

論文

방향성 있는 감쇠재료가 삽입된 복합적층판의 진동 및 감쇠특성

김성준^{*+}

Vibration and Damping Characteristic of Composite Laminates Embedding Directional Damping Materials

Sung Joon Kim^{*+}

ABSTRACT

Embedding viscoelastic-damping materials into composites can greatly increase the damping properties of composite structures. Usually viscoelastic-damping materials behave isotropically so that their damping properties are the same in all directions. In these days, there is a desire to develop viscoelastic-damping materials that behave orthotropically so that damping properties vary with material orientation. These orthotropic damping materials can be made by embedding rows of thin wires within the viscoelastic materials. These wires add significant directional stiffness to the damping materials, where the stiffness variation with wire orientation follows classical lamination theory. In this paper, the loss factor of composite laminate was evaluated based on Ni and Adams' theory. To investigate the effect of directional damping material, the low-velocity impact response analysis was also performed. The present analysis results show that directional damping material has a great influence on vibration and damping characteristic of composite laminate.

초 록

복합재료에 삽입된 점탄성 재료는 복합재구조물의 감쇠물성을 크게 증가시킨다. 일반적으로 점탄성 재료는 등방성이므로 모든 방향의 감쇠물성이 동일하다. 최근 재료의 방향에 따라 감쇠물성이 변하는 이방성 감쇠재료의 개발이 요구되고 있다. 이방성 감쇠재료는 점탄성 재료 내부에 얇은 섬유를 삽입하여 제작한다. 삽입된 섬유는 댐핑재료의 강성에 큰 영향을 주며 강성은 고전 적층판 이론을 따르게 된다. 본 논문에서는 Ni와 Adams의 이론을 이용하여 손실계수를 평가하였다. 그리고 방향성 있는 감쇠재료의 영향을 평가하기 위해 저속충격 거동해석을 수행하였다. 해석결과로부터 방향성 있는 감쇠재료는 복합적층판의 진동 및 감쇠특성에 큰 영향을 줌을 보였다.

Key Words : 복합재료(composite), 방향성 감쇠재료(directional damping material), 손실계수(loss factor), 충격거동(impact response)

1. 서 론

섬유강화 복합재료는 높은 비강성, 비강도 및 물성치의 이방성 등의 장점이 있으며 금속재료에 비하여 감쇠특성이 우수하다. 감쇠(damping)는 모든 물질에 존재하는 고유한

성질 중의 하나로 대부분 기계장치에서 에너지손실을 초래하여 성능을 저하시키는 역할을 하지만 동적안정성의 관점에서 보면 공진주파수 부근에서 응답의 크기를 저하시켜 구조적으로 안전하게 만들어주는 역할을 한다. 섬유강화 복합재료의 경우 섬유자체의 감쇠는 매우 작으며 주로 수

*+ 한국항공우주연구원, 교신저자(E-mail: yaelin@kari.re.kr)

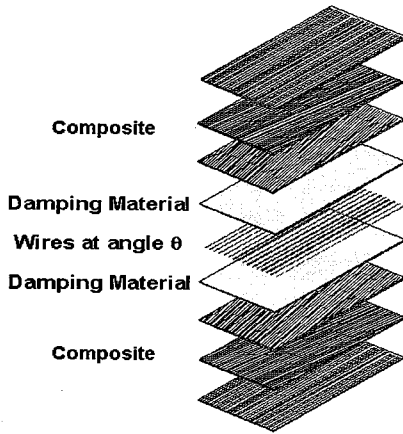


Fig. 1 Schematic Diagram of Composite Laminate Embedding Directional Damping Material.

지가 감쇠를 제공하게 되는데 이는 수지가 점탄성거동을 하기 때문이다[1]. 구조물에서의 감쇠는 공진 시에 응답특성에 민감하게 작용하므로 반복하중이나 충격하중을 받을 때 중요한 역할을 한다[2]. 최근에는 복합적층 구조물의 감쇠특성을 향상시키기 위한 연구가 수행중이다. 한 가지 방법으로는 복합적층 구조물에 방향성 있는 감쇠재료(directional damping material)를 삽입하여 적층판의 강성과 감쇠특성을 조절하는 것으로 이러한 직교이방성 감쇠재료는 점탄성 재료 내부에 얇은 섬유를 삽입하여 제작한다(Fig. 1). 점탄성재료 내부에 존재하는 섬유는 재료의 에너지손실 메커니즘을 재료의 방향에 따라 변화시킨다. 방향성 있는 감쇠재료를 이용한 복합재시편의 제작 및 실험에 관한 연구는 일부 수행되고 있으나 충격 및 진동 특성에 대한 해석적인 연구는 매우 드문 실정이다[3].

본 논문에서는 직교이방성 감쇠재료가 삽입된 복합적층 구조물의 손실계수(loss factors)를 Ni와 Adams[4]가 개발한 이론과 에너지 접근방법을 이용하여 계산하였으며 손실계수에 영향을 주는 요소를 검토하였다. 그리고 방향성 있는 감쇠재료가 복합적층판의 동적거동에 주는 영향을 평가하기 위해 저속충격 거동해석을 수행하였다.

2. 복합적층 구조물의 감쇠계수

본 연구에서는 직교이방성 복합적층 구조물의 감쇠계수를 Ni와 Adams에 의해 개발된 단층 응력조건하의 에너지 접근방법으로 계산하였다. 복합 적층판의 손실계수(loss factor), η 는 다음과 같이 정의된다.

$$\eta = \frac{\Delta W}{2\pi W} \quad (1)$$

$$W = \frac{1}{2} \int_V (\sigma_1 \epsilon_1 + \sigma_2 \epsilon_2 + \sigma_{12} \epsilon_{12} + \sigma_{13} \epsilon_{13} + \sigma_{23} \epsilon_{23}) dV \quad (2)$$

$$\Delta W = \pi \int_V (\eta_1 \sigma_1 \epsilon_1 + \eta_2 \sigma_2 \epsilon_2 + \eta_{12} \sigma_{12} \epsilon_{12} + \eta_{13} \sigma_{13} \epsilon_{13} + \eta_{23} \sigma_{23} \epsilon_{23}) dV \quad (3)$$

여기서, ΔW 는 한 응력 사이클 중 소산된 에너지, W 는 저장된 스트레인에너지, $\eta_1, \eta_2, \eta_{12}, \eta_{13}, \eta_{23}$ 는 각각 복합체의 축방향 손실계수, 횡방향 손실계수 및 전단손실계수이다.

2.1 기본손실계수(Basic Loss Factors)

다양한 섬유방향으로 구성된 복합적층 구조물의 손실계수를 구하기 위해서는 복합적층 구조물을 구성하는 각 단층(lamina)의 기본손실계수를 정확히 평가하여야 한다. Ni와 Adams[4,5]는 혼합법칙으로부터 기본 손실계수를 다음과 같이 유도하였다.

축 방향 기본 손실계수

$$\eta_1 = \eta_m (1 - V_f) \frac{E_m}{E_L} \quad (4)$$

여기서, η_m = 모재의 손실계수, V_f = 복합체의 섬유 부피율, E_m = 모재의 탄성계수, E_L = 복합체의 탄성계수를 의미한다.

횡 방향 기본 손실계수

$$\eta_2 = \eta_m - \frac{\eta_m V_f}{V_f + V_m \left(\frac{E_{Tf}}{E_m} \right)} \quad (5)$$

여기서, V_m = 복합체의 모재부피율, E_{Tf} = 섬유의 횡방향 탄성계수를 의미한다.

전단 기본 손실계수

$$\eta_{12} = \frac{\eta_m (1 - V_f) [(G+1)^2 + V_f (G-1)^2]}{[G(1+V_f)+1-V_f][G(1+V_f)+1-V_f]} \quad (6)$$

여기서, $G = G_f/G_m$, G_f = 섬유의 전단계수, G_m = 모재의 전단계수이다. 식 (4)~(6)을 이용하여 모재가 에폭시인 경우와 손실재료(acrylic matrix)인 경우 단층의 기계적 물성을

계산하였다(Table 2). 계산 시 섬유체적 비율(V_f)은 65%로 가정하였으며 계산에 사용된 재료의 기계적물성은 Table 1에 정리하였다.

Table 1 AS4 Graphite fiber & Matrix properties

구분	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	ν	G (GPa)	η	ρ (kg/m ³)
AS4 Graphite fiber ^[3]	235.0	14.0	0.2	28.0	-	
Acrylic matrix ^[7,8]	9.3	9.3	0.33	3.5	2.0	1200
Epoxy matrix ^[6]	4.3	1.6	0.34	1.6	0.02	950

Table 2 Material properties of lamina

구분	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	ν	G (GPa)	η_1 (10 ⁻³)	η_2 (10 ⁻³)	η_{12} (10 ⁻³)	ρ (kg/m ³)
AS4 Graphite/Epoxy ^[5]	122.2	17.9	0.27	6.2	1.84	8.58	9.48	1509
AS4 Graphite/Acrylic*	156.0	24.8	0.3	8.1	27.7	1860.0	1310.0	1597

*해석결과

2.2 방향성있는 댐핑재료가 삽입된 복합 적층판의 손실계수 계산

방향성 있는 감쇠재료가 삽입된 복합적층판의 저속충격 거동해석을 위하여 3가지 종류의 복합적층판에 대한 손실계수를 계산하였다. 저속충격해석 시 충격체(m_u)와 충격을 받는 물체(m_p)의 중량비(m_u/m_p)가 35이상인 경우 충격체와 피충격체의 일체화된 계의 고유치문제로 해석할 수 있으며, 이때 저속충격거동은 일체화된 계의 첫 번째 모드에 의해 가장 큰 영향을 받는다[9,10]. 정확한 감쇠특성을 모델링하기 위해서는 충격 시 발생하는 모든 모우드를 고려하여야하지만 본 연구에서는 중량비가 35이상인 경우 첫 번째 모우드에 의한 에너지 손실이 매우 크다고 가정하여 근사적으로 감쇠특성을 모사하였다. 이는 중량비가 35이상인 경우 첫 번째 모우드에 의한 충격하중이 고차 모우드에 의해 발생하는 충격하중에 비해 매우 크기 때문이다. 계산을 수행하고자하는 해석모델(Fig. 2)에서 첫 번째 모드에 굽힘 모드이므로, 본 논문에서는 복합적층판의 손실계수를 충격체와 복합적층판의 접촉위치에 단위하중을 적용하여 구해지는 응력과 변형율을 이용하여 계산하였다. 또한 섬유강화 복합재료의 손실계수는 주파수범위가 100-600Hz 범위에서는 크게 변하지 않고[11] 중량비가 35이상인 경우

첫 번째 모드의 주파수는 600Hz이하이므로 복합적층판의 충격거동해석 시 손실계수를 첫 번째 모드의 해석에 의해 구해진 값을 상수로 가정하였다.

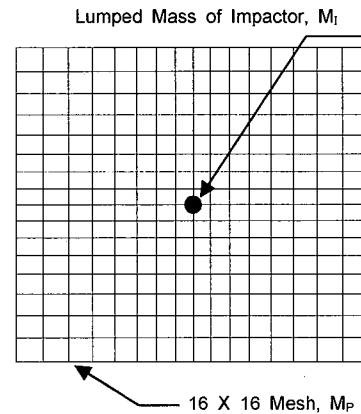


Fig. 2 Finite element modeling of lumped mass model.

Fig. 3은 1/4 모델에 대한 정규모우드 해석결과로 일체화된 계의 첫 번째 모우드 형상이고 Fig. 4는 단위하중을 적용한 정적해석결과이다. 모우드 형상이 단위하중을 적용하였을 경우의 변형과 유사함을 알 수 있다.

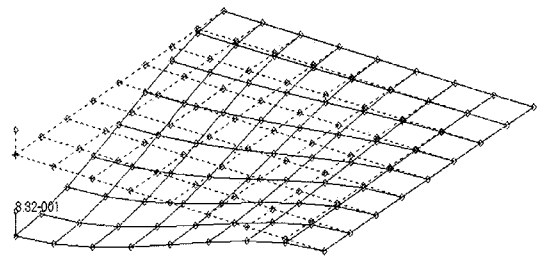


Fig. 3 1st mode shape for lumped mass model.

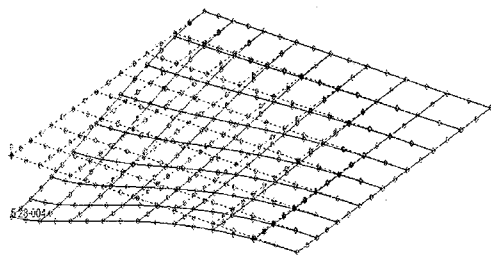


Fig. 4 Deformation shape for lumped mass model.

해석에 사용된 복합 적층판의 치수는 10 X 10 cm 이고 4단이 모두 고정지지(clamped) 이다. 적층판을 구성하는 단층의 두께는 0.0125 cm이며 적층순서는 Table 3에 정리하였다.

Table 3 Stacking sequence of laminates

Case 1		Case 2		Case 3	
Angle	Mat'l	Angle	Mat'l	Angle	Mat'l
0.0	[1]	0.0	[1]	0.0	[2]
0.0	[1]	0.0	[1]	0.0	[2]
0.0	[1]	0.0	[2]	0.0	[2]
0.0	[1]	0.0	[2]	0.0	[2]
0.0	[1]	0.0	[2]	0.0	[2]
0.0	[1]	0.0	[2]	0.0	[2]
0.0	[1]	0.0	[1]	0.0	[2]
0.0	[1]	0.0	[1]	0.0	[2]

[1] : AS4 Graphite/Epoxy

[2] : AS4 Graphite/Acrylic

복합적층판(Case 1~3)의 손실계수를 계산하여 Table 4에 정리 하였다. 계산결과로부터 방향성 있는 감쇠재료가 삽입된 복합적층판의 손실계수는 적층판을 구성하는 이방성 감쇠재료의 구성비와 적층각에 의해 크게 영향을 받을 수 있다.

Table 4 Damping loss factor for each laminate

구분	Case 1	Case 2	Case 3
Loss Factor (10^{-3})	4.1	102.0	250.0

3. 저속충격 거동해석

방향성 있는 감쇠재료가 삽입된 적층판의 진동 및 손실 특성을 검토하기 위하여 저속충격거동해석을 수행하였다. 일반적으로 충격문제는 동적접촉을 고려한 해석을 수행하여야 한다. 구조물의 동적 지배방정식은 다음과 같은 방정식으로 표현된다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f \quad (7)$$

여기서 M , C , K 는 각각 질량, 감쇠, 탄성행렬이고, f 는 충격에 의해 구조물에 가해지는 외력 벡터이다. 본 연구에서는 충격하중을 받는 부위의 변위(식 8)와 충격하중(식 9)을 일체화된 계의 모우드 해석을 이용하여 근사적으로 계산하였다.

$$x(t) = \frac{F_i}{M_i} \sum_{i=1}^n e^{(-\zeta \omega t)} \left(\frac{T_i}{\pi} \right)^2 \sin \left(\frac{\pi}{T_i} t \right) \quad (8)$$

$$f(t) = \sum_{i=1}^n F_i \left(\frac{T_i}{\pi} \right)^2 e^{(-\zeta \omega t)} \times [\zeta^2 \omega^2 \sin \left(\frac{\pi}{T_i} t \right) - 2\zeta \omega \frac{\pi}{T_i} \cos \left(\frac{\pi}{T_i} t \right) - \left(\frac{\pi}{T_i} \right)^2 \sin \left(\frac{\pi}{T_i} t \right)] \quad (9)$$

위식에서 F_i 는 충격체의 질량과 초기속도 및 일체화된 계의 고유진동수의 함수이고, T_i 는 고유진동수의 함수이다. 또한 M_i 는 충격체의 질량, ζ 는 감쇠비, ω 는 고유진동수이다. 해석에 사용된 모델은 앞 절에서 손실계수를 구하기 위해 사용된 복합적층판(Case 1~3)이며 사용한 충격체(impactor)와 적층판의 중량 및 초기속도는 Fig. 5에 정리하였다.

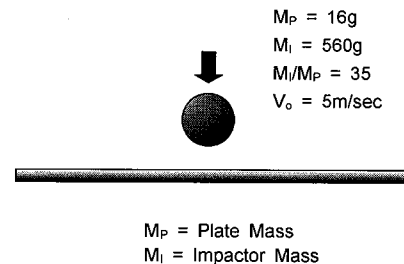


Fig. 5 Impact system.

3.1 충격하중이력 비교

복합적층판(Case 1~3)에 대한 저속충격거동해석을 수행하여 충격체(M_I)에 가해지는 충격하중이력을 계산하였다(Fig. 6~8). 방향성 있는 감쇠재료가 삽입되지 않은 적층판은 손실을 고려한 저속충격해석을 수행하여도 충격하중이력이 거의 변하지 않는다(Fig. 6). 최대충격하중은 감쇠재료가 많이 삽입될수록 즉 손실계수가 커질수록 작아지며 충격하중의 고차모드는 손실계수에 크게 영향을 받을 수 있다. 방향성 있는 감쇠재료의 구성비가 증가할수록 감쇠의 영향을 고려하지 않은(undamped) 결과는 더 큰 충격하중을 예측하는데 이는 방향성 있는 감쇠재료 층이 큰 강성계수를 가지므로 전체적인 복합적층판의 강성이 크기 때문이다.

3.2 복합적층판의 동적거동

저속충격 시 복합 적층판의 동적 거동해석을 수행한 후 Fig. 9~11에 정리하였다. 복합 적층판의 거동은 충격체와의 접촉이 일어난 부위 즉 적층판의 중심에서의 결과이다. 충격하중이력과는 달리 적층판의 동적거동(속도)는 고차모드

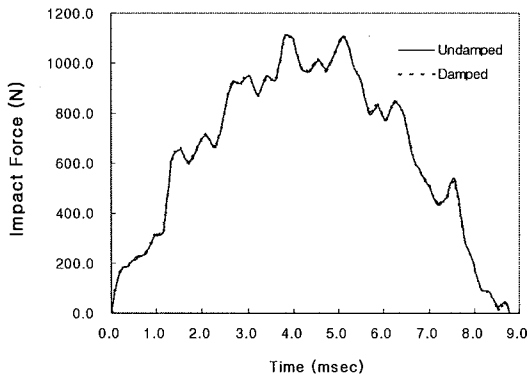


Fig. 6 Impact force histories for case 1.

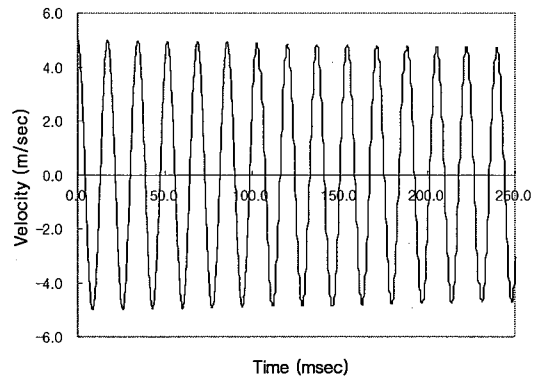


Fig. 9 Time response for case 1.

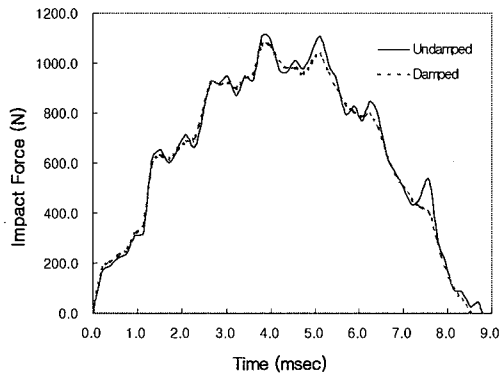


Fig. 7 Impact force histories for case 2.

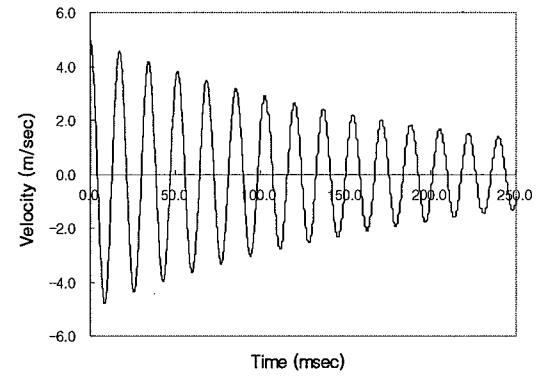


Fig. 10 Time response for case 2.

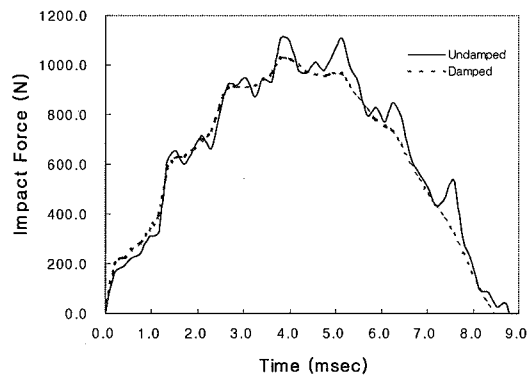


Fig. 8 Impact force histories for case 3.

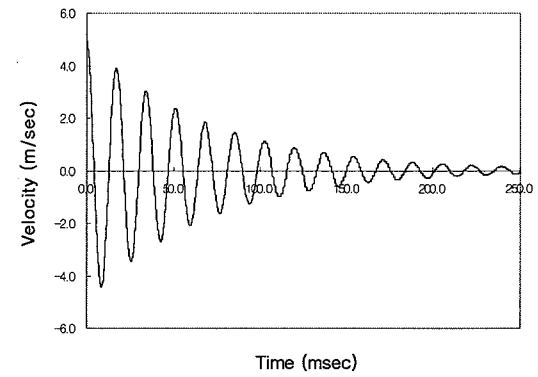


Fig. 11 Time response for case 3.

가 보이지 않는다(Fig. 9). 즉 충격 후 복합적층판의 동적거동은 충격체와 피충격체의 일체화된 계의 첫 번째 모드에 의해 좌우됨을 알 수 있다. 복합적층판의 동적거동 또한 복합적층판을 구성하는 감쇠재료의 구성비와 적층각도에 크게 영향을 받음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 방향성 있는 감쇠재료가 삽입된 복합적층판의 손실계수(loss factors)를 Ni와 Adams가 개발한 이론

과 에너지 접근방법을 이용하여 계산하였다. 또한 직교이방성 손실재료가 삽입된 적층판의 진동 및 손실특성을 평가하기 위해 저속충격거동해석을 수행하여 충격하중이력과 복합적층판의 동적거동을 계산하였다.

계산결과로부터 방향성 있는 감쇠재료가 삽입된 복합적층판의 손실계수는 적층판을 구성하는 감쇠재료의 구성비와 적층각에 영향을 받음을 알 수 있다. 또한 방향성 있는 손실재료는 적층판의 최대충격하중을 크게 감소시키며 적층판의 진동손실특성을 크게 향상시킴을 확인하였다.

향후 중량비가 35이하인 경우의 진동특성을 평가하기 위해 충격 시 발생하는 고차 모우드를 고려한 감쇠모델링을 수행할 계획이다.

참고문헌

- 1) 구교남, “복합적층 구조물의 진동 및 감쇠 특성,” Ph. D. Thesis, KAIST, 1994.
- 2) Bert, C. W., “Composite Materials : A Survey of the Damping Capacity of Fiber Reinforced Composites,” *Damping Applications for Vibration Control*, AMD-Vol. 38, ASME, New York, 1980.
- 3) Biggerstaff, J. M. and Kosmatka, J. B., “Directional Damping Materials for Integrally Damped Composite Plates,” *SPIE Proceedings*, Vol. 3672, 1999, pp. 368-374
- 4) Ni, R. G. and Adams, R. D., “The Damping and Dynamic Moduli of Symmetric Laminated Composite Beams-Theoretical and Experimental Results,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 18, 1984, pp. 104-121.
- 5) Adams, R. D., “Damping Properties Analysis of Composites,” *Engineering Materials Handbook, Composites*, Vol. 1, 1987, pp. 206-217.
- 6) 임중휘, “복합 적층 보의 섬유 부피율에 따른 댐핑의 영향”, *한국복합재료학회*, 제11권, 6호, 1998, pp. 1-9.
- 7) www.rpdinc.com
- 8) Biggerstaff, J. M. and Kosmatka, J. B., “Shear Measurements of Viscoelastic Damping Materials Embedded in Composite Plates,” *SPIE Proceedings*, Vol. 3672, 1999, pp. 82-92
- 9) Choi, I. H. and Hong, C. S., “New Approach for Simple Prediction of Impact Force History on Composite Laminates,” *AIAA Journal*, Vol. 32, 1994, pp. 2067-2072.
- 10) 최익현, “복합적층판에 대한 저속충격해석과 접촉법칙,” *한국복합재료학회*, 제16권, 1호, 2003, pp. 50-57.
- 11) Ashton, J. N. and Hadi, A. S., “Damping Properties of a uni-directional glass/epoxy Composite,” *Composite Structures*, Vol. 34, 1996, pp. 381-385.