

〈論 文〉

혼합적층된 복합재료평판의 저속충격응답

이영신* · 강근희** · 박 응**

(1990년 7월 11일 접수)

Low-Velocity Impact Response of Hybrid Laminated Composite Plates

Young-Shin Lee, Kun-Hee Kang and Oung Park

Key Words : Hybrid Laminated Composite Plates(혼합적층판), Low-Velocity Impact(저속충격), Plate Finite Element(판유한요소), Contact Law(접촉법칙), Fractional Energy Loss(에너지흡수율), Impact Response Behavior(충격응답거동)

Abstract

A numerical analysis using the finite element method was employed in the prediction of the response of hybrid laminated composite plates subjected to low velocity impact. As a result, the fractional energy loss of two hybrid composite plates with the same component ratio has different values according to stacking sequences. Graphite-Kevlar-Graphite plate had low energy loss and Kevlar-Graphite-Kevlar plate much higher. Contact forces between the impactor and plates, center deflections of the plates and velocity change of the impactor with time have different values according to material properties of impacted surface. Various composite plates with the same material in impacted surface behaved similar response.

기 호 설 명

- A_{ij}, B_{ij}, D_{ij} : 적층판의 강성계수
- F, F_m : 접촉력, 최대접촉력
- $[K_p], [K_r]$: 판 및 충격자의 강성행렬
- $[M_p], [M_r]$: 판 및 충격자의 질량행렬
- n, p, q : 부하곡선, 제하곡선 및 재부하곡선의 접촉법칙지수
- $\{P_p\}, \{P_r\}$: 판 및 충격자 전체계의 하중벡터
- u, v, w : 적층판의 변위성분
- x, y, z : 적층판의 기준좌표계
- x_1, x_2, x_3 : 단층판의 좌표계
- x_x, x_y, x_{xy} : 곡률
- ζ, η : 판요소의 무차원화된 국부 좌표계

1. 서 론

무게가 가벼우면서도 높은 비강도(specific strength)를 갖는 graphite/epoxy 나 kevlar/epoxy와 같은 섬유보강 복합재료들이 자동차나 항공기, 미사일 및 우주선 등의 구조물로서 많이 사용되어 왔으며, 이들은 금속재료보다 그 성능이 우수한 것으로 나타났다. 그러나 이러한 복합재료들은 모두가 충격하중에 상대적으로 취약하기 때문에 터빈날개 등에의 적용은 어려웠다.

충격은 그것이 비록 적은 충격에너지라 할지라도 복합재료 구조물에는 상당한 손상을 일으키게 되며, 이는 그 구조물의 강도를 크게 저하시킨다. 손상의 형태로는 보통 국부적인 영구변형, 섬유의 파괴, 층간분리 등으로 나타나며, 그 상태가 복합적

* 정회원, 충남대학교 공과대학 기계설계공학과

** 정회원, 국방과학연구소

으로 발생하기 때문에 충격문제를 다루는 것이 쉽지가 않다.

따라서, 많은 사람들이 복합재료가 저속충격을 받을때의 응답에 대한 해석적 및 실험적인 연구들을 수행하였는데^(1~5), 특히 저속충격을 받는 복합재료 적층판의 충격저항을 좀 더 향상시키고, 잔류강도를 높일 수 있는 방안들을 연구하게 되었으며, 그 한가지 방법으로 각기 다른 종류의 얇은 복합재료판들을 적층한 혼합적층판(hybrid laminate)에 대한 실험적인 연구들이 수행되었다.

Adams와 Miller⁽⁶⁾은 graphite/epoxy와 다른 복합재료들로 구성된 혼합적층판의 저속충격시 발생하는 파괴에너지와 최대하중시의 탄성 변형에너지를 실험과 계산을 통하여 비교하였으며, Dorey와 Sidey 등⁽⁷⁾은 carbon/kevlar 49 섬유의 혼합적층판의 충격특성에 관한 실험적인 연구를 통하여 혼합적층판이 단일적층판보다 파괴에너지 및 잔류 인장강도가 훨씬 크게 나타남을 알았다.

또한, Adams와 Zimmerman⁽⁸⁾은 충격실험을 통하여, polyethylene/epoxy와 graphite/epoxy의 혼합적층판이 graphite/epoxy 단일적층판보다 훨씬 좋은 충격특성을 갖는다는 것을 확인하였으며, Jang과 Chen 등⁽⁹⁾은 저속 충격하중을 받는 여러가지 형태의 혼합적층판의 응답에 관한 실험적인 연구를 통하여 nylon/epoxy, polyester/epoxy 및 polyethylene/epoxy 판들을 graphite/epoxy 판과의 혼합 사용시 graphite/epoxy 적층판의 충격특성을 상당한 정도로 향상 시켜줌을 확인하였다.

이와 같이 최근에 혼합적층된 복합재료 판에 대한 관심이 높아짐에 따라 이에대한 실험적인 연구가 계속되어 왔으나, 국내외적으로 충격을 받는 혼합적층판에 대한 해석적인 연구는 별로 보이지 않는다.

따라서, 본 연구에서는 graphite/epoxy와 glass/epoxy 그리고 graphite/epoxy와 kevlar/epoxy의 혼합적층된 복합재료 평판의 저속충격에 대한 응답을 유한요소 모델을 사용하여 수치해석 한후, 각각의 단일적층판들의 결과와 비교하였으며, 이때의 접촉력 관계식은 Yang과 Sun⁽¹⁰⁾이 제안한 수정된 접촉법칙을 이용하였다. 또한, 수치해석 결과에서의 충격자의 속도변화로써 혼합적층판 배열에 따른 에너지 흡수율을 계산하였고, 이를 충격특성이 취약한 graphite/epoxy 단일적층판의 결과와 비교 고찰하였다.

2. 수학적 해석

2.1 해석 모델

Fig. 1은 일정 두께 h 인 혼합적층판이며, 단방향으로 섬유들이 보강된 복합재료로 된 여러개의 얇은 판(lamina)들이 서로 완벽하게 접착되었다고 가정한다. 섬유방향이 임의로 될 수 있는 각 판은 균질한 직교 이방성 재료로 간주될 수 있으며, k 번째 판의 좌표계 x_1, x_2 는 각각 섬유방향 및 이에 직각인 방향으로 취한다. 각 θ 는 적층판의 기준좌표계 x, y 에서 x_1 축이 x 축과 이루는 시계방향의 각도를 나타낸다. 혼합적층판의 경계조건은 자유단이나 고정단이며, 질량이 m , 속도가 v , 끝단의 반경이 r 인 충격자가 판의 중앙에 충돌한다.

2.2 회전단 효과를 고려한 적층판 이론

Whitney와 Pagano⁽¹¹⁾에 의해 개발된 적층판 이론에서 그 변위 성분들은 아래식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= u^o(x, y) + z\phi_x(x, y) \\ v(x, y, z) &= v^o(x, y) + z\phi_y(x, y) \\ w(x, y, z) &= w^o(x, y) = w(x, y) \end{aligned} \quad (1)$$

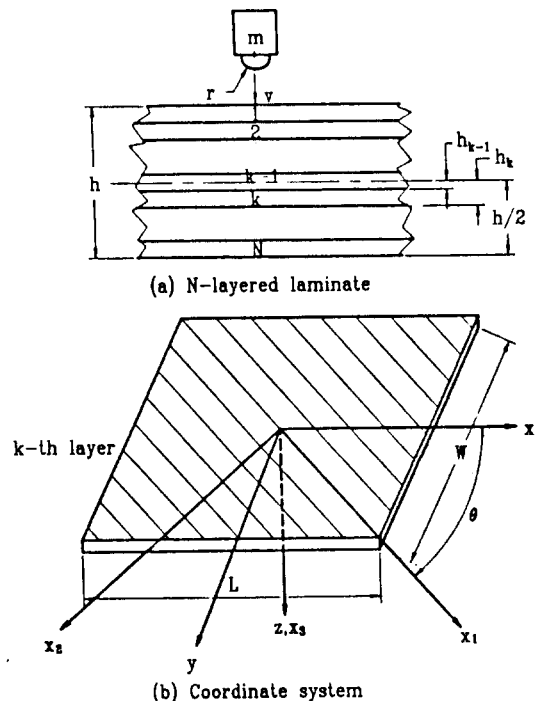


Fig. 1 Geometry of a hybrid laminate

여기에서 u^0, v^0, w^0 는 각각 x, y, z 방향으로의 중립면의 변위 성분들이며, ϕ_x, ϕ_y 는 각각 x, y 축에 수직인 단면의 회전각을 나타낸다.

중립면으로부터 거리가 z 인 적층판의 k 번째 단층판내 한 점에서의 응력은 변형률-변위 및 응력-변형률 관계식으로부터, 다음식 (2)와 같이 표현된다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix}^k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} & 0 & 0 \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} & 0 & 0 \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{Q}_{44} & \bar{Q}_{45} \\ 0 & 0 & 0 & \bar{Q}_{45} & \bar{Q}_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \gamma_{yz}^0 \\ \gamma_{zx}^0 \end{Bmatrix} + Z \begin{Bmatrix} x_x \\ x_y \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서, \bar{Q}_{ij} 는 변환된 축소강성계수(transformed reduced stiffness)이다.

적층판에 작용하는 합력들(stress resultants)은 식 (2)의 응력성분들을 전체 두께에 걸쳐 적분하므로써 얻어지며, 그 관계식은 다음 식 (3)과 같이 표시된다.

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \\ Q \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & O \\ B & D & O \\ O & O & H \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon \\ \chi \\ \gamma \end{Bmatrix} \quad (3)$$

식 (3)에서

$$\begin{aligned} [N] &= \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \chi_x \\ \chi_y \\ \chi_{xy} \end{Bmatrix} \\ [M] &= \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} \quad (3.a) \\ &+ \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \chi_x \\ \chi_y \\ \chi_{xy} \end{Bmatrix} \\ [Q] &= \begin{Bmatrix} Q_y \\ Q_x \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{44} & H_{45} \\ H_{45} & H_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (A_{ij}, B_{ij}, D_{ij}) &= \int_{-h/2}^{h/2} \bar{Q}_{ij} [1, z, z^2] dz \\ &= \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{ij} [(h_k - h_{k-1}), 1/2(h_k^2 - h_{k-1}^2), \\ &1/3(h_k^3 - h_{k-1}^3)] \quad (i, j=1, 2, 6) \quad (3.b) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (H_{ij}) &= \int_{-h/2}^{h/2} \bar{Q}_{ij} dz = \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{ij} (h_k - h_{k-1}) \\ &(i, j=4, 5) \end{aligned}$$

또한, 체적력(body force)를 무시한 전체판의 운동방정식은 다음 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\begin{cases} \partial N_x / \partial x + \partial N_{xy} / \partial y = P\dot{u}^0 + R\ddot{\phi}_x \\ \partial N_{xy} / \partial x + \partial N_y / \partial y = P\dot{v}^0 + R\ddot{\phi}_y \\ \partial Q_x / \partial x + \partial Q_y / \partial y + q = P\ddot{w} \\ \partial M_x / \partial x + \partial M_{xy} / \partial y - Q_x = R\ddot{u}^0 + I\ddot{\phi}_x \\ \partial M_{xy} / \partial x + \partial M_y / \partial y - Q_y = R\ddot{v}^0 + I\ddot{\phi}_y \end{cases} \quad (4)$$

식 (4)에서,

$$\begin{aligned} (P, R, I) &= \int_{-h/2}^{h/2} \rho(1, z, z^2) dz \\ &= \sum_{k=1}^N \rho [(h_k - h_{k-1}), 1/2(h_k^2 - h_{k-1}^2), \\ &1/3(h_k^3 - h_{k-1}^3)] \quad (4.a) \end{aligned}$$

q : 판에 수직으로 작용하는 분포하중

혼합적층판이 대칭인 경우는 $B_{ij} = R = 0$ 이 되고, 적층판의 기준좌표계의 x 축을 0° 섬유방향과 일치하게 잡을 경우 $A_{16} = A_{26} = 0, D_{16} = D_{26}$ 이 되며, 또한 $G_{23} = G_{13}$ 이라 하면 $H_{45} = 0, H_{44} = H_{55}$ 가 된다.

이상과 같은 조건과 함께 위 식 (4)에 식 (3)을 대입하여 정리하면 다음 식 (5)와 같이 최종적인 판의 운동방정식을 얻게 된다.

$$\begin{aligned} &A_{11} \partial^2 u^0 / \partial x^2 + A_{66} \partial^2 u^0 / \partial y^2 \\ &+ (A_{12} + A_{66}) \partial^2 v^0 / \partial x \partial y = P\ddot{u}^0 \\ &(A_{12} + A_{66}) \partial^2 v^0 / \partial x \partial y + A_{66} \partial^2 v^0 / \partial x^2 \\ &+ A_{22} \partial^2 v^0 / \partial y^2 = P\ddot{v}^0 \\ &D_{11} \partial^2 \phi_x / \partial x^2 + 2D_{16} \partial^2 \phi_x / \partial x \partial y + D_{66} \partial^2 \phi_x / \partial y^2 \\ &+ D_{16} (\partial^2 \phi_y / \partial x^2 + \partial^2 \phi_y / \partial y^2) \\ &+ (D_{12} + D_{66}) \partial^2 \phi_y / \partial x \partial y \\ &- H_{44} (\partial w / \partial x + \phi_x) = I\ddot{\phi}_x \quad (5) \\ &D_{16} (\partial^2 \phi_x / \partial x^2 + \partial^2 \phi_x / \partial y^2) + (D_{12} + D_{66}) \partial^2 \phi_x / \\ &\partial x \partial y + D_{66} \partial^2 \phi_y / \partial x^2 + 2D_{16} \partial^2 \phi_y / \partial x \partial y \\ &+ D_{22} \partial^2 \phi_y / \partial y^2 - H_{44} (\partial w / \partial y + \phi_y) = I\ddot{\phi}_y \\ &H_{44} (\partial^2 w / \partial x^2 + \partial^2 w / \partial y^2 + \partial \phi_x / \partial x + \partial \phi_y / \partial y) \\ &+ q = P\ddot{w} \end{aligned}$$

2.3 혼합 적층판 및 충격자의 유한요소 모델

(1) 판의 유한요소

대칭판에서의 굽힘변형은 식 (5)에서 보는 바와 같이 중립면의 변위와 전단변형이 서로 연계되지 않으며, 또한 중립면의 변위 u^0 와 v^0 는 무시할 수가 있다. 따라서, 혼합 적층판에서의 유한요소는 Fig. 2와 같이 9절점을 갖고, 각 절점에서 z 방향에의 변위 w 와 단면의 회전 ϕ_x 및 ϕ_y 의 3자유도를 갖는 평면요소를 사용하였다.

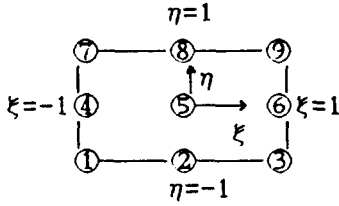


Fig. 2 9-node isoparametric plate element

요소의 각 절점에 대하여는 다음과 같은 형상함수(shape function)를 사용하여 표현한다.

$$\begin{aligned}
 S_1 &= 1/4(\zeta^2 - \zeta)(\eta^2 - \eta), \\
 S_2 &= 1/2(1 - \zeta^2)(\eta^2 - \eta) \\
 S_3 &= 1/4(\zeta^2 + \zeta)(\eta^2 - \eta) \\
 S_4 &= 1/2(\zeta^2 - \zeta)(1 - \eta^2) \\
 S_5 &= (1 - \zeta^2)(1 - \eta^2) \\
 S_6 &= 1/2(\zeta^2 + \zeta)(1 - \eta^2) \\
 S_7 &= 1/4(\zeta^2 - \zeta)(\eta^2 + \eta) \\
 S_8 &= 1/2(1 - \zeta^2)(\eta^2 + \eta) \\
 S_9 &= 1/4(\zeta^2 + \zeta)(\eta^2 + \eta)
 \end{aligned} \quad (6)$$

형상함수를 사용한 판의 변위 w , ϕ_x , ϕ_y 는 아래식과 같이 근사화할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} w \\ \phi_x \\ \phi_y \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^9 [S_i] \{q_{\rho}\}_i \quad (7)$$

윗식에서,

$$\begin{aligned}
 \{q_{\rho}\}_i &= \{w_i, \phi_{xi}, \phi_{yi}\}^T \\
 [S_i] &= S_i [I]_{3 \times 3}
 \end{aligned} \quad (7.a)$$

전형적인 유한요소 과정에 따라, 요소의 강성행렬과 질량행렬들은 Gauss 적분법을 사용하여 수치적분으로 구하며, 전체 계의 강성행렬 $[K_p]$ 와 질량행렬 $[M_p]$ 는 요소행렬들의 합으로 얻어진다.

이와 같이 하여 최종적으로 얻어진 운동 방정식은 아래식으로 표현된다.

$$[M_p] \{\ddot{q}_p\} + [K_p] \{q_p\} = \{P_p\} \quad (8)$$

여기서, $\{P_p\}^T = \{0, \dots, F, \dots, 0\}$ 이며,

F 는 충격점에서 판의 변위 w 와 관련된 접촉력이다.

(2) 충격자의 유한 요소

충격자는 각 절점에서 축 방향 변위 u 와 기울기 $\partial u / \partial x$ 의 2 자유도를 갖는 2절점 막대요소를 사용하고, 변위함수는 아래식과 같이 취한다.

$$u = a_1 + a_2 x + a_3 x^2 + a_4 x^3 \quad (9)$$

식 (9)에서 상수 계수 a_i 를 각 절점의 자유도에

대하여 계산한 후 대입하면 아래와 같은 요소의 변위식을 얻는다.

$$u = \{N\}^T \{q_r\}_e \quad (10)$$

여기서,

$$\{q_r\}_e = \{(u)_1, (\partial u / \partial x)_1, (u)_2, (\partial u / \partial x)_2\}^T \quad (10.a)$$

또한, 식 (10)에서 형상함수 $\{N\}^T$ 는 아래와 같다.

$$\{N\}^T = \{f_1(x), f_2(x), f_3(x), f_4(x)\} \quad (11)$$

식 (11)에서,

$$\begin{cases} f_1(x) = (1-x/L)^2(1+2x/L) \\ f_2(x) = x(1-x/L)^2 \\ f_3(x) = (x^2/L^2)(3-2x/L) \\ f_4(x) = (x^2/L)(x/L-1) \end{cases} \quad (11.a)$$

변분 원리를 이용하면, 한개 요소에 대한 운동 방정식이 얻어지며, 전체 계의 질량행렬과 강성행렬은 각 요소의 질량행렬과 강성행렬들의 합으로 이루어진다. 이와같이 하여 얻어진 전체 계의 운동 방정식은 아래식으로 표현된다.

$$[M_r] \{\ddot{q}_r\} + [K_r] \{q_r\} = \{P_r\} \quad (12)$$

윗식에서, $\{P_r\}^T = \{F, 0, \dots, 0\}$ 이며, F 는 충격자의 끝단에 작용하는 접촉력이다.

2.4 접촉력 해석

복합재료 적층판이 충격 하중을 받게 되면 접촉력이 발생하며, 이 힘은 충격응답해석의 기본자료가 된다. 접촉력 해석은 두 물체가 접촉할 때 작용하는 접촉력과 그 접촉력에 의한 적층판표면의 압입된 깊이(충격시 충격점으로부터 충격자의 변위와 판의 변위의 차이)와의 관계를 나타내는 식으로 표현되나, 이의 일반적인 관계식은 없으며 실험을 통하여 구하여야 한다.

Yang과 Sun⁽¹⁰⁾은 강구를 충격자로 사용하여 정적인 압입 시험을 수행하였으며, 그 시험으로부터, 하중이 증가하는 부하 곡선(loadung curve), 하중이 감소하는 제하 곡선(unloading curve) 및 하중이 다시 작용하는 재부하 곡선(reloading curve)에 대한 접촉력과 압입 깊이와의 관계식을 제안하였다.

(1) 부하 곡선

하중이 작용할 때의 접촉력과 압입 깊이와의 관계식은 Meyer⁽¹²⁾가 제안한 아래식을 사용한다.

$$F = k \alpha^n \quad (13)$$

윗식 (13)에서 F 는 접촉력, α 는 압입 깊이, $n=1.5$ 는 실험으로부터 얻어진 값이며, k 는 수정된 Hertz 법칙으로부터 계산된 접촉계수(계산치는

Table 2 참조)를 나타낸다.

(2) 제하 곡선

하중이 제거 될 때의 접촉력과 압입 깊이와의 관계식은 Crook이 제안한 아래 식을 사용한다⁽¹⁰⁾.

$$F = F_m \left[\frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_m - \alpha_0} \right]^q \quad (14)$$

식 (14)에서 F_m 은 하중이 제거되기 시작할 때의 접촉력, α_0 는 하중이 제거된후의 영구 압입깊이, α_m 은 F_m 에서의 압입 깊이를 나타내며, $q=2.5$ 는 실험을 통하여 얻어진 값이다.

식 (14)는 아래와 같이 다시 표현할 수 있다.

$$F = S(\alpha - \alpha_0)^q \quad (15)$$

위 식에서

$$S = F_m / (\alpha_m - \alpha_0)^q \quad (15.a)$$

를 제하강성도라 하며, 모든 제하 곡선에 대해서 같은 값을 갖는다고 가정하였다.

또한, 시험결과들은 α_0 와 α_m 사이는 다음과 같은 선형관계가 있음을 보여 준다.

$$\alpha_0 = S_p(\alpha_m - \alpha_p) \quad (16)$$

식 (16)에서 α_p 는 영구변형이 발생하는 압입깊이의 임계치를 나타내며, 압입량이 α_p 를 초과하면 영구 변형이 발생한다.

(3) 재부하 곡선

재부하가 작용할 때의 접촉력과 압입 깊이와의

관계식은 아래식과 같이 표현된다.

$$F = k_1(\alpha - \alpha_0)^p \quad (17)$$

여기서, $k_1 = F_m / (\alpha_m - \alpha_0)^{1.5}$ 를 재부하 강성도라 하며 $p=1.5$ 는 실험으로부터 얻어진 값이다.

2.5 수치해석 과정

식 (8)과 (12)의 운동 방정식은 식 (13), (14) 및 (17)의 접촉력에 대한 식들과 연계하여 해석되어야 한다.

적층판의 운동방정식 (8)을 해석하기 위하여 먼저 질량행렬 $[M_p]$ 를 등가질량(lumped mass)기법을 사용하여 대각화 시킨후 시간 적분은 중앙차분법을 사용하였으며, 충격자의 운동방정식 (12)의 시간적분은 가속도가 미소 시간 간격 Δt 에 대하여 선형적으로 변화 한다고 가정하는 Wilson- θ 기법을 사용하였다.

이에 대한 전체 계산과정 흐름도(flow chart)는 Fig. 3과 같다.

3. 수치계산 및 고찰

본 연구에서는 강성도가 뛰어나나, 충격특성이 취약한 graphite/epoxy 적층판에 충격저항이 우수한 glass/epoxy 적층판 및 kevlar/epoxy 적층판을 각각 혼합 적층한 평판에서의 에너지 흡수율과 충격응답을 비교 검토하였다.

판의 적층 방법은 섬유각이 각각 $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]$ 로 된 5개의 단층판(lamina)을 갖는 단일 소 적층판(sub-lamina)을 편의상 하나의 기호 (graphite/epoxy는 C, glass/epoxy는 G, 및 kevlar/epoxy는 K)로 표기하고, 이들을 각각 7가지 형태 즉, CCCC, CGGC, GCCG, GGGG, CKKC, KCKK 및 KKKK로 배열하되 중립면에 대해서 대칭이 되도록 하였다.

예를 들면 CGGC판은 $\{[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_c[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_g\}$ 인 상태로 20개의 단층판이 적층된 혼합적층판을 나타낸다.

적층판 및 충격자의 형상과 유한요소 모델은 Fig. 4와 같으며, 적층판의 두께는 2.69mm이다.

3가지 종류의 단층판 재료의 기계적 성질은 Table 1과 같으며, 단일 적층판의 접촉력 계산에 사용한 계수들은 Table 2와 같다.

Table 2에서 각각의 단일적층판에 대한 접촉계수 k 는 수정된 Hertz 계산식에 의해 계산하였으

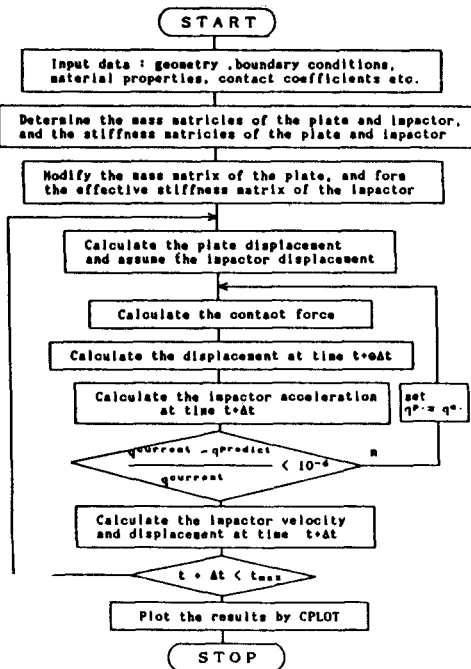


Fig. 3 Flow chart for impact analysis.

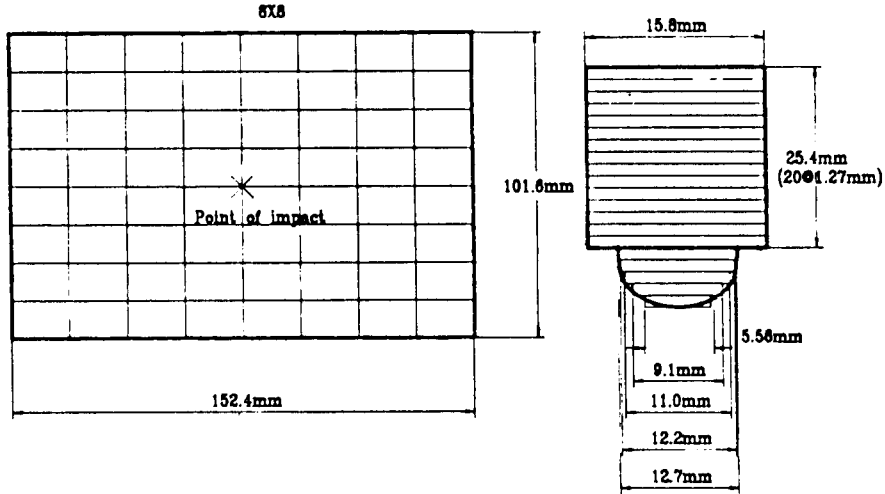


Fig. 4 Finite element mesh for the laminated plate and impactor

Table 1 Mechanical properties of composite plates and impactor^(10,12)

Material	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	$G_{12} = G_{13} = G_{23}$ (GPa)	ν_{12}	ρ (kg/m ³)
Graphite/epoxy	120.7	7.9	5.5	0.30	1600
Glass/epoxy	39.3	8.2	4.1	0.26	2040
Kevlar/epoxy	35.4	22.0	7.3	0.18	1469
Impactor	207.0	-	-	0.30	7860

Table 2 Contact coefficients of specimen $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{2s}$

Specimen	k (N/mm ^{1.5})	q	α_p (mm)	S_p	p
Graphite/epoxy ⁽³⁾ (CCCC)	25,700	2.5	0.0167	0.094	1.5
Glass/epoxy ⁽¹⁰⁾ (GGGG)	26,900	2.5	0.0167	0.094	1.5
Kevlar/epoxy (KKKK)	67,400	2.5	0.0167	0.094	1.5

며, glass/epoxy판의 α_p 및 S_p 값과 kevlar/epoxy 판의 나머지 계수들은 graphite/epoxy판의 실험치와 같다고 가정하였다. Table 2에 제시되지 않은 혼합 적층판의 각 계수들은 실험적으로 구하여야 하나, 본 연구에서는 충격면의 단일 소적층판 재료와 같다고 간주하여 충격면의 재료로 된 단일적층판의 계수와 동일한 값을 취하였다.

본 연구의 유용성을 고찰하기 위하여, 에너지 흡수율에 대하여는 참고문헌 (9)의 실험치의 정성적

인 경향과 비교하였으며, 충격 응답에 대해서는 참고문헌 (3)에 나타난 CCCC 단일적층판의 수치 결과와 비교하였다. Table 3은 참고문헌 (9)에서의 충격자 관통시 혼합적층판에서의 흡수된 에너지량의 실험치와 흡수율을 나타내고 있으며, Table 4는 본 연구에서 계산된 충격자 반발속도에 따른 흡수에너지($E_a = 1/2 m(v_i^2 - v_r^2)$)와 흡수율($100E_a/E_i$)을 보여주고 있다. 여기서, m 은 충격자의 질량, v_i 는 충격속도, v_r 은 반발속도, $E_i = 1/2 m v_i^2$ 은 충

Table 3 Experimental data for the energy loss of various plates by Jang⁽⁹⁾

Specimen	Impact energy (J)	Absorbed energy (J)	Energy loss (%)	Remark
CC	110	2.8	2.5	C : carbon/epoxy P _s : polyester/epoxy P _t : polyethylene/epoxy Specimen size : ϕ75mm Mass of impactor : 1kg Impact velocity : 4.5m/s Boundary condition : clamped
CP _s	110	11.5	10.5	
CP _t	110	11.5	10.5	
P _s C	110	16.0	14.5	
P _t C	110	26.7	24.3	
P _s P _s	110	30.7	27.9	
P _t P _t	110	93.0	84.5	

Table 4 Calculated data for the energy loss of various plates in the present analysis

Specimen	Impact energy (J)	Absorbed energy (J)	Energy loss (%)	Remark
CCCC	0.0675	0.0121	18	C : graphite/epoxy G : glass/epoxy K : kevlar/epoxy Mass of impactor : 15gm Impact velocity : 3m/sec Boundary condition : simply supported
CKKC	0.0675	0.0128	19	
CGGC	0.0675	0.0189	28	
GCCG	0.0675	0.0282	42	
KCCK	0.0675	0.0421	62	
GGGG	0.0675	0.0372	55	
KKKK	0.0675	0.0426	63	

격 에너지를 나타낸다. Table 3의 실험치 결과를 보면 충격 특성이 취약한 carbon/epoxy만의 적충판은 그 에너지 흡수율이 아주 낮으며, 충격특성이 좋은 polyester/epoxy나 polyethylene/epoxy판과의 혼합 적충시는 흡수율이 4배 이상 증가 하였다. 또한 충격면의 재료특성에 따라 그 에너지 흡수율이 차이가 있는데 이는 충격면에 충격특성이 좋은 재료를 갖는 혼합적충판이 충격에너지를 더욱 많이 흡수함을 알 수 있었다.

이와 같은 경향은 Table 4에서 보는 바와 같이 본 연구에서 수치적으로 계산된 값에서도 유사하게 나타났다. 즉, 충격특성이 취약한 graphite/epoxy 단일적충판(CCCC)에서의 에너지 흡수율 보다는 충격 특성이 좋은 glass/epoxy판이나 kevlar/epoxy판과의 혼합적충판에서의 에너지 흡수율이 높게 나타났으며, 특히 구성비율이 같은 혼합적충판 일지라도 충격면에 충격특성이 좋은 재료가 배열된 판(KCCK)이 그 반대로 배열된 판(CKKC)보다도 3배 이상의 충격에너지 흡수율을 갖는다는 것을 알 수 있었다. 따라서 같은 구성비율을 갖는 혼합적충판인 경우 충격특성이 우수한 판을 충격면에 배열하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다.

다음은 혼합적충판이 충격자에 의해 충격속도 3 m/sec의 저속충격을 받을 때의 충격 응답 즉, 시간에 따른 충격력 변화와 판 중앙의 변위 및 충격자의 속도변화에 대하여 고찰해 보기로 한다.

Fig. 5와 Fig. 6은 graphite/epoxy 단일적충판

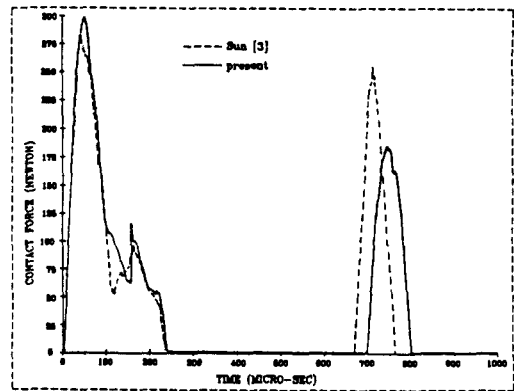


Fig. 5 Contact force between the impactor and plate for CCCC plate ($[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{2s}$) with simply supported edges. Impacted by 12.7mm dia. and 8.54 gm steel ball at 3.0 m/s

(CCCC)에 질량이 8.54gm인 충격자가 충격했을 경우에 대하여 참고문헌 (3)에 나온 자료를 입력하여 얻어진 충격자와 판 사이의 접촉력 및 중앙의 변위를 본 연구에서의 결과와 비교한 것이며, Fig. 7~Fig. 14는 각각의 혼합적층판과 단일적층판에 질량이 15gm인 충격자가 충격했을 경우에 대하여 계산된 결과를 비교한 것이다.

Fig. 5에서 보면 초기 접촉력은 참고문헌 (3)과 아주 잘 일치하며, 후반부의 접촉력은 약간 적게 나타났다. 그러나 충격하는 동안의 판 중앙의 변위는 Fig. 6에서 보는 바와같이 잘 일치하는 것으로

나타났다.

Fig. 7은 4단이 단순지지인 경우의 graphite/epoxy판과 glass/epoxy 판의 혼합적층판(CGGC, GCCG)에서의 시간에 따른 접촉력 변화를 각각의 단일적층판(CCCC, GGGG)의 경우와 비교한 것이다. 여기에서 보면 혼합적층판의 적층배열에 따라 접촉력 변화가 다르게 나타났으며, 충격면에 동일한 재료를 갖는 적층판들은 어느정도 유사한 충격 응답을 가짐을 알 수 있다. Fig. 8과 Fig. 9는 Fig. 7과 동일한 조건의 적층판들에 대한 시간에 따른 판 중앙의 변위와 충격자의 속도변화를 비교한 것

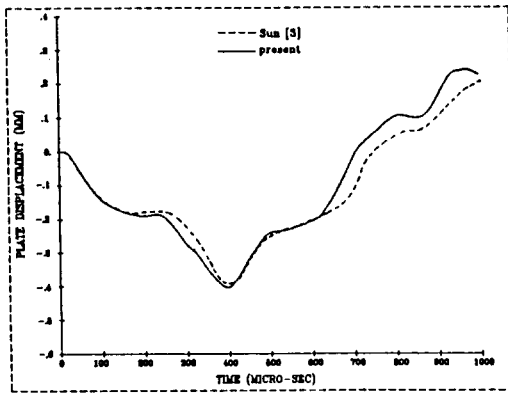


Fig. 6 Displacement of the plate center for CCCC plate ($[0^{\circ}/45^{\circ}/0^{\circ}/-45^{\circ}/0^{\circ}]_{2s}$) with simply supported edges. Impacted by 12.7mm dia. and 8.54 gm steel ball at 3.0m/s

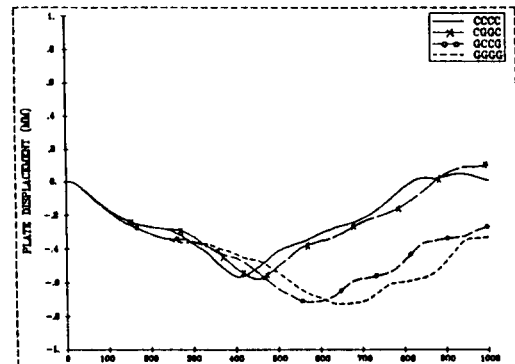


Fig. 8 Displacements of the plate center for various plates—CCCC, CGGC, GCCG & GGGG—with simply supported edges. Impacted by 12.7mm dia. and 15gm steel rod at 3.0m/s

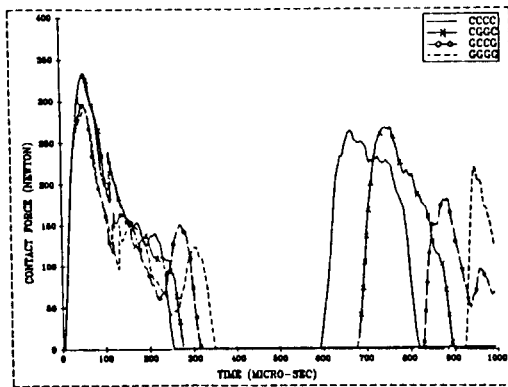


Fig. 7 Contact forces between the impactor and various plates—CCCC, CGGC, GCCG & GGGG—with simply supported edges. Impacted by 12.7mm dia. and 15gm steel rod at 3.0m/s

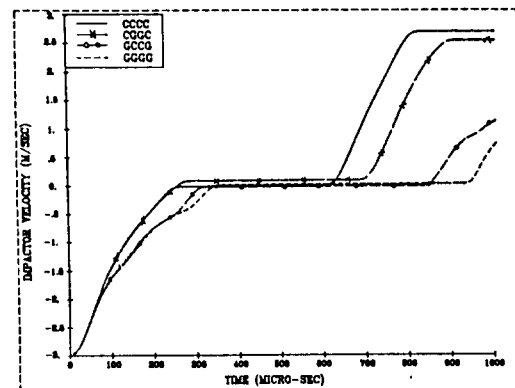


Fig. 9 Impactor velocities on various plates —CCCC, CGGC, GCCG & GGGG—with simply supported edges. Impacted by 12.7mm dia. and 15gm steel rod at 3.0m/s

이다. Fig. 8에서 보면 역시 혼합적층판의 적층배열에 따라 판 중앙의 변위가 다르게 나타나며, 충격면이 동일한 재료인 적층판들은 비슷한 변위특성을 갖는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9의 충격자의 속도변화도 혼합적층판의 적층배열에 따라 차이가 나타나며, 충격면이 같은 재료인 적층판들은 유사한 속도변화를 갖는다.

Fig. 10은 4단이 단순지지인 경우의 graphite/epoxy 판과 kevlar/epoxy판의 혼합적층판(CKKC, KCCK)에서의 시간에 따른 접촉력 변화를 각각의

단일적층판(CCCC, KKKK)의 경우와 비교한 것이다. 이 경우 역시 혼합적층판의 적층배열에 따라서 충격자와 판의 접촉력 변화가 다르게 나타났으며, 충격면에 동일한 재료를 갖는 적층판들은 유사한 응답을 보여주고 있다. Fig. 11과 Fig. 12는 Fig. 10과 동일한 조건의 적층판들에 대한 시간에 따른 판 중앙의 변위와 충격자의 속도 변화를 비교한 것이며, 여기에서 충격면이 동일한 재료인 적층판들은 거의 같은 충격응답을 갖는다는 것을 알 수 있다.

이상의 결과들을 볼 때 판의 굽힘거동은 역시 그 양면층의 재료 물성치에 의해 크게 지배됨을 알 수가 있었다.

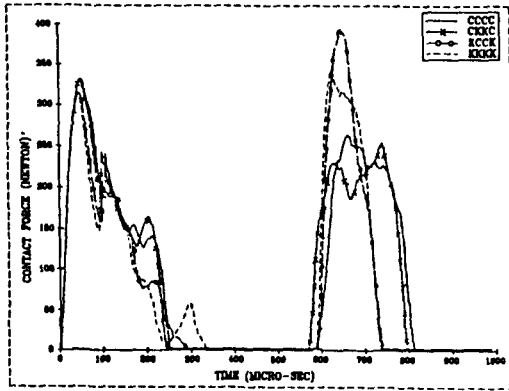


Fig. 10 Contact forces between the impactor and various plates—CCCC, CKKC, KCCK & KKKK—with simply supported edges. Impacted by 12.7mm dia. and 15gm steel rod at 3.0m/s

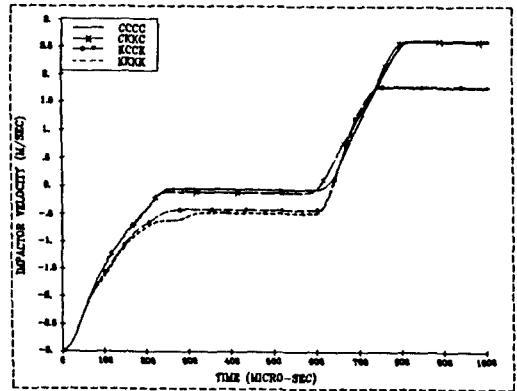


Fig. 12 Impactor velocities on various plates—CCCC, CKKC, KCCK & KKKK—with simply supported edges. Impacted by 12.7mm dia. and 15gm steel rod at 3.0m/s

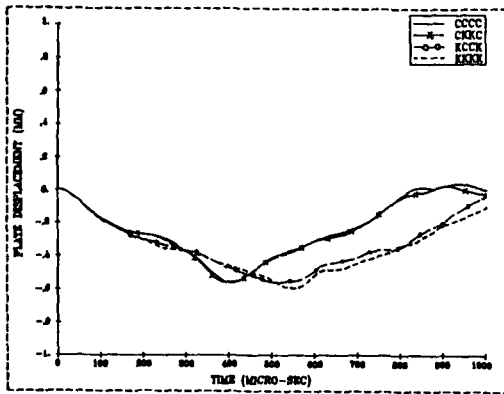


Fig. 11 Displacements of the plate center for various plates—CCCC, CKKC, KCCK & KKKK—with simply supported edges. Impacted by 12.7mm dia. and 15gm steel rod at 3.0m/s

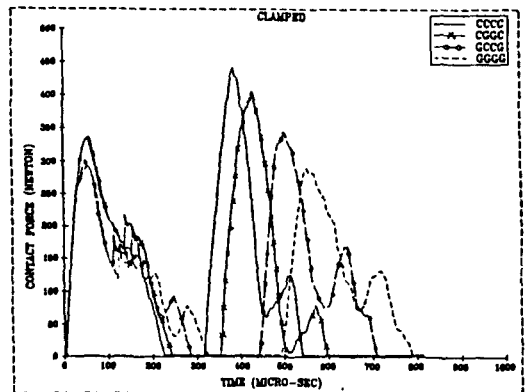


Fig. 13 Contact forces between the impactor and various plates—CCCC, CGGC, GCCG & GGGG—with clamped edges. Impacted by 12.7mm dia. and 15gm steel rod at 3.0m/s

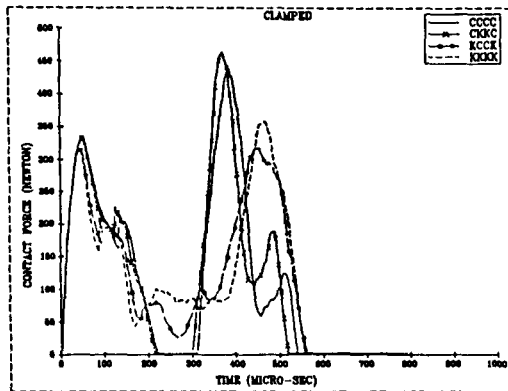


Fig. 14 Contact forces between the impactor and various plates—CCCC, CKKC, KCKK & KKKK—with clamped edges. Impacted by 12.7mm dia. and 15gm steel rod at 3.0m/s

Fig. 13은 4단이 고정인 경우의 graphite/epoxy 판과 glass/epoxy 판의 혼합적층판(CGGC, GCCG)에서의 시간에 따른 충격자와 판의 접촉력 변화를 각각의 단일적층판(CCCC, GGGG)의 경우와 비교한 것이다. 여기에서도 4단이 단순지지인 경우의 Fig. 7과 마찬가지로 충격면이 동일한 재료로 구성된 적층판들은 어느정도 유사한 충격응답을 갖는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 14는 4단이 고정인 경우의 graphite/epoxy 판과 kevlar/epoxy 판의 혼합적층판(CKKC, KCKK)에서의 시간에 따른 충격자와 판의 접촉력 변화를 각각의 단일적층판(CCCC, KKKK)에서의 값과 비교한 것이며, 이 경우 역시 Fig. 10의 단순지지인 판에서의 응답과 마찬가지로 충격면에 동일한 재료를 갖는 적층판들은 유사한 응답이 나타났다.

4. 결 론

혼합적층된 복합재료 평판이 저속 충격을 받았을 때의 응답에 대하여 유한요소법을 사용하여 수치해석 하였다.

그 결과, 동일 구성비율을 갖는 혼합 적층판일지라도 그 충격에너지 흡수율은 혼합 적층배열에 따라 세 배로 까지 증가하는 큰 차이를 보여 주었으며, 따라서 혼합적층판에서의 적층배열은 외부층에 충격저항이 우수한 재료를 사용함이 바람직하다는 것을 알 수 있었다.

또한, 적층판들과 충격자 사이의 접촉력 변화,

관중양의 변위 및 충격자의 속도변화는 충격면의 재료특성에 따라 차이가 나타나며, 충격면에 동일한 재료를 갖는 적층판들은 유사한 충격응답을 나타낸다는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) Sun, C.T., and Chattopadhyay, S., 1975, "Dynamic Response of Anisotropic Laminated Plates Under Initial Stress to Impact of a Mass", J. of Appl. Mech., Vol. 42, pp. 693~698.
- (2) Greszczuk, L.B., 1982, "Damage in Composite Materials Due to Low Velocity Impact", Impact Dynamics, John Willey & Sons, New York, pp. 55~94.
- (3) Sun, C.T., and Chen, J.K., 1985, "On the Impact of Initially Stressed Composite Laminates", J. of Composite Materials Vol. 19, pp. 490~504.
- (4) 안국찬, 김문생, 김규남, 1989, "저속충격을 받는 적층 복합재의 응력과 전파에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제13권, 제1호, pp. 9~19.
- (5) 이영신, 박용, 1990, "고차 전단 변형 이론에 의한 복합재료 적층판의 저속 충격응답", 대한기계학회 논문집, 제14권, 제6호, pp.1365~1381.
- (6) Adams, D.F., and Keith Miller, A., 1975, "An Analysis of the Impact Behavior of Hybrid Composite Materials", Materials Science and Engineering, Vol. 19, pp. 245~260.
- (7) Dorey, G., Sidey, G. R., and Hutchings, J., 1978, "Impact Properties of Carbon Fiber/Kevlar 49 Fiber Hybrid Composites", Composites, Vol. 18, pp. 25~32.
- (8) Adams, D.F., and Zimmerman, R.S., 1986, "Static and Impact Performance of Polyethylene Fiber/Graphite Fiber Hybrid Composites", SAMPE J., Vol. 22, pp. 10~16.
- (9) Jang, B.Z., Chen, L.C., Wang, C.Z., Lin, H.T., and Zee, R. H., 1989, "Impact Resistance and Energy Absorption Mechanisms in Hybrid Composites", Composites Science and Technology, Vol. 34, p. 305.
- (10) Yang, S.H., and Sun, C.T., 1982, "Indentation Law for Composite Laminates", ASTM STP 787, p. 425.
- (11) Whitney, J.M., and Pagano, N.J., 1970, "Shear Deformation in Heterogeneous Anisotropic Plates", J. of Appl. Mech., Vol. 37, pp. 1031~1036.
- (12) Meyer, P.I., 1988, "Low-Velocity Hard-Object Impact of Filament-Wound Kevlar/Epoxy Composite", Composites Science and Technology, Vol. 33, pp. 279~293.