

족관절 근위부 골교정용 기능성 체외고정장치 개발

전경진* (한국생산기술연구원), 이호중 (한국기술교육대 대학원 메카트로닉스공학과)

Development of a Functional External Fixator System for Bone Deformity near Joints in Legs

K. J. Chun(System Eng. Dept., KITECH), H. J. Lee(Mechatronics Eng. Dept., KUT)

ABSTRACT

The functional external fixator system for bone deformity near joints in legs using the worm gear was developed for curing the difference angles in fracture bone and the lengthening bar for curing the difference length in fracture bone. Both experiments and FE analysis were performed to compare the elastic stiffness in several loading modes and to improve the functional external fixator system for bone deformity near joints in legs. The FE model using the compressive and bending FE analysis was applied the FE analysis due to the angle differences. The results show that the compressive stiffness value in experiment was 175.43N/mm, the bending stiffness value in experiment was 259.74N/mm, compressive stiffness value in FEM was 188.67N/mm, bending stiffness value in FEA was 285.71N/mm. The errors between experiments and FEA were less than 10%. The maximum stress (157MPa) to the angle of clamp was lower than the yield stress (176.4MPa) of SUS316L. The stiffnesses in both axial compressive and bending of the new fixator are about 2 times higher than other products except EBI (2003).

Key Words : Functional (기능성), Maximum stress (최대 응력), Compressive stiffness (압축 강성도), Bending stiffness (굽힘강성도), Finite element analysis (유한요소해석), Angle (각도), Worm gear (웜기어)

1. 서론

골절의 치유에 있어 골절 유합과 역동화(Dynamization)의 상관관계에 대해 살펴보면, 골절 부위의 해부학적인 정복 후 견고한 내고정으로 일어나는 일차적 유합¹과 고정된 상태에서 미세운동을 가능하게 하여 가골 형성이 이루어지는 이차적 유합이 있다. 이러한 유합 현상 중에서 일차적 유합에서의 견고한 내고정의 중요성으로 인하여 체외 고정 장치(External fixator system)의 축성 압축 강도는 골절 부위에 가해지는 부하 및 운동 정도에 크게 영향을 미치고 있다고 여러 저자들이 제기하고 있다^{2,3,4,5}. 이런 이유로 축성 압축 및 굽힘 강성도(Stiffness)를 증대시킨 제품과 상용화한 제품을 비교한 자료가 보고되고 있다³.

또한 외고정 장치를 이용한 시술에서 외고정 기구 부품의 균열이 발생하여 부품교체에 따른 문제점이 발생한 것으로 보고되고 있으며, 복잡한 상황의 골절 형태에서도 서로 연결 가능하도록 고정구의 높이 및 봉의 길이 조절기능에 대한 개선이 요

구되었다⁶.

이에 본 연구에서는 상용화된 체외고정 장치에서의 기능적 문제점을 보완, 추가하여 기계적 강성도가 높고 골절의 위치와 골절 형태의 제약 없이 치유하는데 사용이 가능한 제품을 개발하였다.

2. 제작

개발된 기능성 체외고정 장치(Functional external fixator system)는 아래 Fig. 1와 같으며 다목적 고정봉(Lengthening Bar), 웜기어 자유형 고정구, 자유형 고정구의 3 부분으로 구성되어 있다.

자유형 고정구는 Fig. 1의 우측 원안에 위치한 부분으로써 3핀 고정대 몸체부, 고정구 몸체 그리고 고정구 몸체와 회전 및 변위가 없는 완전결합을 유도하기 위하여 미세한 홈을 적용한 몸체부(세레이션(Serration) 몸체부)로 구성되어 있다.

다목적 고정봉은 외측봉과 내측봉으로 구성되어 있으며 길이조절 볼트를 사용하여 최대 40mm까지 신연(Lengthening)이 가능하다.

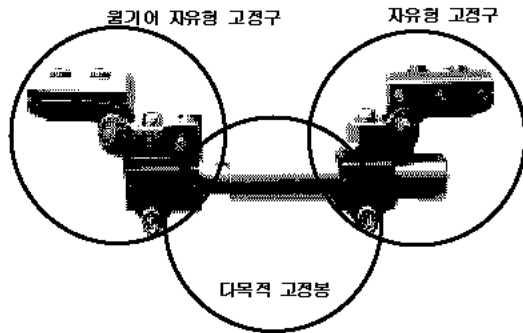


Fig. 1 Functional External Fixator System

웬기어(Worm gear) 자유형 고정구는 3 편 고정대 몸체부, 회전몸체부, 고정구 몸체부로 구성되어 있다. 3 편 고정대 몸체부는 핀스크류(Pin screw)를 고정해 주는 3 편 고정대 몸체와 3 편 덮개, 이를 잡아주는 커버볼트로 구성되어 있으며, Y 축 회전할 수 있다. 회전 몸체부는 3 편 고정대 몸체와 고정구 몸체를 연결해 주는 부분이며, Z 축 회전이 가능한 부분이며 $\pm 40^\circ$ 범위에서 변화시킬 수 있다. 고정구 몸체부는 다목적 고정봉과 체결할 수 있는 구조를 가지고 있으며, X 축 회전이 가능하다.

환자의 시술 후 기구 착용에서 오는 불편함을 감소시키기 위하여 제품의 경량화가 필요하며, 이를 위하여 고정구와 고정구 몸체부들은 Al2024-T4 재질을 사용하였고, 인체에 삽입되는 핀스크류는 SUS316L, 다목적 고정봉 등 그 밖의 부분은 SUS316 을 사용하였다.

3. 실험 및 실험결과

3.1 실험조건

ASTM F1541-01 A7 실험규정을 적용하여 실험을 수행하였다. 실험조건은 ASTM Table A7.1 을 적용하였다. 축성 압축 강성도 실험은 아크릴봉에 장착되어 있는 체외고정장치를 지그에 고정하여 만능시험기에 장착한 후, 웬기어 자유형 고정구 부분의 아크릴 봉에 0N~250N 의 축성 압축력을 가하였고, 자유형 고정구 부분의 아크릴 봉은 완전고정을 하였다. 같은 방법으로 굽힘 실험은 웬기어 자유형 고정구와 자유형 고정구 부분의 아크릴 봉의 중심부에서 0N~250N 의 굽힘 압축력을 가하였다. 이때 플러 지지부는 웬기어 자유형 고정구 부분의 핀스크류 사이, 자유형 고정구 부분의 핀스크류 사이의 중심점에 두었다.

3.2 실험결과

만능시험기를 통한 실험 결과는 Fig. 2 과 Fig. 3

에서 점으로 나타내었다. 선형유한요소해석(Linear finite element analysis) 결과와 비교하기 위하여 실험 데이터를 MATLAB(Mathwork Inc., V 6.5)의 최소자승법에 의한 곡선의 근사법(Least square curve fitting)을 사용하여 1 차 선형화 하였으며, Fig. 2 과 Fig. 3 에서 실선으로 나타내었다.

힘-변위 그래프의 축성 압축 강성도가 175.43 N/mm 값을 나타내었고, 259.74 N/mm 의 굽힘 강성도 값을 보였다.

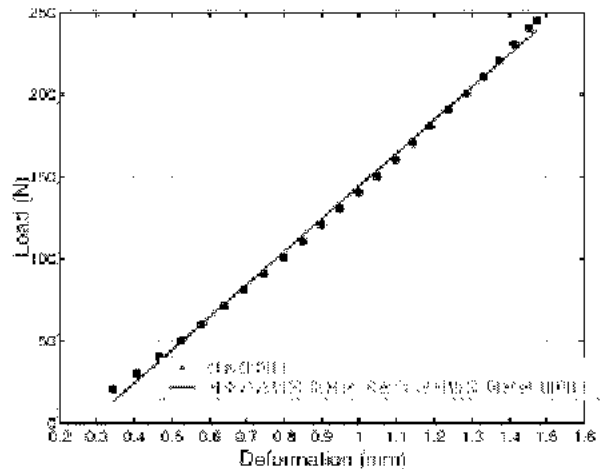


Fig. 2 Compression Experiment Result

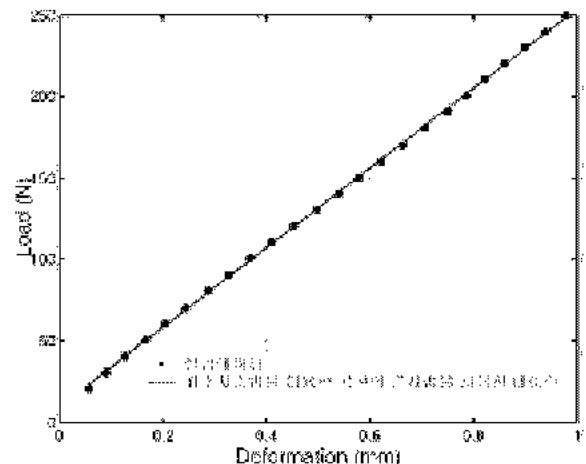


Fig. 3 Bending Experiment Result

4. 유한요소해석 및 결과

4.1 해석방법

형상의 곡면정보를 IGES 파일로 변환하여 유한요소모델(Finite element model)을 전-후처리 프로그램인 HyperMesh(Altair Engineering, Ver. 5)를 이용하여 요소분할 작업을 하였다. CTETRA 를 제외한 28680

개 CHEXA, 970 개 CPENTA 형의 솔리드(Solid) 요소가 사용되었으며, 총 요소 수는 29650 개이며, 총 절점 수는 36425 개이다.

축성 압축, 굽힘 및 각도에 따른 해석에서 웹기어 자유형 고정구 부분의 아크릴 봉에 선형해석에 따른 선형결과가 예상되므로 임의의 200N의 압력을 가했다. 축성 압축 해석에서는 Y, Z 축을 고정시켜, X 축 변위만 가능하게 하였다. 아크릴 하단부의 아크릴 봉에서는 단면 중간부분에 X, Y, Z 축을 고정하였다. 굽힘 해석은 아크릴 안쪽에 총 4 개의 요소에 압력을 주고, 지지부는 Y, Z 축을 고정이고, X 축은 자유상태로 두었다.

각도(Angle)에 따른 해석은 개발된 기능성 체외 고정장치의 주요 목적 중 하나인 골절의 위치 및 골절 형태의 제약없이 골절을 치유하는데 있어 각도(Angle)에 따른 각 부품별 균열이 발생할 가능성을 실험으로 파악하여야 하지만 ASTM 에 따른 실험규격이 없으므로 축성 압축 및 굽힘 실험에서 예측 오차범위 이내에 있는 Mesh Model 을 이용하여 각도에 따른 해석을 수행하였다. 해석방법은 200N의 힘을 회전물체와 연결되어 있는 아크릴에 수직 방향으로 주었으며 지지부는 X, Y, Z 및 모멘트 고정을 하였다. 복잡한 구조, 웹과 웹기어 사이의 공차, 실험상의 오차 그리고 합성수지제품인 아크릴 탄성계수의 부정확 등의 오차 인자들로 인하여 해석결과를 통한 예측 오차범위를 10% 이하로 하였다.

4.2 압축-굽힘 해석결과

상용 선형 해석 프로그램인 MSC/NASTRAN for Windows 4.0(MSC, Ver. 4)을 이용하였다. 해석결과 값은 아래 Table. 2 와 같다.

Table. 1 Comparing Stiffness Results

구분		결과치	오차
압축	실험결과	175.43N/mm	7.06%
	해석결과	188.67 N/mm	
굽힘	실험결과	259.74 N/mm	9.09%
	해석결과	285.71 N/mm	

축성 압축 및 굽힘 해석 결과를 통하여 해석 결과의 오차가 위의 4.2 의 해석조건에서 제시한 예측 오차범위(10%) 이내에 있고, 최대 응력 결과값이 최대응력부인 핀스크류 부분에서 물성치인 SUS316L 의 허용응력(Yield stress)값인 205.8MPa 보다 낮게 나왔으므로 각도에 따른 해석을 수행하였

다.

4.3 각도에 따른 해석결과

축성 압축 및 굽힘 해석에서 응력이 집중이 되는 부분이 각도에 따른 해석 결과에서도 응력 집중 현상이 발생한다고 가정하고, 각도에 따른 해석 결과를 비교하기 위한 3 부분의 응력 집중부를 선택하였다. View_Point_A 는 다목적 고정봉 중 내측봉의 집중 응력 변화부, View_Point_B 는 축성 압축 및 굽힘 해석에서 응력의 집중현상을 보이는 세레이션 몸체부, View_Point_C 는 최대 응력 집중 현상을 나타내고, 각도에 따라 응력값이 클 것으로 예상되는 내측 핀스크류 부를 선택하였다.

해석모델에서 웹기어를 이용하여 각도 θ 를 5°, 10°, 15°로 고정된 후 해석을 수행하였다.

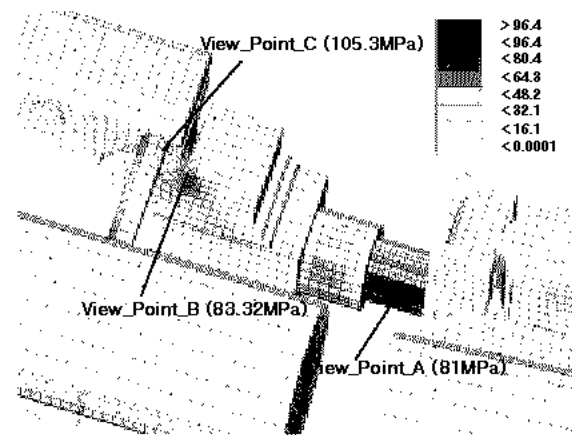


Fig. 4 Analysis Result ($\theta = 5$ degree)

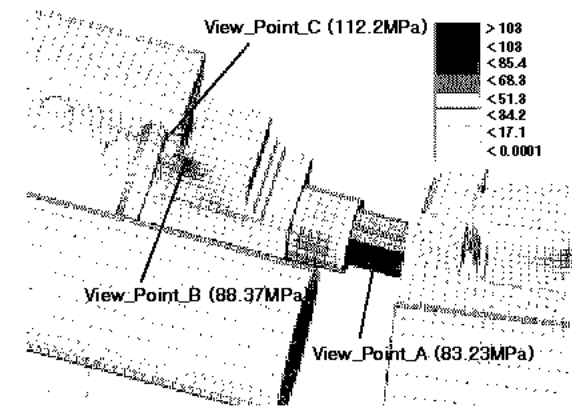


Fig. 5 Analysis Result ($\theta = 10$ degree)

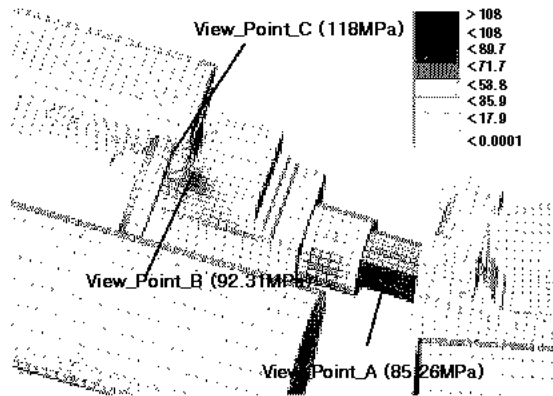


Fig. 6 Analysis Result ($\Theta = 15$ degree)

위의 Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6와 같은 각도에 따른 해석 결과를 통하여 각도가 증가함에 따라 각 부품에서 집중된 응력이 증가하고 있음을 확인 할 수 있으며, 최대응력은 축성 압축해석에서의 같은 부분인 자유형 고정구의 3 핀 고정대 몸체와 3 핀 덮개로 고정된 내측 핀스크류 부분에서 나타나고 있다. 선택한 응력 집중부에서의 응력 결과는 Table. 2 와 같다.

Table. 2 Angle Results

	단위: MPa		
	5°	10°	15°
View_Point_A	81	83.23	85.26
View_Point_B	83.32	88.37	92.31
View_Point_C	105.3	112.2	118
Maxium Stress	113	120	126

5. 결론

본 실험에 사용된 체외고정 장치(BK)의 축성 압축 강성도는 EBI(2003) 대비 71.2%, 굽힘 강성도는 94.1%의 결과를 얻었지만, 이전 제품과의 비교에서는 2 배 이상의 높은 축성 압축 및 굽힘 강성도를 확인하였다⁷.

각도에 따른 해석 결과에서 각도가 증가함에 따라 일정하중에서 체외고정장치에 작용하는 응력은 증가를 하고 있었으며, 각 부품의 최대응력증가율은 1.3 MPa/° 였다. 체외고정장치에 200N 의 외력상에서 40° 로 사용할 때 최대응력은 157 MPa 로써 본 실험에 사용된 제품 재질의 항복강도 (SUS316L=176.4MPa, SUS316=205.8MPa)보다 응력값이 낮으므로 각 부품별 균열이 없을 것으로 판단할 수 있다. 또한 개발된 기능성 체외고정장치는 일반적인 신연(Lengthening) 기능뿐만 아니라 기능성이

부과된 월기어의 특성을 이용한 각도의 미세조절을 통하여 치유기간(clinical period) 동안 환자의 골유합에 맞게 시행하여 정확한 정복(Reduction)을 유도할 수 있으며 수술 시 정밀교정 및 수술의 편의성이 증대될 것으로 사료된다.

후기

본 연구는 2003 년도 한국생산기술연구원 생산기술연구과제의 벤처혁신과제에 의해 수행되었으며, 연구수행에 도움을 주신 BK Meditech(주) 관계자 여러분들께 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Perren, S. M., "Physical and biological aspects of fracture healing with special reference to internal fixation," Clin Orthop, Vol. 138, pp. 175-196, 1979.
2. 오종건, 박정호, "Rancho 방법을 이용한 Ilizarov 외고정 장치의 축성 강도," 대한정형외과학회지, Vol. 33, no. 7, pp. 1928-1932, 1998.
3. Kempson, G. E. and Campbell, D. ., "The comparative stiffness of external fixation frames," Injury, Vol. 12-4, pp. 297-304, 1981.
4. Kristiansen, T., Fleming, B., Reinecke, S. and Pope, M. H., "Comparative study of fracture gap motion in external fixation," Clinical Biomechanics, Vol. 2-4, pp. 191- 195, 1987.
5. Paley, D., Flemming, B., Catagni, M., Kristiansen, T. and Pope, M., "Mechanical evaluation of external fixators used limb lengthening," clin Orthop. Vol. 250, pp. 50-57, 1990.
6. 김휘택, 이상현, "국산 외고정 장치(Dyna-Extor) 의 임상적 응용," 대한정형외과학회지, Vol. 35, pp. 845-849, 2000.
7. Koo, T. K. K., Kim, Y. H., Choi, D. B., Jua, K. G., Lim, J., Inoue, N., Chao, E. Y. S., "Stiffness Analysis of Dynafix External Fixator System," 2003 Summer Bioengineering Conference, pp. 1227~1228, 2003.