

복합적층판의 초기응력에 의한 충격거동 특성

Characteristic of Impact Behavior of Laminated Composite Plates due to Initial Stress

김 승 덕* 강 주 원** 권 숙 준***
Kim, Seung-Deog Kang, Joo-Won Kwon, Suk-Jun

요 약

복합적층판은 다른 금속재료에 비해 높은 비강도, 비강성 등의 우수한 역학적 특성을 지니므로 최근 다양한 분야에서 사용하고 있다. 그러나 이러한 복합적층판은 일반 금속재료에 비해 충격에 약하다는 단점이 있다. 이 점을 해결하기 위한 연구는 많은 연구자들에 의해 다양하게 시도되고 있다. 본 연구는 복합적층판에 초기응력을 도입하여 충격거동 특성을 파악한다. 고전적인 이론식인 Hertz의 접촉법칙과 실험식인 Sun과 Tan의 압입법칙을 포함한 유한요소프로그램을 이용하여 복합적층판의 초기응력에 의한 충격거동 특성을 조사한다.

Abstract

Laminated composite plates have shown their superiority over metals in applications requiring high specific strength, high specific modulus, and so on. Therefore, they have used in various industry. However, they have poor resistance to impact compared to typical metal materials. To resolve this problem by many researchers for a variety of studies have been attempted. This study investigates characteristic of impact behavior of laminated composite plates due to initial stress. Using finite element program which involved the indentation law, we investigate characteristic of impact behavior of laminated composite plates due to initial stress.

키워드 : 유한요소법, 복합적층판, 초기응력, 충격거동, 접촉력

Keywords : Finite element method, Laminated composite plate, Initial stress, Impact behavior, Contact force

1. 서 론

평판은 항공기, 선박, 토목 및 건축구조물에 많이 사용되는 구조요소이다. 이에 관한 이론적 연구가 많은 연구자들에 의해 보고되어 왔다. 이러한 평판에 적용되는 구조재료로, 알루미늄, 철과 같은 일반 금속재료가 많이 사용되어 왔으며, 최근에는 복합적층판의 적용이 점차 증가되는 추세이다. 이와 같이

복합적층판의 적용이 점차 증가되는 이유는 그것이 일반 금속재료에 비해 높은 비강도(High Specific Strength), 높은 비강성(High Specific Modulus), 높은 감쇠(High Damping) 및 열적 특성(Thermal Characteristics)등을 지니기 때문이다. <그림 1>과 같이 복합적층판은 우주·항공, 선박, 건설 분야뿐만 아니라 에너지관련 산업 등 폭 넓은 분야에서 적용되고 있다. 그러나 이러한 복합적층판은 일반 금속재료에 비해 소성변형이 거의 없는 강한 취성을 띠며, 일반 금속 재료에 비해 충격에 대한 저항성이 낮다. 그리하여 복합적층판의 적용 시 이에 대한 충

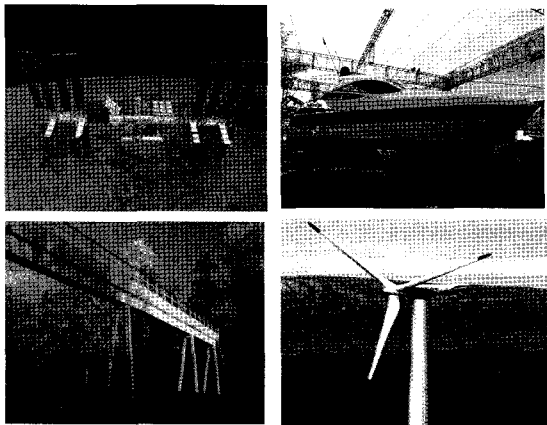
* 교신저자, 세명대학교 건축공학과 교수, 공학박사
Tel : 043-649-1326 Fax : 043-649-1326
E-mail : seungdeog@yahoo.ca

** 영남대학교 건축학부 교수

*** 세명대학교 건축공학과 공학석사

격 거동 특성의 조사는 매우 중요하다.

Hertz는 마찰이 없는 타원접촉의 정적 해를 구하여 접촉문제의 공학적 접근을 시도하였다. 이 때 한 쪽 구의 반지름을 무한대로 하면 구와 반무한체와의 접촉법칙을 얻게 된다. 이방성재료인 복합적층판의 충격해석에도 하중인 접촉력의 해석을 위해 등방성 물체의 정적 접촉문제에 적용할 수 있는 Hertz식을 그대로 또는 수정하여 사용한 연구들이 있다.^{1) 2)} 이후 Yang과 Sun³⁾, Sun과 Tan²⁾은 실험에 의해 얻은 접촉력 관계식을 발표하였다. Chen⁴⁾은 퍼듀대학교에서 복합적층판의 비선형해석에 관하여 연구를 하였다. 국내에도 홍창선⁵⁾, 최익현⁶⁾, 안국찬^{7) 8)} 등에 의해 많은 연구가 진행되어왔다.



〈그림 1〉 복합적층판의 적용

이와 같이 복합적층판의 충격거동에 관해서 다양하게 연구되고 있으나, 복합적층판의 초기응력에 의한 충격거동 특성에 관한 연구는 미비한 실정이다. 본 연구에서는 복합적층판과 같은 최신재료가 충격에 노출되었을 때 판의 초기응력 도입은 그의 거동에 어떤 영향을 미치는지 알아보기 위해 이론적인 Hertz식과 실험적인 Sun과 Tan의 압입법칙을 포함한 유한요소프로그램을 이용하여 초기응력을 받는 복합적층판(흑연/에폭시)의 충격거동 특성을 조사한다.

2. 이론전개 및 수식화

2.1 접촉력에 대한 관계식

고전적인 Hertz의 접촉법칙은 식(1)과 같다.

$$F = k\alpha^{1.5} \tag{1}$$

여기서, F 와 α 는 각각 판과 충격체 사이에 발생하는 접촉력과 압입량이며, 상수 k 는 두 물체의 재료성질과 형태 등에 관계되는 계수이다. Hertz는 상수 k 를 식(2)와 같이 정의하였다.

$$k = \frac{4}{3} \sqrt{r} / \left\{ \frac{1 - (\nu_r)^2}{E_r} + \frac{1 - (\nu_p)^2}{E_p} \right\} \tag{2}$$

여기서, r , ν_r , E_r 은 각각 충격체의 반지름, 포아송비, 탄성계수이고, ν_p , E_p 는 각각 복합적층판의 포아송비, 탄성계수이다. 그 후 Sun과 Yang의 정적 압입실험에 의해 식(1)을 이방성 물체에 그대로 쓸 수 없다는 것이 증명되었고³⁾, Sun과 Tan은 $[0^\circ / 45^\circ / 0^\circ / -45^\circ / 0^\circ]_{2s}$ 로 적층된 흑연/에폭시 복합적층판에 대하여 식(3)과 같은 접촉력 관계식을 얻었다.²⁾

재하 : $F = k\alpha^{1.5} \quad (0 < \alpha \leq \alpha_m)$

비재하 : $F = F_m \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_m - \alpha_0} \right)^q \tag{3}$

재재하 : $F = k_{re} (\alpha - \alpha_0)^{1.5}$
 $(k_{re} = F_m / (\alpha_m - \alpha_0)^{1.5})$

여기서, F_m 과 α_m 은 각각 비재하 시작 시의 접촉력과 압입량이고, α_0 는 영구압입량이다. 식(4)와 같이 α_m 이 임계압입량(α_p)보다 작은 경우에는 영구압입이 0이 되고, α_m 이 α_p 보다 클 경우에는 α_m 과 α_p 의 차와 α_0 사이에는 선형적인 관계가 생긴다.²⁾

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= \beta(\alpha_m - \alpha_p) && (\text{if } \alpha_m > \alpha_p) \\ \alpha_0 &= 0 && (\text{if } \alpha_m < \alpha_p) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, k, q, β, α_p 는 복합적층판의 적층순서와 충격체의 기하학적 형상에 의해 결정되는 계수이다.

2.2 복합적층판의 구성방정식

Mindlin 평판이론과 von-Karman 대치짐이론을 이용하여 판의 변형도-변위 관계식을 나타내면 식(5)와 같다.

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + z \frac{\partial \psi_x}{\partial x} \equiv \epsilon_1^0 + z k_1 \\ \epsilon_2 &= \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + z \frac{\partial \psi_y}{\partial y} \equiv \epsilon_2^0 + z k_2 \\ \epsilon_6 &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial w} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} + z \left(\frac{\partial \psi_x}{\partial y} + \frac{\partial \psi_y}{\partial x} \right) \equiv \epsilon_6^0 + z k_6 \\ \epsilon_4 &= \psi_y + \frac{\partial w}{\partial y} \equiv \epsilon_4^0 \\ \epsilon_5 &= \psi_x + \frac{\partial w}{\partial x} \equiv \epsilon_5^0 \end{aligned} \quad (5)$$

이것을 k 번째 층에 대해 표현하면 식(6)과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_6 \end{Bmatrix}_k = \begin{Bmatrix} \epsilon_1^0 \\ \epsilon_2^0 \\ \epsilon_6^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_6 \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \end{Bmatrix}_k = \begin{Bmatrix} \epsilon_4^0 \\ \epsilon_5^0 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

위의 변형도-변위 관계식에서는 von-Karman 대치짐이론의 가정대로 u, v, ψ_x, ψ_y 의 일차미분의 곱항들은 무시되고⁹⁾ 각 층에 작용되는 응력들을 판의 두께로 적분하면 판에 작용하는 힘, 모멘트 그리고 전단력을 식(7)과 같이 구할 수 있다.¹⁰⁾

$$\begin{aligned} (N_i, M_i) &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (1, z) \sigma_i^k dz, \quad (i=1, 2, 6) \\ (Q_2, Q_1) &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (\sigma_4^k, \sigma_5^k) dz \end{aligned} \quad (7)$$

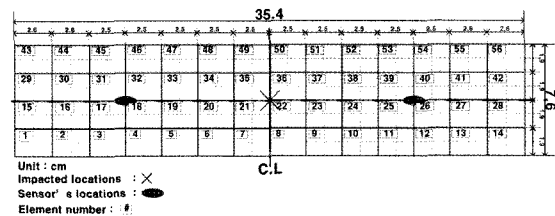
여기서, N_i, M_i, Q_i 는 각각의 축방향과 연관된 면내력, 휨 모멘트, 전단력이다.

3. 해석 예제

초기응력을 받는 복합적층판의 충격거동 특성을 파악하기 위해 사용된 판의 해석모델형상은 <그림 2>와 같다. 경계조건은 단변방향을 clamp, 장변방향을 단순지지로 하였다. 판의 재료성질은 <표 2>와 같고, 충격체의 재료성질은 <표 3>과 같다. 3.1절에서는 초기압축응력을 받는 판의 충격거동과 초기응력을 받지 않는 판의 충격거동을 비교한다. 3.2절에서는 초기인장응력을 받는 판의 충격거동과 초기응력을 받지 않는 판의 충격거동을 비교한다. 해석모델의 명명은 편의상 <그림 3>과 같이 하기로 한다. 가령, <그림 3>과 같이 Case 1H인 해석모델로 예를 들어보면, 아라비아숫자 1은 첫 번째 해석모델유형을 의미하고 뒤이어 오는 알파벳 H는 Hertz의 접촉법칙을 유한요소해석에 적용하여 해석함을 의미한다. 만약에 동일한 첫 번째 해석모델유형을 Sun과 Tan의 압입법칙을 적용하여 해석한다면 Case 1S로 표기할 수 있다. 또한 Sun과 Tan의 압입법칙에 사용되는 계수는 <표 1>과 같다.^{10) 11) 12)}

<표 1> Sun과 Tan의 압입법칙 계수

Contact coefficient (k)	1260800
Power index of loading (n)	1.5
Contact (β)	0.094
Critical indentation (α_p)	0.001667
Power index of unloading (q)	2.5



<그림 2> 해석모델



<그림 3> 해석모델의 명명방법

〈표 2〉 복합적층판의 재료성질

$E_x = E_y$ (GPa)	G_{xy} (GPa)	G_{xz} (GPa)	$\nu_{xy} = \nu_{yx}$	ρ_0 (g/mm ³)
75.8	5.51	4.07	0.05	0.00157

〈표 3〉 충격체의 재료성질

Mass(g)	Radius(mm)	$E_x = E_y$ (GPa)	ν
75.8	55.1	215.6	0.3

3.1 초기압축응력을 받는 복합적층판

초기압축응력을 받는 복합적층판의 충격거동 특성을 조사하기 위해 〈표 4〉와 같은 해석모델을 계획하였다. Case 1H(S)는 초기응력을 받지 않는 판에 해당하고, Case 2H(S)는 초기압축응력을 400(N/cm²) 만큼 받는 판에 해당한다. 판과 충격체의 초기접촉 속도는 242cm/sec로 하였으며, 이에 대한 접촉력, 판의 변위, 변형률해석 결과는 〈그림 4〉와 같다.

〈표 4〉 해석모델의 유형

Case	초기응력 (N/cm ²)
Case 1H(S)	0
Case 2H(S)	-400

〈표 5〉는 해석모델의 유형별 최대변위값을 나타내며, 초기압축응력을 받는 판의 경우가 초기응력을 받지 않는 판의 경우보다 큰 최대변위값을 보임을 알 수 있다. 〈표 6〉은 해석모델의 유형별 최대접촉력과 접촉시간을 나타내며, 초기압축응력을 받는 판의 경우가 초기응력을 받지 않는 판보다 더 작은 최대접촉력을 보임을 알 수 있다. 또한, 초기압축응력을 받는 판이 초기응력을 받지 않는 판보다 더 긴 접촉시간을 보임을 알 수 있다. 이는 초기압축응력이 판의 변위가 커지고 변위응답주기가 길어지는 softening현상을 야기함을 보여준다. 최대접촉력의 경우, Case 1H는 206.3N의 접촉력을 보이는데 비해 Case

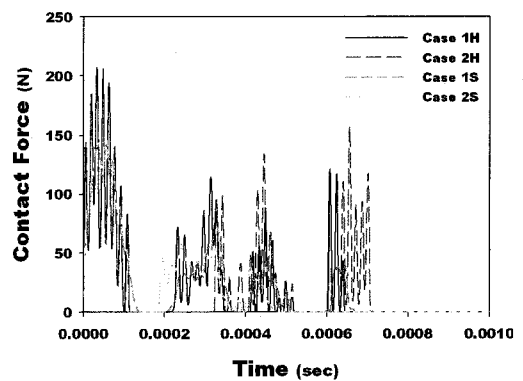
1S는 142N의 접촉력을 보인다. 이와 같은 오차는 해석에 사용된 두 접촉력 관계식에서 접촉력 계산과정의 차이에 기인한다. 〈그림 4〉는 접촉력, 판의 변위, 판의 변형률을 보여준다. 판의 정중앙인 131번절점에 충격을 가하였으므로 변형률 결과가 왼쪽센서와 오른쪽센서에서 서로 같게 나타남을 볼 수 있다.

〈표 5〉 해석모델의 유형별 최대변위값

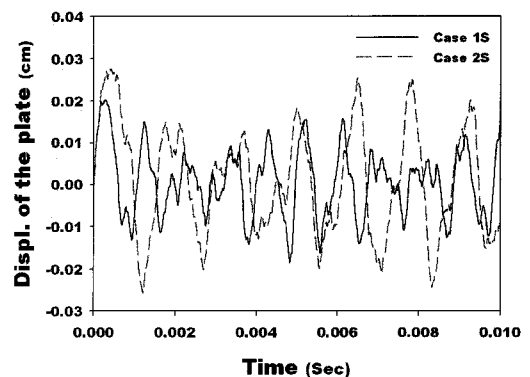
Case	최대변위값 (cm)
Case 1S	0.0204
Case 2S	0.0277

〈표 6〉 해석모델의 유형별 최대접촉력과 접촉시간

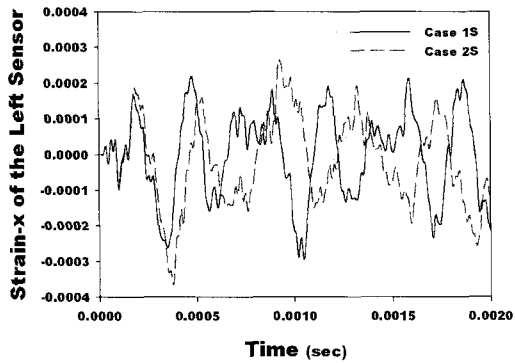
Case	최대접촉력 (N)	접촉시간 (sec)
Case 1H	206.3	0.000644
Case 2H	198.8	0.000708
Case 1S	142.0	0.000668
Case 2S	137.1	0.000726



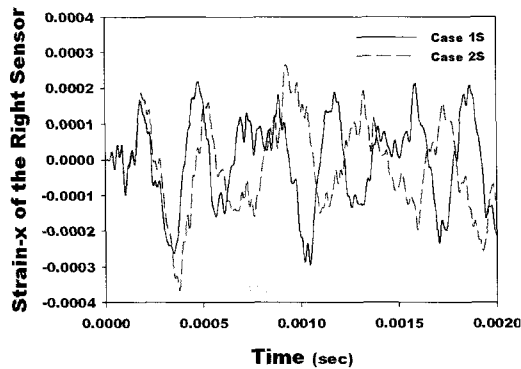
(a) 접촉력



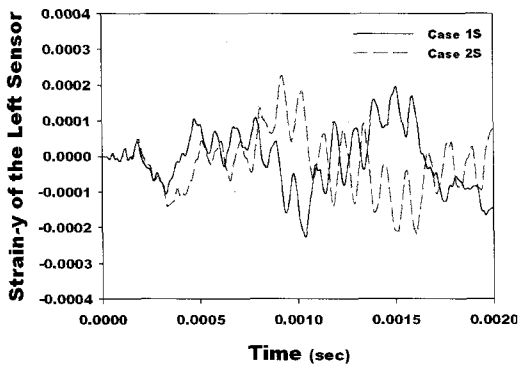
(b) 복합적층판의 변위응답



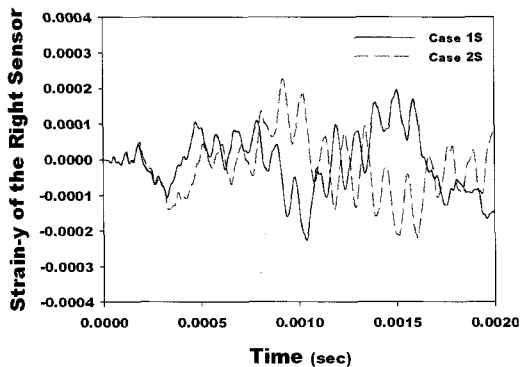
(c) 왼쪽 센서의 변형률-x



(d) 오른쪽 센서의 변형률-x



(e) 왼쪽 센서의 변형률-y



(f) 오른쪽 센서의 변형률-y

〈그림 4〉 초기압축응력에 따른 복합적충판의 저속충격거동

3.2 초기인장응력을 받는 복합적충판

초기인장응력을 받는 복합적충판의 충격거동을 조사하기 위해 〈표 7〉과 같은 해석모델을 계획하였다. Case 1H(S)는 초기응력을 받지 않는 판에 해당하고, Case 3H(S)는 초기인장응력을 $400(N/cm^2)$ 만큼 받는 판에 해당한다. 판과 충격체의 초기접촉 속도는 $242cm/sec$ 로 하였으며, 이에 대한 접촉력, 판의 변위, 변형률해석 결과는 〈그림 5〉와 같다.

〈표 7〉 해석모델의 유형

Case	초기응력 (N/cm^2)
Case 1H(S)	0
Case 3H(S)	400

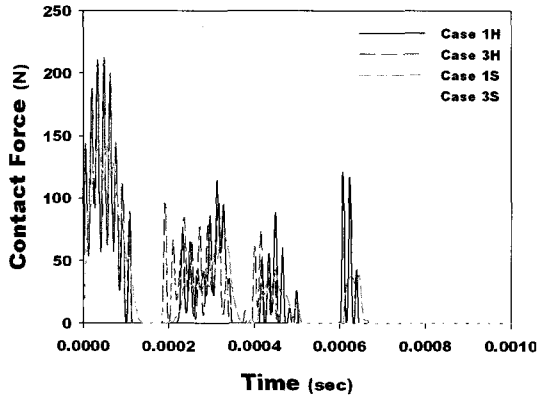
〈표 8〉은 해석모델의 유형별 최대변위값을 나타낸다. 초기인장응력을 받는 판의 경우가 초기응력을 받지 않는 판의 경우보다 더 작은 최대변위값을 보인다. 〈표 9〉는 해석모델의 유형별 최대접촉력과 접촉시간을 나타낸다. 초기인장응력을 받는 판이 초기응력을 받지 않는 판보다 더 큰 최대접촉력을 보인다. 또한, 초기인장응력을 받는 판이 초기응력을 받지 않는 판보다 더 짧은 접촉시간을 보인다. 이는 초기인장응력이 판의 변위가 줄어들고 변위응답주기가 짧아지는 hardening현상을 야기함을 보여준다. 최대접촉력의 경우, Case 3H는 $212.9N$ 의 접촉력을 보이는데 비해 Case 3S는 $146.9N$ 을 보인다. 이러한 오차는 앞 절에서 언급한 바와 마찬가지로 유한요소프로그램에 적용된 두 접촉력관계식의 접촉력계산과정에서의 차이 때문에 발생한다. 〈그림 5〉는 접촉력, 판의 변위, 판의 변형률을 보여준다. 판의 정중앙인 131번절점에 충격을 가하였으므로 변형률결과가 왼쪽센서와 오른쪽센서에서 서로 같게 나타남을 볼 수 있다.

〈표 8〉 해석모델의 유형별 최대변위값

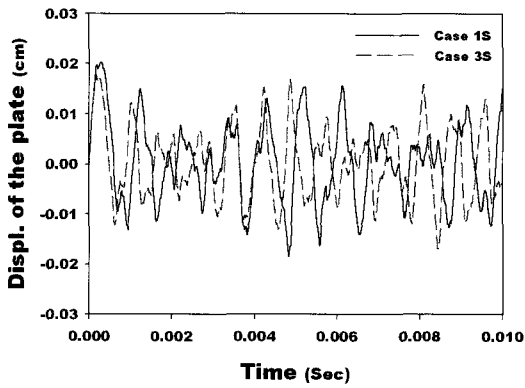
Case	최대변위값 (cm)
Case 1S	0.0204
Case 3S	0.0177

〈표 9〉 해석모델의 유형별 최대접촉력과 접촉시간

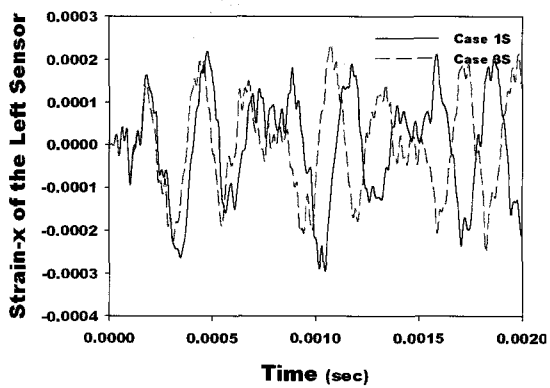
Case	최대접촉력 (N)	접촉시간 (sec)
Case 1H	206.3	0.000644
Case 3H	212.9	0.000452
Case 1S	142.0	0.000668
Case 3S	146.9	0.000474



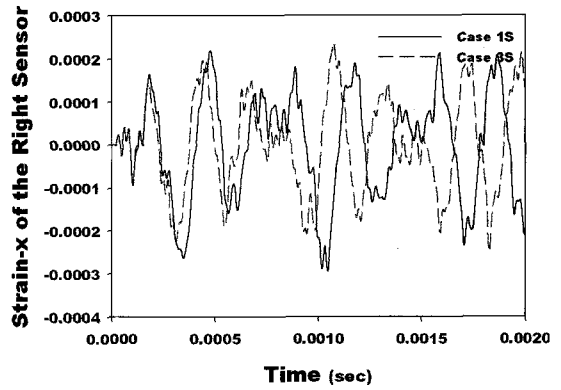
(a) 접촉력



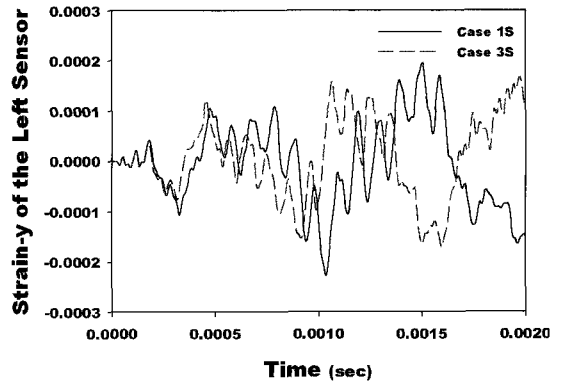
(b) 복합적층판의 변위응답



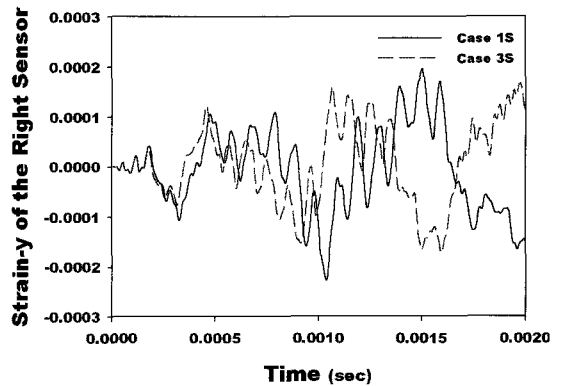
(c) 왼쪽 센서의 변형률-x



(d) 오른쪽 센서의 변형률-x



(e) 왼쪽 센서의 변형률-y



(f) 오른쪽 센서의 변형률-y

〈그림 5〉 초기인장응력에 따른 복합적층판의 저속충격거동

4. 결 론

본 연구에서는 Hertz의 접촉법칙, Sun과 Tan의 압입법칙을 유한요소프로그램에 적용하여 초기응력을 받는 흑연/에폭시(Graphite/Epoxy) 복합적층판의 충격거동 특성을 조사하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) $400(N/cm^2)$ 의 초기압축응력을 도입한 복합적층판의 경우, 초기응력이 도입되지 않은 복합적층판의 경우보다 변위는 35.78% 증가하고, 접촉력은 3.45% 감소하며 변위응답주기가 길어지는 softening현상을 보인다.
- 2) $400(N/cm^2)$ 의 초기인장응력을 도입한 복합적층판의 경우, 초기응력이 도입되지 않은 복합적층판의 경우보다 변위는 13.24% 감소하고, 접촉력은 3.45% 증가하며 변위응답주기가 짧아지는 hardening현상을 보인다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호# '06 건설핵심 B03)에 의해 수행되었습니다.

- 참고문헌 -

1. Werner, Goldsmith., Impact, DOVER, Mineila, New York, 1960
2. T. M. Tan and C. T. Sun., "Wave Propagation in Graphite/Epoxy Lminates Due to Impact," NASA CR-168057, 1982
3. Yang, S. H. and Sun. C. T., "Indentation law for composite lminates," ASTM, STP 787, Ed. I. M. Daniel, 1982, pp. 425-49
4. J. K Chen., "Nonlinear Analysis of Composite Laminates," Purdue University, 1984
5. 최익현, 홍창선., "복합적층판의 저속충격시험 및 거동에 대한 실험적 연구," 대한재료학회논문집, 제18권, 제2호, 1994, pp.359-371
6. 최익현., "복합적층판에 대한 저속충격해석과 접촉법칙," 한국복합재료학회지, 제16권 제1호, 2003, pp.50-57
7. 안국찬, 김문생, 김규남., "유한 요소법에 의한 적층 복합 보의 충격 해석," 대한재료학회논문집, 제12권, 제4호, 1988, pp.652-661
8. 안국찬., "유한 요소법에 의한 적층 복합 보와 판의 충격 해석," 부산대학교 대학원 박사학위논문, 1990
9. Fung, Y. C., Foundations of Solid Mechanics, Prentice-Hall, 1965
10. 권숙준, 김승덕, "적층수에 따른 복합판의 저속 충격거동 조사," 한국공간구조학회 학술발표대회 논문집, 제 7권, 제 1호, 2010.05
11. Kwon, S. J., Choi, C. K. and Kim, S. D., "Investigation of transient responses of composite plates under low-velocity impact load considering various thicknesses," Symposium of IASS, Shanghai, 2010.11
12. 권숙준, "저속충격을 받는 복합적층판의 충격 거동에 관한 연구," 세명대학교 일반대학원 석사학위논문, 2011

(접 수 일 자 : 2011년3월7일)

(심사완료일자 : 2011년6월17일)

(게재확정일자 : 2011년6월30일)