당히 어려운 일이다. 그래서 해석

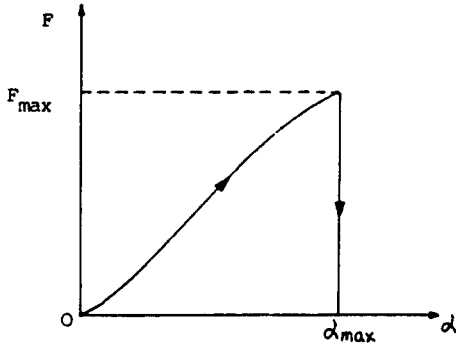


Fig. 4 Loading and unloading paths with permanent indentation

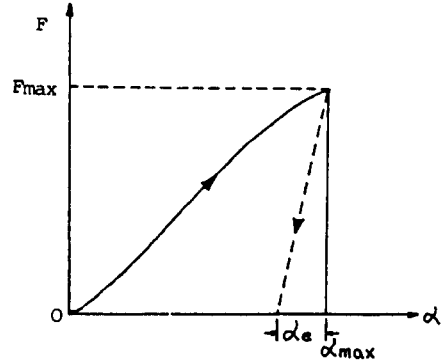


Fig. 5 Contact law with elastic recovery

을 간단히 하기 위하여 재료가 탄성-강소성 거동 (elastic-rigid plastic behaviour)를 한다고 가정하면 접촉력과 압입량의 관계를

Fig. 4처럼 표시할 수 있다. 강구가 적층보에 한 일의 총량은 부하과정 (loading path)에서는

$$W_T = \int_0^{w_{max}} F(t) dw(t) \quad (17)$$

이고, 이때 w_{max} 는 $F = F_{max}$ 에서의 구의 변위이다. 여기서 w_{max} 는 구의 최대 변위가 아니다. 그러면 식 (14)는

$$W_T = W_v + W_D = + \int_0^{v_{max}} F(t) dv(t) + \int_0^{\alpha_{max}} F(t) d\alpha(t) \quad (18)$$

이고, v_{max} 와 α_{max} 은 각각 접촉력이 최대일 때의 보의 변위 및 압입량이다.

또한, 큰 영구 압입을 일으키지 않는 충격 속도에서는 국부 변형의 탄성회복⁽¹⁶⁾을 충분히 고려해 주어야 하나 접촉 지역에서의 정확한 제하 과정 (unloading path)을 알 수가 없으므로 Fig. 5와 같이 탄성 회복된다고 하면, 이때의 탄성 변형률을 다음과 같이 가정한다.

$$\epsilon_e = \frac{Y}{E_T} \quad (19)$$

여기서 Y 는 복합재의 횡방향 강도이다.

그러므로 접촉점에서 회복되어지는 전체 압입량은

Table 1 Total impacted and damage energy

Dimension (mm)	Impact Vel. (m/sec)	W_T (N·m)	W_D (N·m)	W_D/W_T	W_T^* (N·m)
2.464×12.7×125.4	45.72	0.313	0.214	0.684	0.263
	88.40	1.142	0.780	0.683	1.170
	115.0	2.023	1.299	0.642	2.041
	152.4	3.447	2.271	0.659	3.783
2.60×25.4×125.4	147.2	3.640	2.824	0.776	3.607
	236.2	9.332	7.168	0.770	9.708
2.65×38.1×125.4	229.8	8.904	7.525	0.845	9.193
2.62×38.1×125.4	268.2	12.315	10.226	0.830	12.609
2.65×38.1×125.4	275.5	13.107	10.813	0.825	13.287

W_T^* are the experimental data taken from Ref. (15) (Glass/epoxy)

$$\alpha_e = \frac{1}{2} h \epsilon_e \quad (20)$$

이며, h 는 보의 두께이다. 그러면 국부 압입량의 탄성회복을 고려할 때의 손상에너지는

$$W_{RD} = W_D - \frac{1}{2} F_{\max} \alpha_e \quad (21)$$

가 된다. Table 1에는 $Y = 2.76 \times 10^7 \text{Pa}$ 이라 했을 때의 결과치들이 나타나 있다. 식 (18)의 W_D 와 식 (21)의 W_{RD} 값을 비교해 보면 수정량이 크지 않음을 알 수 있다. 이것은 고속 충격으로 인한 국부 압입량의 탄성 회복 정도가 아주 적음을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 W_D 값을 이용하였다.

4. 유한 요소 해석의 결과 및 고찰

본 연구의 유한 요소 프로그램이 충격으로 인한 적층 복합보의 손상에너지 예측에 타당한 지를 Husman의 실험 결과치와 비교 검토하였다. 해석에 사용한 재료의 형상은 Tabel 1에 잘 나타나 있고 섬유방향은 $[0^\circ/90^\circ]_{3s}$ 이다. 이러한 조건을 가진 유리/에폭시 (glass/epoxy) 적층 복합 외팔보에 대해 직경이 4.5mm인 강구로 속도를 변화시켜가며 충격을 가했다. 해석에 사용한 복합보와 강구의 물성치는 다음과 같다.

유리/에폭시 복합보

$$E_L = 39.3 \text{GPa}, E_T = 11.72 \text{GPa}, G_{12} = 5.14 \text{GPa}$$

$$\nu_{12} = 0.31, \rho = 1800 \text{kg/m}^3, G_{23} = G_{31} = G_{12}$$

강 구

$$E_s = 207 \text{GPa}, \rho = 7860 \text{kg/m}^3, \nu_s = 0.3$$

이때 사용한 재료는 Husman 사용한 것과 동일한 것이다.

전체 보는 Fig. 6처럼 24개의 요소로 나뉘었고 시간 증분은 $0.1 \mu\text{sec}$ 로 하였다. Fig. 7과 Fig. 8에는 여러가지 적층 형태와 충격 속도에 대한 수치해석 결과를 나타내었으며 Tabel 1에 해석의 결과치들이 기존의 실험결과치와 잘 일치함을 볼 수 있다.

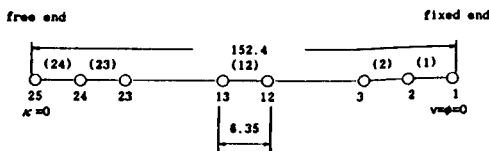


Fig. 6 Finite element discretization

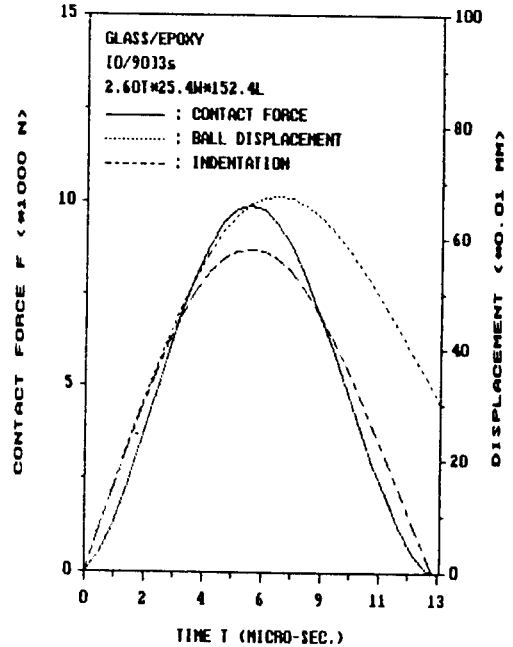


Fig. 7 Impact response history of the laminated cantilever beam for approach velocity 145 m/s

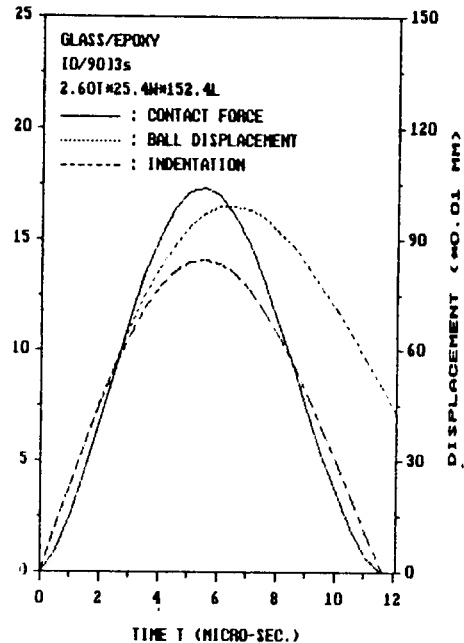


Fig. 8 Impact response history of the laminated cantilever beam for approach velocity 235m/s

손상에너지 평가

적층 복합보가 중앙에 강구의 충격으로 인하여 받는 손상 에너지가 강구의 속도나 보의 적층 방법 및 형상(두께, 폭, 길이)에 따라 어떻게 영향을 받게 되는지를 알아 보려고 한다. 이때 사용되는 강구의 직경은 4.5mm이고, 보는 유리/에폭시가 재료인 적층 복합 외팔보이다.

● 복합보의 재료에 따른 손상 에너지의 변화

섬유방향이 $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{2s}$ 및 $[90^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{2s}$ 인 적층외팔보의 재료가 유리/에폭시와 흑연/에폭시(graphite/epoxy)일 때, 각 경우에 대하여 보가 받는 손상 정도를 알아 보고자 한다. 복합보의 크기는 $2.54 T \times 25.4 W \times 152.4 L$ (mm)이고 흑연/에폭시의 물성치는 다음과 같다.

흑연/에폭시 복합보

$$E_L = 120 \text{GPa}, E_T = 7.9 \text{GPa}, G_{12} = 5.5 \text{GPa}$$

$$\nu_{12} = 0.3, \rho = 1585 \text{kg/m}^3, G_{23} = G_{31} = G_{12}$$

강구가 여러가지 서로 다른 속도를 가지면서 충돌할 때 보가 받는 총 에너지와 손상 에너지를 구한 결과를 Fig. 9와 10에 도시하였다. 이들 결과를 보면 보가 받는 총 에너지는 두 경우가 거의 같지

만 손상 에너지는 섬유 방향이 $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{2s}$ 일 때는 흑연/에폭시가 큰 반면에 섬유 방향이 $[90^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{2s}$ 일 때는 유리/에폭시가 크다. 이것은 복합보의 섬유 방향 중 탄성 계수는 흑연/에폭시가 크고 횡 탄성 계수는 유리/에폭시가 크기 때문인데, $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{2s}$ 인 경우는 흑연/에폭시가, $[90^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{2s}$ 인 경우에는 유리/에폭시가 보의 재료로 쓰일 때 보의 굽힘 강성이 커지게 된다. 굽힘 강성이 커지면 보의 극부 압입량이 커지므로 손상 에너지 또한 커지는 것으로 생각된다.

● 강구의 속도 변화에 따른 손상 에너지의 변화

섬유방향이 $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ]_{2s}$ 인 적층 외팔보에 강구가 여러가지 서로 다른 속도를 가지면서 충돌할 때 복합보가 받는 에너지 손상 정도를 알아 보고자 한다. 복합보의 크기는 $2.54 T \times 25.4 W \times 152.4 L$ (mm)이다. 강구의 운동 에너지와 강구로부터 보가 전달 받은 총 에너지 그리고 보의 손상 에너지 등을 구한 결과를 Fig. 11에 도시하였다. 이들 결과를 보면 강구의 속도가 커짐에 따라 보가 받는 총 에너지와 손상 에너지 역시 증가하지만,

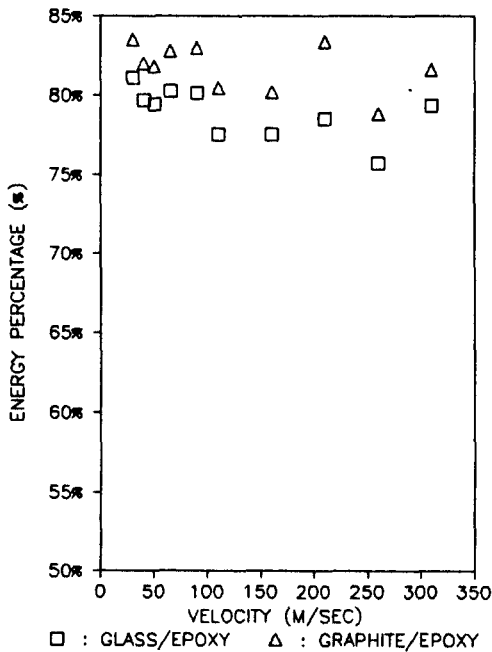


Fig. 9 Material effect on energy percentage in the $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{2s}$ laminate with several velocities

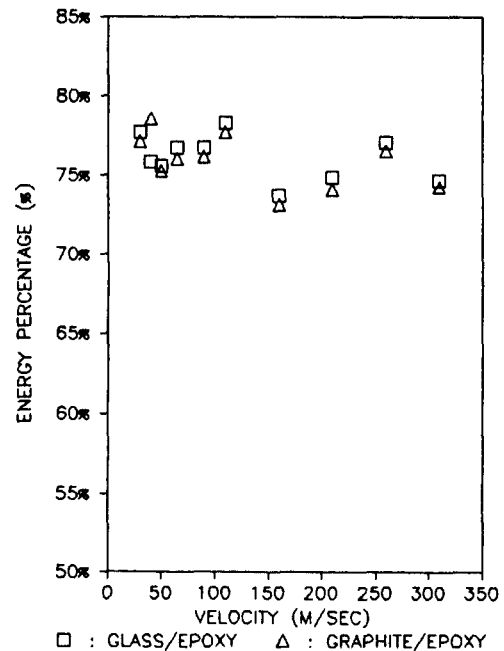


Fig. 10 Material effect on energy percentage in the $[90^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{2s}$ laminate with several velocities

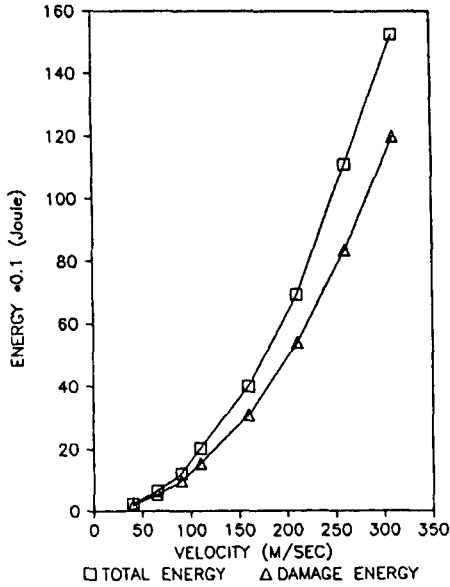


Fig. 11 Velocity effect on total and damage energy transferred to laminate $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ]_{2s}$ with several velocities (Glass/epoxy)

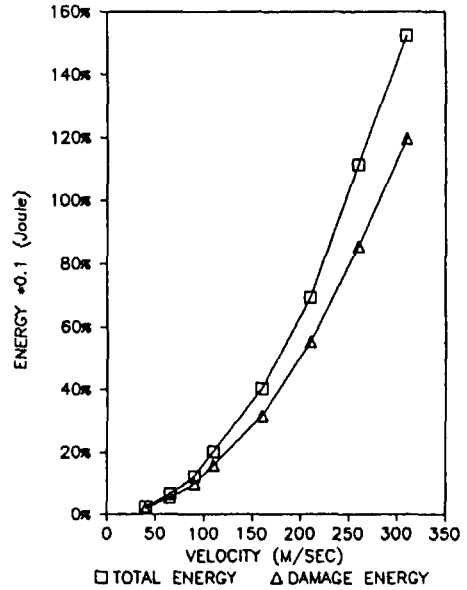


Fig. 12 Fiber orientation effect of total and damage energy transferred to laminate $[0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ]_{2s}$ with several velocities (Glass/epoxy)

총 에너지에 대한 손상 에너지의 비율은 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 이것은 이 후의 결과에서도 볼 수 있듯이 에너지 비율이 강구의 속도가 아니라 시편의 크기에 좌우됨을 알 수 있다.

● 복합보의 섬유방향에 따른 손상 에너지의 변화
적층 복합재의 크기는 $2.54 T \times 25.4 W \times 152.4 L$ (mm) 이고 강구의 섬유방향과 강구의 속도는 다음과 같다.

섬유 방향

- (1) $[0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ]_{2s}$
- (2) $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{2s}$
- (3) $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ]_{2s}$
- (4) $[90^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{2s}$
- (5) $[90^\circ/90^\circ/90^\circ/90^\circ/90^\circ]_{2s}$

강구 속도

- (1) 30m/sec. (2) 40m/sec. (3) 50m/sec.
- (4) 65m/sec. (5) 90m/sec. (6) 110m/sec.
- (7) 160m/sec. (8) 210m/sec. (9) 260m/sec.
- (10) 310m/sec.

각 섬유방향에 대하여 위에 있는 모든 속도를 적용하여 이에 따른 에너지 값들을 구하였다. 이들 결과를 Fig. 12~16에 각각 도시하였다. 이들 해석

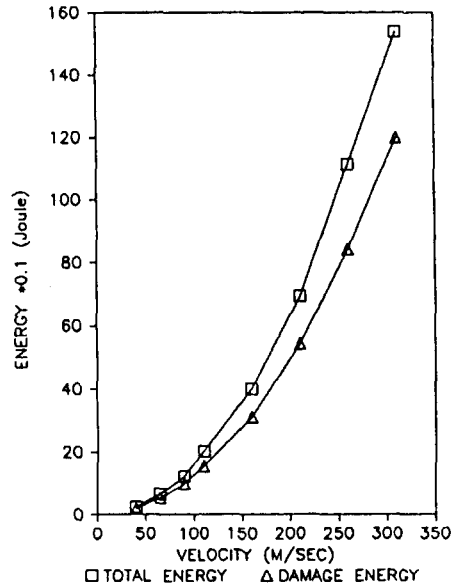


Fig. 13 Fiber orientation effect on total and damage energy transferred to laminate $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{2s}$ with several velocities (Glass/epoxy)

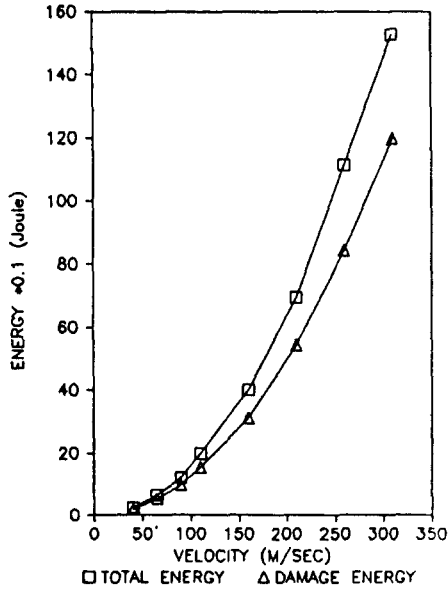


Fig. 14 Fiber orientation effect on total and damage energy transferred to laminate [0°/90°/0°/90°/0°]2s with several velocities (Glass/epoxy)

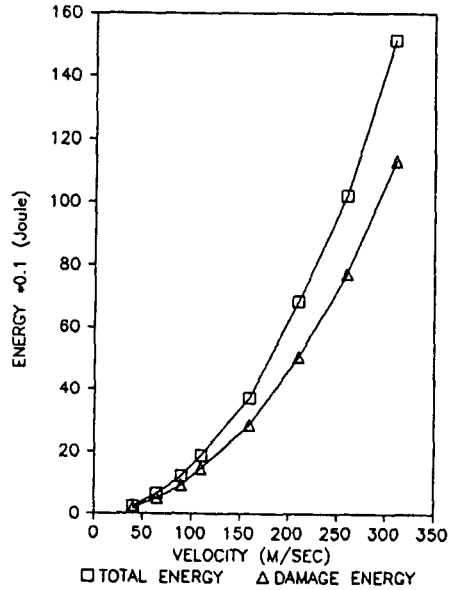


Fig. 16 Fiber orientation effect on total and damage energy transferred to laminate [90°/90°/90°/90°/90°]2s with several velocities (Glass/epoxy)

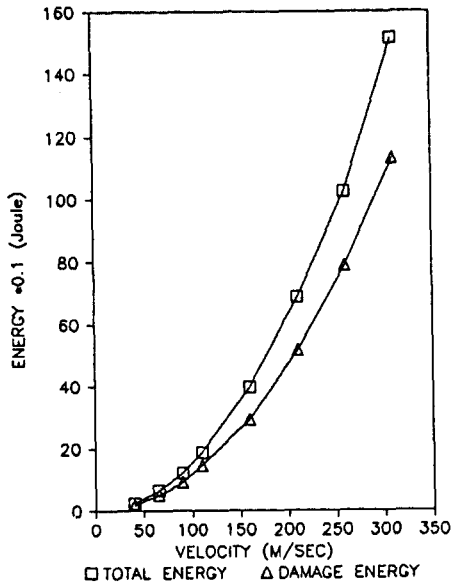


Fig. 15 Fiber orientation effect on total and damage energy transferred to laminate [90°/45°/90°/-45°/90°]2s with several velocities (Glass/epoxy)

결과를 보면 보가 받는 총 에너지와 손상 에너지는 섬유방향 (1), (2), (3), (4) 그리고 (5)의 순서로 감소한다. 이렇게 충격으로 보가 받는 에너지가 섬유방향에 따라 변하는 것은 변형률 에너지식 $U = 1/2 \int \sigma_x \epsilon_x dv$ 가 탄성 계수와 변형률에 의해 결정되어지기 때문인데, 복합재는 섬유 방향 종탄성 계수가 횡 방향의 탄성 계수보다 훨씬 크고 또한 위에 나열한 순서에 따라서 변형률의 비보다 응력의 비가 크기 때문에 위의 순서대로 보가 받는 총 에너지의 값이 작아지는 것이다. 그리고 복합보는 굽힘 강성이 작을 수록 보의 처짐은 커지는 반면 국부 압입량은 줄어들게 되는데 이것은 충격으로 보가 받는 에너지 중 진동 에너지로 보다 많이 바뀔을 의미한다. 그러므로 굽힘 강성이 작아지는 위의 순서대로 손상 에너지 역시 작아지게 된다. 크기와 재질과는 달리 적절히 변화를 줄 수 있으므로 섬유 방향의 조절에 의하여 충격 에너지를 어느 정도 감소시킬 수 있으리라 생각된다.

● 복합보의 형상변화에 따른 손상에너지의 변화
두께 변화
 섬유 방향이 [0°/45°/0°/-45°/0°]_{Ns}와 [90°/45°/

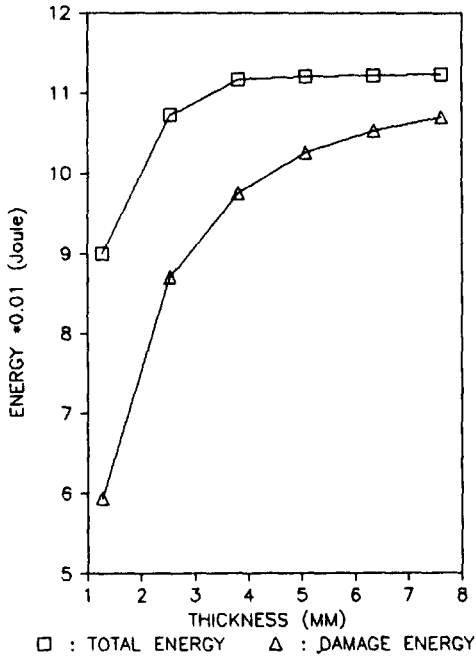


Fig. 17 Thickness effect on total and damage energy transferred to laminate $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_2s$ (Glass/epoxy)

$90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{NS}$ 이고 강구의 속도가 30m/sec일 때 크기가 Thickness \times 25.4 W \times 152.4 L (mm)인 복합보의 두께를 여러가지로 변화시켜 가면서 얻은 결과를 Fig. 17과 Fig. 18에 도시하였다. 여기서 N은 적층시 몇 번 대칭시켜줄 것인가를 나타낸다. 예를 들어 N=1이면 적층보는 10개의 단층(layer)으로 이루어지게 되고 N=2이면 20개의 층으로 이루어지게 된다. 이들 결과를 보면 적층보의 두께가 두꺼워짐에 따라 보가 받는 총 에너지와 손상 에너지가 증가함을 보여주고 있다. 그리고 섬유 방향이 $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{NS}$ 인 적층보가 $[90^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{NS}$ 의 경우에 비해 총 에너지는 거의 변화가 없지만 손상 에너지는 큰 것을 볼 수 있다. 이것 역시 전자의 강성 계수가 후자의 것보다 크기 때문에 기인하는 것으로 사료된다.

폭과 길이 변화

섬유 방향이 $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{2s}$ 와 $[90^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{2s}$ 이고 강구의 속도가 30m/sec일 때 크기가 2.54 T \times Width \times 152.4 L (mm)인 복합보아 2.54 T \times 25.4 W \times Length mm인 복합보를 폭과 길

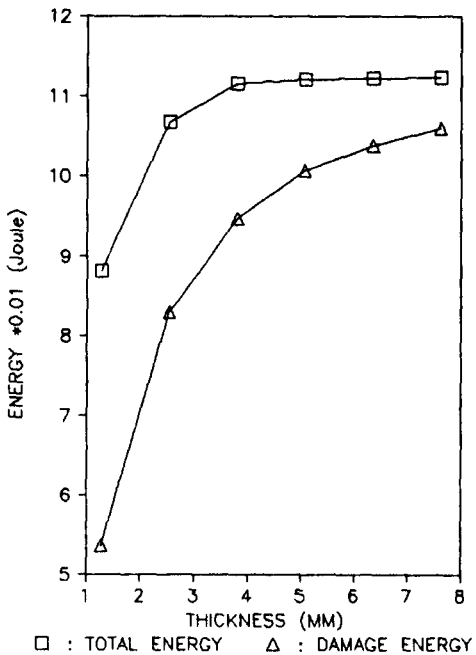


Fig. 18 Thickness effect on total and damage energy transferred to laminate $[90^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_2s$ (Glass/epoxy)

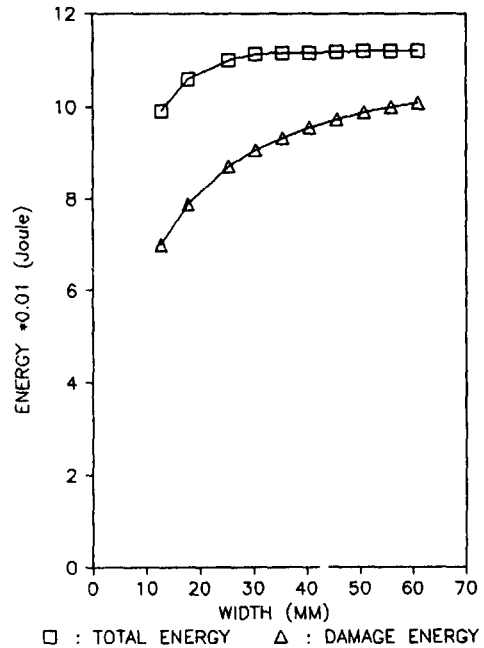


Fig. 19 Width effect on total and damage energy transferred to laminate $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_2s$ (Glass/epoxy)

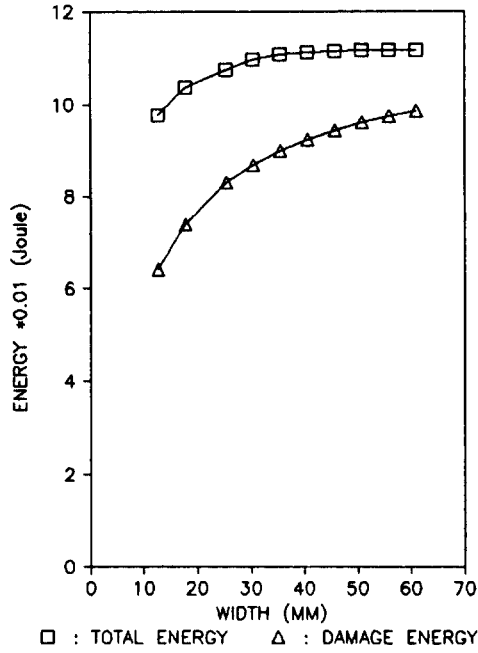


Fig. 20 Width effect on total and damage energy transferred to laminate [90°/45°/90°/-45°/90°]2s (Glass/epoxy)

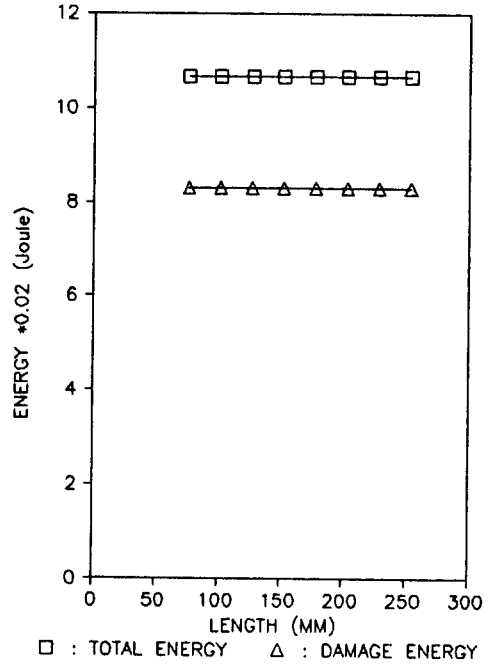


Fig. 22 Length effect on total and damage energy transferred to laminate [90°/45°/90°/-45°/90°]2s (Glass/epoxy)

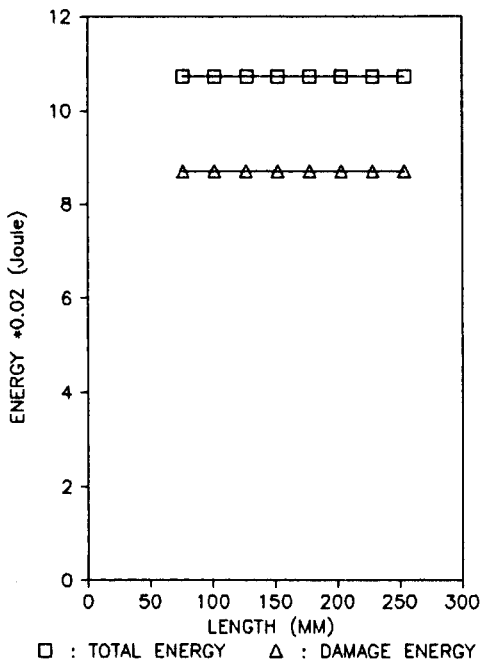


Fig. 21 Length effect on total and damage energy transferred to laminate [0°/45°/0°/-45°/0°]2s (Glass/epoxy)

이를 여러가지로 변화시켜 가면서 얻은 결과를 Fig. 19와 20 및 Fig. 21과 22에 정리하여 놓았다. 이들 결과로부터 적층보의 폭이 증가함에 따라 총 에너지와 손상 에너지가 증가하지만 길이의 변화에는 이들 값이 무관한 것을 볼 수 있는데, 그 이유는 정하중에 의한 보의 처짐은 길이가 긴 경우에는 크게 발생하는 것과는 달리 충격으로 인한 보의 처짐은 국부적으로 결정되어지기 때문인 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구의 결과는 다음과 같다.

(1) 균질 등방성 고차보 유한요소 이론에 복합재료 이론과 정적 접촉법칙을 고려하여 개발한 동적 유한요소 프로그램은 적층 복합보가 강구의 충격으로 인하여 받은 총에너지와 손상에너지를 구하는데 아주 유용했다.

(2) 복합보의 재료를 유리/에폭시와 흑연/에폭시를 사용하였을 때, 두 경우의 총 에너지는 거의 변화가 없이 같았으나 손상 에너지의 경우 섬유 방향

이 $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{2s}$ 일 때는 흑연/에폭시가 그리고 $[90^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{2s}$ 일 때는 유리/에폭시가 크게 나타났다.

(3) 복합보가 받는 총 에너지와 손상 에너지는 강구의 속도가 증가함에 따라 같이 증가하나, 총 에너지에 대한 손상 에너지의 비율은 강구의 속도와는 관계없이 거의 일정했다.

(4) 적층 복합보의 섬유 방향을 변화시켰을 때 상당 굽힘 강성이 큰 섬유 방향일수록 손상 에너지가 작은 값이나마 커짐을 알았다. 즉, 손상에너지가 큰 순서대로 섬유 방향을 나열하면 $[0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ]_{2s}$, $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{2s}$, $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ]_{2s}$, $[90^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{2s}$ 와 $[90^\circ/90^\circ/90^\circ/90^\circ/90^\circ]_{2s}$ 이 된다. 그러나 이들 값의 차이가 크지 않아 무시할 수 있으리라 사료된다.

(5) 섬유 방향이 $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{2s}$ 와 $[90^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{2s}$ 인 두 적층 복합보는 두께가 두꺼울수록 그리고 폭이 넓어질수록 손상 에너지가 증가했고, 이에 비해 길이의 변화에 따른 손상 에너지의 변화는 없었다.

참 고 문 헌

- (1) Takeda, N., Sierakowski, R.L. and Malvern, L.E., 1981, "Wave Propagation Experiments on Ballistically Impacted Composite Laminates", Journal of Composite Materials, Vol. 15, pp. 157~174.
- (2) Doyle, J.F., 1984, "An Experimental Method for Determining the Dynamic Contact Law", Experimental Mechanics, pp. 10~16.
- (3) Doyle, J.F., 1984, "Further Developments in Determining the Dynamic Contact Law", Experimental Mechanics, pp. 256~270.
- (4) Doyle, J.F., 1987, "Determining the Contact Force During the Transverse Impact of Plates", Experimental Mechanics, pp. 68~72.
- (5) Hayashi, T., Ugo, R. and Morimoto, Y., 1986, "Experimental Observation of Stress Waves Propagating in Laminated Composites", Experimental Mechanics, pp. 169~174.
- (6) Sjöblom, P.O., Hartness, J.T. and Cordell, T.M., 1988, "On Low-Velocity Impact Testing of Composite Materials", Journal of Composite Materials, Vol. 22, p. 30~52.
- (7) Sun, C.T. and Chen, J.K., 1985, "On the Impact of Initially Stressed Composite Laminates", Journal of Composite Materials, Vol. 19, pp. 490~504.
- (8) Chen, J.K. and Sun, C.T., 1985, "Analysis of Impacted Response of Buckled Compositing Laminates", Composite Structures, Vol. 3, pp. 97~118.
- (9) Chen, J.K. and Sun, C.T., 1985, "Dynamic Large Deflection Response of Composite Laminates Subjected to Impact", Composite Structures, Vol. 4, pp. 59~73.
- (10) Hertz, H., 1881, "Über die Berührung Fester Elastischer Körper", Journal Reine Angle Math, Crelle, Vol. 92, p. 155.
- (11) Sun, C.T. and Huang, S.N., 1975, Transverse Impact Problems by Higher Order Beam Finite Element", Computers and Structures, Vol. 5, pp. 297~303.
- (12) 안국찬, 김문생, 김규남, 1988, "유한요소법에 의한 적층 복합보의 충격해석", 대한기계학회논문집, 제12권, 제4호, pp. 652~661.
- (13) Yang, S.H. and Sun, C.T., 1982, "Indentation Law for Composite Laminates ASTM STP 787, pp. 425~449.
- (14) Tan, T.M. and Sun, C.T., 1985, "Use of Statical Indentation Laws in the Impact Analysis of Laminated Composite Plates", ASME, Journal of Applied Mechanics, Vol. 52, pp. 6~12.
- (15) Husman, G.E., Whitney, J.M. and Halpin, J.C., 1975, "Residual Strength Characterization of Laminated Composites Subjected to Impact Loading", ASTM STP 568, pp. 92~113.
- (16) Sun, C.T., 1977, "An Analytical Method for Evaluation of Impact Damage Energy of Laminated Composites", ASTM STP 617, pp. 427~440.
- (17) Willis, J.R., 1966, "Hertzian Contact of Anisotropic Bodies", Journal of Mechanics and Physics of Solids, Vol. 14, pp. 163~176.
- (18) Wilson, E.L. and Clough, R.W., 1962, "Dynamic Response by Step Matrix Analysis", Symp. on Use of Computers in Civil Engineering, Lisbon.