생체구조를 모방한 다층복합재료의 이방성 유효탄성계수 및 저속 충격 해석

Analysis of Low-velocity Impact and Effective Anisotropic Elastic Constants of Multilayer Structures by Biomimetics

*이종원[1], #범현규[2]

*J. W. Lee[1], #H. G. Beom (hgbeom@inha.ac.kr)[2]

[1]인하대학교 대학원 기계공학과, [2]인하대학교 기계공학과

Key words : Effective Anisotropic Constants, Hierarchical Structure, Low-velocity Impact

1. 서론

조개껍질은 미네랄(mineral)과 단백질(protein)이 다중 계층구조(multiple hierarchical structure)를 형성하고 있는데, 순수한 미네랄과 단백질에 비해 몇 배나 뛰어난 물리적, 기계적 성질을 가지고 있다. 이러한 성질은 비교적 단단한 미네랄과 연한 단백질이 여러 겹의 계층구조를 이루며 서로 간의 상호작용을 통해 뛰어난 성질을 지니게 된다.[1-2] 이러한 조개껍질은 거시적으로 다층구조로 볼 수 있고, 다층구조물은 오늘날 항공기, 선박, 자동차 등의 경량화, 고강도의 재료를 요하는 산업 전반에 걸쳐 널리 이용되고 있다. 하지만 이러한 다층구조물은 저속 충격에 노출되어 육안으로 식별할 수 없는 계면균열(matrix cracking), 섬유파단(fiber failure), 층간분리(delamination)과 같은 내부 손상을 유발시킨다. 따라서 현재 첨단 산업에 널리 사용되고 있는 다층구조물의 저속 충격에 관한 연구가 중요한 과제로 다루어 질 필요가 있다.

본 연구에서는 다층구조물의 3차원 이방성 유효탄성계수를 포텐셜 에너지법을 사용하여 유도하는 방법과 이를 적용한 다층구조물의 저속 충격에 관해 해석하고자 한다. 또한 저속 충격에 대한 다층구조물의 재료간의 부피비율(volume fraction)과 계층화의 차수(order)에 따른 영향도 규명하고자 한다.

2. 이방성 유효탄성계수

조개껍질과 같은 생체재료는 계층구조로 이루어져 있다.[3] 이러한 계층구조는 구성 재료간의 부피비율과 계층화의 차수가 다층구조물의 특성에 중요한 역할을 담당하고 있다.

생체모방구조의 이방성 유효탄성계수를 구하기 위하여 우선 평형방정식으로부터 해석을 시작한다. 3차원의 복잡한 구조에서 생체구조는 이방성의 특성을 나타내므로 본 과제에서는 생체모방구조물을 직교이방성 재료로 가정하여 해석을 수행하였다. 복합재료와 단일재료에 같은 크기의 고정된 변위를 인가하여도 두 재료간의 응력의 결과가 다르게 나타나고, 복합체의 경우 각 면의 응력이 일정하지 않다. 따라서 두 구조의 전체 시스템의 포텐셜 에너지가 같아지도록 유효탄성계수를 유도한다. 복합재료의 포텐셜 에너지와 단일재료의 유효 포텐셜 에너지는 다음과 같다.

$$\Pi_{comp} = \int_S \frac{1}{2}\sigma_{ij}^c u_i n_j dS \tag{1}$$

$$\Pi_{eff} = \frac{1}{2}\sigma_{ij}^e \epsilon_{ij} V = \frac{1}{2} C_{ij} \epsilon_{ij}^2 V \tag{2}$$

여기서 Π_{comp}, Π_{eff}, σ_{ij}^c, σ_{ij}^e, u_i, n_j, ϵ_{ij}, C_{ij}, V는 각각 복합재료의 포텐셜 에너지, 단일재료의 유효 포텐셜에너지, 고정변위 하의 복합재료의 응력, 단일재료의 응력, 변위, 단위외향수직벡터, 변형율, 구조물의 부피를 의미한다.

유효탄성계수를 구하기 위해 상용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 3차원 8절점 사각형 요소인 C3D8R을 사용하여 생체모방 구조물을 3차원 모델링 하였고 일정한 고정 변위를 인가한 후 얻어지는 응력의 결과를 이용해 위의 두 식의 전체 시스템의 포텐셜 에너지를 같다고 두고 응력의 적분과 수치계산을 통해 3차원 다층구조물의 이방성 유효탄성계수를 구할 수 있다.

3. 저속 충격 해석

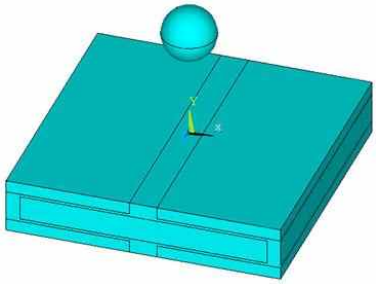

Fig. 1 Impact model of impactor and specimen

생체모방구조의 저속 충격에 대한 우수성을 확인하기 위하여 미네랄과 단백질의 단일 구조와 다층구조물에 대하여 비교 해석하였다. 또한 다층구조물의 부피비율 Φ와 계층화에 따른 영향도 살피었다. 충격 에너지를 고정한 채 다층구조물에 대하여 부피비율과 계층 수준에 따른 변위와 충격시의 충격력, 충격점의 Vonmises stress를 비교 해석하였고 이는 Fig. 2 ~ Fig. 4와 같은 결과를 보임을 확인하였다.

다층구조물의 저속 충격은 비탄성 변형을 고려한 비선형 해석이 수행되어야 한다. 이에 본 연구에서는 저속 충격을 받는 다층복합재료의 해석을 수치적으로 계산하기 위해 ANSYS/LS-DYNA를 이용하였고, 충격체와 다층구조물의 면 대 면 접촉조건과 Solid 164 explicit 3D structural solid 요소를 사용하여 Fig. 1과 같이 모델링하였다.

4. 결론

본 연구에서는 조개껍질 구조를 모방한 다층구조물의 3차원 이방성 유효탄성계수를 유도하였고, 단일 구조에 대한 다층 구조물의 저속 충격에 대한 우수성을 확인하였다. 해석을 통해 생체구조를 모방한 다층구조물에서 저속충격에 영향을 미치는 미네랄과 단백질 간의 부피비율과 계층화 등의 많은 요소를 확인하였다. 또한 이러한 구조물은 단일 구조에 비해 유연한 경향을 보이고 단백질의 밀도가 작으므로 계층화가 진행될수록 전체 구조물의 경량화가 가능하다는 장점이 있다.

후기

이 논문은 2010 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2010-0010163).

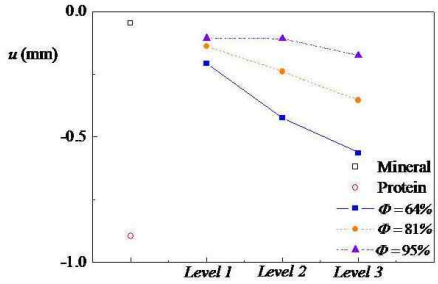

Fig. 2 Maximum displacement of various structures

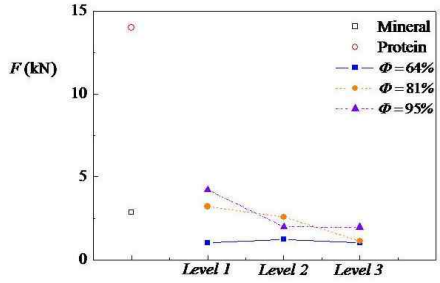

Fig. 3 Maximum impact force of various structures

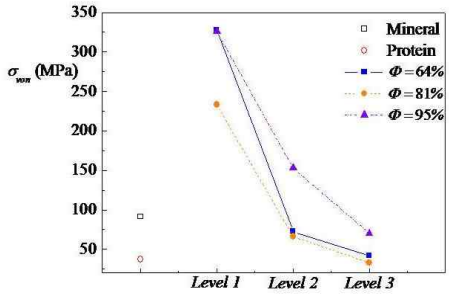

Fig. 4 Maximum Vonmises stress of various structures

참고문헌

1. Gao, H. J., "Application of fracture mechanics concepts to hierarchical biomechanics of bone and bone-like materials," Int. J. Fracture, Vol. 138, pp.101-137, 2006.
2. Broedling, N. C., Hartmaier, A., Buehler, M. J., Gao, H. J., "The strength limit in a bio-inspired metallic nanocomposite," J. Mech. Phys. Solids, Vol. 56, pp.1086-1104, 2008.
3. Bertoldi, K., Bigoni, D., Drugan, W. J., "Nacre: An orthotropic and bimodular elastic material," Composites Science and Technology, Vol. 68, pp.1363-1375, 2008