

## 이중 헥사포드 외고정 기구를 이용한 선천성 왜소증 환자의 골 교정 시뮬레이션

주상민\*(경희대 테크노공학대학), 김윤혁(경희대 테크노공학대학)

Computer Simulation of Double Osteotomy in Tibia Using Double-Hexapod External Fixator

S. M. Joo(College of Adv. Tech., KHU), Y. H. Kim(College of Adv. Tech., KHU)

### ABSTRACT

In this paper, we proposed a new method of pre-operative planning for tibial deformity correction using double hexapod external fixator in pseudoachondroplasia. The 3-D computer graphic model of deformed tibia was reconstructed from 3 mm sliced CT data, and CAD model of double hexapod external fixator was developed. The fixator was composed of 170 mm diameter of three rings and 90 mm of twelve struts. The bone deformities and the osteotomy lines for double osteotomy were measured using X-rays, and the necessary joint values to correct the given deformities were obtained by inverse kinematics analysis. The computer graphic simulation was performed to visualize the deformity correction process and evaluate the analysis result. By examining the pre-op and post-op X-rays, the simulation result was in good agreement with the clinical outcomes.

**Key Words** Pre-operative planning (수술예비계획), Deformity correction(기형교정), External fixator(외고정 기구), Computer simulation (컴퓨터 시뮬레이션)

### 1. 서론

선천성 왜소증 환자의 기형골을 교정하기 위한 방법으로 외고정 기구를 이용한 수술적 치료방법이 널리 사용되고 있다. 외고정 기구를 이용한 기형골의 교정은 복잡한 기형골을 장기간에 걸쳐 점진적으로 교정하기 때문에 정확하고 안전하게 치료할 수 있다. 그리고 신연골 형성술의 원리를 이용하면 교정으로 인하여 발생하는 골 결손 부위에 추가적인 골 이식수술이 필요없다. 현재 외고정 기구를 이용한 기형골의 교정치료는 치료 후 만족할만한 수술 결과들을 보이고 있고, 합병증도 비교적 낮게 발생하는 것으로 보고되고 있다<sup>1)</sup>.

외고정 기구를 이용한 기형골의 교정치료 시 수술의 효율을 높이기 위해서는 수술예비계획이 필요하다. 수술예비계획은 수술 전에 기형교정을 위한 외고정 기구 조작, 절골면의 위치, 골편의 각변형량 등을 계획하는 것이다. 의사는 기존 수술 자료, 다수의 방사선 사진, 수술경험 등을 바탕으로 정확한 수술예비계획을 수립한다. 그러나 의사가 2 차원의

방사선 사진을 이용하여 복잡한 3 차원 복합기형골의 수술예비계획을 정확하게 수립하는 것은 어려운 일이다.

최근 골절치료, 기형교정술을 위한 수술예비계획 수립의 어려움을 해결하기 위한 연구들이 이루어지고 있다. Kim 등은 단외고정 기구를 이용한 골절된 장골의 교정과정을 시뮬레이션을 하여 단외고정 기구의 각 조인트의 값을 예측하고, 수술결과를 3 차원 그래픽으로 가시화하였다<sup>2)</sup>. Ron 등은 CT 촬영 사진을 이용하여 수술 중 골편의 위치를 가상공간 내에서 3 차원 그래픽을 사용하여 실시간으로 가시화할 수 있는 연구를 하였다<sup>3)</sup>. Seide 등은 헥사포드 외고정 기구를 이용한 골절치료의 결과를 컴퓨터를 이용하여 예측하고, 실제 치료에도 적용하였다<sup>4,5)</sup>.

대부분의 연구가 임상적으로 발생가능한 단순골절에 초점을 두고 있다. 그러나 기형골의 교정은 장기간에 걸쳐 치료를 하기 때문에 그 결과를 확인하기까지는 오랜 시간이 걸린다. 또한 점진적인 교정 과정 중 기구구조의 변화는 교정결과에 영향을 주기 때문에 정확한 예측이 필요하다. 기형골의 교

정치료에는 교정을 위한 기구구조의 변화, 수술과정, 수술결과 등을 예측할 수 있는 수술예비계획 수립방법이 필요하다.

본 연구에서는 CT 데이터를 이용하여 선천성 왜소증 환자의 우측 경골에 대한 3 차원 CAD 모델과 이중 헥사포드 외고정 기구의 CAD 모델을 개발하고, 기형 경골 교정술에 대한 컴퓨터 그래픽 시뮬레이션을 수행하여, 복잡한 기형 교정술의 결과를 예측할 수 있는 컴퓨터 이용 수술예비계획 수립방법을 제안하고자 한다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1 기형 경골 및 이중 헥사포드 외고정 기구의 3 차원 CAD 모델 개발

본 연구에서는 왜소증 환자의 우측 경골에 대하여 3 mm 간격으로 촬영한 CT 데이터를 이용하여 CAD 모델을 개발하였다. 그리고 직경이 170 mm 인 세 개의 링과 12 개의 90 mm 지지대들로 구성된 이중 헥사포드 외고정 기구를 상용 CAD 소프트웨어인 SolidWorks® (Solidworks Inc., USA)을 이용하여 3-D CAD 모델로 개발하였다(Fig 1).

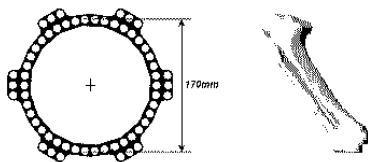


Fig 1. 3-D CAD models of a double hexapod external fixator system and a tibia in pseudoachondroplasia

개발된 경골 모델과 이중 헥사포드 외고정 기구모델을 이용하여 골절면의 위치, 링의 위치 등을 결정하였다. 골편의 고정을 위하여 첫 번째 링은 무릎중심에서 원위부로 약 12 mm, 두 번째 링은 약 85 mm, 세 번째 링은 약 150 mm 에 고정시켰다. 두 번째 골편에 고정된 링은 수평면에 25° 외측으로 기울인 채로 고정시켰다(Fig 2).

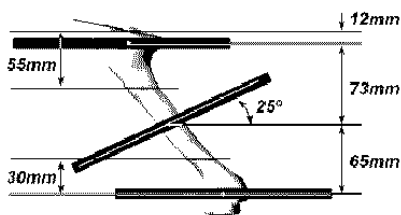


Fig 2. Bone cutting lines of tibia for the double osteotomy

### 2.2 기형 경골의 교정을 위한 기구해석 및 시뮬레이션

이중 헥사포드 외고정 장치의 12 개의 지지대를 L1 ~ L12 로 정의하였다(Fig 3(a)). 기형 경골의 교정을 위한 변형량은 Fig 3 의 (b), (c) 와 같이 정의하였다. Fig 3(b) 에서  $\theta_1$  는  $O_1$  을 중심으로 두 번째 골편을 외측으로 회전시키는 변형량이다. 그리고  $\theta_2$  는  $O_2$  을 중심으로 두 번째 골편을 외측으로 회전시키는 변형량이다. Fig 3(c) 에서  $\theta_3$ ,  $\theta_4$  는 각각  $O_3$ ,  $O_4$  를 중심으로 각 골편을 회전시킨 변형량이다. 이 때, 기형 경골의 교정을 위하여 헥사포드 외고정 기구의 역기구해석 프로그램을 개발하였다<sup>6)</sup>. 개발한 프로그램을 이용하여 헥사포드 외고정 기구의 각 지지대의 길이를 계산하였다.

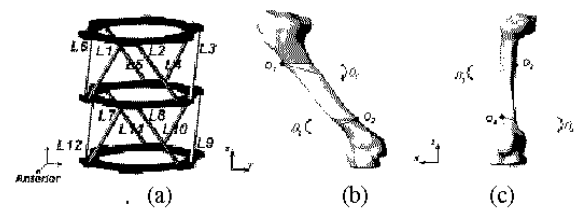


Fig 3. The positions of 12 struts and the centers of rotation for deformity correction

교정과정을 컴퓨터 그래픽 시뮬레이션하기 위하여 동역학 해석 소프트웨어인 RecurDyn™ (FunctionBay, Inc., Korea) 을 사용하였다. 우선, 이중 헥사포드 외고정 장치와 경골에 대한 CAD 모델을 결합시키고, 역기구학 해석에서 계산된 각 지지대의 길이를 개발된 모델에 입력하여 교정과정을 가시화하였고 교정과정 중 링 간의 충돌, 골편 간의 충돌 여부를 살펴보았다.

## 3. 결과

### 3.1 이중 헥사포드 외고정장치 지지대의 길이 변화량

본 연구에서는 기형 경골 모델을 교정하기 위하여 전면방향에서는 두 번째 골편의 변형량  $\theta_1$  을 48.9° 외측방향으로, 세 번째 골편의 변형량  $\theta_2$  를 38.9° 내측방향으로 회전하였다. 측면방향에서는 두 번째 골편의 변형량  $\theta_3$  을 12.4° 후면 방향으로, 세 번째 골편의 변형량  $\theta_4$  를 9.0° 전면 방향으로 회전하였다. 이와 같이 경골 절편을 교정하기 위한 이중 헥사포드 외고정 장치의 각 지지대의 길이는 Table 1 과 같은 결과를 보였다.

Proximal Struts (mm)						
Struts	L1	L2	L3	L4	L5	L6
Inc/Dec	-1.7	+37.9	+75.9	+64.0	-16.3	+39.2
Distal Struts (mm)						
Struts	L7	L8	L9	L10	L11	L12
Inc/Dec	+41.1	-17.3	-38.3	+16.5	+26.7	+55.4

(+) : increase strut length, (-) : decrease strut length)

Table 1. Changes of strut lengths for tibial deformity correction

### 3.2 기형 경골의 교정 결과

3 차원 CAD 경골 모델과 이중 헥사포드 외고정 기구를 이용한 시뮬레이션 결과를 가시화하였다. Fig 4 에서와 같이 가시화된 교정 과정은 이중 헥사포드 외고정 기구의 링간의 충돌과 기형 경골의 세 개의 절골면 간의 충돌이 보였다.



Fig 4. The graphic simulation of sequential adjustment for the deformity correction process

기형골의 교정 후 결과평가를 위하여 건강한 사람의 경골, 임상적 치료결과, 시뮬레이션 결과를 비교하였다(Table 2). 또한 교정 후 임상적 방사선 사진과 가시화된 기형경골 교정결과를 Fig 5 과 같이 비교를 하였다.

	Health Tibia	X-rays		Simulation	
		Pre-op	Post-op	Pre-op	Post-op
Frontal Plane	mMPTA 85.0~90.0°	43.0°	82.0°	48.0°	82.0°
	mLDTA 86.0~92.0°	56.5°	76.0°	57.5°	77.0°
Sagittal Plane	aPPTA 77.0~84.0°	89.0°	86.5°	90.0°	86.0°
	aADTA 78.0~82.0°	86.5°	83.0°	87.0°	86.0°

(mMPTA : the mechanical medial proximal tibia angle, mLDTA : the mechanical lateral distal tibia angle, aPPTA : the anatomic posterior proximal tibia angle, aADTA : the anatomic anterior distal tibia angle)

Table 2. Tibial joint orientation angles of the pre-op and the post-op

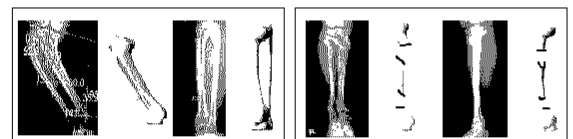


Fig 5. Comparison of the clinical X-rays and the simulation before and after the deformity correction in frontal and sagittal plane

## 4. 고찰 및 결론

골은 입체적 물체이기 때문에 2 차원 방사선 사진으로 기형골의 형상을 정확히 파악하기 힘들다. 또한 외고정 기구를 이용한 기형교정은 기구와 골편의 조합에 어려움이 있다. 이와 같은 이유로 수술예비계획에 대한 임상적 중요성이 부각되고 있다. 현재의 수술예비계획은 절골면의 상대적 위치를 파악하기 위하여 전면 방향 사진과 측면 방향 사진을 이용하고 있다. 2 차원의 방사선 사진을 이용하여 기형골의 수술예비계획을 세우는 것은 쉽지 않은 문제이다. 이 문제의 해결방법으로 컴퓨터를 이용한 수술예비계획이 점차 중요하게 다루어지고 있다. 컴퓨터를 이용한 수술예비계획은 3 차원 컴퓨터 그래픽을 이용하여 수술과정을 의사에게 보여줌으로써 수술과정 및 결과를 확인 시켜줄 수 있다.

본 연구에서는 이중 헥사포드 외고정 기구의 기구해석 프로그램과 3 차원 그래픽 시뮬레이션 기술을 이용하여 기형 교정을 위한 각 지지대의 길이 변화량을 계산할 수 있었다. 계산된 길이 변화량은 장기간의 교정치료가 필요한 환자의 치료 스케줄을 계획하는데 쓰일 수 있다. 또한 예측된 값들은 교정에 쓰이는 헥사포드 외고정 기구의 정확한 기구구조를 결정 하는데 쓰일 수 있다.

인체 내에 있는 골편은 각변형, 회전변형 등을 주었을 때 골편간 충돌이 발생할 수 있다. 이 문제점을 해결하기 위하여 충돌을 예방할 수 있도록 골연장을 시킨 후 변형을 교정하고 다시 단축을 시키는 방법이 있다. 그러나 충돌을 피할 수 있는 각변형 중심을 찾고 교정과정을 3 차원 그래픽으로 가시화하여 교정 과정 중 골편 간의 충돌을 확인할 수 있다면 골연장 후 다시 단축을 시키는 과정을 거치는 번거로움을 피할 수 있다. 이번 연구에서는 교정 과정을 가시화하여 교정 과정 중 골편간의 충돌이 일어나지 않는 것을 확인할 수 있었고, 링과 링간의 충돌도 일어나지 않는 것을 확인할 수 있었다. 최종적으로 교정 후 경골형태를 3 차원 그래픽으로 가시화함으로써 수술예비계획의 교정 결과를 예측할 수 있었다. 이와 같이 교정과정을 3 차원 그래픽으로 가시화하는 방법은 의사가 육안으로 수술예비계획을 검증하는 방법으로 쓰일 수 있다.

본 연구의 연구대상은 절골술이 필요한 기형 경골이다. 절골술을 이용한 기형교정의 경우 절골면이 비교적 평면이기 때문에 시뮬레이션 결과를 분쇄골절에 비해 실제 수술에 적용하기 용이하다. 그러나 실제 임상에 직접 적용하기

위해서는 임상 실험과 추후 연구가 필요하다. 연구에 쓰인 기형교정을 위한 이중 헥사포드 외고정 기구는 세 개의 링과 12 개의 지지대로 구성되어 있기 때문에 기구의 무게와 외형이 환자에게 불편함을 줄 수 있다. 이 문제는 기구의 경량화, 기구 설계 변경을 통하여 해결할 수 있다. 그리고 절골면의 위치는 골의 생리적인 문제를 고려하지 않았기 때문에 실제 임상에서는 골의 불유합, 근육 손상 등의 문제가 발생할 수 있다. 생리적인 문제를 임상실험을 하여 해결방법을 찾아야 한다. 그러나 본 연구의 목적은 기형골의 교정을 위한 헥사포드 외고정 기구의 지지대 길이를 계산하고 그 결과를 그래픽 시뮬레이션으로 확인하는데 있으므로 향후 실제 임상 실험을 통하여 잠재적 문제들을 해결할 수 있을 것이라 생각한다.

본 연구에서는 컴퓨터를 이용한 기형골 교정의 수술예비계획을 위한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 수술 결과에 영향을 미칠 수 있는 요소를 결정하고, 시뮬레이션 과정을 통하여 여러 결과를 예측할 수 있었다. 추후 연구는 임상실험을 통하여 수술결과에 영향을 줄 수 있는 요소를 결정하고, 이를 바탕으로 실제 임상에 쓰일 수 있는 컴퓨터를 이용한 수술예비계획 시스템을 개발하는 것이다. 이와 같은 연구는 자동화된 헥사포드 외고정 기구에 적용하여 수술과정에서 발생하는 기구조작의 어려움도 해결할 수 있을 것이다. 또한, 외고정 기구의 성능 분석 및 개발, 골절치료의 교육용 프로그램으로 활용될 수 있을 것이다.

## 후기

본 연구는 과학기술부 한국과학재단 지정 연세대학교 의용계측 및 재활공학 연구센터의 지원에 의한 것입니다. 저자들은 본 연구에 필요한 자료를 제공하여 주신 고려의대 정형외과 송해룡 선생님께 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. Kim Y.M., Chung M.S, Seong S.C., "Fracture", 1<sup>st</sup> ed, Seoul, Kunga Publishing Co, pp 1-126.
2. Kim Y.H., Inoue N., Chao E.Y.S., "Kinematic Simulation of Fracture Reduction and Bone Deformity Correction under Unilateral External Fixation", Journal of Biomechanics, 35, pp. 1047-1058, 2002.
3. Ron B.A., Leo J., Charles M., Ariel S., "Computer-Based Periaxial Rotation Measurement for Aligning

- Fractured Femur Fragments from CT : A Feasibility Study", Computer Aided Surgery, 7, pp. 332-341, 2002.
4. Seide K., Wolter D., Kortmann H.R., "Fracture Reduction and Deformity Correction With the Hexapod Ilizarov Fixator", CORR, 1(363), pp. 186-195, 1999.
5. Stuart G., "Taylor Spatial Frame Disorients Ilizarovians", The Limb Lengthening and Reconstruction Society, 15, 1, 1997.
6. Ping J., Hongtao W., "A Closed-Form Forward Kinematics Solution for the 6-6P Stewart Platform", IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 17, pp. 522-526, 2001.