

진주조개를 모방한 다층복합재료의 저속 충격 해석 Low-Velocity Impact Analysis of Multilayered Composites Mimicking Nacre

*조승운¹, #범현규²

*S. U. Jo¹, #H. G. Beom(hgbeom@inha.ac.kr)²

¹ 인하대학교 대학원 기계공학과, ² 인하대학교 기계공학과

Key words : Hierarchical structure, Impact, Multilayered composites, Nacre

1. 서론

다층구조물에 대한 연구는 탄성재료의 계면균열에 대한 핵심적인 개념을 제시한 Rice¹의 논문 이후로 등방성 및 이방성 탄성재료의 계면균열과 접합중 간의 상호작용²에 대한 연구가 수행되었으며, 이방성 탄성재료의 계면균열 선단의 소성영역에 대해 연구되었다.³

뼈나 조개의 구조적 형상과 특성을 볼 때 이러한 생체 재료 또한 거시적으로 다층구조물에 속한다. 뼈와 조개 껍질의 기계적 성질에 대한 실험이 Kamat⁴, Norman⁵ 등에 의해 행해지고 그 우수성이 알려지면서 생체재료의 구조에 대한 관심이 높아지기 시작하였다. 최근에는 Gao^{6,7}에 의해 나노 사이즈의 미네랄 블록(block)들이 단백질 속에 여러 단계의 계층구조(hierarchical structures)로 서로 엮여져서 적응되어 있는 뼈와 조개의 구조가 밝혀졌다

이에 본 논문은 뼈나 조개와 같은 생체재료의 구조적 특성을 모방한 다층구조물의 충격 거동 특성에 대해 연구하였다. 진주조개와 같이 작은 구조를 거시적으로 표현하여 일정한 속도의 입자 충격에 대해 단층 재료와 이를 조합한 구조, 그리고 생체재료를 모방한 계층구조에 대해 시간에 따른 응력, 변위 등의 특성을 비교 연구하였다.

2. 충격 이론방정식

본 논문은 다층구조물에 충격이 가해지는 동적인 문제의 해석을 다루고 있다. 감쇠(damping)를 무시한 동적 평형방정식은 다음과 같다.⁸

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

여기서 [M]과 [K]는 구조물의 질량과 강성 행렬이다. \ddot{U} 과 U 는 절점의 가속도 벡터와 변위 벡터이다. 그리고 F(t)는 시간에 따라 변화하는 외부 응력 벡터이다.

충격이 가해질 때의 외부 응력 벡터는 다음과 같다.

$$F(t) = \frac{m(v_f - v_i)}{\Delta t} \quad (2)$$

여기서 m 은 발사체의 질량, v_f , v_i 는 각각 발사체의 나중속도, 처음속도이다. Δt 는 시간간격이다.

3. 계층구조의 관계식

생체재료의 구조와 그 기계적 특성에 대해서는 지금까지 많은 연구가 되어왔다. Meyers⁹ 등은 이러한 일련의 생체재료 연구에 대한 진행상황 등을 연구 보고하였다. Fig.1 은 조개와 같은 생체재료가 미네랄(mineral) 같은 강한 재료와 단백질(protein)과 같은 연질(soft)한 재료로 서로 특성이 다른 재료로 구성되어 계층적 구조를 이루고 있음을 보여준다. 진주조개를 살펴보면, 탄성계수(Young's modulus)가 매우 큰 미네랄과 그와 대조적으로 작은 탄소성(elasto-plastic) 특성의 단백질로 이루어져 있다.

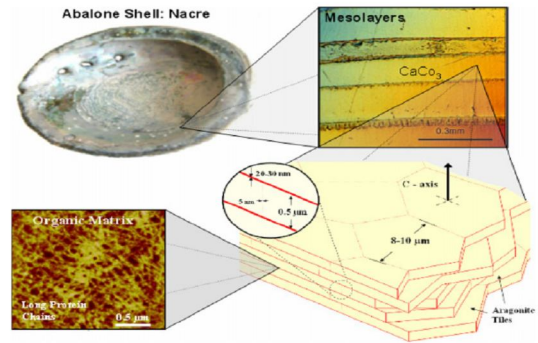


Fig. 1 Hierarchy of abalone structure.¹¹

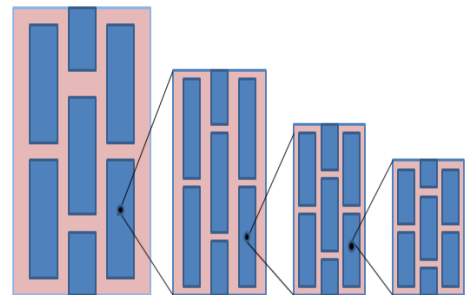


Fig. 2 Hierarchical structure

단백질이 미네랄과 비교하여 매우 연질함에도 불구하고 이 두 재료로 이루어진 계층구조의 뼈나 조개의 강도(hardness)와 강성(stiffness)은 매우 우수하다. Gao^{6,7}가 연구한 바에 의하면 이러한 강도와 강성의 비결은 Fig. 2와 같이 나노 구조에서 시작된 생체재료만이 가지는 계층적 구조적 특성에서 그 원인을 도출하고 있다.

Gao⁶가 제안한 단백질과 미네랄로 이루어진 생체복합재료(biocomposites)의 인장-전단 모델(tension-shear chain model)에서 단백질은 인장 응력을 받지 않고 Voigt와 Reuss model의 중간치 값을 도출하는 유효 탄성계수(effective Young's modulus)를 도출해낸다.⁶

$$\frac{1}{E^*} = \frac{4(1-\Phi)}{G^p \Phi^2 \rho^2} + \frac{1}{\Phi E^M} \quad (3)$$

여기서 E^* 는 유효 탄성계수, E^M 은 미네랄 탄성계수, G^p 은 단백질의 전단응력, Φ 는 미네랄의 부피비율, ρ 는 길이 변수이다.

4. 수치해석

저속 충격을 받는 다층복합재료의 해석을 수치적으로 계산하기 위해 ANSYS/LS-DYNA를 이용하였다. 크기 800mm X 800mm X 51mm의 판 모형에 공기저항을 무시한 강구(rigid ball)가 일정한 속도 30mm/s로 부딪힐 때를 모형화한 모델링이다. 해석에 사용된 본 판 모형과 강구의 물성치는 Table. 1에 나타내었다.

Table 1 Material properties

	Mineral(M1)	Protein(M2)	Rigid ball
Young's modulus[GPa]	100	15	100
Poisson's ratio	0.3	0.3	0.3
Density[g/cm ³]	2.7	1.3	2.0
Shear modulus[GPa]		15	
Yield strength[MPa]		40	
Tangent modulus[GPa]		1.25	
Failure strain		0.005	

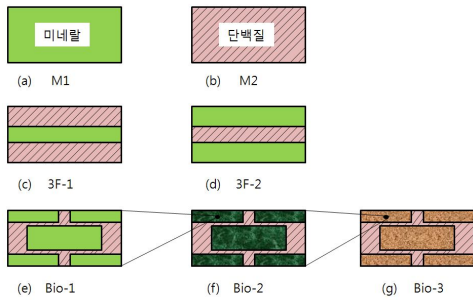


Fig. 3 Multilayered composites

강한 재료인 미네랄을 M1, 약한 재료인 단백질을 M2로 각각 명하고, Fig. 3과 같은 다층복합재료 모형들을 모델링하였다. Fig. 3의 (a)와 (b)는 단일 재료인 미네랄과 단백질을 나타낸다. Fig. 3의 (c)와 (d)는 두 재료를 합하여 3층의 다층복합재료로 구현한 것이다. 그리고 Fig. 3의 (e)는 조개와 같은 다층구조물의 특이한 벽돌-모르타르 형식의 구조를 구현한 것이고, Fig. 3의 (f)와 (g)는 이러한 조개의 다층구조물이 계층구조를 이루었을 때를 구현한 것이다.

이러한 다층복합재료 모형들에 저속 충격이 발생하는 상황을 ANSYS/LS-DYNA를 이용하여 시간에 따른 유한요소 해석 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 3에 나타났는 각각의 다층복합재료에 대해 초기속도 30mm/s의 강구가 충격가속도로 하강할 때에 대하여 시간에 따른 충격점 부근의 응력(von mises stress)과 변위를 해석하였다.

5. 충격해석

Fig. 4와 Fig. 5는 전체적인 다층 복합재료의 응력과 변위양상을 비교한 그래프이다. 조개의 생체구조를 구현하였을 경우 시간에 따른 충격의 전체적인 경향성을 살펴보면, 응력부분에서는 단층재료가 받는 응력을 크게 낮출 수 있다. 변위부분에서는 초기에 발생하는 변위가 유연한 재료로 변모함에 따라 시간지연이 발생하고 변위의 크기는 단층재료 사이의 중간 값을 가지게 된다.

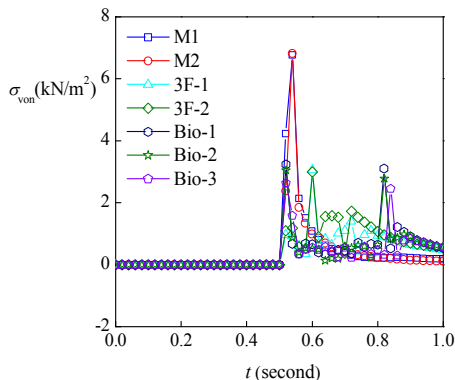


Fig. 4 Stress variations of multilayered composites

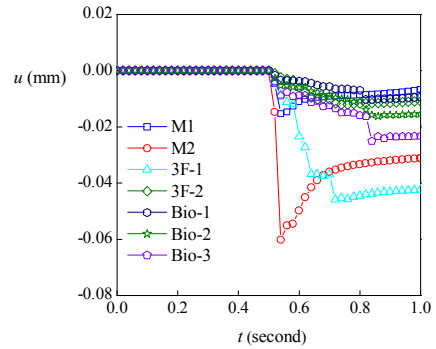


Fig. 5 Displacement variations of multilayered composites

6. 결론

조개의 생체구조를 모방함으로써 충격에 대한 응력과 변위를 알아보았다. 일정한 속도의 강구의 저속 충격에 대해 단일재료인 미네랄과 단백질이 받는 큰 응력을 재료가 계층 구조화하고 다층구조를 이룸으로써 전체적으로 응력이 감소하는 경향을 보였다. 그리고 변위는 단백질과 미네랄의 중간값을 가지게 되었다. 조개의 계층 구조적 특이성을 Gao⁶가 주장한 유효탄성계수로 치환하여 계층구조를 구현하였다. 계층구조의 차수가 높아짐에 따라 재료는 점점 단백질의 파괴 비율이 증가하여 전체적으로 유연한 성질을 가지게 된다. 이러한 재료는 외부충격에 대한 응력을 감소시키고 변위는 증가하는 경향성을 보인다. 다시 말하면 외부 발사체에 대한 에너지 흡수가 뛰어난 재료가 변모한다는 사실을 의미한다. 또 하나의 흥미로운 사실은 계층화할수록 전체적인 밀도가 감소하므로 재료가 경량화 해진다는 것이다.

후기

이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2009-0067592).

참고문헌

1. Rice, J. R., "Elastic Fracture Mechanics Concepts for Interfacial Cracks," *Journal of Applied Mechanics*, **55**, 98-103, 1988.
2. Suo, Z., "Interfaces and Cracks in Dissimilar Anisotropic Media," *Proceedings of Royal Society of London A*, **427**, 331-358, 1990.
3. Bassani, J. L. and Qu, J., "Finite Crack on Biomaterial and Bio crystal Interfaces," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **37**, 435-453, 1989.
4. Kamat, S., Su, X., Ballarini, R. and Heuer, A. H., "Structural Basis for the Fracture Toughness of the Shell of the Conch Strombus Gigas," *Nature*, **405**, 1036-1040, 2000.
5. Norman, T. L., Vashishth, D. and Burr, D. B., "Fracture Toughness of Human Bone under Tension," *Journal of Biomechanics*, **28**, 309-320, 1995.
6. Ji, B. and Gao, H., "Mechanical Properties of Nanostructure of Biological Materials," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **52**, 1963-1990, 2004.
7. Gao, H., "Application of Fracture Mechanics Concepts to Hierarchical Biomechanics of Bone and Bone-like Materials," *International Journal of Fracture*, **138**, 101-137, 2006.
8. ANSYS/LS-DYNA User's Guide.
9. Meyers, M. A., Chen, P. Y., Lin, A. Y. M. and Seki, Y., "Biological Materials: Structure and Mechanical Properties," *Progress in Materials Science*, **53**, 1-206, 2008.