

# 이방성 재료의 충격거동에 관한 시뮬레이션

안국찬<sup>#</sup>, 정대식<sup>\*</sup>, 김봉환<sup>\*\*</sup>

## Impact Behavior Simulation of Anisotropic Materials

Kook-Chan Ahn<sup>#</sup>, Dae-Sik Jung<sup>\*</sup>, Bong-Hwan Kim<sup>\*\*</sup>

(Received 10 November 2010; received in revised form 14 January 2011; accepted 21 February 2011)

### ABSTRACT

A study was performed to investigate the dynamic behaviors of fiber-reinforced composite materials subjected to transversely low-velocity impact.

For this purpose, the simulation of modified beam finite element based on higher order beam theory for two(isotropic and anisotropic) materials is carried out according to the changes of material property, stacking sequence, geometric dimension and impact velocity of steel ball, etc.

Main composite materials for simulation are composed of  $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/-90^\circ/0^\circ]_{2s}$ ,  $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/-90^\circ/0^\circ]_s$  and  $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{2s}$ ,  $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_s$  stacking sequences.

The effectiveness of this simulation for qualitative and quantitative evaluations in composite materials subjected to foreign object impact was established.

**Key Words** : Fiber-reinforced Composite Materials(섬유강화복합재), Isotropic(등방성), Anisotropic(이방성), Stacking Sequences(적층순서)

### 1. 서 론

적층 복합재의 주요한 충격 손상에는 섬유의 파단과 단층에 발생하는 모재 균열(matrix cracking), 그리고 단층과 단층사이의 경계면에 발생하는 층간분리(delamination)가 있다. 이러한 손상은 외부에 나타나지 않고 복합재 내부에 발생하는 손상으로써 복합재 구조물의 강도를 현저히 저하시켜 복합재 구조물의 파괴를 일으키는 원인이 된다. 이것은 초기 파괴 거동과 관련이

있기 때문에 매우 중요하므로 외부 물체의 충격을 받게 되는 복합재 구조물을 설계할 때에 반드시 고려하여야 할 복합재의 기하학적 변화에 따른 충격 거동(접촉력, 변위, 응력특성 등)에 관한 이론적 연구는 아주 중요한 과제이다.

균질, 등방성 재료로 구성된 보에 대한 충격 문제는 아주 광범위하게 연구되어 왔다<sup>[1]</sup>. 접촉 거동의 정확한 예측은 충격 문제를 해석하기 위해 중요한 단계중의 하나일 것이라고 단정할 수 있을 것이며, 이를 위해 Hertz<sup>[2]</sup>에 의해 유도된 탄성구와 탄성면 사이의 고전적 접촉 법칙을 이용하여 충격에 의한 동적 응답 해석을 위한 힘 함수(forcing function)로 사용하였다<sup>[3]</sup>.

Timoshenko<sup>[4]</sup>는 탄성구의 충격을 받게 되는 보의

\* 경남과학기술대학교 산업대학원 자동차공학과

\*\* 경남과학기술대학교 자동차공학과

# 교신저자 : 경남과학기술대학교

E-mail : kcahn@gntech.ac.kr

순간적 동적 거동을 해석하기 위하여 Hertz 접촉 법칙을 Bernoulli-Euler 보 이론과 결합함으로써 기초적 시도를 하였다. Karas<sup>[4]</sup>는 이 연구를 단순 지지된 사각 평판에 대한 충격으로 확장하여 접촉점에서의 접촉력과 변위를 구하였다. 그리고 Sun<sup>[5]</sup>은 보의 충격 해석을 위해 균질 등방성 재료에 대한 고차 보 유한 요소법(higher-order beam finite element method)을 개발하여 해석 정도의 우수성을 입증하였으며, 이 이론에 의한 6 자유도 (6 degrees of freedom)는 상용 요소(conventional element)의 4 자유도보다 동적 응답의 해석에 훨씬 더 효과적이라는 것을 보였음에도 불구하고 등방성 및 이방성 재료에 대하여 재료의 물성, 적층순서와 기하학적 변화 및 외부물체(강구)의 충격 속도 변화 등에 따른 충격거동에 관한 이론적 연구는 아직도 미비한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 Ahn<sup>[6]</sup>에 의해 개발되어 복합재 충격 거동 연구에서 타당성이 입증된 충격 해석용 프로그램을 수정 보완하여 복합재의 물성, 적층 형태와 기하학적 변화 및 강구의 충격속도 변화에 따른 충격 거동 등을 규명하고자 한다.

## 2. 이론 해석

복합재가 물체의 충격을 받을 때 재료에 발생되는 탄성파(elastic waves)는 단파 진동 모드(short wave length vibration modes)이며, 이러한 단파를 가지는 파동(wave motion)을 표현하기 위해서는 보 요소(beam element)에 많은 자유도(degrees of freedom)가 필요하다. 자유도는 유한 요소의 수를 증가시키거나 각 요소에 대한 절점 요소의 절점 자유도(nodal degrees of freedom)를 증가시킴으로써 그 수를 증가시킬 수 있다.

Yang<sup>[7]</sup>은 봉(bar)의 축 진동(axial vibration)의 경우에 절점 자유도를 증가시키는 것이 절점 자유도가 작고 요소의 수가 많은 경우보다 훨씬 우수하다는 것을 보였으며, Sun<sup>[5]</sup>은 균질, 등방성 보의 충격 해석을 위하여 4 자유도를 가지는 상용 요소(conventional element)보다 절점 자유도가 2개 많은 고차 보 유한 요소(higer-order beam finite element)

이론을 개발하여 충격 해석에 적용하여 유효성을 입증하였다.

Hertz의 고전적 접촉 법칙은 균질, 등방성 재료의 접촉 거동을 해석하는 데 많이 이용되었으며, Willis<sup>[8]</sup>는 횡 방향으로 등방인 반공간을 누르는 강구(steel ball)에 대해서 Hertz 접촉 법칙

$$F = k\alpha^n \quad (1)$$

에서  $n$ 의 값이 1.5가 유효하다는 것을 보였다.

여기서,  $F$ ,  $\alpha$ 와  $n$ 은 각각 접촉력(contact force), 압입량(indentation) 및 부하 과정의 접촉 법칙 지수이고,  $k$ 는 강구(indentor)와 표적물(target)의 물성치 및 강구의 반경에 의해 다음과 같이 정해지는 접촉 계수이다.

$$k = (4/3) (R_s)^{1/2} [ (1-\nu_s^2)/E_s + (1-\nu_t^2)/E_t ]^{-1} \quad (2)$$

식 (2)에서  $R$ ,  $\nu$  및  $E$ 는 각각 반경, 포아송 비와 종탄성 계수이며, 하첨자  $s$ 와  $t$ 는 강구와 표적물을 각각 나타낸다.

본 연구에서는 Wilson과 Clough<sup>[9]</sup>에 의해 제안된 유한 차분 형태의 시간 적분을 행한다.

그런데 해의 안정성을 위해서는 시간 증분  $\delta t$ 가 중요한 인자이므로 Yang<sup>[10]</sup>의 연구 결과인

$$\delta t \leq 2/\omega_m \quad (3)$$

에 따르면, 충격에 의한 복합재의 높은 주파수 응답 특성을 알아볼 수 있도록 본 연구에서는 임계 시간 증분  $\delta t$ 의 10분의 1 이하가 되도록 선택하였다. 식 (3)에서  $\omega_m$ 은 복합재의 최대 고유 주파수이다.

한편, 동적 유한 요소법을 강구(indentor)로 복합재에 횡방향으로 충격을 가하는 경우의 문제 해석에 적용하기 위해서는 충격력 즉 접촉력을 구하는 것이 중요하다. 이를 위해 본 연구에서는 탄성 변형만을 고려한 식 (2)의 접촉 법칙을 적용하였다.

식 (1)에서 압입량  $\alpha$ 는 Fig. 1 에서와 같이

$$a = (w_s)_{t+\delta t} - w_{t+\delta t}(x_o, y_o) \quad (4)$$

로 표현된다. 여기서  $w_s$ 는 강구의 변위이고,  $w$ 는 복합재의 변위이며  $(x_o, y_o)$ 는 접촉점의 좌표값이다.

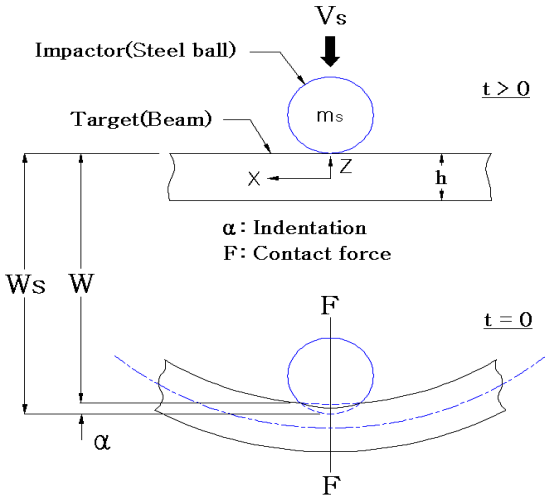


Fig. 1 Central transverse impact of a rigid body

그리고 시간  $t+\delta t$ 에서의 강구의 운동 방정식은

$$F_{t+\delta t} = -m_s(\ddot{w}_s)_{t+\delta t} \quad (5)$$

또는

$$\begin{aligned} m_s(\ddot{w}_s)_{t+\delta t} &= \\ -k [(w_s)_{t+\delta t} - w_{t+\delta t}(x_o, y_o)]^n & \quad (\text{부하과정}) \\ = \left\{ \frac{a - a_o}{a_m - a_o} \right\}^q & \quad (\text{제하과정}) \end{aligned} \quad (6)$$

로 표현되므로 강구와 보 또는 판의 운동은 연계되어 있음을 알 수 있으며, 식 (5)에서  $m_s$ 는 강구의 질량이다.

식 (6)에서 강구의 가속도  $(\ddot{w}_s)_{t+\delta t}$ 를 구하기 위한 초기 조건으로  $(w_s)_{t+\delta t}$ 와  $w_{t+\delta t}(x_o, y_o)$ 의 값을 각각 다음과 같이 근사화 한다.

$$\begin{aligned} (w_s)_{t+\delta t} &= \\ (w_s)_t + \delta t(\dot{w}_s)_t + (\delta t^2/2)(\ddot{w}_s)_t & \quad (7) \\ w_{t+\delta t}(x_o, y_o) &= \\ w_t(x_o, y_o) + \delta t\dot{w}_t(x_o, y_o) + (\delta t^2/2)\ddot{w}_t(x_o, y_o) \end{aligned}$$

식 (6)을 식 (5)에 대입하면 가속도  $(\ddot{w}_s)_{t+\delta t}$ 를 얻을 수 있으며, 접촉력  $F_{t+\delta t}$ 를 구할 수 있다. 그러나 더욱 정확한  $(w_s)_{t+\delta t}$ 와  $w_{t+\delta t}(x_o, y_o)$ 를 구하기 위하여 다음과 같은 형태로 나타내면

$$\begin{aligned} (w_s)_{t+\delta t} &= \\ (w_s)_t + \delta t(\dot{w}_s)_t + (\delta t^2/3)(\ddot{w}_s)_t + (\delta t^3/6)(\ddot{\ddot{w}}_s)_{t+\delta t} & \quad (8) \\ w_{t+\delta t}(x_o, y_o) &= \\ w_t(x_o, y_o) + \delta t\dot{w}_t(x_o, y_o) + (\delta t^2/3)\ddot{w}_t(x_o, y_o) & \\ + (\delta t^3/6)\ddot{\ddot{w}}_{t+\delta t}(x_o, y_o) & \end{aligned}$$

이 되며, 여기서 앞에서 구한  $(\ddot{w}_s)_{t+\delta t}$ 가 대입된다.

식 (8)을 식 (6)에 대입한 결과를 다시 식 (5)에 대입하면 수정된 접촉력이 구해지며 이러한 반복 과정을 통하여 해는 아주 빠르게 수렴하게 된다.

이상의 과정들을 통하여 적층 복합재에 대한 충격 해석용 유한 요소 프로그램을 개발하였다.

### 3. 시뮬레이션

본 연구를 위하여 양단 고정체의 중앙에 직경 12.0mm 강구로 충격을 가하는 경우를 고려하였다.

재료의 중앙을 중심으로 대칭인 보의 절반을 30개의 요소로 나누고, 시간 증분  $\delta t$ 를 0.1

**Table 1 Material properties of the isotropic, anisotropic and steel ball**

재 료 명	물 성 치
등방성 재료	E=207GPa, G=79.6GPa, $\nu=0.30$ , $\rho=7860\text{Kg/m}^3$
복합 재료	유리/에폭시 E <sub>1</sub> =40GPa, E <sub>2</sub> =8.5GPa G <sub>12</sub> =4.25GPa, $\nu_{12}=0.26$ , $\rho=2000\text{Kg/m}^3$
	흑연/에폭시 G <sub>13</sub> = G <sub>13</sub> = G <sub>12</sub> E <sub>1</sub> =120GPa, E <sub>2</sub> =7.9GPa G <sub>12</sub> =5.5GPa, $\nu_{12}=0.30$ , $\rho=1580\text{Kg/m}^3$
강 구	G <sub>23</sub> = G <sub>13</sub> = G <sub>12</sub> G <sub>s</sub> =207GPa, $\nu_s=0.30$ , $\rho=7860\text{Kg/m}^3$

**Table 2 Specification for the simulation**

Material	Fiber orientation	Dimension	Ball velocity
	degree	t×w×l (mm)	(m/sec.)
Isotropic	-	-	-
Glass/epoxy	[0°/90°/0°/-90°/0°] <sub>2s</sub>	1.5×30×300	3
	[0°/45°/0°/-45°/0°] <sub>2s</sub>	3.0×30×300	
Graphite/epoxy	[0°/90°/0°/-90°/0°] <sub>2s</sub>	1.5×30×400	4
	[0°/90°/0°/-90°/0°] <sub>s</sub>	3.0×30×400	5
	[0°/45°/0°/-45°/0°] <sub>2s</sub>	1.5×30×500	
	[0°/45°/0°/-45°/0°] <sub>s</sub>	3.0×30×500	

1) 재료의 물성 변화

재료의 물성에 따른 충격 거동을 비교 연구하기 위하여 Table 1에서 나타난 등방성 재료와 이방성 재료인 복합재의 유리/에폭시, 흑연/에폭시를 사용하였으며 적절한 충격 속도를 가지는 강구를 가정하여 시뮬레이션 하였다.

2) 복합재의 적층 형태 변화

재료의 강성에 따른 충격 거동을 규명하기 위하여 Table 2에 나타난 각각 x 방향과 y 방향으로의 강성이 강조된 [0°/90°/0°/-90°/0°]<sub>2s</sub>, [0°/90°/0°/-90°/0°]<sub>s</sub>와 [0°/45°/0°/-45°/0°]<sub>2s</sub>, [0°/45°/0°/-45°/0°]<sub>s</sub>을 가지는 섬유방향의 복합재를 선정하였다.

3) 복합재의 기하학적 변화

복합재의 기하학적(두께와 길이)의 변화에 따른 충격 거동을 비교하기 위하여 Table 2에 표시된 바와 같이 1.5(3.0)×3×(300, 400, 500)의 크기를 가진 6가지의 경우를 동일한 조건에서 상기 기술과정과 동일하게 수행하였다.

4) 외부 물체(강구)의 충격속도 변화

재료의 충격 속도에 따른 충격 거동 특성 연구를 위하여 Table 2에 표시된 3, 4, 5m/sec.의 3가지 경우를 동일한 조건하에서 수행하였다.

## 4. 검토 및 고찰

복합재의 저속 충격 거동을 규명하기 위하여 수행한 유한요소 시뮬레이션 결과를 Table 3에 정리하여 검토와 고찰을 하고자 한다.

### 4.1 재료의 물성 변화

유한요소 시뮬레이션은 등방성 재료와 이방성 재료(유리/에폭시, 흑연/에폭시)에 대하여 행하였으며, 이방성 재료는 또한 [0°/90°/0°/-90°/0°]<sub>2s</sub>, [0°/90°/0°/-90°/0°]<sub>s</sub>와 [0°/45°/0°/-45°/0°]<sub>2s</sub>, [0°/45°/0°/-45°/0°]<sub>s</sub>의 적층 형태를 구분하여 적용하였다.

Fig. 2~Fig. 3에서 보는 바와 같이 동일한 조건하에서 최대 접촉력은 등방성 재료에서 1,632N으로 매우 높으며 상대적으로 흑연/에폭시 [0°/90°/0°/-90°/0°]<sub>2s</sub>에서 394N과 유리/에폭시 [0°/90°/0°/-90°/0°]<sub>2s</sub>에서 386N의 순으로 나타났다. 그리고 보 변위 측면에서 보면 유리/에폭시 [0°/90°/0°/-90°/0°]<sub>2s</sub>의 경우 0.161mm, 흑연/에폭시 [0°/90°/0°/-90°/0°]<sub>2s</sub>의 경우 0.156mm와 등방성 재료의 경우 0.067mm로 반대 현상을 보여주고 있다.

이는 복합재가 등방성 재료와 비교하여 보 변위가 상대적으로 매우 크기 때문에 최대 접촉력이

매우 작게 나타난 것이며, 이것은 복합재의 비강 로 사료된다.  
 도, 비강성 및 유연성이라는 특성에 기인하는 것으

**Table 3 Results of impact simulation according to changes of material property and dimension in isotropic and anisotropic materials**

보의 길이	충격속도	해석 결과	등방성 재료	유리/에폭시		흑연/에폭시			
				[90] <sub>2s</sub>	[45] <sub>2s</sub>	[90] <sub>2s</sub>	[45] <sub>2s</sub>	[90] <sub>s</sub>	[45] <sub>s</sub>
300(mm)	3.0m/sec.	최대접촉력(N)	1623	386	391	394	401	221	226
		최대압입량(mm)	0.028	0.060	0.060	0.063	0.064	0.043	0.044
		보 변위(mm)	0.067	0.161	0.159	0.156	0.154	0.215	0.213
	4.0m/sec.	최대접촉력(N)	2232	542	550	547	556	302	310
		최대압입량(mm)	0.034	0.075	0.075	0.079	0.079	0.053	0.054
		보 변위(mm)	0.089	0.215	0.213	0.209	0.205	0.285	0.282
	5.0m/sec.	최대접촉력(N)	2825	682	709	711	723	394	401
		최대압입량(mm)	0.040	0.088	0.089	0.094	0.095	0.063	0.064
		보 변위(mm)	0.110	0.269	0.266	0.260	0.257	0.355	0.352
400(mm)	3.0m/sec.	최대접촉력(N)	1754	444	450	447	453	263	268
		최대압입량(mm)	0.029	0.065	0.066	0.069	0.069	0.047	0.048
		보 변위(mm)	0.055	0.142	0.134	0.136	0.134	0.200	0.199
	4.0m/sec.	최대접촉력(N)	2439	615	624	626	635	368	374
		최대압입량(mm)	0.036	0.081	0.082	0.086	0.087	0.060	0.061
		보 변위(mm)	0.073	0.190	0.187	0.183	0.179	0.266	0.063
	5.0m/sec.	최대접촉력(N)	3116	801	811	804	818	472	482
		최대압입량(mm)	0.043	0.097	0.097	0.102	0.103	0.071	0.073
		보 변위(mm)	0.091	0.238	0.234	0.229	0.225	0.331	0.327
500(mm)	3.0m/sec.	최대접촉력(N)	1838	485	490	488	495	310	307
		최대압입량(mm)	0.030	0.069	0.070	0.073	0.074	0.052	0.053
		보 변위(mm)	0.047	0.126	0.124	0.120	0.118	0.189	0.186
	4.0m/sec.	최대접촉력(N)	2574	680	688	683	692	415	422
		최대압입량(mm)	0.038	0.087	0.087	0.091	0.092	0.065	0.066
		보 변위(mm)	0.062	0.169	0.167	0.162	0.159	0.250	0.248
	5.0m/sec.	최대접촉력(N)	3309	874	886	886	898	540	550
		최대압입량(mm)	0.045	0.102	0.103	0.108	0.109	0.078	0.079
		보 변위(mm)	0.077	0.213	0.209	0.204	0.200	0.312	0.308

※ 보의 변위는 충격후 100μsec 경과 할 때의 변위임  
 ※ [90]<sub>2s</sub>는 [0°/90°/0°/-90°/0°]<sub>2s</sub>, [90]<sub>s</sub>는 [0°/90°/0°/-90°/0°]<sub>s</sub>,  
 [45]<sub>2s</sub>는 [0°/45°/0°/-45°/0°]<sub>2s</sub>, [45]<sub>s</sub>는 [0°/45°/0°/-45°/0°]<sub>s</sub>를 의미함

## 4.2. 복합재의 적층형태 변화

등방성 재료인 유리/에폭시와 흑연/에폭시 각각에 대하여 적층형태  $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/-90^\circ/0^\circ]_{2s}$ ,  $[0^\circ/90^\circ/0^\circ/-90^\circ/0^\circ]_s$ 와  $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{2s}$ ,  $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_s$ 를 적용하여 행한 결과 Table 3과 Fig. 4~Fig. 5에서처럼 재료의 탄성 계수가 크고 x 방향의 강성이 클수록  $\{[0^\circ/90^\circ/0^\circ/-90^\circ/0^\circ]_{2s}$  보다는  $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ/0^\circ]_{2s}$  접촉력이 크게 나타났으며, 재료의 변위는 반대 경향을 보여주고 있다.

이는 섬유 방향이 길이 방향으로 놓여 있을수록 강성이 강함에 기인한다는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 다른 경우에도 아주 동일하게 나타남을 Table 3에서 쉽게 볼 수 있다.

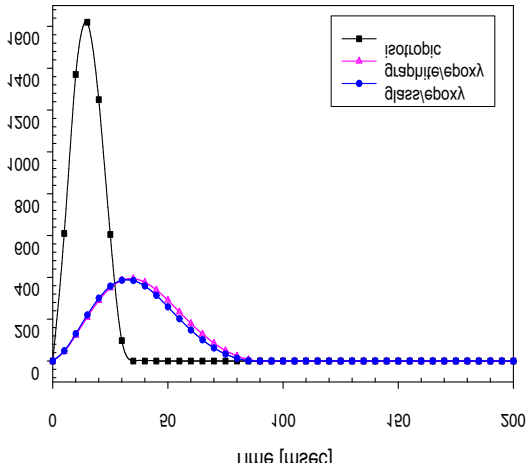


Fig. 2 Contact force for isotropic and anisotropic beam subjected to impact (Velocity=3m/sec, Thickness=3.0mm, Length=300mm)

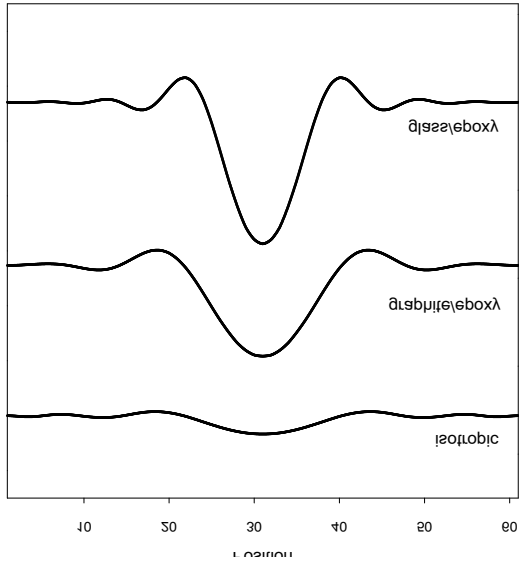


Fig. 3 Displacement profiles of isotropic and anisotropic laminates at 100μsec (Velocity=3m/sec, Thickness=3.0mm, Length=400mm)

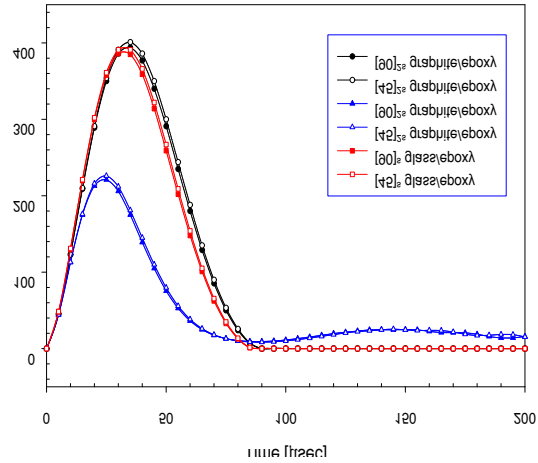
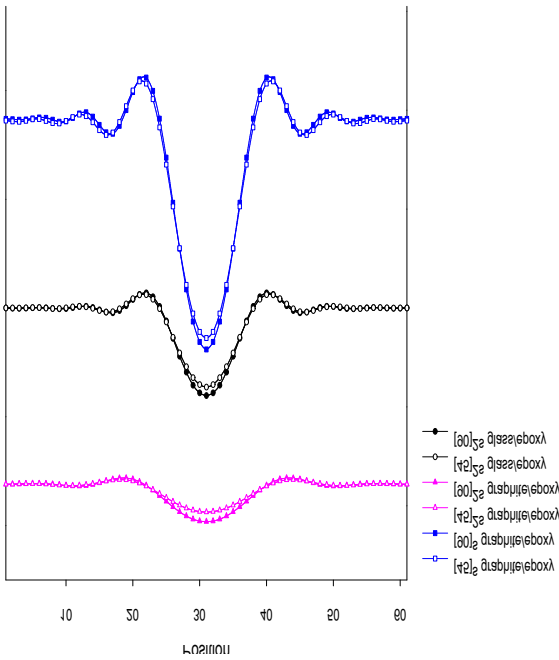


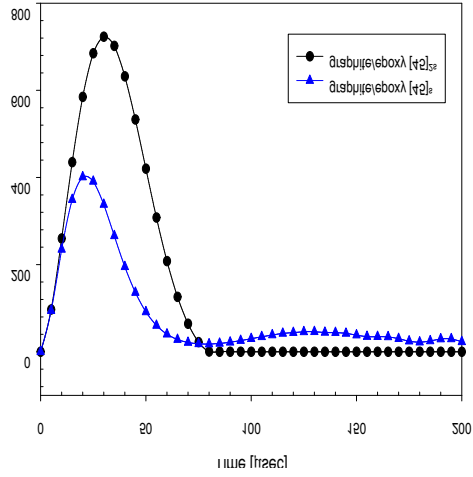
Fig. 4 Contact force for graphite/epoxy and glass/epoxy beam subjected to impact (Velocity=3m/sec, Length=300mm, Thickness= $[90]_{2s}=[45]_{2s}=3.0\text{mm}$ ,  $[90]_s=[45]_s=1.5\text{mm}$ )



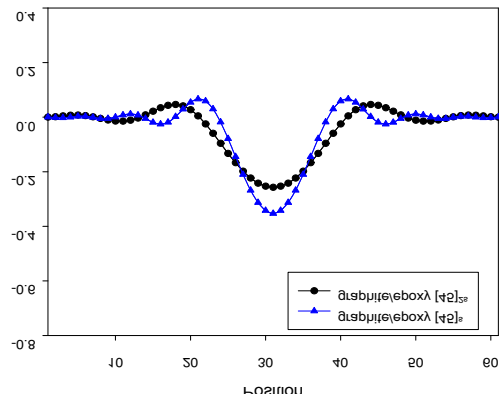
**Fig. 5 Displacement profiles of graphite/epoxy and glass/epoxy laminates at 100µsec**  
 (Velocity=3m/sec, Length=300mm,  
 Thickness=[90]<sub>2s</sub>=[45]<sub>2s</sub>=3.0mm,  
 [90]<sub>s</sub>=[45]<sub>s</sub>=1.5mm)

### 4.3 복합재의 기하학적 변화

복합재의 두께와 길이 변화를 통한 충격 거동을 검토해 보면 Fig. 6와 Fig. 9에서 보는 바와 같이 두께가 두꺼울수록, 그리고 길이가 길수록 접촉력은 커진다는 것을 알 수 있다. 그리고 보의 변위가 반대 경향을 보인다는 것은 당연하다.



**Fig. 6 Contact force for a graphite/epoxy beam subjected to impact**  
 (Velocity=5m/sec, Length=300mm,  
 Thickness=[45]<sub>2s</sub>=3.0mm, [45]<sub>s</sub>=1.5mm)



**Fig. 7 Displacement profiles of graphite/epoxy laminates at 100µsec**  
 (Velocity=5m/sec, Length=300mm,  
 Thickness=[45]<sub>2s</sub>=3.0mm, [45]<sub>s</sub>=1.5mm)

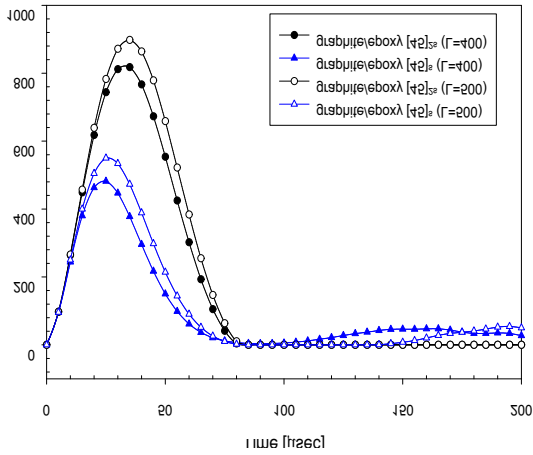


Fig. 8 Contact force for a graphite/epoxy beam subjected to impact (Velocity=5m/sec, Thickness=[45]<sub>2s</sub>=3.0mm, [45]<sub>s</sub>=1.5mm)

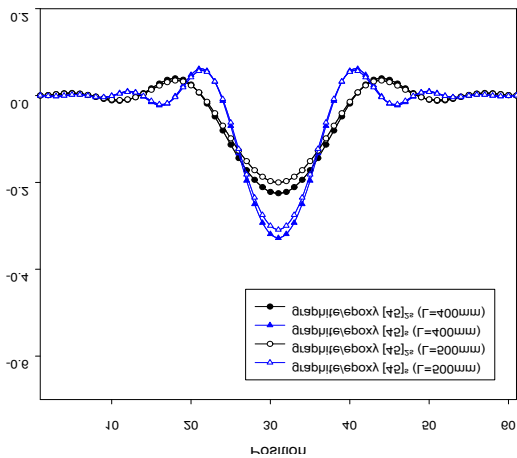


Fig. 9 Displacement profiles of graphite/epoxy laminates at 100μsec (Velocity=5m/sec, Thickness=[45]<sub>2s</sub>=3.0mm, [45]<sub>s</sub>=1.5mm)

#### 4.4 외부 물체(강구)의 충격 속도 변화

충격 속도의 변화에 대한 충격 거동 결과에 대하여 총괄적 요약은 Table 3과 Fig. 10~Fig. 11에 잘 나타나 있다.

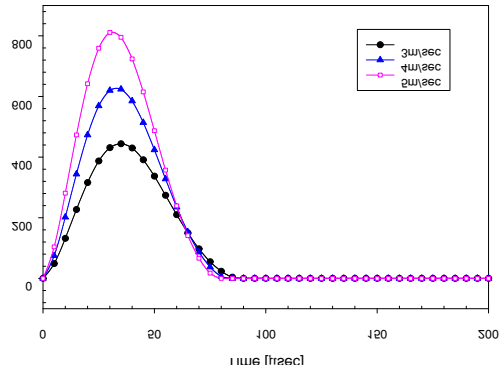


Fig. 10 Contact force for a [0°/90°/0°/-90°/0°]<sub>2s</sub> graphite/epoxy beam subjected to impact (Thickness=3.0mm, Length=300mm)

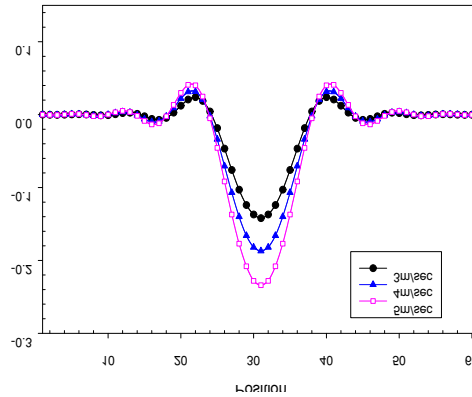


Fig. 11 Displacement profiles of [0°/90°/0°/-90°/0°]<sub>2s</sub> graphite/epoxy laminates at 100μsec (Thickness=3.0mm, Length=300mm)

동일한 재료와 조건하에서 충격 속도가 클수록 최대 접촉력과 보 변위가 크게 나타난다는 것은 그만큼 속도에 따른 충격에너지가 크다는 결과로 이는 시뮬레이션을 통하여 정성적 의미보다는 정량적 결과를 정확히 예측하여 복합재 기본 설계 기술에 적용할 수 있다는 데 큰 의미가 있다.



## 5. 결 론

본 논문에서는 등방성과 이방성 재료가 강구에 의하여 저속 충격을 받게 될 때 재료에 발생하는 충격 거동을 유한요소 시뮬레이션을 행한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 유한요소 시뮬레이션 프로그램은 모든 재료에 대한 충격 거동의 정성적 및 정량적 특성을 정확히 규명하는데 매우 유효함을 확인하였다.
- 2) 충격시 재료의 물성 즉, 탄성 계수가 클수록 접촉력은 크게 되고, 변위는 상대적으로 작게 나타남을 알 수 있었다. 이는 충격 거동이 재료의 비강도, 비강성 및 유연성이라는 특성에 기인한다는 것을 의미한다.
- 3) 충격시 복합 재료의 적층 형태에 의한 충격 거동은 [0°90°0°-90°0°]<sub>2s</sub> 보다 [0°45°0°-45°0°]<sub>2s</sub> 일 때가 접촉력이 크고, 상대적으로 변위는 작게 나타났다. 이는 또한 적층 형태가 강성을 지배하므로 길이 방향으로의 강성이 강한 편이 접촉력이 크며 변위와 압입량이 작게 됨을 의미한다.
- 4) 충격시 복합재의 기하학적 변화 즉, 재료의 두께와 길이의 변화에서 두께가 두꺼울수록, 길이가 길수록 접촉력은 증가하고 변위는 작게 된다는 것은 기하학이 강성과 깊은 상관관계가 있음에 기인한다는 것을 의미하며, 충격 속도가 클수록 접촉력이 크게 됨은 정성적으로 당연한 결과이다. 더욱 중요한 것은 정량적 평가를 정확히 예측할 수 있다는 것에 큰 의의가 있다.

## 후 기

본 논문은 진주산업대학교 2009년도 기성회 연구비 지원에 의하여 연구되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Goldsmith, W., Impact, Edward Arnold Ltd., London, 1960.
2. Hertz, H., "Über die Berührung fester Elastischer

- Korper", Journal Reine Angle Math, Crelle, Vol. 92, pp. 155, 1881.
3. ASTM, Foreign Object Impact Damage to Composite, STP568, 1973.
4. Sun, C.T., and Chattopadhyay, S., "Dynamic Response of Anisotropic Laminated Plates Under Initial Stress to Impact of a Mass". Journal of Applied Mechanics, Trans. ASME, pp. 693-698, 1975.
5. Sun, C.T., and Huang, S.N., "Transverse Impact Problems by Higher Order Beam Finite Element", Computers & Structures, Vol. 5, pp. 297-303, 1975.
6. 안국찬, 김문생, 김규남, "저속충격을 받는 적층 복합재의 응력과 전파에 관한 연구", 대한기계학회논문집, Vol. 13, No. 1, pp. 9-19, 1989.
7. Yang, S.H., and Sun, C.T., "Indentation Law for Composite Laminates", ASTM STP 787, pp. 425-449, 1982.
8. Willis, J.R., "Hertzian Contact of Anisotropic Bodies", Journal of Mechanics and Physics of Solids, Vol. 14, pp. 163-176, 1966.
9. Wilson, E.L. and Clough, R.W., "Dynamic Response by Step by Step Matrix Analysis", Symp. on Use of Computer in Civil Engineering, Lisbon, 1962.
10. Yang, S.H., "Static and Dynamic Contact Behaviors of Composite Laminates", Ph.D. Thesis, Purdue University, Aug., 1981.