

Marching cube 알고리즘을 이용한 대퇴골의 유한요소 모델링에 관한 연구

곽명근*(경희대 대학원 기계공학과), 오택열(경희대 기계산업시스템공학부),
변창환(경희대원 기계공학과), 이은택(칸티바이오), 유용석(칸티바이오),

A study on the finite element modeling of femur based marching cube algorithm

M. K. Kwak(Mech. Eng. Dept. KHU), T. Y. Oh(Mech. Eng. Dept., HKU),
C. H. Byun(Mech. Eng. Dept. KHU), E. T. Lee(CANTibio Inc.), Y. S. Yu(CANTibio Inc.)

ABSTRACT

Biomechanical behavior of the human femur is very important in various clinical situations. In this study, the data of FE models based on DICOM file exported from Computed tomography(CT). We generated FE models(voxel model, tetra model) of human femur using CT slide image. We compared them with Von Mises stress results derived from finite element analysis(FEA). Comparing the two models, we found a correlation of them. As a result, the tetra model based proposed marching cube algorithm is a valid and accurate method to predict parameters of the complex biomechanical behavior of human femur

Key Words : Marching cube algorithm, Voxel mesh, Tetra mesh, Finite element analysis(FEA), Computed tomography(CT)

1. 서론

미국에서는 250,000 명 이상의 힙골절(hip fracture)과 500,000 명 이상의 척추골절이 연간 45 세 이상인 사람들 사이에서 발생한다. 그리고 여성의 경우 33%, 남성의 경우 17%가 90 세까지 살아가면서 단 한번이라도 힙골절을 경험하게 된다.¹⁾ 따라서, 뼈(bone)에 대한 상태파악 및 안정성을 평가하는 데에 초점이 맞춰지고 있다.

일반적으로 2 차원적인 유한요소 모델은 실질적인 골의 구조를 표현하는 데 많은 어려움이 있다. 이는 골에 대한 생체역학적 특성에 대해서 완벽하게 표현해 줄 수가 없었고, 뿐만 아니라 구조적인 특성에 대해서도 한계성을 갖게 되었다. 이러한 한계성은 골에 대한 구조해석을 하는 데에 타당성을 잃게 했다.

이에 대한 대안이 바로 CT(computed tomography 컴퓨터단층촬영)의 도입인데,²⁾ 이로 인하여 골에 대한 생체역학적인 특성을 어느 정도 표현해 줄 수가 있었다. CT 는 X 선과 컴퓨터를 결합시킴으로써 체내의 모든 부분을 관찰할 수 있도록 해주는 진단 장치로써, 이를 이용하여 연속된 하나의 완전한 유

한요소 모델 생성이 용이하게 되었다. 이는 각각의 요소마다 CT number 를 골밀도와 탄성계수로 변환시켜 물성치를 정의하는 방법으로 생체역학적인 골의 구조를 표현해 줄 수 있다.

과거에는 골의 구조적 특성이나 생체역학적 특성을 표현하는 데에는 많은 시간을 소비해야만 했고 작업량도 그만큼 증대되었다. 이에 따라 근래에 들어와서는 해석결과뿐만 아니라 작업량과 시간량을 많이 고려하고 있다. 이런 대책으로 사용하게 된 게 바로 Voxel(volume element) Mesh 기법과 Tetra Mesh 기법이다.

하지만, Voxel Mesh 기법은 요소의 수와 계산량이 많아져서 고성능 컴퓨터의 하드웨어가 필요하고 요소 간에 계단모양의 경계가 발생할 뿐만 아니라, 뼈 안에 보철물(implant)을 포함한 모델 생성은 쉽지 않다는 등의 어려움이 많이 있다. 이에 반에 개선된 Marching Cube Algorithm 을 사용하는 Tetra Mesh 기법은 경계면을 연속적으로 표현하여 형상을 매끄럽게 할 뿐 아니라, 보철물을 포함하여 모델을 생성할 수 있다. 하지만, 일반적인 Marching Cube Algorithm 을 사용하였을 때는 Voxel Mesh 기법보다 오히려 요소(element)수가 많아지고 그만큼 컴퓨터

성능도 좋아야 했는데, 개선된 Marching Cube Algorithm 을 사용함에 따라 요소의 수나 Mesh 의 사이즈를 줄임으로써 Voxel model 기법보다 계산량을 줄일 수 있다.

본 연구에서는 의료영상용 표준 입출력 영상화 일인 DICOM 형태의 파일을 이용하여 3 차원 유한요소 모델을 개선된 Marching Cube Algorithm 을 이용한 Tetra Mesh 기법과 Voxel Mesh 기법으로 대퇴골의 형상을 자동 생성시킨 후 똑같은 경계조건 하에 하중을 적용시켜 유효응력(Von Mises stress)과 변형량(strain)을 구하여 개선된 marching Cube 를 이용한 Tetra Mesh 기법의 작업성과 효율성 등을 검증하고자 한다.

2. 연구 내용 및 방법

2.1 CT scan 및 모델 제작

본 연구에서는 3 차원적인 유한요소 모델을 자동적으로 생성하는 모델을 얻기 위하여 CT 데이터를 사용하였다. 이 데이터는 파라핀(paraffin)처리된 대퇴골을 Voxel Mesh 는 4mm, Tetra Mesh 는 1mm 간격으로 횡단면(transverse plane) 방향으로 연속적으로 CT 촬영하여 얻어졌으며, 대퇴골두 부분의 골절 위험성이 가장 크므로 대퇴골의 상부 1/3 의 크기만을 사용하였다. 본 연구에 사용된 CT 사진은 GE Medical Systems 사의 CT 촬영기를 사용하였으며, Voxel 은 35 장, Tetra 는 총 137 장으로 구성되었고, 해상도는 512 pixel × 512 pixel 이었다.

2.1.1 voxel mesh 방법에 의한 유한요소 모델

Voxel Mesh 를 통한 유한요소 모델의 구성은 다음과 같다. CT 사진을 Hounsfield Unit(HU)을 조절하여 Threshold detection 을 통해 대퇴골을 추출한다. Voxel Mesh 는 일반적인 경계라인을 필요로 하는 수작업과는 다르게 대퇴골의 영역을 선택하여 그 영역 내의 모든 픽셀(pixel)값을 선택하는 방법을 이용한 것이다. 이러한 픽셀(pixel)에서는 Hunsfields Unit(HU) 즉, CT number 를 포함하고 있기 때문에 이를 바탕으로 밀도와 탄성계수를 얻을 수 있다. Voxel Mesh 는 이런 픽셀(pixel) 값들로 이루어진 Voxel(volume element)로 구성되어 있으며, 이러한 Voxel 에 의하여 3 차원적 유한요소 모델을 자동 생성하게 된다. 본 연구에서는 node 수는 37,613 이고, element 수는 32,236 였으며, material set 은 2,600 개 이다. Voxel Mesh model 은 Fig. 1(a)에 나타내었다.

2.1.2 tetra mesh 방법에 의한 유한요소 모델

개선된 Marching Cube 를 이용한 Tetra Mesh 의

유한요소 모델 구성은 다음과 같다. Voxel Mesh 와 마찬가지로 CT 사진을 이용하여 대퇴골의 영역을 추출하되 해면골(trabecular bone)과 치밀골(cortical bone)을 각각 따로 추출한 다음 추출한 CT 사진들을 이용하여 삼각형의 형태로 3 차원적으로 대퇴골 윤곽만을 자동 생성시킨다. 이때 생성된 표면에 대하여 삼각형 수를 축소(decimation)하거나, 표면 다듬질(smoothing), 삼각형 각도 조절(adjust angle) 등의 작업을 수행하여 마지막으로 해면골과 치밀골의 윤곽을 합성시켜 유한요소 모델로 출력시킨다. 본 연구에서는 node 수는 7,835 이고, element 수는 34,313 개 이며, Tetra Mesh model 은 Fig. 1(b)에 나타내었다.

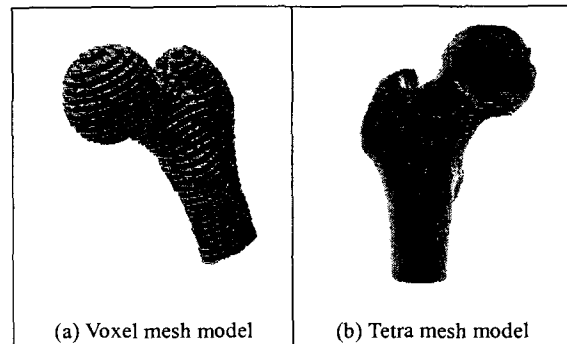


Fig. 1 Two models of the femur

2.1 Marching Cube 알고리즘

Marching Cube 기술은 1987 년 W. Lorensen 과 H. Cline 에 의해 발표된 알고리즘으로써 3 차원의 입체적인 데이터 셋으로부터 등가면(isosurface)을 추출하기 위해 접근하는 표준화(standard)된 방법이다. 이 알고리즘에서는 픽셀(pixel) 값을 이용하여 입방체(cube)를 형성하고 각각의 픽셀(pixel)의 강도(intensity)값을 이용하여 등가면(isosurface)을 추출함으로써 이미지를 형성할 수 있는 방법이다. 이 방법은 매우 실용적이고 간단한 알고리즘이며 의학 등의 여러 분야에서 많이 이용되고 있는 알고리즘이다. 그래서 최근에는 인체의 3 차원적인 의학정보를 얻는데 많이 이용되고 있다.

본 연구에서는 새로운 모델을 생성함으로써, 새롭고 강화된 분석을 할 수 있는 알고리즘인 개선된 Marching Cube Algorithm 을 사용하였다.

과거의 Marching Cube Algorithm 은 입방체(cube)를 회전(rotation) 함에 따라 부과되어 생성된 삼각형의 많은 수와 계산상 오버헤드(overhead)에서 나타나는 틈문제(hole problem)를 포함했다. 이런 방법의 입방체 형상은 장황하거나 예러가 발생하는 경향이 있다. 하지만, 개선된 Marching

Cube Algorithm 은 삼각형(triangle)보다는 오히려 다각형(polygon)에서 직접적으로 등가면 포인트(isosurface point)를 정의한다. 따라서 위의 방법은 대칭(symmetry)에 방법을 수행했을 때 나타나는 hole problem 의 문제점을 없앨 수 있다.

본 논문에서도 다각형(polygon)의 수를 줄이는 알고리즘중의 하나인 데시메이션(decimation)이라는 알고리즘을 사용하였다. 이 알고리즘은 원래의 형상의 변형 없이 삼각형의 메쉬(mesh) 수를 줄일 수 있다는 장점을 가지고 있다.

2.3 경계조건 및 유한요소 해석

두 모델에 대한 경계조건은 대퇴골의 축 가장 밑부분에는 node 점들을 세 개의 방향(x, y, z)에 대하여 구속조건을 적용하였고, 대퇴골의 머리부분에 첫째는 외다리로 서있는 경우, 둘째는 서있는 자세에서 낙상했을 때의 각각 경우에 대한 대퇴골에 작용하는 하중조건을 나타내었다. (Fig. 2)

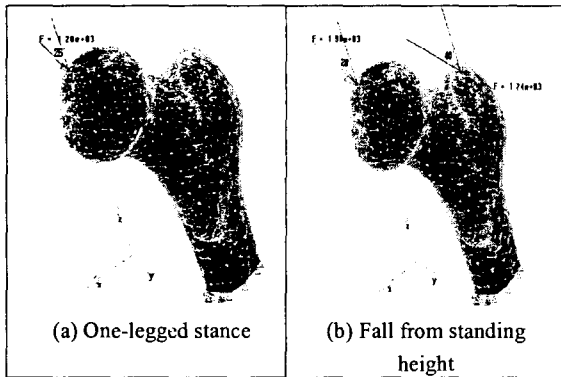


Fig. 2 The boundary condition of the femur model

Voxel Mesh 와 Tetra Mesh 기법은 다른 연구에서 나온 결과나 이용되었던 값($E=14200 \text{ MPa}$, $\nu=0.3$)들을 사용하였으며³⁾, 이렇게 구해진 값에 의하여 각각의 모델들을 생성하였다.

Voxel Mesh 와 Tetra Mesh model 들을 평가하기 위하여 각각의 모델들을 생성시킨 후 구속조건, 하중조건 등을 똑같은 경계조건 하에서 적용시킨 다음 유한요소 해석 프로그램인 MSC/NASTRAN 을 실행하여 대퇴골 목(neck)부분의 유효응력(Von Mises stress)과 변형률(strain)을 구하였다. 이처럼 위의 두 모델방법을 비교함으로써 개선된 Marching Cube Algorithm 을 이용한 Tetra Mesh method 의 효율성 및 타당성을 평가하였다.

3. 결과

3.1 Voxel model 에 의한 유한요소 해석결과

Voxel Mesh 로 생성된 유한요소모델에 대한 대퇴골 목(neck)부분의 평균 유효응력(Von Mises stress)은 하나의 물성치(one material)인 경우 낙상(fall)은 $1.357 \sim 2.781 \text{ MPa}$, 외다리(one-legged stance)는 $1.411 \sim 1.836 \text{ MPa}$ 의 범위를 갖는다.

대퇴골에 작용하는 응력은 낙상했을 시에나 외다리로 서있을 때 모두 대퇴골의 목(neck)부분에서 가장 두드러지게 나타남을 알 수 있었다. 또한 요소 사이즈 및 수를 달리하여 유한요소 분석한 결과 모두 비슷한 결과를 얻을 수 있었다.

3.2 Tetra model 에 의한 유한요소 해석결과

Tetra Mesh 로 생성된 유한요소모델에 대한 대퇴골 목(neck)부분의 평균 유효응력(Von Mises stress)은 하나의 물성치인 경우 낙상은 $2.761 \sim 3.876 \text{ MPa}$, 외다리는 $1.638 \sim 2.319 \text{ MPa}$ 의 범위를 갖는다. Tetra model 도 Voxel model 과 마찬가지로 대퇴골에 작용하는 응력은 대퇴골의 목(neck)부분에서 가장 두드러지게 나타남을 알 수 있었다. 또한 이 모델도 Voxel 모델처럼 요소 사이즈나 수를 달리하여 유한요소 해석을 한 결과 거의 비슷한 유효응력을 얻을 수 있었다.

3.3 Voxel 과 Tetra method 의 비교분석

Voxel method 와 Tetra method 의 유한요소 해석 결과를 분석하기 위해 수렴성을 평가한 결과 물성치를 하나의 똑같은 값($E=14200 \text{ MPa}$)을 포함시켰을 때, 요소 수를 근사하게 조절한 모델일수록 유효응력 값이 거의 같음을 알 수 있었다. 따라서 본 논문에서는 Voxel model 중 5×5 (element number - 32236 개)와 Tetra model 중 decimate(34313)을 선택하여 하나의 물성치를 기준으로 하여 비교 분석하였다. (단, 5×5 는 각각의 픽셀 5를 1로 조절한 것이고, decimate(34313)는 요소 수를 34313 개로 조절한 것임)

Voxel 와 Tetra method 를 해석한 결과 Fig. 3 에서 보듯이 전반적으로 비슷한 결과를 가져왔다. 세부적으로 살펴보면, 하나의 물성치로 비교하였을 때에 낙상뿐만 아니라 외다리 모두 목의 위 부분에서 아래부분으로 내려감에 따라 두 모델 모두가 거의 비슷한 증가를 가져왔다. 하지만, 약간의 차이가 있는 것은 각각의 모델을 형성하는 요소의 차이라고 볼 수 있다. 즉, Voxel model 은 동일한 크기의 육면체로 되어있는 반면, Tetra model 은 사면체로 구성되어 있을 뿐 아니라 사면체의 크기도 각기 다르고 밀집정도도 달라 Voxel model 과는 요소의 차이가 있다는 점이다.

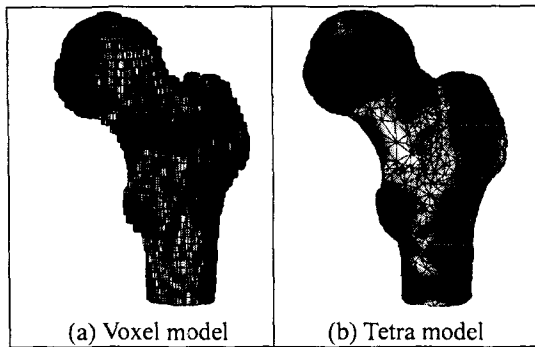


Fig. 3 Stress distribution of two models

4. 결론

두 모델에 대하여 유한요소 해석한 결과 똑같은 하나의 물성치를 포함시켰을 경우 유효응력과 변형량은 매우 정확한 일치율을 보이고 있다.(Fig. 4 - 7) Tetra method 는 3 차원의 유한요소해석에 사용된다는 점과 유한요소 모델을 수행함에 있어 작업량이나 효율성의 측면에서 볼 때 Voxel model 과 유사하지만, Voxel model 은 구조적인 특성에서 요소간에 계단모양의 경계면이 생겨 형상이 매끄럽지 못하고, 요소의 수가 많아 계산량이 많다는 단점이 있는 반면 개선된 Marching Cube Algorithm 을 이용한 Tetra 는 삼각형 Mesh 를 통해 이상적인 등가면을 구성하고 데시메이션(decimation)을 사용함으로써 요소의 수를 감소시켜 시간적 여유와 효율성이 증가될 뿐 아니라, 등가면을 생성하므로 인체의 골에 보철물을 포함한 3 차원 유한요소 모델생성이 용이하다.

위와 같은 점을 고려하여 볼 때, 개선된 Marching Cube Algorithm 을 이용한 Tetra method 의 3 차원 유한요소에 대한 해석은 Voxel method 보다도 골에 대한 생체역학적 특성뿐만 아니라 골에 구조적인 특성 즉, 형상이 매끄럽고 골에 보철물을 삽입시켜 3 차원 유한요소 해석을 할 수 있다는 점에서 의공학자에게 많은 도움이 될 수 있을 것이다.

또한 수작업을 수행한 모델보다는 모델을 형성하는 데에 걸리는 시간적인 노력을 줄일 수 있다는 결과를 가져올 것이다.

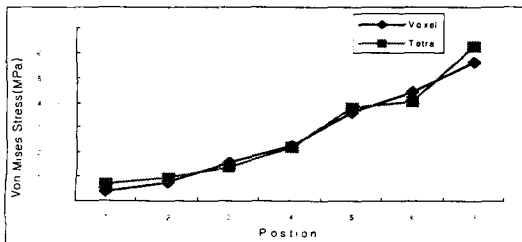


Fig. 4 The result of two models for von mises stress(fall)

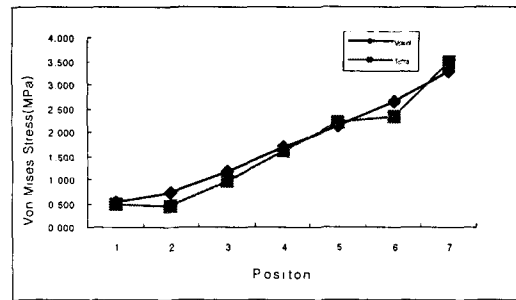


Fig. 5 The result of two models for von mises stress (one-legged stance)

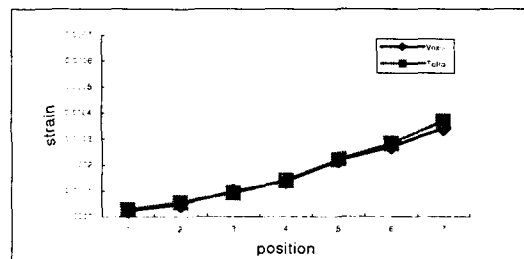


Fig. 6 The result of two models for strain(fall)

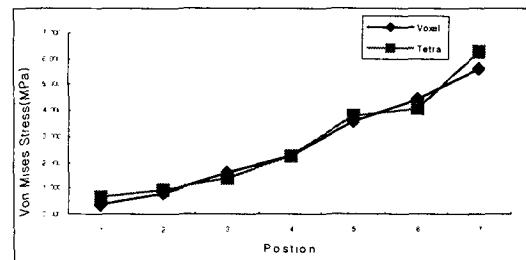


Fig. 7 The result of two models for strain (one-legged stance)

참고문헌

1. Wilson C. Hayes and Mary L. Boussein., Biomechanics of cortical and trabecular bone : implications for assessment of fracture risk,
2. Coureau, B., Hobatho, M.C., Daramana, R., Brignola, J.C., Arlaud., J.Y., "Finite element modeling of the vibrational behaviour of the human femur using CT-based individualized geometrical and material properties", J. Biomech., Vol. 31, pp. 383-386, 1998
3. Marco Viceconti, Luisella Bellingeri, Luca Cristofolini, Aldo Toni, A comparative study on different methods of automatic mesh generation of human femurs, Medical Engineering & Physics 20,