

티타늄 단조로 이루어진 골절용 CHS플레이트 개발

Development of CHS plate made by forging process

*김현순¹, 진창수¹, 우수현², 하지영¹, 고필용³, 이성재²

*H. S. Kim¹, C. S. Chon(suhohoon@solco.co.kr)¹, S. H. Woo², J. Y. Ha¹, C. W. Ko³, S. J. Lee²

¹(주)솔고바이오메디칼, ²인제대학교 의용공학과 생체역학실험실, ³한국생산기술연구원 실버기술개발단

Key words : Forging process, CHS(Compression Hip Screw) plate, Phase analysis, FE Analysis

1. 서론

노령화 인구의 증가로 인하여 골다공증 환자들이 증가추세에 있으며, 이와 관련하여 골절환자의 수가 증가하고 있다. 골절을 치료하기 위하여 수술시 사용하는 골절합용 plate의 주재료는 생체적합성이 우수한 Pure Titanium과 Titanium alloy등이 사용되고 있으며, 골다공증 및 뼈와 관련된 질병이 있는 사람들에게서 쉽게 발생하는 대퇴부 골절 골절치료를 위한 임플란트 중 하나로 Ti합금(Ti6Al4V)재질의 CHS(Compression Hip Screw) Plate (Fig. 1)가 많이 사용되고 있다. 이러한 CHS plate의 경우 기계가공으로 인한 원자재 손실 및 제작기간의 증가함으로 이를 감소하기 위하여 Titanium의 단조가공이 검토 되고 있다.

Titanium 소재 단조가공시 활성이 매우 강한 금속으로 원 소재 용해 시 분위기중의 가스 흡수나 용해 도가니와의 반응층 형성으로 기계적 성질의 저하를 초래할 수 있고, Ti-6Al-4V로 대표되는 티타늄 합금은 순수 티타늄과 달리 냉간가공성이 나쁘기 때문에 열간 단조가 필요하며 단조가공을 하기위한 원소재의 가열은 수소흡수를 피하기 위해 환원성 분위기는 피해야 한다. Titanium 단조 관련 기술은 미국, 일본, 독일 등의 선진공업국가에서 이미 20-30년 전에 개발되어 현재 안정기에 있는 기술이나 국내 기술은 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 제작기간 및 가격의 감소를 위하여 CHS plate에 단조가공을 적용하여 기술적 부가가치가 높고 가격 측면의 경쟁적인 단조품 개발을 위한 Ti합금(Ti6Al4V)을 이용한 골절합용 Plate의 열간 단조 공정에 따른 Ti합금의 상(phase) 분석과 기계적 성능을 분석하였다.^{4,5}



Fig. 1 CHS Plate System

2. 재료 및 방법

2.1 Ti 재료특성 및 임플란트 선정

단조온도는 티타늄의 재질의 따라 다르고 목적에 따라 선택하며, 일반적으로 순수 티타늄의 단조온도는 700~950°C 범위이며, 여러 가지 티타늄 합금의 적정 단조 온도는 Table. 1과 같다.

일반적으로 Ti합금의 단조는 β 합금을 제외하고 β 취성을 피하기 위하여 β 변태점 이하에서 마무리 단조를 한다.³ (Table. 1)

본 연구에서는 Ti합금 중 정형외과 임플란트에 적합한 물성치를 가지면서 생체적합성이 검증된 Ti-6Al-4V, ELI(Titanium-6Aluminum-4Vanadium ELI(Extra Low Interstitial)합금을 사용하였다.²

Table. 1 Forging process temperature of Ti alloy

| 분류 | 합금명 | 변태점 (°C) | 1차단조온도 (°C) | 마무리단조온도 (°C) | |
|-----|--------------------|--------------------|-------------|--------------|---------|
| α합금 | Ti-5Al-2.5Sn | 1032 | 1050~1150 | 950~1020 | |
| | Ti-8Al-1Mo-1V | 1038 | 1050~1150 | 950~1020 | |
| | Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo | 995 | 1000~1100 | 900~980 | |
| | α+β합금 | Ti-6Al-4V | 995 | 1000~1100 | 850~950 |
| | | Ti-6Al-6V-2Sn | 945 | 1000~1100 | 800~920 |
| | | Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo | 955 | 1000~1100 | 800~930 |
| β합금 | Ti-5Al-2Cr-1Fe | 970 | 1000~1100 | 800~950 | |
| | Ti-15Mo-5Zr-3Al | 780 | 900~1100 | 800~1000 | |
| | Ti-13V-11Cr-3Al | 780 | 900~1100 | 800~1000 | |

2.2 단조온도 설정

선형 문헌을 통하여 최적화된 1차 단조온도 및 풀림 열처리 온도를 설정하기 위하여 1차 단조온도(850°C, 950°C, 1050°C)와 이에 대한 풀림 열처리온도(450°C, 550°C, 650°C)로 각각의 단조 시편을 제작하였다.^{2,3}



Fig. 2 Specimens made by Forging process

2.3 상분석 및 조성분석

1차 및 풀림 열처리 조건에 따른 Ti합금의 조성 분석을 위하여 EDX Micro 분석기,7200H)(HORIBA,Ltd, Japan)와 상분석을 위한 XRD, X'pert PRO(PANalytical, Netherlands)을 이용하여 분석하였고 분석조건은 Scan Power:40kV-30mA, Step size:0.017(°2θ), Scan step time:30sec, Scan range:30~90(°2θ)으로 하였다.

2.4 역학적 시험 (Mechanical Test)

본 연구에서 역학적 시험은 ASTM A-360, steel products에 준하여 실시하였고, 만능재료시험기(MTS 858 Table Top System, USA)를 이용하여 단조 온도 조건별 시편을 3점 굽힘 시험을 수행하였다.(Fig.3)



Fig. 3 Three-point Bending Test

2.5 유한요소 해석(FEA: Finite Element Analysis)

단조 CHS plate와 CHS plate를 삽입한 대퇴골의 최종 시술모델 해석은 Abaqus 6.8(ABAQUS, HKS, USA)를 이용하였다.(Fig. 4) CHS plate를 삽입한 대퇴골 모델에 대해 대퇴 골두 부위 2100N의 압축하중(관절간의 반발력을 고려하여 성인 남성 정상체중의 3배)을 적용하였고, 대퇴골 원외부는 움직이지 않도록 구속하였으며 대퇴골과 삽입된 CHS plate의 표면의 마찰계수는 0.5로 설정하여 단조 Ti CHS 모델과 기존 Ti CHS 모델을 비교하였다.

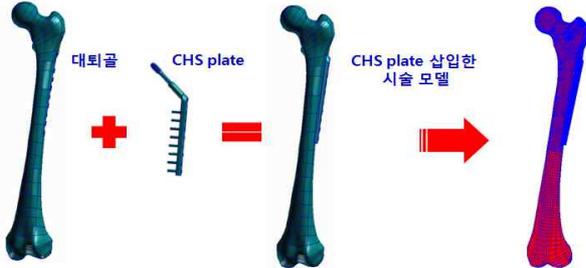


Fig. 4 Finite Element Model of Femer with CHS Plate

2.6 생물학적 안전성 시험을 통한 생체적합성 검증

Titanium의 단조가공 후 생체적합성을 검증하기 위하여 한국 산업기술시험원에 의뢰하여 세포독성 시험, 감각성 시험 및 피내 반응 시험을 ISO 10993에 의거하여 수행하였다.

3. 결과 및 논의

3.1 표면성분 및 상분석

표면성분 분석 결과 1차 열처리 온도 및 풀림 열처리 온도에 따른 표면성분 분석의 변화는 없음이 확인되었으며, 상분석 결과 대부분의 온도에서 주상인 α 상이 나타났으며, 1차 단조온도 850°C-풀림 열처리온도 650°C, 1차 단조온도 950°C-풀림 열처리 온도 650°C에서 부상인 β 상이 발생하였다.

3.2 역학적 시험 (Mechanical Test)

1차 단조온도와 풀림 열처리온도에 대한 영향을 평가하기 위하여 시험을 수행한 결과 1차 단조온도 1050°C의 경우 stiffness와 yield load는 높아지는 반면에 취성으로 인해 시편이 파괴되는 경향을 보였으며 850°C의 경우 낮은 yield load를 나타내어, 1차 단조온도로 950°C가 적절하였으며 yield load 및 stiffness가 가장 좋은 것으로 나타난 풀림 열처리온도 450°C를 CHS plate의 열간단조 온도로 판단하였다.(Table. 3)

Table. 2 Data of three-point bending test

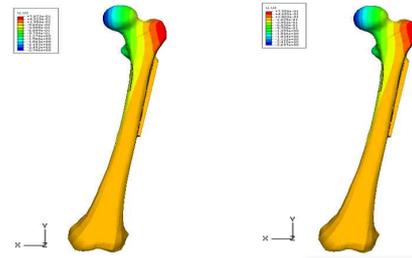
| 1차 열처리 온도 950°C 및 풀림 열처리 온도 450°C | |
|-----------------------------------|--------------|
| yield strength | 5866.75 N |
| Stiffness | 1499.60 N/mm |

3.3 유한 요소해석 (FEA)

대퇴골 시술모델의 유한요소 해석 결과 단조 Ti CHS plate의 stiffness가 1.4%(16.65N/mm)높은 경향을 보였고, 큰차이가 없어 구조적 안정성에 영향을 미치지 않을 것으로 나타났으며(Table. 2), PVMS는 13.4%(28.9 MPa) 낮은 경향을 보이며 이는 응력 집중의 분산으로 인하여 단조 Ti CHS plate의 파단 가능성이 낮을 것으로 사료된다.

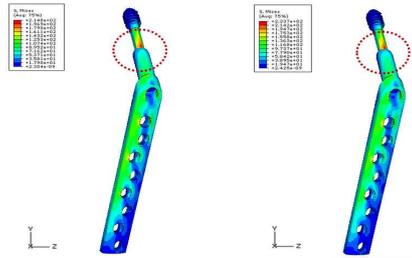
Table. 3 FEA data of bone model with CHS plate

| | Stiffness(N/mm) | PVMS(MPa) |
|-----------------|-----------------|-----------|
| Ti CHS plate | 1174.497 | 243.7 |
| 단조 Ti CHS plate | 1191.151 | 214.8 |



(a) Ti CHS plate model (b) 단조 Ti CHS plate model

Fig. 5 A comparison of Ti CHS plate with forging Ti CHS plate (Stiffness)



(a) Ti CHS plate model (b) 단조 Ti CHS plate model

Fig. 6 A comparison of Ti CHS plate with forging Ti CHS plate (PVMS)

3.4 생물학적 안전성 시험을 통한 생체적합성 검증

세포독성 시험결과 양성과 음성대조가 정확했고, 모든 시료구에서 세포 용혈이나 독성이 관찰되지 않아 적합한 것으로 판단되었다.

또한 감각성 시험 및 피내반응 시험결과 ISO 10993의 시험기준에 의거하여 시험한 결과 적합하였다.

4. 결론

본 연구를 통해 Ti 단조를 위한 열처리 온도를 평가하기 위하여 샘플의 역학적 시험 결과 적정 단조온도(1차 단조온도 950°C, 풀림 열처리온도 450°C)를 얻었고, 생물학적 안전성을 확인하였으며, 또한 실험을 통해 Ti 단조 가공을 위한 temperature control의 Know-how를 확보하였으며 이를 통하여 implant 가공에 있어 최적의 생산 조건을 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

후기

본 연구는 지식경제부의 우수제조기술연구센터 (ATC) 협회의 지원을 받아 수행하였음. (과제번호:10014102)

참고문헌

- Ed. Frank Kreith, "Mechanical Engineering Handbook", CRC Press LLC, 1999, section 4.
- Ed. James F. Shackelford, W. Alexander, "Material Science and Engineering Handbook", CRC Press LLC, 2001, pp367-368, 1652.
- Michael Baucchio, Ed, "ASM Metals Reference Book", Third Edition, ASM International, Materials Park, OH, p512, (1993).
- S. L. Semiatin, R. L. Goetz, V. Seetharaman, E. B. Shell and A. K. Ghosh, "Cavitation and failure during hot forging of Ti-6Al-4V", Volume 30, Number 5, pp1411-1424, 1999.
- Y.V.R.K. Prasad, T. Seshacharyulu, S.C. Medeiros, W.G. Frazier, "Influence of oxygen content on the forging response of equiaxed (α, β) preform of Ti±6Al±4V: commercial vs. ELI grade", OH 45433-7746, USA, (2000).