

'12 춘계학술대회 우수 논문

메카노 규제 이론에 기초한 복합재료 IM-rod가 적용된 골절부의
세포분화과정의 유한요소해석

손대성*, Hassan Mehboob*, 장승환**

Finite element analysis of tissue differentiation process in fractured bones applied
by a composite IM-rod based on a mechano-regulation theory

Dae-Sung Son*, Hassan Mehboob*, Seung-Hwan Chang**

ABSTRACT

This paper describes the bone healing process of fractured long bones such as a tibia applied by composite IM rods using finite element analysis. To simulated tissue differentiation process mechano-regulation theory with a deviatoric strain was implemented and a user's subroutine programmed by a Python code for an iterative calculation was used. To broadly find the appropriate rod modulus for healing bone fractures, composite IM rods were analyzed considering the stacking sequence. To compare mechanical stimulation at fracture gap, two kinds of initial loading conditions were applied. As a result, it was found that the initial loading condition was the most sensitive factor for the healing performance. In case a composite IM rod made of a plain weave carbon fiber/epoxy (WSN3k) had a stacking sequence of $[\pm 45]_{nT}$, the healing efficiency was the most effective under a initial load of 10%BW.

초 록

본 논문에서는 복합재료 IM rod가 적용된 골절부의 세포 분화과정을 모사하기 위해 유한요소해석을 실시하였다. 세포의 골화 과정을 해석하기 위해 편향 변형률을 이용한 메카노 규제 이론을 사용하였으며, 반복 계산을 위해 Python 코드를 이용하여 서브루틴을 구현하였다. 치료에 가장 적절한 복합재료 IM rod의 강성을 찾기 위해 직물 탄소섬유/에폭시 복합재료 (WSN3k)의 적층 각도를 바꾸어 해석을 실시하였다. 골절부에 가해지는 기계적 자극에 따른 치료효율을 비교하기 위해 두 가지 초기 하중 조건을 적용하였다. 그 결과 치료효율은 강성의 차이보다 하중에 의해 큰 영향을 받았으며, 초기 하중이 몸무게의 10%이고, 적층순서가 $[\pm 45]_{nT}$ 일 때 치료효율이 가장 높았다.

Key Words : 최소침습적 시술법(minimal invasive percutaneous plate osteosynthesis; MIPPO), 복합재료(composite materials), 골내 정(intramedullary rod; IM rod), 메카노 규제(mechano-regulation)

1. 서 론

최소 침습적 시술을 위한 MIPPO(minimal invasive percutaneous plate osteosynthesis)는 환부를 최소한의 영역만 절개하여 시술하기 때문에 연부조직 손상을 최소화하며, 골절부의 원활

한 혈액공급과 환자의 고통을 줄여주는 장점을 가지고 있어 결과적으로 조속한 골유합을 얻을 수 있는 방법으로 주목을 받고 있다[1-2]. 이러한 골절 치료에 사용되고 있는 고정기구로는 고정판(Bone plate)과 IM-rod (Intramedullary rod)가 있으며, 고정판에 대한 연구는 이미 많은 연구자에 의해 연구가 진행

2012년 춘계학술대회 우수논문(무심사)

* 중앙대학교 기계공학부 대학원

** 중앙대학교 기계공학부, Corresponding author(E-mail:phigs4@cau.ac.kr)

되고 있다[3-5]. 장골이 골절되었을 때 정복(Reduction)을 유지하고 골유합을 보조하는 방법 중 하나로서 골수강 내에 IM-rod를 삽입하는 방법이 있으며, IM-rod를 이용한 치료는 특히 경골 간부 골절에서 높은 골유합률을 가짐과 동시에 감염이나 부정유합 등의 합병증이 적은 것으로 알려져 있다[6]. 여러 선행 연구자들의 연구결과에 따르면 골절부 내 치료세포 분화와 같은 생체역학적 거동은 골절부에 가해지는 외부 자극에 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다[7-8]. Isaksson 등[8]은 선행연구자들이 수행했던 골절치료해석 모델에 각 메카노 규제 이론에 대한 결과를 각 단일 변수들만 적용되었을 때의 결과와 비교 분석하였다. 연구결과에 따르면 편향 변형률이 적용된 연구결과에서 비교적 정확하게 골절 치유과정을 예측하였다. Kim 등[9]은 위에서 언급한 단일 변수 중 편향 변형률에 대한 메카노 규제 이론이 적용된 골절 치료세포의 분화과정을 모사하였다. Cheung[10]은 대퇴골을 실제 물성과 비슷하게 제작하여 IM-rod를 이식하여 보행주기에 따라 하중을 주는 실험을 하였으며, 실험 결과와 유한요소해석 결과를 비교하였다. 이러한 선행연구에서는 뼈에 IM-rod를 삽입한 모델에 하중을 부여하여 해석하는 비교적 단순한 해석을 실시하였기 때문에 골절 치료과정의 시뮬레이션에 대한 연구는 부족한 상태이다.

본 연구에서는 비교적 단순한 해석을 실시했던 IM-rod관련 해석에 메카노 규제 이론을 적용하여 골절부의 회복 과정을 모사하였다. 그리고 다양한 하중 조건을 부여하여 골절 치료효율을 증가시킬 수 있는 하중 조건을 예측하여 수술 후 재활치료에 중요한 정보를 제공하고자 한다. 또한 골절부에 기존의 스테인레스 강 IM-rod와 직물 탄소섬유/에폭시 복합재료 IM-rod를 적용하여 IM-rod의 물성이 골절부의 치료효율에 미치는 영향을 비교하였다.

2. 모델링 및 해석 조건

2.1 형상 및 재료

골절 치료 과정을 모델링 하기 위해 상용프로그램인 ABAQUS 6.91사용하였으며, 골절된 경골에 IM-rod가 삽입된 형상을 직경 8mm, 두께 2mm인 환봉형으로 단순화 하여 모델링 하였다(Fig. 1 참조). Lacroix[7]와 Kim등[9]의 연구 결과와 비교하기 위하여 골절부 틈을 3mm로 결정하였으며, 외부 가골의 형상은 선행연구와 동일하게 모델링 하였다. IM-rod는 현재 수술에 많이 쓰이는 확공성 IM-rod에 대해 모델링 하였으며, 이를 고려하기 위해 IM-rod와 뼈 사이에 1mm 간격을 두고 해석을 실시하였다[10]. IM-rod의 물성은 기존에 널리 쓰이는 스테인레스 강과 직물 탄소섬유/에폭시 복합재료(WSN3k[0]_{2nT}과 WSN3k[±45]_{nT})를 사용하였으며, 해석에 사용된 복합재료는 다양한 보철 기구로 사용되었을 때 생체 적합성이 증명되었다[12]. 치밀골은 종 방향의 물성이 더 높기 때문에 이방성 물성을 적용하였으며, 그 값은 Table 1과 같다.

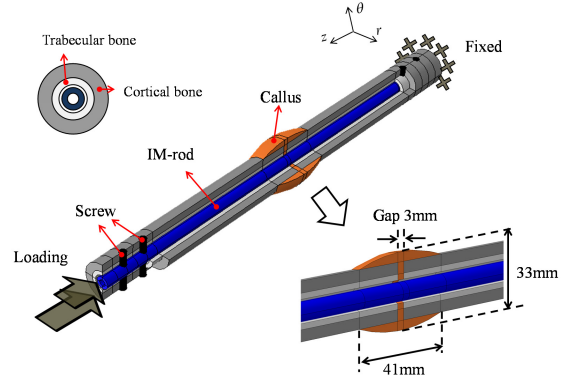


Fig. 1 Finite element model of a fractured tibia.

Table 1 Material properties of IM rods and bones

	Young's modulus[GPa]	Shear modulus[GPa]	Poisson's ratio
Cortical bone	$E_r=8.50$	$G_{r\theta}=2.40$	$\nu_{r\theta}=0.141$
	$E_\theta=7.00$	$G_{rz}=5.00$	$\nu_{rz}=0.065$
	$E_z=18.40$	$G_{\theta z}=3.60$	$\nu_{\theta z}=0.099$
Trabecular bone	1.10	0.44	0.260
Stainless steel	193.00	74.23	0.300
WSN3k [0] _{2nT}	$E_r=10.00$	$G_{r\theta}=3.50$	$\nu_{r\theta}=0.019$
	$E_\theta=70.00$	$G_{rz}=3.50$	$\nu_{rz}=0.019$
	$E_z=70.00$	$G_{\theta z}=5.06$	$\nu_{\theta z}=0.130$
WSN3k [±45] _{nT}	$E_r=10.00$	$G_{r\theta}=3.95$	$\nu_{r\theta}=0.019$
	$E_\theta=17.90$	$G_{rz}=3.95$	$\nu_{rz}=0.019$
	$E_z=17.90$	$G_{\theta z}=30.97$	$\nu_{\theta z}=0.780$

2.2 메카노 규제 이론

메카노 규제 이론이란 세포에 적절한 기계적 자극을 가해 주면 세포분화가 활발히 일어나 높은 치료효율을 가질 수 있다는 이론이다. 본 연구에서는 선행연구[8-9]와 동일한 편향 변형률을 이용한 메카노 규제 이론을 사용하였으며, 골절부에 가해지는 편향 변형률에 따라 세포 표현형(Cell phenotype)을 분류하였다(Fig. 2 참조).

분류된 세포 표현형은 낮은 물성 세포부터 육아조직(Granulation tissue), 섬유조직(Fibrous tissue), 연골(Cartilage), 미성숙 골(Immature bone), 중간성숙 골(Intermediate bone), 성숙 골(Mature bone)로 분류하였다. 동일한 세포인 경우 편향 변형률에 따라 물성이 선형적으로 변화하는 것으로 가정하였으며, 세포의 물성은 과도한 물성 회복을 방지하기 위해 한번에 두 단계까지만 세포가 분화될 수 있도록 가정하였다(Fig. 2 참조). 즉, 본 해석에서는 과도한 물성회복 및 물성 저하는 발생하지 않는다.

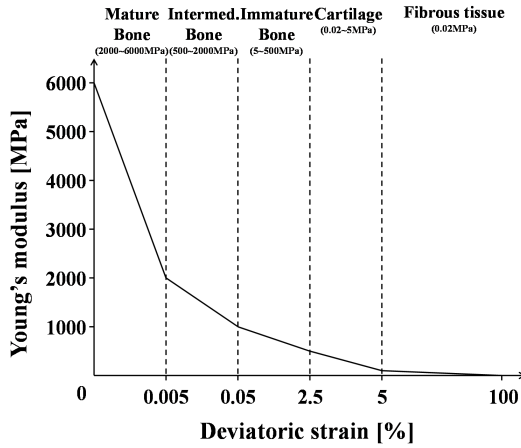


Fig. 2 Mechano-regulation theory with a deviatoric strain.

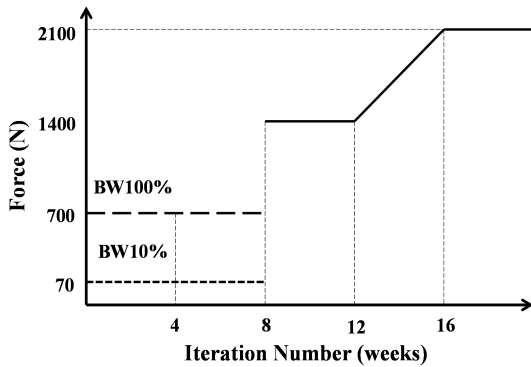


Fig. 3 Load condition during healing period.

2.3 하중조건

본 연구에서는 경골의 형상을 원통 모양으로 단순화하였다. 하지만 실제 경골의 형상은 복잡하기 때문에 경골의 내측(Medial)과 외측(Lateral)에 걸리는 하중이 달라지게 된다. 선행연구의 결과를 이용하여 내측(Medial)과 외측(Lateral)에 걸리는 하중 비를 구하여 유한 요소 모델링에 적용하였다 [11]. 하중 조건은 치료 초기의 보행습관을 고려하여 Fig. 3과 같이 초기 8주간 체중의 10%(10%BW)와 100%(100%BW)로 나누어 해석을 실시하였으며, 16주 이후에 가해지는 300% 하중 조건은 일반적인 걸음 걸이 조건일 때 경골에 가해지는 하중이다[13].

골절된 치료세포가 시간에 따라 회복되는 과정을 모사하기 위해서 Python 3.1을 사용하여 반복적인 계산을 수행하였다. 하중이 가해졌을 때 가골부의 요소마다 편향 변형률이 다르고, 각 요소마다 세포 분화 속도가 다르기 때문에 각 요소마다 다른 물성을 부여하여야 한다. 따라서 하중에 따른 편향 변형률을 계산하여 앞서 언급한 메카노 규제 이론에 따라 각

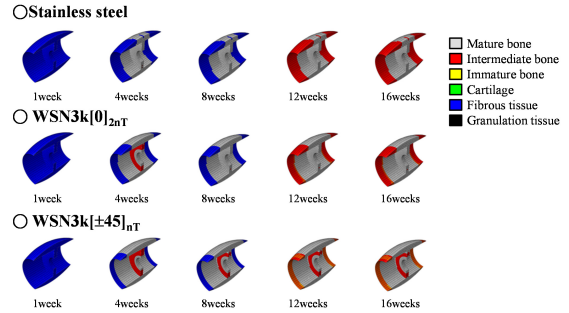


Fig. 4 Tissue differentiation for initial loads of 10% BW.

요소에 새로운 물성을 부여하였다. 새롭게 부여된 가골부(Callus)의 물성을 다음 단계 해석에 적용시켰으며, 16주의 치료기간에 따른 세포 분화 과정을 모사하기 위해 일련의 해석과정을 16회 반복 수행하였다.

3. 해석 결과

3.1 10%BW 하중 조건에서의 골절 치료 효율

치료기간에 따른 가골부의 세포 분화과정은 Fig. 4와 같다. 중심 가골(Central callus)보다 외부 가골(External callus)에서 먼저 성숙골로 회복되었으며, 중심 가골에서는 치밀골보다 망상골이 먼저 성숙골로 회복되었다. 이는 고정판을 시술하였을 때와 유사한 경향을 나타낸다[9]. 또한 중심 가골에서는 강성이 높을수록 성숙골 세포로 더 많이 분화하였지만, 외부 가골의 경우 강성이 낮은 경우가 더 많이 성숙골 세포로 분화하였다. 실제로 외부 가골의 발달은 골절부 안정성에 큰 영향을 주기 때문에 강성이 낮은 경우 더 높은 치료효율을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

IM-rod의 물성에 따른 가골부의 회복 정도를 비교하기 위해 가골부의 물성을 평균화한 값을 치료효율(Healing efficiency)이라고 정의하였으며, 그 결과는 Fig. 5와 같다. 앞서 정의한 메카노 규제 이론에 의하면 과도한 물성 회복은 이루어지지 않는다고 가정하였다. 그 결과 강성이 가장 높은 스테인레스 강일 때 3889.9MPa로 가장 낮은 치료 효율을 가졌으며, 강성이 가장 낮은 WSN3k[±45]nT일 때 4131.3MPa로 가장 높은 치료효율을 가졌다. 강성이 높을 경우 가골부의 편향 변형률이 낮기 때문에 이 부분이 성숙골로 분화가 되어야 하지만, 단기 간의 과도한 물성회복은 억제되었기 때문에 결과적으로 낮은 초기 물성 회복률을 보인다. 그 결과 IM-rod의 강성이 낮을 경우가 강성이 클 때 보다 치료 초기에 다음 세포 표현형으로 분화하는 경우가 많아 높은 회복률을 보이게 된다.

3.2 100%BW 하중 조건에서의 골절 치료 효율

초기하중이 100%BW일 때의 치료기간에 따른 가골부의

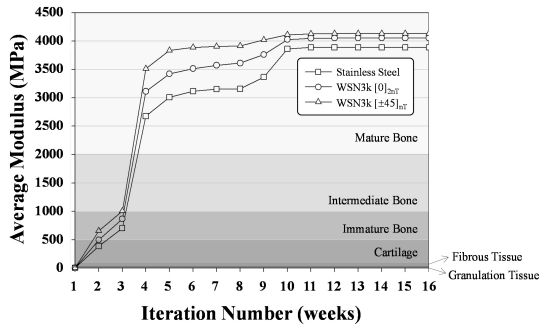


Fig. 5 Average callus modulus according to healing period for initial loads of 10% BW.

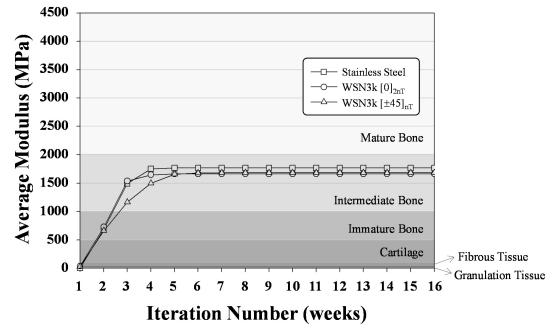


Fig. 7 Average callus modulus according to healing period for initial loads of 100% BW.

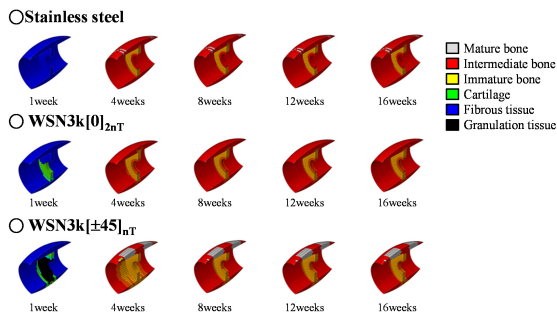


Fig. 6 Tissue differentiation for initial loads of 100% BW.

세포 분화과정은 Fig. 6과 같다. 해석 결과 중심 가골 보다 외부 가골이, 중심 가골에서는 치밀골보다 망상골의 치료효율이 더 높았으나, 대부분 성숙골까지 세포분화가 이루어 지지 않았다. 이러한 결과의 원인은 치료 초기에 큰 하중이 걸리기 때문에 가골부에 큰 편향 변형률이 발생하여 성숙골의 분화가 덜 이루어졌기 때문이다.

IM-rod의 물성에 따른 가골부의 회복 정도를 비교하기 위해 앞선 방법과 동일하게 가골부의 물성을 평균화한 값을 치료효율로 정의하였으며, 그 결과는 Fig. 7과 같다. 하중이 100%BW일 경우 IM-rod의 물성이 가장 높은 스테인레스 강일 때 치료효율이 가장 높았다. 그 이유는 IM-rod의 강성이 낮을수록 가골 내에 과도한 편향 변형률이 발생하여 육아조직이 다음 단계의 세포 표현형으로 분화되지 못했기 때문이다. 분화되지 못한 세포는 물성이 낮아 다음 반복계산에 영향을 주어 다시 과도한 편향 변형률이 발생된다. 따라서 강성이 낮을수록 세포분화 속도가 느려 치료효율이 낮은 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 골절된 경골에 복합재료 IM-rod와 스테인레스 강 IM-rod를 적용함에 따른 골절치료 세포의 회복과정을

모사하기 위해 유한요소해석을 사용하였다. 편향 변형률을 이용한 메카노 규제 이론을 적용하여 치료기간에 따라 세포가 분화되는 과정을 Python 코드를 이용하여 반복 계산하였다. 모델링을 위해 수술에 많이 사용되는 확공성 IM-rod를 이용하였으며, 하중 조건 및 IM-rod의 물성에 따른 골절부의 치료효율을 계산하였다.

초기 하중이 체중의 10%(10%BW)일 때는 탄소섬유/에폭시 복합재료(WSN3k[±45]_{nT}) IM-rod가 가장 우수한 치료효율을 가졌으며, IM-rod의 강성이 높아질수록 치료효율은 감소하였다. 초기 하중이 체중의 100%(100%BW)인 경우는 10%BW 하중 조건과는 반대로 강성이 가장 높은 스테인레스 강이 가장 높은 치료효율을 가졌다. 하중 조건에 따른 치료효율을 비교하면, 초기 하중이 10%BW일 때 보다 100%BW 하중 조건에서 치료효율이 낮은데, 이는 초기에 과도한 편향 변형률이 발생하여 세포분화가 천천히 일어나기 때문이다.

이번 연구 결과를 통해 적절한 하중 조건(10%BW)과 적합한 IM-rod(탄소섬유/에폭시 복합재료; WSN3k[±45]_{nT})를 사용하여, 기존에 쓰인 스테인레스 강 IM-rod보다 치료효율을 증가시킬 수 있음을 확인하였다. 또한 본 연구와 동일한 메카노 규제 이론을 이용한 고정판 연구와 비교한다면, 상황에 따라 보다 높은 치료효율을 유도할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 한국연구재단(NRF)을 통해 교육과학기술부의 중견연구자지원사업(핵심연구지원) (2010-0009372)의 재정지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1) Krettek, C., Schandelmaier, P., Nliclau, T., and Tscherne, H., "Minimally invasive percutaneous plate osteosynthesis

- (MIPPO) using the DCS in proximal and distal femoral fractures,” *Injury*, Vol. 28, Supplement 1, 1997, pp. A20-30.
- 2) Ji, F., Tong, D., Tang, H., Cai, X., Zhang, Q., Li, J., and Wang, Q., “Minimally invasive percutaneous plate osteosynthesis(MIPPO) technique applied in the treatment of humeral shaft distal fractures through a lateral approach,” *International Orthopaedics*, Vol. 33, No. 2, 2009, pp. 543-7.
 - 3) Kim, J.H., and Chang, S.H., “A Basic Design and Characterization on Composite Bone Plate for Bone Fracture Healing,” *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 20, No. 5, 2007, pp. 7-12.
 - 4) Kim, S.H., Park, M.G., An, S.T., Cho, S.K., and Chang, S.H., “Finite element analysis of callus generation in fractured bones according to the strain distribution,” *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 22, No. 3, 2009, pp. 29-34.
 - 5) Kim, S.H., and Chang, S.H., “Finite element analysis on bio-mechanical behavior of composite bone plate for healing femur fracture considering contact conditions,” *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 23, No. 1, 2010, pp. 1-7.
 - 6) Hajek, P.D., Bicknell, H.R., Bronson, W.E., Albright, J.A., and Saha, S., “The use of one compared with two distal screws in the treatment of femoral shaft fractures with interlocking intramedullary nailing. A clinical and biomechanical analysis,” *Journal of Bone and Joint Surgery-American Volume*, Vol. 75, No. 4, 1993, pp. 519-525.
 - 7) Lacroix, D., and Prendergast, P.J., “A mechano-regulation model for tissue differentiation during fracture healing: analysis of gap size and loading,” *Journal of Biomechanics*, Vol. 35, No. 9, 2002, pp. 1163-71.
 - 8) Isaksson, H., Wilson, W., Donkelaar, C.C., Huijkes, R., and Ito, K., “Comparison of biophysical stimuli for mechano-regulation of tissue differentiation during fracture healing,” *Journal of Biomechanics*, Vol. 39, No. 8, 2006, pp. 1507-16.
 - 9) Kim, H.J., Chang, S.H., and Jung, H.J., “The simulation of tissue differentiation at a fracture gap using a mechano-regulation theory dealing with deviatoric strains in the presence of a composite bone plate,” *Composites Part B-Engineering*, Vol. 43, No. 3, 2012, pp. 978-87.
 - 10) Cheung, G., Zalzal, P., Bhandari, M., Spelt, J.K., and Papini, M., “Finite element analysis of a femoral retrograde intramedullary nail subject to gait loading,” *Medical Engineering & Physics*, Vol. 26, No. 2, 2004, pp. 93-108.
 - 11) Donahue, T.L.H., Hull, M.L., Rashid, M.M., and Jacobs, C.R., “A finite element model of the human knee joint for the study of tibio-femoral contact,” *Journal of Biomechanical Engineering-Transactions of the Asme*, Vol. 124, No. 3, 2002, pp. 273-80.
 - 12) Ramakrishna, S., Mayer, J., Wintermantel, E., and Leong, K.W., “Biomedical applications of polymer-composite materials: a review,” *Composites Science and Technology*, Vol. 61, No. 9, 2001, pp. 1189-224.
 - 13) Mow, V.C., and Huijkes, R., *Basic orthopaedic biomechanics & mechano-biology*, Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, USA, 2005.