

## 골강화제가 주입된 망상골의 영률에 관한 연구

문희욱<sup>†</sup>(서강대원)·이문규<sup>†</sup>(서강대원)·박종을\* (고려대)·채수원\* (고려대)·이태수\*\* (서강대)

### The Study of Young's Modulus in Trabecular Bone with Bone Cement Injection

H.W. Moon<sup>†</sup>, M.K. Lee<sup>†</sup>, J.Y. Park\*, S.W. Chae\*, T.S. Lee\*\*

**Key Words:** Vertebroplasty(척추성형술), PMMA, Young's Modulus, Apparent density(겉보기밀도)

#### Abstract

PMMA which is used as the bone cement for vertebroplasty is able to be a supporter, as a fixing supporter role, for broken trabecular structure, caused by the compressed fracture of spine on aged osteoporosis.

In this thesis, as experimenting apparent density of bone pieces, we have figured out support extent of Young's modulus as classifying the bone pieces injected PMMA and the others which are not. In case of low apparent density of PMMA in some bone, Young's modulus seems to be more supportable to bone. On the other hand, if apparent density of bones is normal, injection of PMMA is not very effective on improvement in Young's modulus of bone cement injection.

#### 기호설명

$\rho$  : 겉보기 밀도  
E : 영률

#### 1. 서론

골다공증에 의한 척추 압박골절은 뼈의 골절 중 가장 흔하게 발생하는 질환이다.<sup>(1)</sup> 척추성형술은 척추압박골절에 의하여 붕괴된 척추체내에 골강화제인 PMMA를 주입함으로써 척추체의 장력을 보완하고 골절로 인한 동통의 완화를 가져오는 시술 방법이다.<sup>(2)</sup> 본 연구에서는 PMMA의 기계적 특성을 바탕으로 골다공증이 일어난 망상골의 골강화제에 의한 영률의 향상 정도를 파악해

보고자 한다. 이와 같은 연구는 임상에서 시술시 CT image를 통해 알아낸 환자의 밀도로부터 곧바로 수술후 효과를 예측이 가능하다는 장점이 있다.<sup>(3)</sup>

#### 2. 재료 및 방법

##### 2.1 재료.

사체의 요추와 흉추로부터 32개의 시편을 적출하였다. 또한 돼지의 요추와 흉추에서 60개의 시편을 적출하였다. PMMA는 Powder와 MMA의 혼합으로 만드며, Zimmer사에서 만들고, 임상에서 사용되고 있는 Osteobond를 이용하였다. 사체와 돼지의 시편은 각각 12mm x 12mm x 12mm의 크기를 가지며, PMMA는 Powder와 MMA의 비율이 1.5g/ml 가 되도록 하였다.

##### 2.1.1 시편의 가공

사체나 돼지로부터 얻은 요추, 흉추는 -70 °C의 냉동고에 보관되며, 시편의 가공을 위해 해동된 상태에서 척추체 주변의 연조직을 제거한다.

†서강대학교 기계공학과 대학원

E-mail : heewook@sogang.ac.kr

TEL : (02)712-1599 FAX : (02)712-0799

\* 고려대학교 의과대학

\*\* 서강대학교 기계공학과



Fig. 1 Exakt Saw cutting

연조직이 제거된 척추체는 Facet joint에서 각 부분 척추체로 나뉘게 되고 이렇게 나뉜 척추체는 사각형의 시편의 제작을 위한 Jig에 고정을 위하여 치과용 Resin을 이용하여 Process부분을 응고시키킨다. 시편은 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 Saw를 이용하여, 12mm의 크기로 가공된다. 이때 발생하는 열을 줄이기 위해 생리식염수를 사용한다. 가공된 시편은 마이크로 정밀 저울을 이용하여 무게와 부피가 측정되어 겉보기 밀도를 산출하게 된다.

### 2.1.2 PMMA의 시편

PMMA가 주입된 망상골의 영률을 측정하기에 앞서 순수한 PMMA의 기계적 특성을 먼저 파악할 필요가 있으므로 PMMA만으로 구성된 시편을 제작하였다. 시편은 ASTM 규정에 의거하여 원기둥 시편으로 직경 12.7mm, 높이 25.4mm의 형상을 가지도록 하였다.

## 2.2 방법

### 2.2.1 PMMA의 주입

망상골에 PMMA를 주입하기 위하여, 겉보기 밀도가 산출된 각 시편군을 PMMA가 주입될 군과 그렇지 않은 군으로 나누었다. 이때 서로 겉보기 밀도가 비슷한 시편은 같은 영률을 가진다는 가정을 하였다. PMMA가 주입될 군으로 나뉜 시편은 1.5g/ml의 PMMA gel에 담근 후 Vacuum machine을 가동시켜 망상골의 안의 공기가 빠지면서 PMMA gel이 망상골 구조체 사이로 스며들도록 하였다. PMMA gel이 가접착을 하여 안정성을 가지게 되는 3분후 Vacuum machine에서 꺼내어 뼈 주변의 잔여 PMMA를 제거하였다.



Fig. 2 PMMA in trabecular bone

완전 응고시간은 약 3시간이며, 이때 생체 조건을 만족시키기 위해 37 °C의 5% 이산화탄소 조건의 Incubator에서 보관하였다. Fig. 2 는 망상골내에 주입된 PMMA의 SEM 사진이다. 밝게 보이는 부분이 망상골이며, 어둡게 보이는 부분이 골강화제인 PMMA이다. PMMA가 망상골에 완전 접착되었음을 확인 할 수 있다.

### 2.2.2 압축시험

원기둥형으로 제작된 PMMA 시편은 INSTRON 8511을 이용해 20Hz의 Sampling rate에 0.1mm/sec의 속도로 탄성영역 이후까지의 관찰을 위하여 3mm로 압축하였다.

망상골에 대해서도 INSTRON 8511을 이용하였으며, 30Hz의 Sampling rate에 0.1mm/sec의 속도로 1mm 압축시험을 행하였다. 뼈는 각 방향에 따라 기계적 물성치의 차이를 보이기 때문에<sup>(4)</sup> 실질적으로 사람이 보행시나 직립시에 하중을 받는 IS 방향으로 압축력을 받도록 하고 MAX를 이용하여 변위와 하중 data를 받았다. Fig. 3은 INSTRON을 압축시험 과정을 보여주고 있다.



Fig. 3 Compression test

### 3. 결과

#### 3.1 PMMA 물성 연구 결과

압축시험을 통해 밝혀진 1.5g/ml의 PMMA의 영률은 약 1.2GPa로 밝혀 졌으며 이는 Powder와 MMA의 비율에 따라 PMMA의 영률이 선형적으로 증가한다는 종전 결과의 범위 안에 속한다. Fig. 4에서 보이는 결과에 의하면 Powder의 비율이 높아질수록 영률은 증가하는 것으로 나타난다. 또 SEM을 통해서 살펴본 PMMA는 Powder의 혼합비가 높아질수록 pore size가 작아지는 경향을 보인다.

#### 3.2 망상골의 겔보기 밀도 산출 결과

정밀저울과 캘리퍼스를 이용하여 측정된 망상골의 겔보기 밀도는 사람의 나이와 성별에 따라 크게 차이가 난다. 일반적으로 여성이 남성보다 밀도가 작으며, 35세 이후에는 골밀도가 감소하는 것으로 알려져 있다. 또한 폐경기 이후의 여성은 그 감소수준이 같은 나이의 남성보다 높게 나타난다. 본 연구에서 측정된 골밀도는 대략 0.1~1.0g/cm<sup>3</sup>로 나타나며, 임상적으로 약 0.4~0.5 g/cm<sup>3</sup> 이하의 골밀도를 가지는 경우 골다공증으로 판단한다. 첫 번째 사체인 65세 남성의 경우 골밀도가 약 0.1~0.4g/cm<sup>3</sup>로 나타나 골다공증이 있었던 것으로 판명되었으며, 16세 남성의 경우 0.4~1.0g/cm<sup>3</sup>의 골밀도를 나타내었다. 돼지 시편의 경우는 그 폭이 넓게 분포하고 있었다.

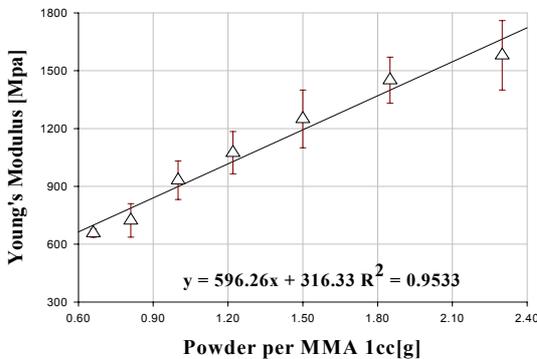


Fig. 4 Young's modulus of PMMA

#### 3.3 순수 망상골의 물성 연구 결과

PMMA가 주입되지 않은 순수 망상골의 경우, Displacement control로 1mm를 압축하였을때 Load cell에서 측정되는 반력은 약 400~1000N 정도가 되었으며, 평균 영률이 229MPa이 나오며 최대 501MPa, 최소 13.6MPa의 영률을 가진다. 이때 순수 망상골의 경우는 종전에 연구된 결과와 같이 멱급수의 관계를 이루며 R square 값은 0.745로 산출되었다.<sup>(5)</sup> 겔보기 밀도에 대한 순수 망상골의 영률은 Fig. 5와 같으며, Curve Fitting을 통한 추세식은 다음의 식 (1)과 같다.

$$E = 705.3\rho^{1.57} \quad (1)$$

#### 3.3 PMMA가 주입된 망상골의 물성 연구 결과

PMMA가 주입되지 않은 경우 돼지뼈와 사람뼈 모두 비슷한 경향을 보인 반면, PMMA가 주입된 경우 시편의 밀도가 낮다면 영률의 편차가 심하다는 것을 Fig. 5를 통하여 알 수 있다. 그러나 밀도가 커짐에 따라 편차는 작아지며, 밀도가 약 0.7g/cm<sup>3</sup>을 넘어가면 돼지시편의 경우와 거의 일치하는 결과를 보이고 있다. 순수 망상골의 경우와는 다르게 PMMA가 주입된 망상골은 처음 밀도가 작은 경우에는 영률의 큰 증가를 보이며, 밀도가 커질수록 영률이 작아진다. 망상골의 밀도가 0.1~0.2g/cm<sup>3</sup>인 경우 순수망상골에 PMMA가 주입되면 약 650MPa 정도의 영률의 상승을 가져오며, 0.2~0.3g/cm<sup>3</sup>는 약 600MPa, 0.3~0.4g/cm<sup>3</sup>는 약 560MP 정도의 보완정도를 보인다. 이는 평균적으로 골다공증이 있는 환자에 PMMA가 주입되면 평균적으로 약 370%정도의 강도보완이 척추체에 일어남을 시사하고 있다. 그러나 정상인으로 간주가 가능한 0.5g/cm<sup>3</sup>이상의 겔보기 밀도를 가지는 경우에는 앞서 설명한 바나 Fig. 5에서 보이는 것처럼 PMMA에 의한 보완정도가 평균적으로 150%를 넘지 못하는 것으로 나타난다. 겔보기 밀도에 따른 PMMA가 주입된 망상골의 영률을 추세선으로 나타내어 보았다. 밀도가 증가함에 따라 영률은 선형적으로 감소하는 경향을 보였으며 curve fitting으로 표현한 식은 다음과 같다.

$$E = -152.3\rho + 766.3 \quad (2)$$

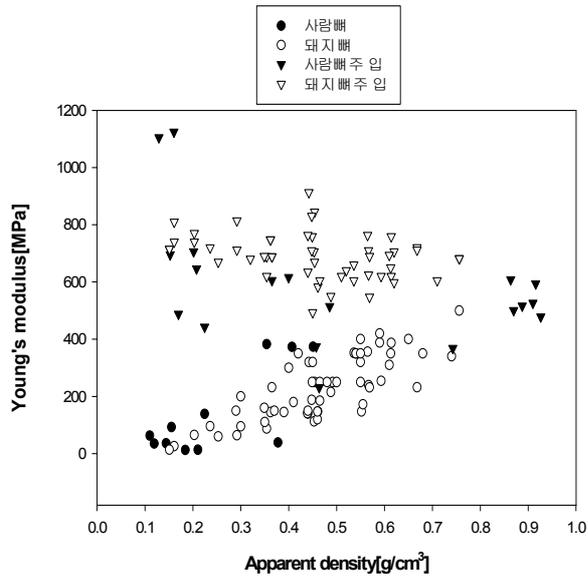


Fig. 5 Young's moduli of bones

4. 결 론

본 연구에서는 척추성형술에서 사용되는 골강화제인 PMMA의 주입이 척추체에 미치는 압축강도의 변화정도를 실험을 통하여 관찰 하였다. 시편은 65세 및 16세의 남성 사체와 돼지로부터 얻었으며, 시편의 크기는 각 방향을 12mm의 크기로 하였다.

또한 순수 PMMA의 물성치를 파악하기 위해 기존 논문자료와 자체 제작된 Jig를 사용하여 규정된 크기의 원기둥 시편을 만들어 기계적 특성을 파악하였다.

사체 및 돼지로부터 얻어진 시편은 골밀도에 따라 분류되어 PMMA가 주입될 것과 그렇지 않을 순수망상골로 나뉘었다. PMMA의 주입은 진공기계를 이용하여 PMMA gel이 망상골 구조체 내로 완전 접촉이 가능하도록 하였으며, 생체조건하에서 건조가 되도록 하였다.

실험은 INSTRON 8511을 이용하였으며, 뼈의 물성이 각 방향에 따라서 차이를 보이기 때문에 실질적으로 하중을 받는 Inferior-superior 방향으로 압축하중을 가하였다.

실험을 통해 나타난 결과는 Fig. 5와 같으며, 순수망상골의 경우 겔보기 밀도가 증가할수록 영률이 먹급수의 관계를 가지며 증가하는 것을 알 수 있다.

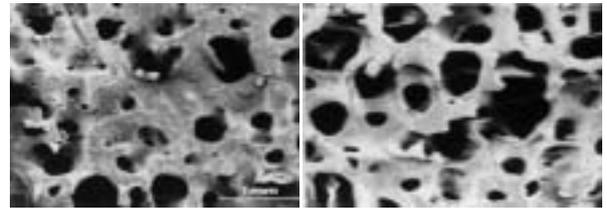


Fig. 6 SEM, 24 years old and 65 years old

이는 위 Fig. 6에서 보이는 바와 같이 밀도가 작은 경우에 압축하중을 받아 골절로 인해 망상골 구조체가 붕괴하는 경우에 공극의 크기가 크고 같은 크기의 밀도가 높은 시편에 비하여 아래쪽에 받쳐주는 지지체가 부족하기 때문이며, 역으로 밀도가 높은 경우에는 같은 변위의 하중이 가해졌을 때 구조체의 붕괴로 부서진 구조체의 수가 많으므로 영률의 증가가 먹급수의 형태로 커지는 것이다. 또한 이는 간접적으로 뼈의 이방성을 보여주기도 한다.<sup>(6)</sup>

PMMA가 주입된 시편의 경우는 겔보기 밀도가 증가함에 따라 영률이 식 (2)에서 보는 바와 같이 선형적으로 감소한다. 골다공이 있다고 생각되는 시편의 경우 PMMA의 주입에 의한 영률의 보강 정도는 약 370%로 나타났다. 그러나 식에서 알 수 있듯이 겔보기 밀도가 높은 경우에는 차츰 보강 정도가 낮아져 겔보기 밀도가 1g/cm³에 근접할 경우에는 영률이 순수망상골과 거의 같아짐을 그래프를 통하여 예측이 가능하다. 이러한 결과는 겔보기 밀도가 작은 경우 즉, 골다공증이 생긴 경우에 커진 공극사이로 많은 양의 PMMA가 주입되어 뼈자체의 기계적 물성치 보다는 PMMA의 물성치가 전체적인 혼합체의 영률에 큰영향을 미치고 반대로 밀도가 높은 경우에 PMMA보다는 뼈 자체의 영률이 전체 혼합체의 영률에 미치는 바가 더 크기 때문인 것으로 사료된다.

또한 기존 연구에서 밝혀진 바와 같이 돼지뼈의 경우에 사람뼈의 물성과 차이가 크지 않다는 결과를 Fig. 5에서 확인이 가능하였다.<sup>(7)</sup> 이는 사체로부터 시편이 구하기 어려운 상황에서 사람뼈를 대신하여 돼지를 이용함으로써 그 결과를 임상에도 적용이 가능하다는 것을 시사하고 있다.

척추성형술은 골다공증으로 인한 척추압박골절로 고통받는 환자들에게 척추체의 장력보완과 간편한 시술 및 빠른 회복등의 장점으로 인해 세계적으로 시술되는 보편적인 치료방법이다. 또한

PMMA는 응고시 높은 열을 발생하여, 압박골절로 인한 신경중추의 압박에 따른 통증을 완화시켜주는 효과도 가지고 있다. 본 연구에서 행해진 PMMA에 의한 척추체의 압축강도의 보완정도 실험은 다른 인체 골격내에도 그 적용이 가능하므로, 앞으로 행해질 생체역학의 연구에도 많은 도움이 될 것이며, 아울러 임상시술에서 환자에게 수술에 따른 이점을 도표적으로 설명할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 2001년 특정기초연구과제(R01-2001-00374)에 의해 수행된 것이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Jensen M E, Evans A J, Mathis J. M, et al, 1997, "percutaneous PMMA vertebroplasty in the treatment of osteoporotic vertebral body compression fractures: Technical aspects", AJNR , Am J Neuroradiol Vol. 18. pp1897-1904
- (2) Melton LJ III, 1989, "Epidemiology of vertebral fractures in women", Am J Epidemiol, Vol 129, pp1000-1011
- (3). Gangi A, Kastler B. A, Dietemann J-L, 1994, ercutaneous vertebroplasty guided by a combination of CT and fluoroscopy", AJNR Vol. 15, pp83-86
- (4) Goldstein S. A, "The mechanical properties of trabecular bone-dependence on anatomical location and function", J. Biomechanics Vol. 18, pp317-328
- (5) J.C.Rice et al, 1988, "On the dependence of the elasticity and strength of cancellous bone on apparent density", J. Biomechanics, Vol. 21, pp155-168
- (6) Brown et al, "Mechanical property distributions in the cancellous bone of the human proximal femur", Acta orthop, scand, Vol. 51. pp429-473
- (7) D.C wirtz, 2000, "Critical evaluation of known bone material properties to realize anisotropic FE simulation of the proximal femur", J.