

# 대퇴골두 무혈성 괴사증의 수술적 기법 적용 후 괴사 망상골 내에서의 응력 변화 해석

김정성, 이성재  
인제대학교 보건대학 의용공학과

## An Analysis of Stress Transfer Behaviors within the Necrotic Cancellous Bone following Surgical Procedures for the Management of the Osteonecrosis of the Femoral Head

J. S. Kim, S. J. Lee

Department of Biomedical Engineering, College of Health, Inje University,

### ABSTRACT

Operative interventions for the management of osteonecrosis of the femoral head (ONFH) include core drilling, with or without vascularized fibular bone grafting. Nevertheless, their clinical results have not been consistently satisfactory. Recently, a new surgical procedure that incorporates cementation with polymethylmethacrylate (PMMA) after core drilling has been tried clinically. In this study, a biomechanical analysis using a finite element method(FEM) was undertaken to evaluate surgical methods and their underlying surgical parameter. Our finite element models included five types. They were (1) normal model (Type I), (2) necrotic model (Type II), (3) core decompressed model (Type III), (4) fibular bone grafted model (Type IV), and (5) cemented with PMMA model (Type V). The geometric dimensions of the femur were based on digitized CT-scan data of a normal person. Various physiological loading conditions and surgical penetration depths by the core were used as mechanical variables to study their biomechanical contributions in stress transfer within the femoral head region. In addition, the peak von Mises stress(PVMS) within the necrotic cancellous bone of the femoral head was obtained. The fibular bone grafted method and cementation method provided optimal stress transfer behaviors. Here, substantial increase in the low stress level was observed when the penetration depth was extended to 0mm and 5mm from the subchondral region. Moreover, significant decrease in PVMS due to surgery was observed in the fibular bone grafted method and the cementation method when the penetration depths were extended up to 0 and 5mm from the subchondral region. The drop in PVMS was greater during toe-off than during heel-strike (57% vs. 28% in Type IV and 49% vs. 22% in Type V). Both the vascularized fibular bone grafting method (Type IV) and the new PMMA technique (Type V) appear to be very effective in providing good stress transfer and reducing the peak Von-Mises stress within the necrotic region. Overall results show that fibular bone

grafting and cementation methods are quite similar. In light of above results, the new cementation method appears to be a promising surgical alternative for the treatment of ONFH. The use of PMMA for the core can be less prone to surgical complication as opposed to preparation of fibular bone graft and can achieve more immediate fixation between the core and the surrounding region.

### 서론

대퇴골두 무혈성 괴사증을 치료하기 위한 대표적인 수술기법으로는 핵심 감압술과 비골 이식술등이 있다. 이러한 기법들은 골수강 내압을 낮추거나, 구조적 안정성을 강화함으로써 골두의 함몰을 방지하거나, 연장시킨다. 그러나, 실제 임상에서의 결과는 만족스럽지가 못하며, 많은 논란의 대상이 되고 있다 [1]. 최근에 골소파술을 한 후에 골 시멘트 (Polymethylmethacrylate, PMMA)를 충전시키는 새로운 시술법이 임상에서 시도되었다. 생체역학적인 관점에서 골 시멘트가 골 이식편의 구조적인 지지 역할을 충분히 수행할 수 있으며, 망상골의 강성도에 더 가까워서 괴사골 내에서의 응력분포를 더 균일하게 해 줄 것이다. 본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 각 수술기법의 수행 능력을 역학적인 관점에서 연구하였다. 이에 본 연구에서는 다양한 하중과 천공 영역의 침투 깊이에 대한 역학적인 변수으로써 각 수술기법의 효용성을 판단하였다.

### 재료 및 방법

#### 1. 유한요소모델 구현

본 연구에서 구현한 모델은 모두 14가지이다. 먼저, validation을 위해 정상 모델(Type I)이 구현되었고, 골두에 괴사가 일어난 괴사 모델(Type II)이 해석의 기준을 보여주기 위해 만들어 졌다. 각각의 수술 기법에 따라서, 핵심 감압술을 시술한 핵심 감압 모델 (Type III), 괴사 영역을 천공한 후 비골 이식편을 주입한 골 이식 모델(Type IV)과 골 이식편 대신에 골 시멘트를 충전시킨 시멘트 모델(Type V)을 구현하였

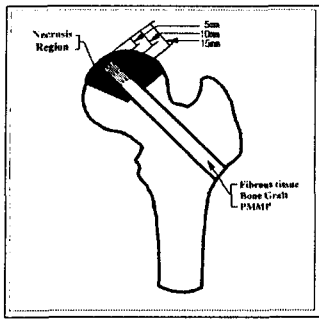


Figure 1. Schematic representation of the surgical model

다. 그리고, 각각의 수술 모델(Type III~V)에 대한 천공의 침투 깊이를 4가지로 변화시켜, 총 12개의 유한 요소 모델을 구현하였다. 3차원 유한요소모델은 최.등[2]의 CT 단층촬영을 이용하여 정상적인 한국 성인의 대퇴골의 형상을 분석한 해부학적인 자료를 토대로 하였으며, 이러한 형상자료를 범용유한요소 프로그램 ANSYS<sup>(6)</sup>5.3(Swanson Analysis System, Inc., Houston, PA., U. S. A.)를 이용하여 linear-static 해석을 하였다. 본 연구에서 구현한 모델의 도식적인 그림은 Fig. 1에서 볼 수 있다. 해석의 일관성을 갖게 하기 위해서 전 모델을 동일하게 10101개의 요소와 15852개의 절점으로 유한요소 모델을 구현하였다. 피질골, 망상골, 천공영역은 10개의 절점을 가지는 사면체 요소로, 연골하골은 6개의 절점으로 이루어진 thin shell element로 요소분할하였다.

유한요소모델의 물성치는 등방성의 선형 탄성체라 가정하였다. Table 1와 같이 망상골, 피질골과 연골하골에 대한 물성치는 Brown[3,4]의 자료에 근거하여 설정하였고, Type II~V에 설정된 피사골의 물성치는 정상골 대비 탄성계수가 72%로 감소하는 것으로 설정하였다[5]. 핵심 감압모델(Type III)의 천공 영역은 수술 이후 섬유조직으로 채워지는 것으로 가정하여 1MPa로, 골 이식 모델(Type IV)의 비골 이식편은 치밀골과 같은 물성치로 설정하였다.

2. 피사골 영역의 설정

대퇴골두 무혈성 괴사증에 있어 괴사의 위치와 형상은 임상적인 예후에 있어 중요한 변수로 작용한다. 이에 본 저자는 공간적인 위치와 형상에 근거를 둔 새로운 알고리즘으로 설정하였다. 성모 병원을 내방한 대퇴골두 무혈성 괴사증 환자 중 10명의 CT 사진

Table 1. Material properties<sup>(3,4)</sup>

		Young's modulus (MPa)	Possion's ratio, $\nu$
Cortical bone	Subchondral	2000	0.32
	Pure cortical	14000	0.32
Cancellous bone	Head	550	0.32
	Proximal	411	0.32
	Distal	345	0.32
Necrosis	Subchondral	560	0.32
	Cancellous	154	0.32
Fibular cortical bone		14000	0.32
Cement		2200	0.23

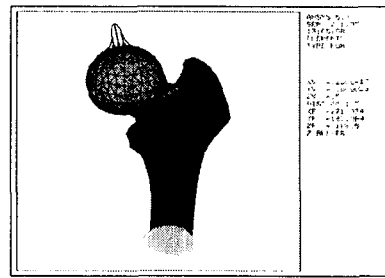


Figure 2. Finalized view of a FEM model with a mesh generation and boundary conditions

을 저자 중의 한사람인 전문 임상가의 의견을 근거로 하여 분석한 평균값으로 설정하였다. 연골하골의 미세한 함몰은 무시하였다.

3. 수술기법의 적용

천공 영역의 설정은 임상가의 의견을 근거로 하여 천공 입구부를 설정한 후, 해부학적으로 허용이 가능한 범위 내에서 외측으로 향하도록 설정하였다. 이때의 횡단면에 대한 천공 영역의 경사각도는 48°를 이루었다. 천공 영역 침투 깊이의 변화는 Fig.1과 같이 천공 영역의 축에서 대퇴 골두표면을 정점으로 하여 천공 상단부가 15mm, 10mm, 5mm와 연골하골(0mm)까지 침투하도록 설정하였다. 이 때 15mm, 10mm, 5mm와 0mm는 대퇴 골두표면과 침투된 천공 영역의 상단부 사이의 간격이 되고, 수치가 작을수록 천공 영역이 많이 침투한 경우를 나타낸다. 천공의 직경의 변화가 피사골 내에서 응력 감압에 중요한 인자로 작용되지 않는다는 문헌[6]에 근거하여 10mm로 설정하였다. 이러한 천공 영역에 골이식 모델의 경우는 골 이식편이, 시멘트 모델의 경우는 골 시멘트가 채워진다.

4. 하중조건과 구속조건

유한요소법을 이용한 해석에 있어 실제적인 생리학 하중의 설정은 정확한 모델 구현과 물성치의 입력 못지않게 중요한 요소이다. 이러한 하중을 유한요소모델에 실현하기 위한 하중 구성 요소로는 관절 반력의 방향과 크기, 하중 분포 영역과 하중 분포 형태 등이 있다. 하나의 하중 조건만을 고려한 유한요소법의 연구 결과는 보행시 하중의 변화에 따라 대퇴골두 내의 weight-bearing의 변화로 인하여 여러 수술 기법에 대한 응력 분석의 잘못된 결과를 유도할 수가 있다. 이에 본 연구에서 하중의 방향과 관절 반력의 크기는 인공 고관절 내에 원격 측정 다채널 스트레인게이지를 삽입한 *in vivo* 실험에 의해서 획득

Table 2. The direction and magnitude of the joint reaction forces

Gait	Direction		Magnitude
	Frontal force angle (F)	Transverse force angle (T)	
after heel-strike	12 °	26 °	3.3 B.W.
before toe-off	18 °	- 13 °	2.3 B.W.

\*B.W. : Body weight

한 실험값[7]을 본 모델에 적용하였다. 그리고 체중은 한국 정상 성인의 표준 몸무게로 설정하였다[8]. 하중의 영역은 문헌[9]에 근거로 설정하여, cubic cosine 분포로 가하였다.(Table 2.)

구속조건은 대퇴골의 강성체 운동을 막기 위해서 모델의 최하단부를 완전히 고정시켰다. 본 연구에서의 유한요소모델과 구속조건은 Fig. 2에서 보여준다.

5. Validation and data analysis

본 유한요소모델에 대한 검증의 절차와 결과는 이전의 연구 결과에서 이미 검증이 되었다[10].

본 연구는 수술 이전 모델(Type II)에 대한 각 수술기법(Type III ~ V)의 효과를 고찰하기 위해서 천공 영역의 침투깊이와 생리학적 하중의 변화에 따른 대퇴골두에서의 응력분포를 고찰하였다.

먼저, 각 수술 기법 모델에 대한 괴사골 내에서의 peak von Mises 응력(PVMS)을 산출하여 수술 이전 모델인 괴사 모델의 PVMS에 대해서 정규화(normalize)시켰다. 이러한 결과로 국소적인 영역에서의 failure로 인해 야기되어질 수 있는 골두 함몰의 가능성을 고찰하였다. 그리고, 골괴사가 발생한 망상골내에서 각 단계에 대한 von Mises 응력의 부피비를 수술 이전의 단계인 괴사 모델과 비교하였다. von Mises 응력의 분포에 대한 범위의 설정은 Brown등[3]의 자료에 따라서 11MPa를 괴사골에서의 항복응력으로 보고 설정하였다. 먼저, 5MPa 이하를 failure와는 관계가 없는 허용단계, 항복응력을 넘지는 않지만 계속되는 반복하중하에서 안전이 위협될 수 있는 5MPa~11MPa의 중간단계, 항복응력을 넘어서는 11MPa이상의 위험단계로 분류하여 분석하였다. 이러한 결과로 높은 범위의 응력이 낮은 범위로 이동되는 현상을 고찰하여 전체적인 괴사골 내에서의 기계적 강도를 해석함으로써 대퇴골두의 함몰 가능성을 분석하였다.

결 과

Table 3.는 각 수술 기법에 대한 괴사골 내에서의 PVMS 값을 수술 이전 모델(Type II)에 대해 정규화

Table 3. The normalized peak von Mises stress within the necrotic cancellous bone

Model type	Penetration depth (mm)	Normalized PVMS	
		after heel-strike	before toe-off
Type II	-	1.00	1.00
	15 mm	1.00	1.00
Type III	10 mm	1.00	1.00
	5 mm	1.12	0.92
	0 mm	1.19	0.92
Type IV	15 mm	1.01	1.00
	10 mm	1.00	1.00
	5 mm	0.86	1.03
	0 mm	0.72	0.43
Type V	15 mm	1.00	1.00
	10 mm	1.00	1.00
	5 mm	0.88	1.04
	0 mm	0.78	0.51

\*PVMS : Peak von Mises stress

시킨 값이다. 모든 하중 조건에서 천공 영역의 침투 깊이가 15mm와 10mm일 때는 수술적 효과를 볼 수 없는 것을 알 수가 있다. 반면에, 천공 영역의 침투 깊이가 5mm부터는 각 수술 기법에 대한 효과가 나타난다. 먼저, after heel-strike의 하중 조건에서 각 수술기법에 대한 효과는 다음과 같다. 핵심 감압술(Type III)을 시술한 경우 천공 영역의 침투 깊이가 증가할수록 PVMS가 증가하는 것을 관찰할 수가 있었다. 반면에 비골 이식술(Type IV)과 골 시멘트 충전술(Type V)은 침투 깊이가 증가함에 따라 PVMS가 감소하였다. 그러나, before toe-off의 하중 조건에서는 핵심 감압술(Type III)을 시술한 경우 천공 영역의 침투 깊이가 증가할수록 PVMS가 다소 감소하는 것을 관찰할 수가 있었고, 비골 이식술(Type IV)과 골 시멘트 충전술(Type V)은 침투 깊이가 5mm에서는 수술적 효과를 보지 못하다가 침투깊이가 0mm에서는 PVMS가 50%이상으로 감소하는 효과를 보여주었다.

Table 4는 괴사가 발생한 망상골의 부피에 대한 각 단계별 von Mises 응력의 괴사모델에 대한 상대적인 부피비를 비교하여 응력의 이동 상황을 보여준다. 이러한 결과는 수술기법의 적용 후 괴사 영역 내에서 응력의 이동 현상을 반영한다. 먼저, 핵심 감압술(Type III)을 시술한 경우 하중 조건이나 침투 깊이의 변화에 관계없이 높은 범위의 응력 부피비가 증가하는 것을 볼 수가 있었다. 한편, 비골 이식술(Type IV)과 골 시멘트 충전술(Type V)은 안전 단계에 대한 응력의 부피비는 증가하고 위험 단계에서의 응력의 부피비는 감소하는 것을 볼 수가 있었다. 그러나, 이 기법의 경우 침투 깊이가 15mm일 경우는 이러한 결과가 반대로 나와 오히려 골두의 함몰을 유도할 수 있는 결과를 보여 주었다. 그리고, 두 기법(Type IV & Type V) 사이의 양상은 아주 유사하였다.

검 토 및 토 의

대퇴골두 무혈성 괴사증의 수술적 기법에 대한 효율성을 보여주기 위해서 본 연구에서는 생체역학 연구에 있어 보편적으로 이용되는 유한요소법을 도입하였다. 생체역학분야에 있어서 유한요소법의 이점으로는 여러 가지 수술기법에 대한 시뮬레이션이 가능

Table 4. Relative volumetric percent change(%) in von-Mises stress distribution within the necrotic region due to surgery

Model Type	Penetration depth (mm)	Von-Mises stress distribution(MPa)					
		Heel-strike			Toe-off		
		0-5	5-11	11-	0-5	5-11	11-
Type III	15 mm	-0.6	0.6	+0.1	-0.4	+0.2	+0.1
	10 mm	-2.3	+2.2	+0.1	-1.3	+1.1	+0.3
	5 mm	-2.4	+1.7	+0.8	-1.0	+0.1	+0.9
	0 mm	-1.8	+1.1	+0.8	-2.0	+1.1	+0.9
Type IV	15 mm	-0.8	0.7	+0.2	-0.2	0	+0.2
	10 mm	+1.2	-1.4	+0.3	+0.6	-0.9	+0.3
	5 mm	+4.4	-3.5	-0.8	+3.3	-3.0	-0.2
	0 mm	+7.4	-5.2	-2.1	+5.2	-4.0	-1.2
Type V	15 mm	-0.5	0.4	+0.1	0	0	+0.1
	10 mm	+1.2	-1.3	+0.1	+0.4	-0.7	+0.3
	5 mm	+3.8	-2.9	-0.8	+2.7	-2.5	-0.2
	0 mm	+6.5	-4.3	-2.1	+4.8	-3.6	-1.2

하고, 역학적인 변수 설정이 용이하며, 동물실험이나 임상실험에 비해서 위험부담이 작고, 경제적인 절감 효과를 볼 수가 있다. 피사골의 항복응력의 설정은 Brown등[3]의 연구 결과에 의하면, 정상 골에서의 탄성계수와 항복응력은 0.0416의 선형회귀계수를 갖는다고 보고한다. 그리고, 피사골의 항복응력은 정상골의 항복응력의 50%라는 문헌에 근거하여[5], 본 모델에 적용하여 피사골에서의 항복응력을 11MPa로 설정하였다. 일반적인 구조역학에서의 안전계수를 1.67로 두어 허용응력을 설정하나, 본 연구는 보다 안정된 구조해석에 주안점을 주고자, 안전계수를 2.2로 설정하여 허용응력을 이보다 더 낮은 5MPa로 설정하여 분석하였다.

Table 3의 결과를 고찰하면, 천공 침투 깊이가 15mm와 10mm일 경우는 구조역학적인 관점에서 수술적인 효과를 볼 수 없다가 5mm와 0mm에서 수술적 효과를 볼 수 있다는 것을 알 수가 있다. 먼저, 핵심 감압술의 경우 침투 깊이의 증가함에 따라 피사골 내의 PVMS가 증가하는 것을 볼 수가 있다. 이는 핵심 감압술에서의 천공 영역 침투 깊이의 증가는 골두의 함몰을 부추길 수 있다는 것을 알 수가 있다. 반면에, 비골 이식술이나 시멘트 충전술의 경우는 천공 깊이의 증가가 피사골 내의 PVMS를 낮춤으로서 피사골 내의 구조적 안정성을 보장하는 것을 알 수가 있다. 특히, 천공 영역이 연골하골까지 침투한 경우에는 피사골 내에서의 PVMS가 모든 하중 조건에서 30%~57%까지 낮아지는 것을 볼 수가 있었다.

Table 4에서는 핵심 감압술을 시술한 경우 하중조건이나 천공 침투 깊이의 변화와는 상관없이 5MPa이상의 높은 응력 범위에서의 부피비가 수술 이전보다 증가하는 것을 볼 수가 있다. 즉, 이는 이 시술법을 한 후에는 골두의 함몰이 증가한다는 것을 유추할 수가 있다. 반면에 비골 이식술이나 시멘트 충전술의 경우는 5MPa이하의 안전 범위에서의 부피비는 증가하고, 5MPa이상의 위험 범위에서의 부피비는 감소함으로써 수술 이전의 높은 범위의 응력들이 수술 이후 낮은 범위로 응력이 이동됨으로서 골두의 함몰을 연장시킬 수 있다는 것이 관찰되었다.

따라서, 비골 이식술과 시멘트 충전술은 하중의 변화와는 상관없이 천공영역이 연골하골까지 침투할수록 수술의 효과가 증가한다는 것을 알 수가 있고, 핵심 감압술의 경우는 오히려 수술의 효과가 역으로 나타남을 알 수가 있다. 그리고, 천공영역이 10mm 이상을 침투하지 않을 경우는 구조역학적인 관점에서 수술의 효과가 없다는 것을 알 수가 있다.

생체역학적인 관점에서 기존의 핵심 감압술보다 골 이식술이나 시멘트 충전술이 구조적인 강도 부족을 보완해 주는데 효과적이었다. 그리고, 천공 침투 깊이는 연골하골까지 침투하는 것이 좋으나, 이는 실제 임상에서의 적용이 어려울 것으로 사료된다. 그러나, 최대한으로 천공 침투 깊이를 늘려감으로서 수술의 효과를 증가시킬 수 있다는 것을 알 수가 있었다. 또한, 시멘트 충전술이 골 이식술의 구조적인 지지효과를 충분히 수행한다고 결론 내릴 수 있다.

비골 이식술의 시술적 측면에서 수술 기법의 난이도, 비골 이식으로 인한 공여부의 합병증과 수술 후 경과 시간등을 고려한다면, 초기 대퇴골두 무혈성 피사증에 대한 시멘트 충전술의 효용성은 더 높으리라 사료된다.

참 고 문 헌

1. B.D. Mulliken, "Osteonecrosis of the femoral head-current concept and controversies", Iowa Orthop. J., vol. 13, pp.160-6, 1993
2. 최귀원, 최재봉, 강승백, 최광수, "전산화 단층 촬영을 통한 정상 한국성인의 대퇴골 형상 분석", 의용생체공학회 춘계학술대회 논문집, 18권, 2호, pp.347-8, 1996
3. T.D. Brown and A.B. Ferguson Jr., "Mechanical property distributions in the cancellous bone of the human proximal femur", Acta Orthop. Scand., vol. 51, pp.429-37, 1980
4. T.D. Brown, M.S. Vrahas, "The apparent elastic modulus of the juxtarticular subchondral bone of the femoral head", J. Orth. Res., vol.2, pp.32-8, 1984
5. T.D. Brown, M.E. Way and A.B. Ferguson Jr., "Mechanical characteristics of bone in femoral capital aseptic necrosis.", Clin. Orthop., no. 156, pp.240-7, May 1981
6. T.D. Brown., D.R. Pedersen and K.J. Baker, "Mechanical consequences of core drilling and bone grafting on Osteonecrosis of the Femoral head", J. Bone and Joint Surg., vol. 75-A, no. 9, pp.1358-67, Sep. 1993
7. G. Bergmann, F. Graichen and A. Rohlmann, "Hip joint loading during walking and running, measured in two patients", J. Biomech., vol.26, no.8, pp.969-90, 1993
8. 김철중, "산업제품의 표준치설정을 위한 국민 표준 체위조사 연구 사업", 공업진흥청, 1992
9. T.D. Brown, D.T. Shaw, "In vitro contact stress distributions in the natural human hip", J. Biomech., vol.16, no.6, pp.374-84, 1983
10. 김정성, 이성재, 김용식, 신정욱, "생리학적 하중의 변화에 따른 대퇴골두 무혈성 피사증의 수술적 기법들에 대한 생체역학적 해석", 대한정형외과연구학회 학술대회, 제3권, pp.4, 1997