

論文

진주조개를 모방한 생체모방 복합재료의 저속충격 해석

조승운*, 범현규**+

Analysis of Low Velocity Impact on Biomimetic Composites Mimicking Nacre

Seung-Un Jo*, Hyeon Gyu Beom**+

ABSTRACT

The dynamic response of biomimetic composites mimicking nacre under low velocity impact is investigated. The composites have hierarchical structures with a staggered pattern consisting of a protein and a mineral. To analyze the impact response of the composites, the finite element method is used. The effects of the hierarchical structures of the composites on the dynamic response are examined. It is shown that the maximum stress, displacement and contact force in the composite subjected to low velocity impact decrease as the level of structural hierarchy increases.

초 록

진주조개를 모방한 생체모방 복합재료의 저속충격 하에서의 동적 거동에 대해 연구하였다. 이러한 복합재료는 단백질과 미네랄 층이 계층구조를 이루고 있다. 유한요소해석을 사용하여 복합재료의 충격거동을 해석하였다. 복합재료의 계층구조가 동적 거동에 미치는 영향을 고찰하였다. 생체모방구조물은 계층구조의 차수가 높아짐에 따라 저속충격에 대해 충격지점에서 구조물이 받는 최대 응력과 변위, 접촉하중을 감소시킨다.

Key Words : 계층구조(hierarchical structure), 생체모방 복합재료(biomimetic composite), 저속충격(low velocity impact)

1. 서론

이종재료의 장점을 이용하면서 동시에 경량화를 이룰 수 있다는 이점 때문에 복합재료로 이루어진 다층구조물의 사용이 증가하고 있다. 다층복합재료로 이루어진 기계 부품들은 불가피하게 동적 하중이나 충격 하중 하의 상황에 처하게 된다. 충격은 구조물의 수명을 줄이고 내부 손상을 일으키지만 감지하기가 쉽지 않다. 충격 또는 충격 후 부재의 거동이나 특성을 파악하는 것은 실제적이고 중요한 문제가 되었다.

뼈나 조개와 같은 생체재료 다층복합재료에 대한 기계적 성질에 대한 실험이 Kamat[1], Norman[2] 등에 의해 연구되었고, 그 우수성이 알려지면서 생체재료의 구조에 대한 관심이 높아지기 시작하였다. 최근에는 Gao[3-5]에 의해 나노 사

이즈의 미네랄 블록(block)들이 단백질 속에 여러 단계의 계층구조(hierarchical structures)로 서로 엇갈리게(staggered pattern) 적층되어 있는 뼈의 구조가 밝혀졌다. 또한 Currey[6]에 의해 미네랄이 차지하는 부피비율(volume fraction)에 따른 인성(toughness)에 관해 연구되었다. 그러나 현재까지 우수한 기계적 성질을 지녔음에도 불구하고 이러한 생체재료 다층구조물의 충격에 대한 연구결과는 많지 않다.

본 논문은 조개의 계층구조 형상을 모방한 복합재료의 저속충격 하의 동적 거동에 대해 연구하였다. 외부 충격에 의해 단층재료와 이를 조합한 이종재료, 그리고 계층구조재료의 시간에 따른 응력, 변위, 접촉하중 등의 특성을 비교 연구하였다. 그리고 이러한 해석결과를 바탕으로, 생체재료를 모방한 다층구조물의 저속충격 거동을 고찰하였다.

* 인하대학교 대학원 기계공학과

**+ 인하대학교 기계공학과, 교신저자(E-mail:hgbeom@inha.ac.kr)

2. 이론적 배경

2.1 저속충격 특성

이종재료로 이루어진 다층구조물의 경우는 충격의 속도가 크지 않더라도 접착층간의 계면균열(matrix cracking), 층간분리(delaminations), 섬유파단(fiber failure)과 같은 내부 손상을 유발한다.

저속충격은 일반적으로 충격체의 질량이 작고 속도가 빠르거나, 질량이 크고 속도가 다소 느린 두 가지의 조건으로 나눌 수가 있다. 충격체가 구조물과 부딪힐 때의 충격에너지는 통상 15J 이하의 에너지로 규정한다. 충격에너지의 크기와 관련해서는 충격에너지가 증가할수록 구조물이 받는 최대 응력과 접촉시간이 증가하는 경향을 보인다[7]. 또한 이러한 충격특성은 구조물의 두께가 얇고 그에 비해 상대적으로 충격체의 두께가 큰 경우는 관통(penetration)하는 현상이 발생하기도 한다.

2.2 충격 이론방정식

본 논문은 다층구조물에 충격이 가해지는 동적인 문제의 해석을 다루고 있다. 충격에 관한 문제는 통상적으로 댐핑(damping)을 무시하고 시간에 따른 과도응답 특성의 동적 평형 방정식(transient dynamic equilibrium equation)으로 다음과 같이 나타낼 수 있다[8].

$$[M]\{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = F(t) \quad (1)$$

여기서 $[M]$ 과 $[K]$ 는 구조물의 질량 매트릭스(structural mass matrices)와 강성 매트릭스(structural stiffness matrices)이다. \ddot{U} 과 U 는 절점 가속도 벡터(nodal acceleration vector)와 절점 변위 벡터(nodal displacement vector)이다. 그리고 $F(t)$ 는 시간에 따라 변화하는 외부 작용응력 벡터(applied external and body force vector)로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F(t) = \{F_i^{EXT}\} \quad (2)$$

$$\{F_i^{EXT}\} = \frac{m(v_f - v_i)}{\Delta t} \quad (3)$$

여기서 Δt 는 시간증분(time increment), v_f 와 v_i 는 각각 충격체의 나중속도와 초기속도이다.

2.3 계층구조 관계식

빠나 조개와 같은 생체재료는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 미네랄(mineral)과 단백질(protein)로 구성되어 있고 계층구조를 이루고 있다. 계층구조를 이루고 있는 단위요소인 미네랄과 단백질의 특성은 서로 상이하다. 진주조개는 탄성계수가

매우 큰 선형탄성(linear elastic) 특성의 미네랄과 탄성계수가 작은 탄소성(elasto-plastic) 특성의 단백질로 이루어져 있다. 단백질이 미네랄과 비교하여 유연한 재료임에도 불구하고 이 두 재료로 이루어져 있는 생체재료의 강도(Strength)와 강성(stiffness)은 매우 우수하다.

Gao[3-5]가 연구한 바에 의하면 이러한 강도와 강성은 나노 구조에서 시작된 생체재료만이 가지는 반복적 계층구조에서 그 원인을 찾고 있다. 미네랄 층의 종횡비(aspect ratio) ρ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\rho = L/h \quad (4)$$

여기서 L 과 h 는 미네랄 층의 길이와 폭을 각각 나타낸다. 종횡비는 계층구조에서 중요한 역할을 하며 값이 커질수록 이종재료로 구성된 구조물의 강성은 커진다[4].

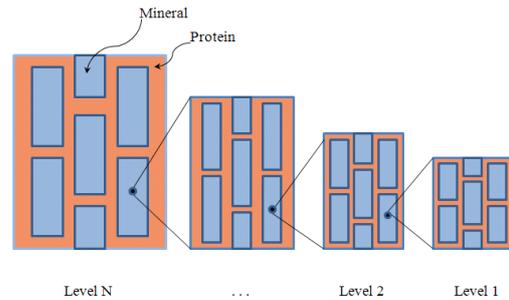


Fig. 1 Hierarchical structure.

Gao[3]가 단백질과 미네랄로 이루어진 생체복합재료(bio composite)를 단순화한 인장전단 모델(tension shear chain model)을 통해서 생체재료 구조의 유효탄성계수(effective Young's modulus)를 다음과 같이 제안했다[4].

$$\frac{1}{E_{Gao}} = \frac{4(1-\Phi)}{\mu_p \Phi^2 \rho^2} + \frac{1}{\Phi E_m} \quad (5)$$

여기서 μ_p , Φ 는 단백질의 전단변형계수(shear modulus), 미네랄의 부피비율(volume fraction)이고 E_m 은 미네랄의 탄성계수이다.

Gao가 주장한 유효탄성계수는 단백질과 미네랄의 부피비율을 이용한 Voigt와 Reuss 모델들과 비교할 때 그 사이의 값을 가진다. Voigt와 Reuss 모델의 유효탄성계수, E^{Voigt} 와 E^{Reuss} 는 다음과 같이 나타내진다

$$E^{Voigt} = (1-\Phi)E^P + \Phi E^M \quad (6)$$

$$\frac{1}{E^{Reuss}} = \frac{1-\Phi}{E^P} + \frac{\Phi}{E^M} \quad (7)$$

여기서 E^P 와 E^M 는 각각 단백질과 미네랄의 탄성계수를 나타낸다.

3. 저속충격 수치해석

저속충격을 받는 다층복합재료의 해석을 수치적으로 계산하기 위해 ANSYS/LS-DYNA를 이용하였다. 크기 630mm × 51mm × 400mm 의 판 모형 구조물에 공기저항을 무시한 질량 30g, 반경 15mm의 강구(rigid ball)의 충격체가 10mm 위치의 높이에서 일정한 속도 20m/s로 부딪힐 때를 모델링하였다. 경계조건은 구조물의 길이부분의 한쪽은 열린 상태, 다른 한쪽은 고정하여 양단 지지하였다.

저속충격의 충격에너지가 클 경우는 관통현상이 발생하기 때문에 충격에너지를 약 6J로 임의 규정하였다. 해석에 사용된 본 구조물의 판 모형의 미네랄과 단백질, 충격체의 물성치는 Bertoldi[9]의 논문을 참고하였으며, Table 1에 나타내었다.

Table 1 Material Properties

Properties	Materials		
	Mineral	Protein	Impactor
Young's modulus (GPa)	100	15	20
Poisson's ratio	0.33	0.33	0.3
Density (kg/m ³)	2700	1500	2100
Shear modulus (GPa)		5	
Yield strength (MPa)		300	
Tangent modulus (GPa)		700	
Failure strain		0.8	

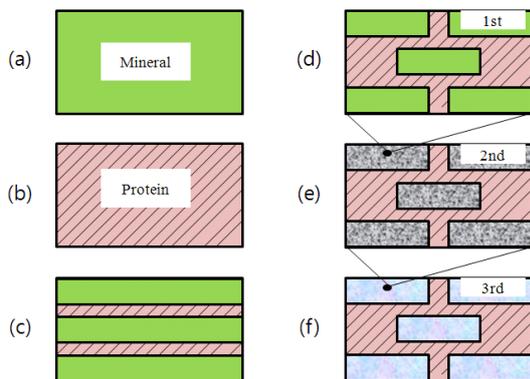


Fig. 2 Models used in impact analysis.

이종재료인 미네랄과 단백질을 사용하여, Fig. 2와 같은 다층복합재료 모형들을 모델링하였다. Fig. 2 (a)와 (b)는 단일 재료인 미네랄과 단백질을 나타낸다. Fig. 2 (c)는 두 재료를 합하여 5층의 다층복합재료로 만든 것이다. 그리고 Fig. 2 (d)는 조개와 같은 다층구조물의 특이한 벽돌-모르타르 형식의 구조를 구현한 것이고, Fig. 2 (e)와 (f)는 이러한 구조물의 반복되는 계층화를 구조의 차수를 높이면서 구현한 것이다. 계층화 구조의 차수가 높아지면서 미네랄부분의 탄성계수가 Gao의 유효탄성계수 값으로 대체된다.

다층복합재료 모형들에 저속충격이 가해지는 상황을 ANSYS/LS-DYNA를 이용하여 시간에 따른 유한요소해석을 수행하였다. 3차원 시뮬레이션 요소(element)는 Solid 164 explicit 3-d structural solid를 사용하였다. 3차원 시뮬레이션을 하는데 tetra hexagonal element 메시(mesh)를 하였고, 구조물의 길이부분은 고정하여 충격에 대한 구조물의 상태를 비교하였다. Fig. 2에 나타나 있는 각각의 다층복합재료 구조에 대해 초기속도 20m/s의 충격체가 충격체속도로 하강할 때에 대하여 시간에 따른 충격점 부근의 응력(stress)과 변위(displacement)를 해석하였다.

Fig. 3와 Fig. 4는 단일재료 미네랄과 단백질 재료로 이루어진 각각의 모델이 충격을 받았을 경우 충격점 부근에서 시간에 따른 Mises 응력 σ 와 두께 방향 변위를 나타낸 것이다. Table. 2는 다층 복합재료 모델들의 초기 응력과 최대 응력, 최대 변위를 수치로 나타낸 것이다. 상대적으로 강한 재료인 미네랄이 단백질에 비해 적은 변위를 가지고 최대 변위가 나타나는 시간 역시 짧다. 미네랄과 단백질 재료를 단순 적층하여 5층으로 쌓았을 경우에 단일 재료와 비교하여 전체적인 응력은 감소했고 응력의 산란(scatter)현상이 발생한다. 그리고 변위는 이종재료 사이의 값을 가진다.

구조물이 생체재료의 기하학적 계층구조를 모방한 경우에 대해서는 저속충격 시에 발생하는 최대응력과 최대변위는 감소하고, 변위는 증가하는 경향성을 띤다. 하지만, 이러한 응력과 변위 모두 단층재료로 이루어졌을 경우와 비교하면 작은 수치이다. 생체모방 구조물의 계층화 차수가 높아짐에 따라 단백질 부분의 파괴비율이 증가하고, 미네랄부분의 탄성계수는 Gao[3]가 주장한 유효 탄성계수로 대체된다. 계층화할 수록 이전단계의 탄성계수 수치와는 차이가 줄어들고 Voigt 모델의 탄성계수 값에 접근한다.

생체모방 다층구조물을 구현하여 다른 구조물 모델의 충격에 대한 경향성을 비교하여 살펴보면, 응력부분에서는 단일 재료 미네랄과 단백질이 받는 응력을 크게 낮출 수가 있다. 변위부분에서는 초기에 발생하는 변위가 단백질의 파괴비율이 증가하고 계층구조화된 재료로 바뀔 때 따라 구조물의 최대응력과 최대변위가 초기에 발생하지 않고 시간이 다소 흐른 시점에서 발생한다. 최대변위는 단일 재료인 단백질의 큰 수치보다 낮은 값을 가진다.

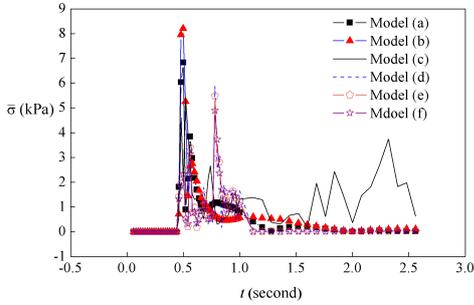


Fig. 3 Stress-time histories for all models.

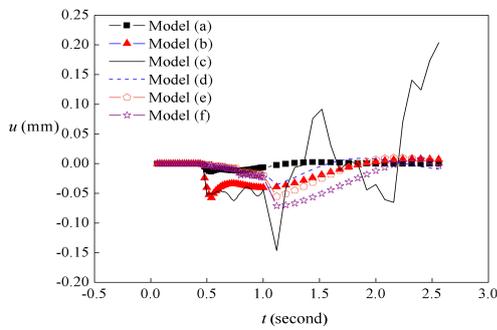


Fig. 4 Displacement-time histories for all models.

Table 2 Stress and displacement for all models

Model	Initial stress (kPa)	Maximum stress (kPa)	Maximum displacement (mm)
a	6.829	6.829	0.0137
b	8.204	8.204	0.0523
c	4.609	5.447	0.1465
d	2.252	5.875	0.0358
e	2.302	5.485	0.0552
f	2.332	4.895	0.0710

4. 충격 거동해석

저속충격에 대한 전형적인 결과의 해석방법은 시간에 따른 충격하중이력이나 충격 후 구조물의 에너지 해석에 의한 에너지이력, 실험을 통한 충격 후 압축 시험(CAI) 등 다양한 방법이 사용되고 있다. 본 논문에서는 충격거동의 동적 현상을 알아보기 위해 Hertz 접촉법칙(Hertz contact law)을 사용하여 미네랄과 단백질로 이루어진 각각의 모델들에 대하여 이론적인 해석을 시도하였다. 두 물체 사이에 발생하는 압입량(indentation)은 Hertz 접촉법칙을 사용하여 충돌 시 발생하는 접촉하중으로 치환 가능하다. Sun[10]은 이러한 Hertz 법

칙을 사용하여 수정된 접촉법칙을 적용하여 충격 문제 등에 적용하였다. Sun[10]의 일련의 방법을 적용하여 복합적층판의 저속충격거동을 해석한 논문[11]을 참고하였다. 접촉법칙은 다음과 같다.

$$P = k\alpha^{1.5} \quad (8)$$

여기서 P 는 충돌 시 발생하는 접촉하중(contact force), α 는 압입량(indentation), k 는 접촉계수(contact stiffness)를 나타낸다. 압입량 α 는 충격 전후의 충격체 변위 $w_1(t)$ 와 표적 변위 $w_2(t)$ 의 차이로 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\alpha = w_1(t) - w_2(t) \quad (9)$$

다층구조 복합재료에 대해 Yang과 Sun[12]이 수정된 접촉계수 k 를 다음과 같이 제안하였다.

$$k = \frac{4}{3} R^{1/2} \frac{1}{[(1-\nu_1^2)/E_1 + 1/E_2]} \quad (10)$$

접촉영역(contact zone)과 관련된 곡률반경 R 값은 다음과 같다.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (11)$$

R 과 E 의 값은 등방성(isotropic) 모델에 적용되는 변수이다. R_1 과 R_2 는 충격체와 표적인 두 물체의 곡률반경이고, E_1, ν_1 과 E_2, ν_2 는 각각의 물체에 대한 탄성계수와 프아송비(Poisson's ratio)이다. 미네랄과 단백질로 이루어진 모델은 이방성(anisotropic) 모델이기 때문에 이러한 접촉법칙을 적용하여 접촉하중 P 를 알기 위해서는 수식에서 몇 가지 수정이 필요하다. R_2 는 접촉하는 표적이 평판이므로 $\frac{1}{R_2}$ 은 0이다.

E_2 는 접촉하는 표적의 탄성계수이다. 진주조개는 미네랄과 단백질로 구성되어있기 때문에 E_2 를 Gao[4]가 제안한 식(5)의 유효탄성계수로 치환하여 적용한다. 이를 이용해 식(10)에 있는 접촉계수 k 를 수정하여 나타내면 다음과 같다.

$$k = \frac{4}{3} R^{1/2} \frac{1}{[(1-\nu_1^2)/E_1 + 1/E_{Gao}]} \quad (12)$$

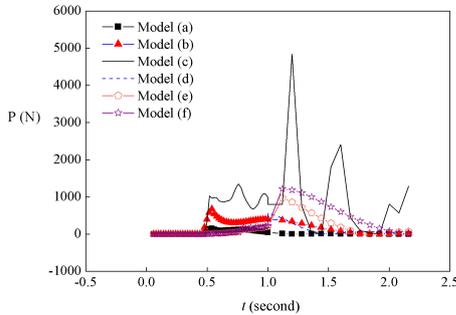


Fig. 5 The contact force histories for all models.

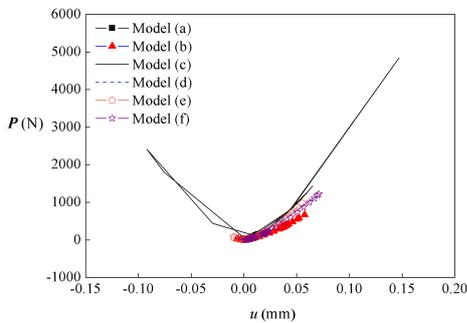


Fig. 6 Contact force and deflection for all models.

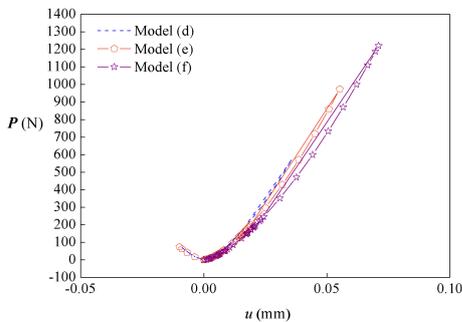


Fig. 7 Contact force and deflection for model (d),(e),(f).

앞 절의 저속충격 시뮬레이션을 통한 충격점 부근의 변위를 압입량으로 대입하여 미네랄과 단백질로 이루어진 Fig. 3의 전체 모델에 대해 고찰해본다.

Fig. 5는 모든 모델에 대해 시간에 따른 접촉하중을 나타낸 것이다. 접촉하중 P 는 변위 즉, 압입량이 클수록 그 값이 크게 나타난다. Fig. 5의 모델(a)와 모델(b)의 단일재료끼리 비교했을 때는 단백질이 미네랄에 비해 변위도 크고 재료가 받는 접촉하중도 크다. 단층재료를 이용하여 단순적층한 모델(c)는 오히려 그 접촉하중의 크기가 단일구조에 비해 크게

나타나지만, 진주조개의 구조적 계층적 특성을 모방한 모델(d), 모델(e), 모델(f)는 초기하중뿐 아니라, 접촉하중의 크기도 줄일 수 있다.

Fig. 6은 전체 모델에 대한 접촉하중과 변위그래프이다. 단순적층한 모델(c)의 그래프가 가장 큰 하중과 변위를 나타낸다. 그리고 단일 재료인 모델(a)와 모델(b) 사이에 진주조개를 모방한 다층구조물 모델(d), 모델(e), 모델(f)의 결과를 나타낸다. Fig. 7을 통해 다층구조물 모델(d), (e), (f)는 변위와 하중이 단일 재료의 중간값을 가지며 결과적으로 그 특징적인 장점을 잘 갖추고 있다는 것을 알 수 있다. 진주조개와 유사한 계층구조를 가진 모델들에 대해서는 N 차수의 계층화가 거듭됨에 따라 변위는 증가하고 기울기가 감소하며 접촉하중의 크기는 증가한다. 이러한 일련의 변화는 계층화를 통한 단백질의 파괴비율이 증가함에 따른 경향성이다. 하지만 그 변화의 양상은 그리 크지 않음을 알 수 있다.

5. 결론

진주조개의 벽돌-모르타르의 구조적 형상과 계층구조를 가지고 있는 생체모방 복합재료의 저속충격에 대한 동적 거동을 알아보았다. 발사체가 구조물에 충격을 가하고 충격점 부근에서 시간에 따른 응력과 변위를 알아보았다. 일정한 속도의 외부 발사체 강구의 충격에 대해 단일재료인 미네랄과 단백질이 받는 큰 응력을 이중재료로 구성되어 다층구조를 이루므로써 구조물이 받는 최대응력과 최대변위가 감소했다. 계층구조의 차수가 높아짐에 따라 단백질의 파괴비율이 증가하고 전체적으로 유연한 성질을 가지게 된다. 또한 상대적으로 단백질의 밀도가 작기 때문에 전체 구조물의 경량화를 이룰 수 있다. 이러한 계층구조의 생체모방 다층구조물은 외부 충격에 대한 응력과 변위를 감소시키는 경향성을 띤다.

참고문헌

- 1) S. Kamat, X. Su, R. Ballarini and A. H. Heuer, "Structural Basis for the Fracture Toughness of the Shell of the Conch Strombus Gigas," *Nature*, Vol. 405, 2000, pp. 1036-1040.
- 2) T. L. Norman, D. Vashishth and D. B. Burr, "Fracture Toughness of Human Bone under Tension," *Journal of Biomechanics*, Vol. 28, 1995, pp. 309-320.
- 3) B. Ji and H. Gao, "Mechanical Properties of Nanostructure of Biological Materials," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 52, 2004, pp. 1963-1990.
- 4) H. Gao, "Application of Fracture Mechanics Concepts to Hierarchical Biomechanics of Bone and Bone-like Materials,"

- International Journal of Fracture*, Vol. 138, 2006, pp. 101-137.
- 5) N. C. Broedling, A. Hartmaier, M. J. Buehler and H. Gao, "The Strength Limit in a Bio-inspired Metallic Nanocomposite," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 56, 2008, pp. 1086-1104.
 - 6) J. D. Currey, "Bones: Structure and Mechanics," New Jersey: Princeton University Press, 2002.
 - 7) J. H. Lee, C. D. Kong and Soutis Cotstas, "Modeling of Low Velocity Impact Damage in Laminated Composites," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 19, No. 4, 2005, pp. 947-957.
 - 8) ANSYS/ LS-DYNA User's Guide
 - 9) K. Bertoldi, D. Bigoni and W. J. Drugan, "Nacre: An Orthotropic and Bimodular Elastic Material," *Composite Science and Technology*, Vol. 68, 2008, pp. 1363-1375.
 - 10) J. K. Chen and C. T. Sun, "Dynamic Large Deflection Response of Composite Laminates Subjected to Impact," *Composite Structures*, Vol. 4, 1985, pp. 59-73.
 - 11) 최익현, "초기 면내하중을 받는 복합적층판의 저속충격 거동 및 손상해석," 한국복합재료학회지, 제22권 제1호, 2009, pp. 1-7.
 - 12) S. H. Yang and C. T. Sun, "Indentation Law for Composite Laminates," ASTM STP 787, 1981, pp. 425-449.