

음의 프와송 비를 갖는 미세 구조체에 대한 유한요소해석

이문규 (한국과학기술연구원 의과학연구소), 최귀원 (한국과학기술연구원 의과학연구소),
최재봉* (한성대학교 기계시스템공학과)

Finite Element Analysis to Micro-structure with Negative Poisson's ratio

M. K. Lee(BRC. KIST), K. Choi(BRC. KIST), J. B. Choi(Mech. E. HSU)

ABSTRACT

Materials with specific micro-structural shape can exhibit negative Poisson's ratio. These materials can be widely used in structural applications because of their high resilience and resistance to impact. Specially, in the field of artificial implant's material, they have many potential applications. In this study, we investigated the Poisson's ratio and the ratio(E_x/E) of the elastic modulus of rotational particle structures based on structural design variables using finite element method. As the ratio of fibril's length to particle's diameter increased and the ratio of fibril's diameter to fibril's length decreased fixing the fibril's angle with 45 degree, the negative Poisson effect of rotational particle structures increased. The ratio of elastic modulus of these structures decreased with Poisson's ratio. The results show the reasonable values as compared with the previous analytical results.

Key Words : Negative Poisson's ratio (음의 프와송 비), Rotational particle structure (질점회전구조),
Finite element analysis (유한요소해석)

1. 서론

인공관절의 관절운동 재료로 초고분자량 폴리에틸렌이 많이 쓰이고 있는데 기존 재료의 경우 충격에 의한 마모와 파손은 인공관절의 수명을 단축시키는 요인으로 작용하고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 진행중인 연구 중의 한가지가 기존 재료를 이용해서 질점회전 미세구조를 갖게 하여 음의 프와송 비를 갖도록 하는 것이다. 음의 프와송 비를 갖는 구조체는 응력집중현상을 줄여주고 탄성 및 충격 흡수성을 향상시킬 수 있다. 이런 음의 프와송 비를 갖는 구조체에 대한 연구는 1980년대부터 본격적으로 시작되었는데 1984년 Herakovich [1]는 적층 구조물에서 적층의 두께와 적층 방향을 조절하여 음의 프와송 비를 얻었고 1985년 Kopalkov [2]는 벌집 구조물을 변형시켜 음의 프와송 비를 주는 2차원 구조물을 개발하였다. 실제 재료의 합성에 적용한 사례로는 1989년 영국의 Evans [3] 그룹에 의해 Polytetrafluoroethylene (PTFE) 합성시 미세 구조를 조절하여 음의 프와송 비를 얻었으나,

비등방향이 심하여 실용화할 수 없었고 1987년 Lakes [4]등에 의해 개발된 Foam 물질은 음의 프와송 비를 주는 최초의 등방향성 물질이지만, 강도가 낮아 하중 지지에는 부적합한 단점을 가지고 있다. 하지만 1992년 Lakes 와 본 연구의 저자인 J.B. Choi [5]는 음의 프와송 비를 줄 수 있는 미세 구조와 그 이론적인 근거를 분석하였고 이러한 지속적인 연구가 절실히 요구되고 있다.

따라서 본 연구의 목적은 이러한 음의 프와송 비를 갖는 미세 구조체 개발을 위한 기계적 물성치의 이론적인 자료를 얻기 위해 유한요소법을 이용하여 미세 구조의 형상에 따른 프와송 비와 탄성계수를 분석하는 것이다.

2. 유한요소해석

2.1 모델링

음의 프와송 비를 갖는 미세구조를 설계하기 위해 질점회전 미세구조를 선택하였고 (Fig. 1), 세 가지의 설계변수를 설정하여 이에 따른 유한요소해석

을 수행하였다. 첫 번째 설계변수는 particle 의 직경에 대한 fibril 의 길이 비로서 0.2 에서 2.0 까지 일정한 간격으로 10 case 에 대해 수행하였고 두 번째 설계변수는 fibril 의 길이에 대한 fibril 직경의 비로서 0.02 에서 0.2 까지 10 case 에 대해 수행하였으며 세 번째 설계변수는 선택한 fibril 자체의 각도를 0 도에서 접하는 각도까지 10 도 간격으로 값을 주었다. 이러한 세 가지 변수를 조합한 총 213 case 에 대해 해석을 수행하여 각 변수들 사이에 대한 프와송 비와 탄성계수의 비를 분석하였다.

Particle 의 직경은 실험을 근거로 하여 0.12mm 로 구성하였고 각 모델들은 기준 모델을 중심으로 설계변수를 변화시킨 것으로 기준모델은 particle 의 직경에 대한 fibril 의 길이 비를 0.5 로 하였고 fibril 의 길이에 대한 fibril 직경의 비를 0.1 로 하였으며 fibril 자체의 각도는 particle 에 접하는 각으로 설정하였다.

요소망은 2D 인 plain stress quadratic element 를 사용하였고 총 515 개의 particle 을 갖고 particle 간에 6 개의 fibril 로 연결된 구조체를 모델링 하였다. Quadratic element 를 사용하였기 때문에 particle 과 fibril 이 만나는 부분을 fillet 을 주어 표현하는 것이 가능하다.

경계조건은 단순인장시험을 모사하기 위해 좌측을 고정시키고 우측 끝단을 0.1% strain 에 해당하는 변위를 인장하였다.

해석은 ABAQUS 6.3 을 사용하였고 각 case 에 대한 해석을 통해 상단과 하단의 변위를 측정하여 프와송 비를 구하였다. 탄성계수는 초기 단면에 대한 인장에 따른 반발력을 측정하여 구할 수 있고 이때 얻은 탄성계수를 초기에 재료의 물성치로 입력한 탄성계수로 나누어 무차원화 하였다. 이러한 결과 값을 통해 고정된 한가지의 설계변수에 대하여 두 설계변수에 대한 프와송 비와 탄성계수의 비에 대한 경향을 나타내었다.

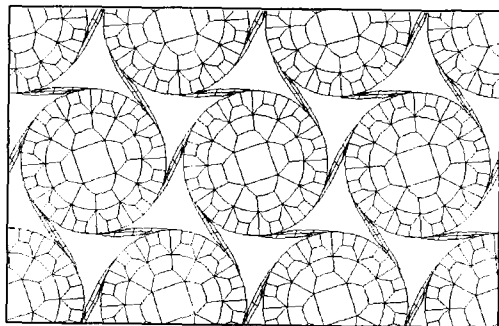


Fig. 1 Finite element model of a particle-fibril microstructure.

2.2 요소망 자동 생성 프로그램

각 설계변수는 기준 모델을 중심으로 변화시킨 것이며, 이러한 많은 모델의 유한요소해석을 효율적으로 수행하기 위해 MATLAB 프로그램을 이용하여 설계변수의 입력으로 요소망을 자동으로 생성하는 프로그램을 제작하여 사용하였다. 본 프로그램으로 인해 각 case 에 대한 요소망을 생성하는데 드는 많은 시간적 비용을 절약할 수 있고 각 모델의 구조에 대한 동일한 기하학적인 규칙을 적용하여 모델링 할 수 있는 장점이 있다.

3. 미세 구조체의 프와송 비 및 탄성계수 비

3.1 미세구조체의 프와송 비에 대한 분석

본 연구를 결과를 기존 문헌과 비교해 보면 그 값이 유효한 범위를 갖는 것을 알 수 있고 본 연구에서 설정한 설계변수에 따라 프와송 비와 탄성계수의 비가 일정한 경향을 나타냄을 알 수 있다. 전체 모델에 대하여 프와송 비는 -0.7 에서 0.2 의 범위를 갖고 탄성계수의 비는 0.01 에서 0.37 의 값을 갖지만 탄성계수의 비의 경우 대부분이 0.15 이하의 값을 갖는다는 것을 알 수 있다.

각 설계변수에 대한 프와송 비의 경향을 살펴보면, 질점의 직경에 대한 fibril 의 길이의 비가 증가할수록 프와송 비는 초기에 급격히 감소하여 음의 값을 갖게 되고 점차적으로 감소량이 줄어들면서 일정한 값을 갖게 되거나 fibril 의 길이에 대한 직경의 비가 증가하면서 그 값이 미소하게 증가하는 경향을 갖게 된다(Fig 3, left). 이는 fibril 의 직경이 프와송 비에 중요한 인자로 작용함을 의미한다.

기본적인 모델은 fibril 이 질점에 접하는 형상을 갖도록 하였기 때문에 fibril 의 각도가 질점의 직경에 대한 fibril 길이의 비에 의해서 결정되게 되는데 이 밖에도 fibril 자체의 각도를 변경하여 프와송 비를 측정할 결과 그 각이 45 도 부근에서 가장 작은 음의 값을 갖는다는 것을 알 수 있다(Fig 4, left).

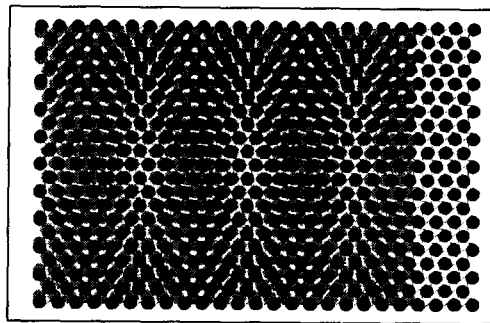


Fig. 2 Deformation which shows a negative Poisson effect

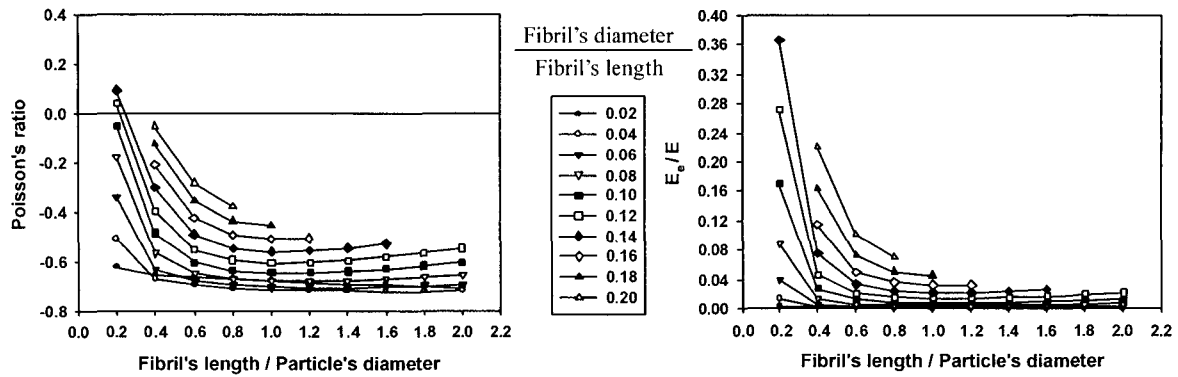


Fig. 3 The effective Poisson's ratio and the effective elastic modulus' ratio on rotational particle structures for fibril's angle = tangential angle

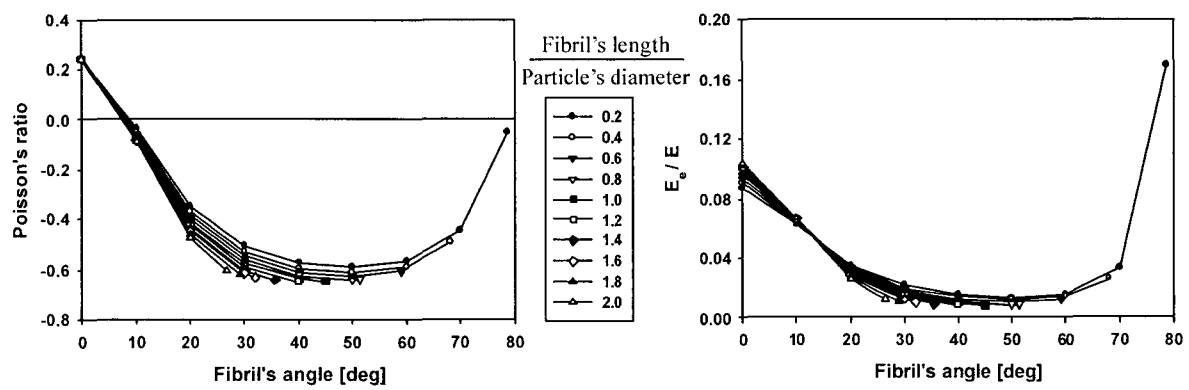


Fig. 4 The effective Poisson's ratio and the effective elastic modulus' ratio on rotational particle structures for the ratio of fibril's diameter to fibril's length = 0.1

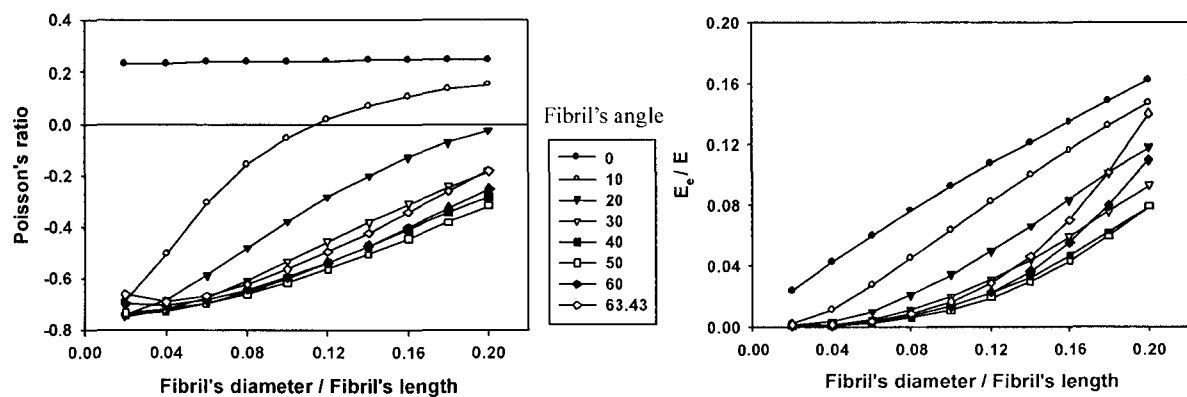


Fig. 5 The effective Poisson's ratio and the effective elastic modulus' ratio on rotational particle structures for the ratio of fibril's length to particle's diameter = 0.5

상대적으로 fibril의 각도가 작거나 fibril의 길이에 대한 직경의 비가 작을수록 다른 변수에 대한 프와송 비의 변화는 작다는 것을 알 수 있다. Fibril의 각도가 0도를 제외하고는 그 각이 작을수록 fibril의 길이에 대한 직경의 비에 따른 프와송 비의 변화가 크다는 것을 알 수 있고 상대적인 fibril의 직경의 값이 클수록 fibril 각도에 따른 프와송 비의 차이가 크게 된다(Fig 5, left).

3.2 미세구조체의 탄성계수 비에 대한 분석

일반적으로 탄성계수의 비는 프와송 비가 음의 값을 가질수록 작은 값을 갖게 됨을 알 수 있는데 질점의 직경에 대한 fibril의 길이가 작아질수록 탄성계수의 비는 점점 급격히 증가하게 된다(Fig 3, right). 이 사실은 fibril의 길이가 상대적으로 짧아지면 질점 간의 거리 또한 짧아지게 되므로 전체적인 공극률이 줄어드는 것을 의미한다.

Fibril의 길이에 대한 직경의 비가 작을수록 그리고 fibril의 각도가 45도인 부근에서 상대적으로 작은 탄성계수의 비를 나타냄을 알 수 있고 0.1의 값과 동일한 각도에 대해서는 질점의 직경에 대한 fibril의 길이의 변화에 따른 탄성계수의 비에 대한 변화가 거의 없다(Fig. 4, right).

Fibril의 길이에 대한 직경의 비가 증가할수록 탄성계수의 비도 증가함을 알 수 있는데 fibril의 각도가 45도의 부근에 갈수록 선형적인 비례에서 멱급수의 비례로 진행함을 알 수 있다(Fig. 5, right).

차후에는 형상에 대한 탄성에너지와 압입 시험을 분석함으로써 최적의 형상을 예측하고자 한다.

4. 결론

결론적으로 질점회전 미세구조의 형상 변수를 변화시킴으로써 다양한 음의 프와송 비를 갖는 구조체를 생성할 수 있다.

상대적으로 음의 프와송 비에 주요한 영향을 주는 인자는 fibril의 길이에 대한 직경의 비와 fibril의 각도이다.

Fibril의 길이에 대한 직경의 비가 커질수록 프와송의 비도 커지는 양상을 갖게 되고 이때 fibril의 각도가 0도를 제외하고 그 각이 작을수록 커지는 양상이 뚜렷하게 된다. 이에 대한 탄성계수의 비도 비례하는데 fibril의 각도가 45도 부근으로 갈수록 비례관계가 더 뚜렷해진다.

Fibril의 각도는 질점에 접하는 형상과는 관계없이 45도 부근에서 가장 작은 프와송 비를 갖게 되고 동시에 가장 작은 탄성계수의 비를 갖게 된다. 즉, 접할 때의 각도가 45도보다 커지게 되면 프와송 비와 탄성계수의 비가 모두 증가하게 된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-1999-000-00256-0)지원연구로 수행되었으므로 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Herakovich C. T., J. Composite Materials, Vol. 18, pp. 447, 1984
2. Kolpakov, A., Prikl. Mat. Mekh. Vol. 59, pp. 969, 1985
3. Evans, K., J. Phys. D, Appl. Phys., Vol. 22, pp. 1870, 1989
4. Lakes R. S., Science, Vol. 235, pp. 1038, 1987
5. Choi, J. B., Lakes, R. S., J. Mater. Sci., Vol. 27, pp. 4678, 1992