

論文

골절 치료를 위한 복합재료 고정판 기초 설계 및 특성 평가

김주호*, 장승환**+

A Basic Design and Characterization on Composite Bone Plate for Bone Fracture Healing

Ju-Ho Kim*, Seung-Hwan Chang**+

ABSTRACT

This paper aims to enhance the efficiency of bone fracture healing with bone plate made of fiber reinforced composite materials. The composite bone plate was designed as the same dimension and shape as the existing stainless steel bone plate. To find out the appropriate stacking sequence of the composite bone plate the variations of strain distributions were calculated using FE analysis when the bone plates were applied to the fracture site. From the analysis result it was found that the composite bone plate whose Young's modulus is lower than that of metal bone plate gave more uniform strain distribution and provided appropriate condition for callus formation and its development.

초 록

본 논문에서는 골절치료의 효율을 높이기 위해 기존에 사용되는 고정판을 복합재료를 이용하여 설계하는 연구를 수행하였다. 복합재료 고정판의 크기와 모양은 기존 시술에 가장 많이 쓰이는 스테인리스 강 고정판의 한 제품과 동일하게 설계하여 연구를 수행하였다. 기존의 스테인리스 강 고정판과 복합재료의 고정판이 골절 부위에 시술 되었을 경우 고정판의 재질에 따른 골절 계면부에 발생하는 변형률 분포의 변화를 계산하고 비교하였다. 각각의 계면부의 하중분포와 변형률은 유한요소해석을 통해 계산하였으며, 고정판이 사람의 하지에 시술된 후 환자가 보행하는 경우를 고려하여 하중조건을 부가하였다. 유한요소해석 결과 복합재료 고정판은 골절 부위의 변형률 분포를 보다 고르게 하며, 가골 형성을 촉진할 수 있는 환경을 제공하는 것을 밝혀내었다.

Key Words : 고정판(Bone Plate), 섬유강화복합재료(Fiber reinforced Composites), 유한요소해석(Finite Element Analysis), 변형률 분포(Strain Distribution)

1. 서 론

복합재료의 제반 기술이 발전함에 따라 다양한 분야에서 섬유강화복합재료(Fiber reinforced composites)가 사용되고 있으며, 생활에 쓰이는 대부분의 제품들이 더 가벼워지고 소형화 되어가는 추세에서 복합재료는 기존의 금속재료보다 가볍고 더 강한 강도의 제품을 설계하고 제작하는데 중요한 역할

을 담당하고 있다[1]. 복합재료의 우수한 기계적 특성으로 인해 기존 산업계뿐만 아니라 의료계에서도 복합재료를 이용한 제품을 연구 중이며, 특히 정형 의료 분야에서 골절 시 인골을 고정해주는 고정판(Bone plate)을 이용한 골절치료법이나 이를 효과적으로 응용하기 위한 연구들이 진행 중이다[2]. 골절 시 골절부위 치료방법은 시술부위에 따라 외부 고정술(External fixation)과 내부 고정술(Internal fixation)로 나뉜다,

* 중앙대학교 기계공학부

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

외부 고정술은 골절 부위를 고정하기 위해 관절부를 포함하여 고정을 하는 기술이며, 이는 차후 고정물을 제거했을 때 관절이 경직되는 부작용뿐만 아니라 일상생활의 불편함을 동반하는 부정적인 영향을 피할 수 없다. 반면, 내부 고정술은 체내 골절 부위만 직접 고정시키기 때문에 골절부에 근접한 관절을 움직일 수 있으며, 고정판을 하지에 시술 시 수일 내로 보행이 가능한 이점이 있다. 고정판 기술의 방법 중 간접 골치료 (Indirect bone healing) 는 유연한 고정(Flexible fixation) 으로서 생물학적 혈액의 공급이 비교적 원활하여 골절부위의 뼈 사이에 뼈 생성 물질인 가골(Callus)의 성장과 발달에 도움을 준다[3]. 가골은 뼈 사이에 미세한 변위가 발생하면 생성이 촉진되고 가골이 많이 생성될수록 빠른 치유를 할 수 있는 것으로 알려져 있다[3]. 최근에 의공학에 관한 연구가 활발히 진행되면서 본 치료법의 높은 효율성이 증명되고 있어 생물학상의 이점이 있는 간접 골치료 기술이 활발히 연구되고 있다. 특히 대퇴골(Femur)은 인체에서 가장 큰 장관골이며, 보행 시 체중 부하에 직접적으로 관여하는 부분이다. 고속 교통수단의 발달과 평균 수명의 연장에 의해 활동이 많은 중년층과 고령층에서 대퇴골 골절이 증가 추세를 보이고 있으며, 전체 고관절부 골절의 10~34%를 차지하는 것으로 보고되고 있다[4]. 골절의 원인은 주로 교통사고나 추락사고 등의 강한 충격에 의한 손상이 75%이고 이러한 사고에 노출되기 쉬운 청장년층이 환자의 주류를 이루며, 골 밀도가 상대적으로 낮은 고령층에서는 주로 약한 충격에 의한 저에너지 골절이 발생하는 것으로 조사된다[4]. 또한 소아인 경우는 수술을 하지 않아도 치료가 잘 되지만 성인인 경우 수술을 통한 치료가 만족할만한 결과를 보이는 것으로 알려져 있다[5]. 대부분의 대퇴골 골절 시 수술에 의한 치료의 경우는 고정판 간접 골치료 기술이 사용되고 있으며, 고정판은 스테인리스 강(Stainless steel)이나 티타늄(Titanium) 합금소재가 주로 사용되고 있다. 이러한 금속소재 고정판은 높은 강성으로 인해 뼈 사이에 가골 형성을 촉진할 수 있는 기능은 좀처럼 기대하기 어렵다. Perren [3]의 연구에서 손상골 사이의 변형률 범위가 2%~10% 사이일 때 가골 생성을 촉진하며 조속한 골유합을 얻을 수 있는 것으로 조사되었다. 가골이 생성되는 손상골 사이에 균일한 미세 변형이 발생할 경우 조골세포의 생성과 치료 조직의 활성화를 기대할 수 있으며, 복합재료 고정판은 재료의 강성 조절을 통해 뼈 사이의 미세한 상대 운동을 조절할 수 있기 때문에 스테인리스 강이나 티타늄 합금소재보다 가골을 생성하는 데 도움을 줄 것으로 판단된다. 또한 섬유강화복합재료를 이용하면 상지와 하지에 따라 하중을 많이 받는 방향과 부분을 보강하여 설계·제작 할 수 있으며 유연한 고정(Flexible fixation)을 연령과 환자의 행동 습관, 몸무게 등을 고려하여 설계가 가능하다. 섬유강화복합재료를 이용한 고정판에 대한 연구를 살펴보면, Veerabagu [2]등이 복합재료 고정판을 금속 고정판의 평균 크

기를 측정하여 설계·제작하였으며, 제작된 복합재료 고정판의 기계적 특성을 측정하고 기존 제품과 비교함으로써 복합재료 고정판의 적용 가능성을 증명하였다.

본 논문에서는 섬유강화복합재료를 이용하여 고정판을 설계하였으며, 복합재료의 적층수와 적층각도를 변경하면서 유한요소해석을 수행하여 기존의 스테인리스 강 고정판을 적용할 경우 발생하는 변형률 분포와 복합재료 고정판을 적용할 경우의 변형률 분포를 계산하여 복합재료 고정판의 타당성을 검증하였다. 또한 손상골에 전해지는 응력을 각 경우에 대해 비교하여 복합재료 고정판의 적합성을 증명하였다.

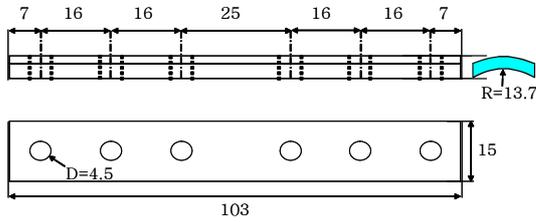
2. 골절 치료용 고정판

2.1 고정판의 형상

고정판은 장기간 체내에서 손상골을 고정하여 치료하는데 사용되기 때문에 설계 시 고정판이 시술될 골절부위의 기하학적 형상을 어느 정도 고려해야 한다. 대퇴골을 길이 방향으로 고정시키기 위해 고정판의 형상은 일반적으로 종방향으로 긴 형상을 가지며, 원호형으로 모사할 수 있는 뼈의 단면 형상에 기인하여 횡방향으로 일정한 곡률을 가진다(Fig. 1 참조). 뼈와 고정판을 체결하기 위해서는 스크루가 이용되며, 본 연구에서 사용된 고정판은 6개의 스크루 구멍을 가지고 있다. 대퇴골과 같은 하지의 경우 상지인 상완골(Humerus)에 비해 사람의 체중을 지탱해야 하므로 일반적으로 6개의 스크루를 사용하여 견고한 고정을 하며, 상완골은 통상 4개 이하의 스크루만 사용하여도 된다. 대표적인 상용 고정판의 예를 Fig. 1에 제시하였다. 본 연구에서 사용된 고정판의 사양은 Fujihara [6]등이 연구한 고정판의 크기와 동일하며(Fig. 2 참조), 고정판의 두께는 3.8mm이다. 또한 실제 크기와 같은 고정판을 섬유강화복합재료를 이용하여 제작한 결과를 Fig. 3에 제시하였다.



Fig. 1 Existing Metal Bone Plates.



All dimension are in mm

Fig. 2 Shape and Dimension of Carbon/epoxy Fabric Composite Bone Plate.



Fig. 3 Fabricated Carbon/epoxy Fabric Composite Bone Plate.

2.2 고정판의 재료

기존의 고정판은 주로 스테인리스 강과 티타늄 합금으로 제작되어 사용되고 있다. 본 논문에서는 복합재료 고정판을 평직 탄소섬유/에폭시 프리프레그 (WSN3k, SK Chemical Korea)를 이용하여 설계하였다. 고분자 재질의 고정판은 뼈와의 접촉면에서 체결력이 우수해서 스테인리스 강 고정판보다 손상골과 고정판의 고정을 더 견고히 할 수 있으며, 평직 탄소섬유/에폭시 프리프레그는 적층각도에 따라 고정판의 물성을 다르게 제작할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서 사용된 평직 복합재료(탄소섬유/에폭시)의 적층각도에 따른 탄성계수를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 보이는 바와 같이 연구에 사용된 복합재료는 0°와 90° 방향으로 70GPa의 영계수를 가지며, 45° 방향으로는 평균적인 인골의 피골부 강성과 유사한 18GPa를 가진다.

본 연구의 기준이 되는 스테인리스 강 고정판의 물성과 복합재료의 물성을 Table 1에 제시하였으며, 대퇴골의 골절 시 스테인리스 강 고정판과 복합재료 고정판을 비교하기 위해 대퇴골의 길이방향 탄성계수를 정상적인 뼈의 평균적인 값인 18GPa [2]로 설정하였다. 또한 골절부의 실제 물질특성을 모사하기 위해 골절된 계면부의 물성을 단계적으로 조정하였다. Fig. 5에 골절 계면부의 단계적 물성을 도식적으로 나타내었다.

3. 해석 결과

3.1 유한요소 모델링

본 연구를 위해 유한요소해석에 사용된 상용 패키지는 ANSYS

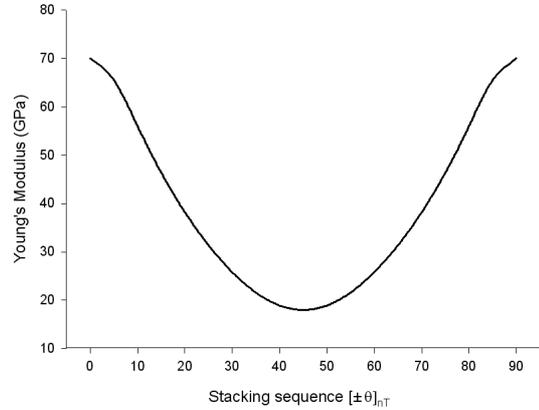


Fig. 4 Young's Modulus of WSN3k w.r.t. the Stacking Sequence.

Table 1 Material Properties of Stainless Steel, Carbon-epoxy and Bone

Material	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
Stainless Steel	200	0.3
Carbon/Epoxy	E ₁ 70	0.13
	E ₂ 10	0.13
	E ₃ 10	0.13
Femur	18	0.24

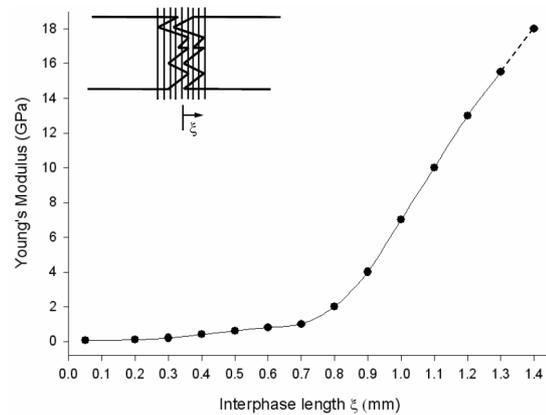


Fig. 5 Step-wised Material Property of Interphase.

9.0이며, 사용된 요소는 Solid 45(뼈, 계면부)와 Solid 46(복합재료 고정판)이다. 대퇴골 단면의 기하학적 형상은 계산의 단순성을 위해 중공형 원으로 근사하였다. 대퇴골의 피골(Cortical bone) 두께는 5mm로 설정하였으며[6], 피골을 제외한 나머지 조직은 매우 낮은 강성을 고려해서 무시하였다. 또한 골절부 위 사이의 계면부를 2.5mm로 모델링하여 25개의 층(각 층의

두께는 0.1mm)으로 나누어 13개의 서로 다른 물성을 입력하였다(Fig. 5 참조). 골절부의 정확한 기계적 물성 특성은 알려져 있지 않으며, 단지 골절편의 축방향 접촉 조건에 따라 큰 차이를 나타내기 때문에 구체적인 물성을 사용하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 골절부의 중앙($\xi = 0$)에 근접한 부분과 정상골에 근접한 부분에 대해 기울기가 서로 다른 물성 변화를 고려하여 해석을 수행하였다. 뼈와 고정판 사이의 경계조건으로는 이중재료 체결부의 모든 방향의 변위를 일치 시키는 커플(Couple) 조건을 사용하였다. 하중 조건은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 70kg의 사람이 보행 시 최대 동적 하중이 대퇴골의 축 방향으로 전달되는 것으로 가정하였으며, 무릎관절을 통해 전달된 축방향 압축 하중을 모델 한 끝단에 부가하고, 반대쪽 끝단은 변위를 고정하는 경계조건을 부가하였다. 대퇴골과 고정판의 유한요소 모델링을 Fig. 7에 제시하였다. Fig. 8은 환형단면으로 근사된 대퇴골에 고정판이 체결될 경우 대퇴골-고정판 복합단면의 중립축 이동을 개념적으로 나타낸 것이다. 해석에 사용된 균일한 축방향 압축하중 (F)은 중립축 이동에 의해 대퇴골-고정판 체결구조에 굽힘 거동을 유발한다.

3.2 해석 결과

유한요소해석을 통하여 스테인리스 강 고정판과 복합재료 고정판이 적용된 경우에 대한 골절부의 변형률 분포를 계산하였으며, 복합재료 고정판의 적층각도를 변경함에 따른 계면부의 변형률과 고정판 및 뼈에서 발생하는 응력을 비교하였다. 이에 따른 거동으로 손상 골 사이 계면부의 변형거동을 확인하였다. Fig. 9는 각종 고정판 적용에 따른 계면부에서의 변형률 분포이다. 각각의 계면부 원환 상단은 고정판이 고정되어 있는 부분이며, 하단은 고정판이 고정되지 않는 계면부의 변형률을 나타낸다. Fig. 10은 골절 계면부의 변형률 분포를 스테인리스 강 고정판과 복합재료 고정판의 적층 각도에 따라 계산한 결과이다. 계산 결과 최소 변형률은 고정판과 접촉하는 면에서 발생하며, 최대 변형률은 고정판과 접촉하는 면의 반대편에서 발생하였다. 이러한 현상은 손상골 부위에 체결한 고정판이 상대적으로 높은 강성을 가지기 때문이며, 해당 단면의 중립축을 고정판 부분으로 이동시킴에 따른 전체 구조의 굽힘현상에 기인한 결과이다(Fig. 8 참조). Fig. 10에서 보이는 바와 같이 스테인리스 강 고정판의 경우 최소 변형률과 최대 변형률 간의 차이가 가장 컸으며, 이는 고정판의 강성이 가장 높기 때문에 부가하중에 의해 고정판이 고정되지 않는 부분으로의 굽힘량이 증가하기 때문임을 알 수 있다. 굽힘량이 증가하면 계면부에 하중이 불균일하게 집중되며, 이는 가골의 형성과 골절 부위의 치료에 도움이 되지 않는 것으로 알려져 있다[3]. 또한 고정판에 따른 대퇴골과 고정판의 응력분포를 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 고정판의 강성이 감소함에 따라 뼈와 고정판에 걸리는 응력의

크기와 비율이 변화함을 알 수 있으며, 이는 유연한 고정판이 응력방패현상(Stress shielding effect)을 효과적으로 개선함을 의미한다.

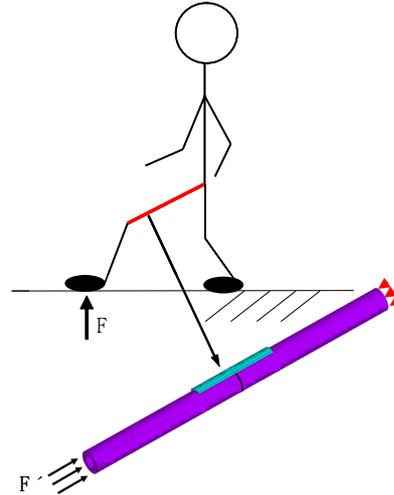


Fig. 6 Loading Condition.

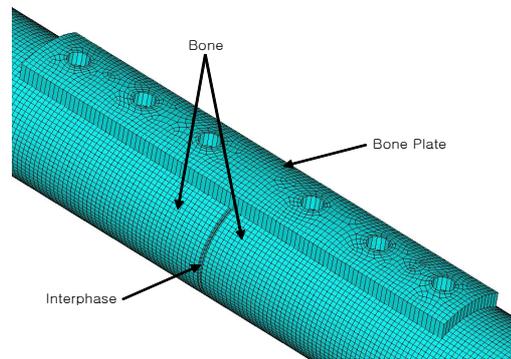


Fig. 7 Finite Element Model of Bone Plate and Bone.

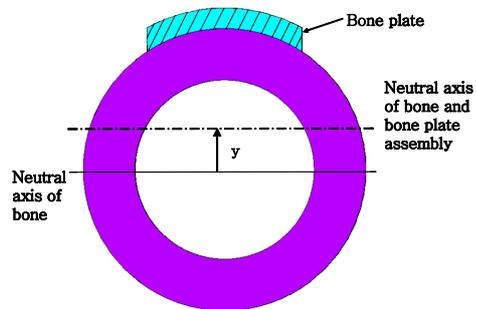
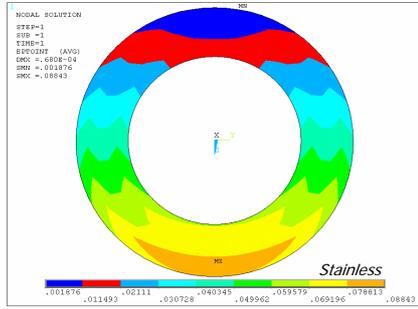
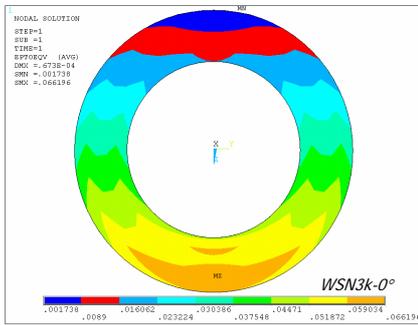


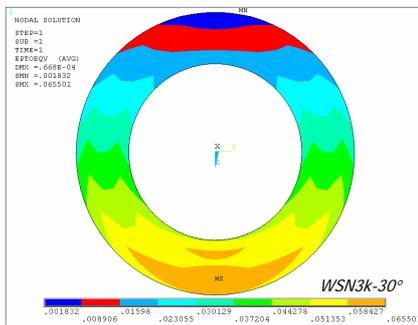
Fig. 8 Neutral Axis Shift of Bone and Bone Plate Assembly.



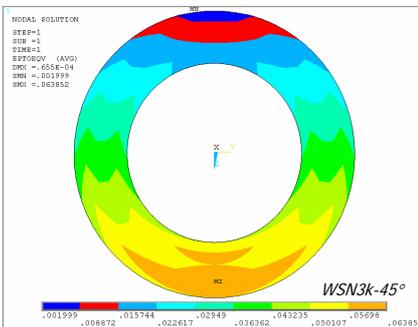
(a)



(b)

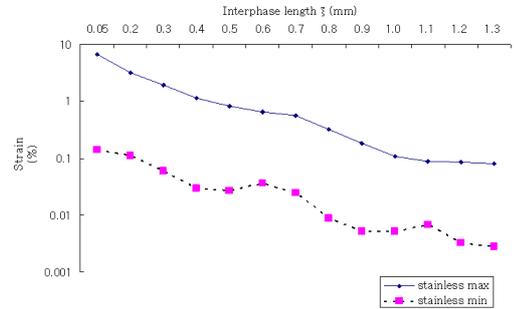


(c)

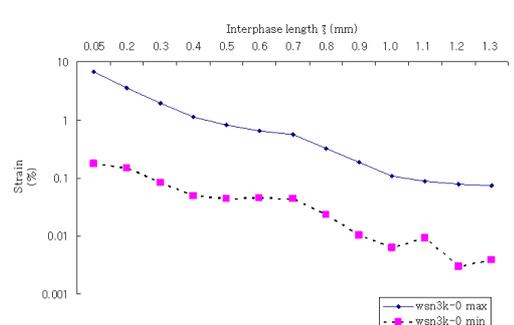


(d)

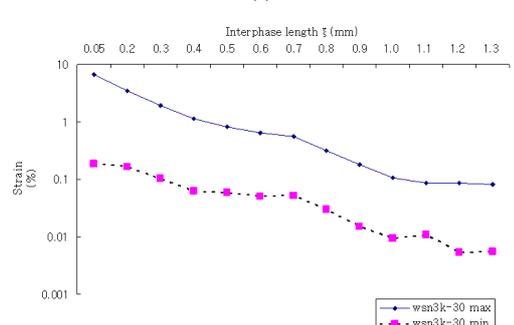
Fig. 9 Strain Distribution at Interphase; (a) Stainless Steel Bone Plate, (b) Composite Bone Plate [0]_{int}, (c) Composite Bone Plate [±30]_{int}, (d) Composite Bone Plate [±45]_{int}



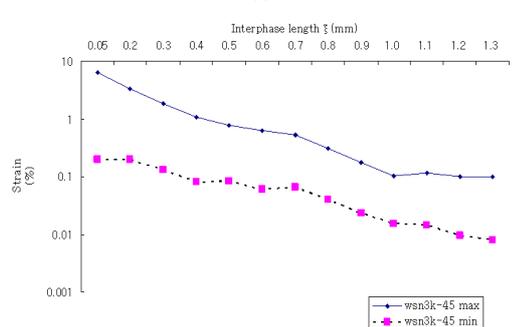
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 10 Strain Distribution; (a) Stainless Steel Bone Plate, (b) Composite Bone Plate [0]_{int}, (c) Composite Bone Plate [±30]_{int}, (d) Composite Bone Plate [±45]_{int}

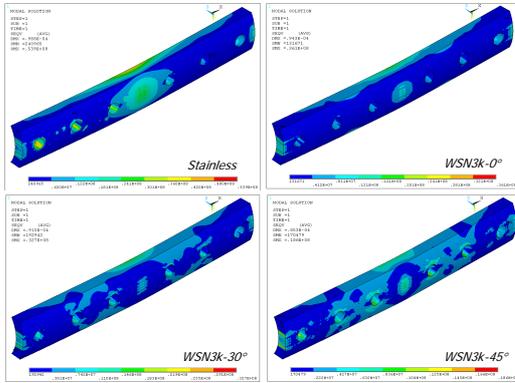


Fig. 11 Stress Distribution in Bone Plate. Average Stress

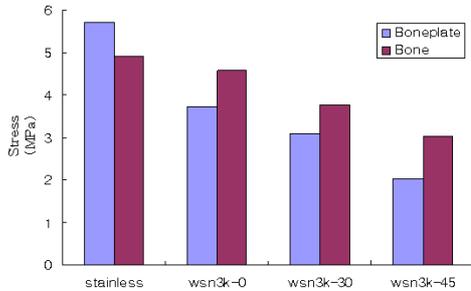


Fig. 12 Average Stress of Bone Plate and Bone.

4. 결론

골절 부위를 고정판으로 고정하는 내부 고정술에서 손상골의 안정화와 조속한 골유합은 골절치료 시술에 있어 매우 중요하다. 기존 금속 고정판은 골절 계면부의 변형률이 불균일하며, 응력방패 현상을 유발하고 경우에 따라 손상골이 유합되지 않을 가능성이 있다. 본 연구를 통해 복합재료를 이용한 고정판은 고정판의 강성을 조절하여 기존 재료로 제작된 고정판과는 달리 고정판이 고정되지 않는 부분에 고풍응력이 집중되는 현상을 완화하여 계면부에 분포되는 불균일한 하중을 비교적 균일하게 조절하는데 도움이 됨을 알 수 있었다. 이는 골절 부위의 치료를 빠르게 유도하며 변형률의 불균일로 새로운 뼈가 생성되지 않는 것을 방지하고 응력방패 현상을 완화시켜 손상골과 고정판에 균일한 하중을 분포시킴으로서 새로 생성되는 골밀도를 균일하게 하며, 손상골의 원활한 유합을 도울 것으로 예상된다. 또한 골다공증에 의해 골밀도가 청장년층의 뼈 물성보다 낮은 고령층의 손상골의 치료 효율을 증가시켜서 치료 시간을 단축시켜서 도움이 될 것으로 판단된다. 이는 계면부의 변형률 해석을 통해 확인하였으며, 기존의 스테인리스 강 고정판보다 복합재료 고정

판이 골절치료에 더욱 긍정적인 결과를 제공할 것으로 기대된다. 본 논문에서 다룬 모든 연구내용과 결과는 생물학적인 적합성을 배제하고, 고정판의 물성 변화에 따른 골절부의 역학적 거동의 변화와 개선에 초점을 맞추었다. 본 연구를 통해 얻은 결과를 이용하여 차후 생체적합성을 가지는 섬유강화복합재료 (탄소섬유강화 열가소성 복합재료 등)를 이용한 고정판의 설계와 그것을 이용한 동물대상 생체실험에 중요한 정보를 제공할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2005년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2005-041-D00013)

참고문헌

- 1) 김대일, 장승환, “미세 방전가공 기계 구조를 위한 복합재료-포움 샌드위치 구조 설계에 관한 파라메트릭 연구,” 한국복합재료학회지, 제19권, 제2호, 2006, pp. 13-19.
- 2) S. Veerabagu, K. Fujihara, G.R. Dasari and S. Ramakrishna, “Strain Distribution Analysis of Braided Composite Bone Plates,” *Composite Science and Technology*, Vol. 63, No. 11, 2003, pp. 427-435.
- 3) M. Perren Stephan, “Evolution of the Internal Fixation of Long Bone Fractures,” *The Journal of Bone & Joint Surgery*, Vol. 84-B, No. 8, 2002, pp. 1093-1110.
- 4) 고한석, 김병직, 주석규, 최재성, “대퇴골 전자하부 골절에 이용한 금속판 및 골수강내 금속성 고정술의 비교,” 한국골절학회지, 제7권, 제2호, 1994, pp. 352-363.
- 5) 홍문기, 장준섭, 박병문, 정인희, “대퇴골 간부골절에 관한 임상적 연구,” 한국정형외과학회지, 제12권, 제3호, 1977, pp. 447-459.
- 6) K. Fujihara, K. Teo, R. Gopal, P.L. Loh, V.K. Ganesh, S. Ramakrishna, K.W.C. Foong and C.L. Chew, “Fibrous Composite Materials in Dentistry and Orthopaedics: Review and Applications,” *Composite Science and Technology*, Vol. 64, No. 6, 2004, pp. 775-778.