

소결방법에 따른 다공성 티타늄 임플란트의 기계적 특성

김 영 훈
원광보건대학교 치기공과

Mechanical property of porous Ti implants by sintering method

Yung-Hoon Kim
Department of Dental Laboratory Technology, Wonkwang Health Science University

[Abstract]

Purpose: This study was performed to compare mechanical properties for sintering methods of porous Ti implants.

Methods: The specimens of Ti implant were fabricated by several sintering methods. One of them is spark plasma sintering(SPS). Another is electro discharge sintering(EDS) and the other is high vacuum sintering(HVS). Mechanical properties of porous Ti implants were evaluated by universal testing machine(UTM) and their fracture surface was examined under a scanning electron microscope(SEM).

Results: The tensile strength was in a range of 71 to 230 MPa, and Young's modulus was in a range of 11 to 21 GPa. It matched with range of cortical bone.

Conclusion: Mechanical properties of porous Ti implants were similar to human bone. It was shown that sintering methods of spherical powders can efficiently produce porous Ti implants with various porosities. Porous metals will be commonly used in orthopedic and dental application despite of initial focus has been on bioceramics.

○Key words : implant, mechanical property, porous, sintering, strength

*본 연구는 2012년도 원광보건대학교 교내연구비 지원에 의해서 이루어진 논문임.

교신저자	성명	김 영 훈	전화	063-840-1244	E-mail	kimyh@wkhc.ac.kr	
	주소	전북 익산시 신용동 344-2 원광보건대학교 치기공과					
접수일	2012. 7. 16		수정일	2012. 8. 30		확정일	2012. 9. 21

I. 서론

인체의 내부에 적용되어지는 의료기기 중 임플란트는 크게 치과용과 정형외과용으로 대별할 수 있으며, 골 조직을 대체하기 위한 수단으로 이용된다. 대부분의 골 대체 재료로는 생체적합성이 우수한 생체세라믹스가 주로 사용되어지지만 구조적 기능을 수행하기 위한 생체재료로는 적절한 기계적 특성과 물리화학적 특성 그리고 생체 친화성 등이 요구되기 때문에 현재는 생체용 금속재료가 체내 이식용 임플란트 재료의 70% 이상을 차지하고 있다 (심재동과 석현광, 2011). 저작압을 견디거나 인체 구조를

지탱해야 하므로 강도 및 탄성을 등의 기계적 특성이 우수해야 하지만 골 조직과의 탄성을 차이가 크게 되면 응력차폐(stress shielding)현상(Oh et al., 2003) 등에 의해 골 조직에 오히려 위해를 가할 수도 있다. 따라서 기계적 특성으로는 과도하게 우수한 성능 보다는 인간의 피질골 또는 해면골과 유사한 특성을 갖는 것이 바람직하다고 판단된다. Wagoner Johnson & Herschler(2011)의 보고에 의하면 인체의 골 조직에서 하중이 전달되는 부분에 적용되는 골 대체재는 기계적 특성이 유사해야 한다고 하였으며 인간의 피질골과 해면골에 대한 기계적 특성치를 <Table. 1>과 같이 제시하였다.

Table 1. Summary of the mechanical properties and porosity of human bone

	Compressive strength(MPa)	Tensile strength(MPa)	Modulus of elasticity(GPa)	Porosity (%)
Cortical bone	130-180	50-151	12-18	5-13
Cancellous bone	4-12	1-5	0.1-0.5	30-90

인간의 골조직과 유사한 기계적 특성을 가지는 다공성 티타늄 임플란트를 제조하는 방법에는 RP장비(SLM)를 이용하거나 space holder를 이용하는 등의 여러 가지 방법이 있는데, 금속 분말 소결에 의한 일반적인 방법으로는 진공 상태의 전기로에서 소결(조유정 등, 2008)하는 방법이 있으며 특수한 방법으로는 통전 활성 소결(Lee et al., 2011)과 전기 방전 소결(An & Lee, 2006)법이 있다. 그러나 일반적인 고진공의 전기로에서 소결(High Vacuum furnace Sintering, HVS)을 시키게 되면 승온 속도와 냉각 속도가 더디기 때문에 임플란트를 제조하는데 오랜 시간이 필요하며, 원하는 형태를 잡아주기 위해서는 두 번 이상의 공정을 필요로 하기도 한다. 통전 활성 소결(Spark Plasma Sintering, SPS)법은 전도성 몰드 내에 티타늄 분말을 충전시키고 가압한 다음 전기에너지를 직접 통전시켜 10분 이내의 단시간에 소결을 완료할 수 있는 방법으로 충전된 금속 분말의 자체 저항발열과 입자 사이에서 발생하는 플라즈마 그리고 전도성 몰드의 저항열이 열원으로 작용하여 소결이 진행된다. 전기 방전 소결(Electro Discharge Sintering, EDS)법은 전극봉 사이에 티타늄 분말을 충전시키고 약 10 kgf 의 하중을

가한 다음 축전기에 충전된 전기에너지를 순간적으로 방전시키면 input energy에 따른 소결이 진행되는 방법이다. 전기 방전 소결은 진공 또는 불활성 기체 등의 분위기 조절이 수월하며 수 백 μ s 이내에 소결이 마무리되므로 대기중에서 소결하여도 티타늄 표면에 과도한 산화막이 형성되지는 않는다.

이에 본 연구에서는 여러 가지 소결방법에 의해 제조된 다공성 티타늄 임플란트가 인체 골조직의 기계적 특성에 대해 얼마나 유사성을 가지는지 알아보기 위해 비교 실험 하였다.

II. 연구 방법

1. 시편 제작

실험에 사용한 시편은 구형의 순수 티타늄(cp Ti, Gr.2) 분말(TLS Technik, Germany)을 각각 고진공 전기로와 통전 소결기 그리고 전기 방전 소결기(Fig. 1)를 이용하여 직경 4mm, 길이 40mm가 되도록 제작(Fig. 2)하였다.

2. 기계적 강도 시험

시험 장비로는 만능 강도 시험기(Instron 3367, USA)을 사용하였으며 하중 속도는 1mm/min로 인장 시험하여 시편이 파절될 때까지 시험하였다. 6개의 시편(Fig. 2)에 대해 시험하여 평균값을 계산하였으며 티타늄 원소재의 기계적 강도를 비교하기 위해 치밀한 티타늄 봉상(solid Ti rod)의 시편에 대해서도 같은 방법으로 시험하였다. 기공율은 수은 주입에 의한 기공율 측정기(Poremaster 33, USA)를 사용하였다.

3. 비교분석

소결방법에 따른 시편의 표면과 인장시험 후 파단면의 양상을 주사전자현미경(HITACHI S-4700, Japan)으로 관찰하였으며, X-선 회절 패턴(Rigaku D/MAX-2500/PC, Japan)을 분석하여 상의 변화를 알아보았고, 다공성 티타늄 임플란트 시편과 인간의 골 조직에 대한 인장강도 및 탄성율을 비교 분석하였다.

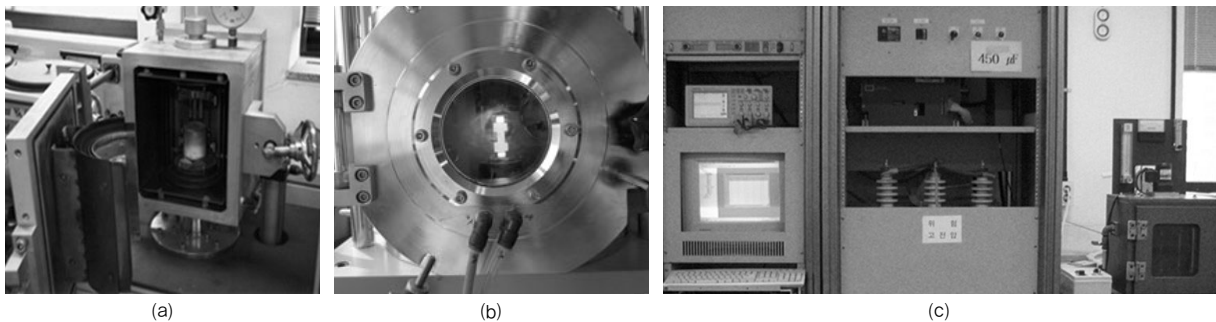


Fig. 1. Sintering machine (HVS(a), SPS(b), EDS(c))



Fig. 2. Sintered samples (4×40mm)

III. 결 과

다공성 티타늄 임플란트의 시편들은 각각의 소결방법에 따라 직경 4mm에 길이 40mm의 크기로 제조(Fig. 2)되었다. <Fig. 3>에서 보이는 바와 같이 구형의 티타늄 분말 입자들은 소결방법에 관계없이 입자간에 적절한 necking을 형성하고 있으며 XRD 분석 결과(Fig. 4) 구형의 티타늄 분말들은 소결과정에서 오염되거나 상(phase)이 변화

지 않은 순수 티타늄(cp Ti)의 회절 패턴을 나타내고 있었다. 통전 활성 소결법을 이용하여 제작한 다공성 임플란트 시편에서는 흑연(graphite) 몰드를 사용했기 때문에 시편 표면에 소량의 탄소가 검출 되었지만 XRD 회절 패턴을 보면 순수 티타늄과 큰 차이를 보이지 않아 흑연 몰드와 화학반응을 일으킨 것은 아니라고 사료되며 아세톤과 에탄올에서 20분씩 초음파 세척을 통해 제거될 수 있었다.

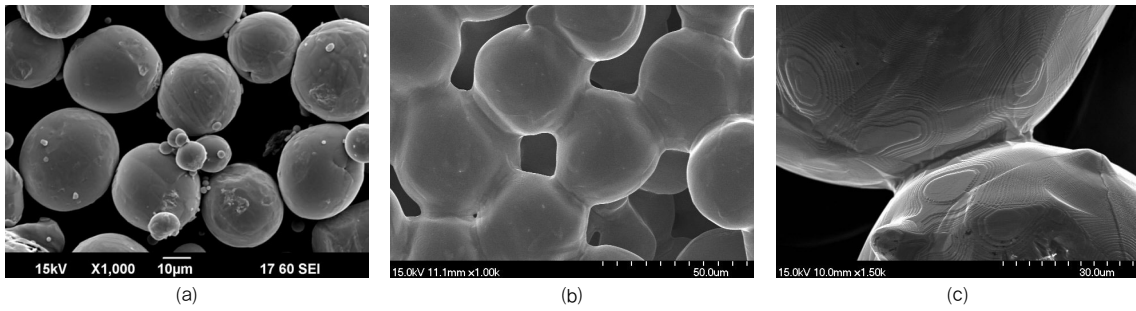


Fig. 3. SEM images of titanium powder(a) and surface of sintered body (b)(c)

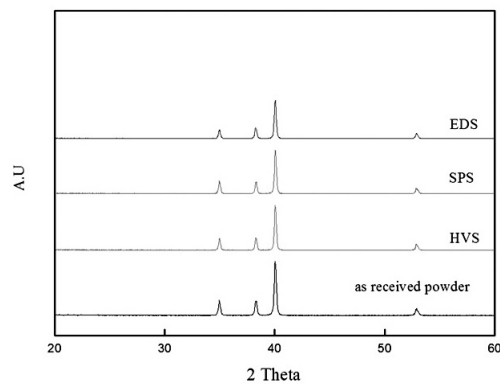


Fig. 4. X-Ray Diffraction patterns of respective sample

만능 강도 시험기(Universal Testing Machine)를 통해 얻어진 시편의 인장강도와 탄성율 그리고 측정된 기공율을 <Table 2>에 나타내었다. 인장강도는 고진공 로에서 소결된 시편(HVS)이 가장 높았으며, 통전 활성 소결된 시편(SPS)이 가장 낮았고, 탄성율은 전기 방전 소결된 시편

(EDS)이 가장 낮았다. <Fig. 5>을 보면 고진공 로에서 소결된 시편의 파절면(Fig. 5(a))이 가장 거칠고 불규칙적으로 형성된 것을 볼 수 있으며 통전 활성 소결된 시편의 파절면(Fig. 5(b))은 일정한 결을 형성하고 있는 것을 볼 수 있다.

Table 2. Summary of the mechanical properties and porosity of each sample

Sintering method	Tensile strength(MPa)	Elongation (%)	Modulus of elasticity(GPa)	Porosity (%)
HVS	230	2.54	21	9
SPS	71	0.68	18	17
EDS	128	9.34	11	11
Solid Ti rod	478	29.14	140	0

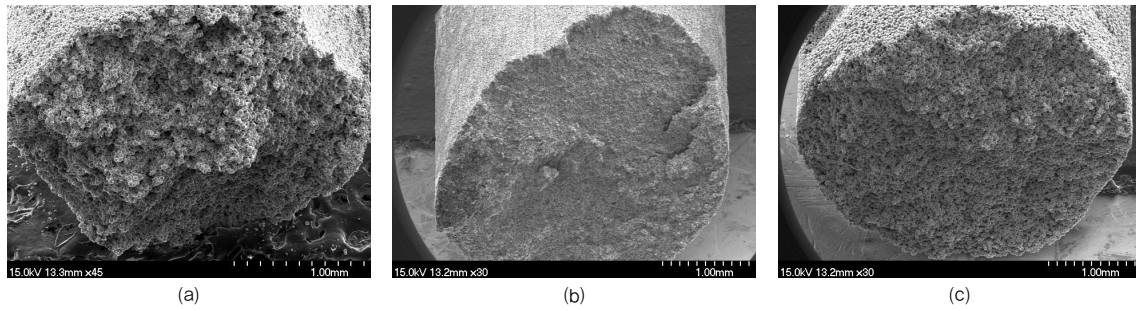


Fig. 5. SEM images of fracture surface after tensile test (HVS(a), SPS(b), EDS(c))

IV. 고찰

티타늄이 최초로 치과용 임플란트에 사용되어진 후 본격적인 상업화는 1970년대 중반부터 이루어졌다(심재동과 석현광, 2011). 초기의 임플란트 유형은 기계가공으로 매끈한 표면을 갖는 형태에서부터 나사산을 갖는 형태, 표면 거칠기를 증가시킨 형태 등으로 발전되었다. 골과의 결합력을 증가시키기 위한 방법으로 다공성 임플란트가 고안되어졌으나 감염의 위험성과 원소재 대비 강도 저하 등의 이유로 각광을 받지 못했다. 최근에까지 임플란트 표면처리에 대한 연구가 활발히 진행되어왔으나 대부분은 표면적 증가로 인한 초기 골유착(osseointegration)을 증진시키는데 중점을 두었다. 그러나 앞으로는 생체융합 소재를 개발하는 방향으로 전환될 것이다. 생체융합 소재는 구조적 기능을 하는 임플란트 체에 생리활성물질 등이 융합된 소재를 말하며, 융합된 생리활성물질은 그 방출 속도가 미미하여 지속적인 치유기능을 발휘할 수 있어야 한다. 치밀한 티타늄 임플란트 표면에 코팅된 생리활성 물질은 생체 내에서 급속히 용해되어 그 효과를 지속적으로 기대하기 어렵지만, 다공성 임플란트의 경우에는 미세 다공성의 공간에 생리활성물질을 탑재하고 있으면서 모세관 현상에 의해 서서히 방출시킬 수 있어 골유도성(osseointegration) 및 골전도성(osseococonductivity) 증진에도 효과적으로 작용할 것이다.

최근들어 골과 인체 조직 치료를 목적으로 하는 다공성 지지체(scaffold)들에 대한 연구가 떠오르고 있다. 치과나

정형외과적 임플란트는 하중을 지탱하는 구조적 역할을 수행하지만 조직공학에서의 다공성 지지체들은 신생골 또는 새로운 조직을 재형성시키는 역할을 하기 때문에 세포 분화를 위한 생리활성물질이 담지된 상태를 유지하는 정도의 기계적 특성만 요구되어 진다. 따라서 의료용 임플란트는 강도와 탄성계수가 높지만 해서는 좋은 효과를 기대하기 어렵다. 순수 티타늄(cp Ti)의 탄성계수는 약 110GPa 이상에 달하고 사람의 피질골의 경우 부위에 따라 10~30GPa 정도로 그 차이가 크기 때문에 임플란트 시술 후에는 비교적 탄성계수가 작은 피질골에 충분한 응력이 전달되지 못하는 응력차폐(stress-shielding)현상이 발생하여 골 주위조직의 퇴화를 일으킨다(Oh et al., 2003). 결과적으로 강도는 높고 탄성계수는 낮아야 하는데 둘 사이의 관계는 일반적으로 비례관계에 있기 때문에 적절한 수준의 기계적 특성이 필요하다고 하겠다.

본 실험에서 티타늄 원소재의 인장강도와 탄성계수는 478MPa과 140GPa로 높게 측정 되었으며, 각 소결방법에 의한 다공성 티타늄 임플란트 시편들 에서는 인장강도 71~230MPa, 탄성계수 11~21GPa로 낮게 측정되었다. 다공성 시편들의 인장강도에서는 원소재 대비 50% 이하로 강도의 저하가 일어났으나 <Table 1>에 제시된 인간의 피질골에 대한 인장강도 범위와 탄성계수 범위에 매우 흡사한 범위로 접근한 것을 볼 수 있었다. 따라서 다공성 티타늄 임플란트를 제조함에 있어서 기공율과 소결방법 등을 적절히 조절한다면 사람의 뼈와 유사한 임플란트를 제조할 수 있을 것이다.

V. 결 론

인간의 골 조직을 대체하기 위한 임플란트는 구조적 특성을 위해 특정 기준치 이상의 기계적 성질을 지녀야 하며, 치유기간의 단축 또는 적용 대상을 증가시키기 위한 기능적 특성을 겸비해야 한다. 이러한 이유에서 다공성 티타늄 임플란트의 발전 가능성이 크다고 하겠다. 다공성 임플란트의 기공 크기와 기공율 그리고 제조방법을 적절히 개발한다면 사람의 뼈와 유사한 기계적 성질과 생체융합 소재의 개발이 가능하리라 판단된다. 본 실험에서 다공성 티타늄 임플란트를 제조하기 위해 사용한 세 가지의 소결 방법에서는 각각 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 고진공로 소결법: 원소재 대비 인장강도는 낮아졌으나 인간의 피질골 보다는 약 80MPa 가량 높은 특성을 보였으며 탄성계수는 21GPa로 피질골과 거의 유사한 수치를 나타내었다. 기공율은 9%로 다른 소결방법들 보다 치밀하게 소결되는 양상을 보였다. 이는 소결 시간이 오래 걸렸기 때문으로 판단된다.

2. 통전 활성 소결법: 시편의 모양을 원하는 대로 설계할 수 있고 10분 이내의 단시간에 소결을 완료할 수 있었으나 실험군 중에서 인장강도가 가장 낮았고 기공율이 높은 것으로 보아 치밀한 소결체를 이루지 못한 것으로 보인다.

3. 전기 방전 소결법: 소결이 이루어지는 시간이 400 μ s 정도로 매우 짧았으며 기계적 특성치도 인간 피질골의 특성치 범위 내에 포함되는 것으로 보아 가장 바람직한 소결 방법으로 나타났다. 그러나 축전기 용량에 의존하여 소결 여부가 결정되므로 치과용 임플란트 제조에는 유용하나 정형외과용 임플란트처럼 큰 제품을 제조하는데는 어려움이 있을 것으로 보인다.

다공성 티타늄 임플란트는 각각의 소결방법에 따라 제작이 가능하였다. 인장강도는 전기방전소결 시편이 인간 피질골의 특성치와 가장 유사하였고 탄성율은 통전소결 시편이 가장 유사하였으며 전체적인 강도값은 고진공로

에서 소결된 시편이 가장 높았다. 본 실험에서는 소결 방법에만 국한하여 연구하였지만 구형 분말 입자의 크기를 조절하거나 2차 가공 또는 열처리 등을 병행하여 연구한다면 최적의 제조 공법을 설계할 수 있으리라 기대된다.

참 고 문 헌

- 심재동, 석현광. 생체의료용 티타늄합금의 연구개발 동향. 생체재료학회지, 15(4), 176-183, 2011.
- 조유정, 김영훈, 장형순, 강태주, 이원희. 다공성 티타늄 임플란트의 생체적합성 증진을 위한 복합 표면처리에 관한 연구. 한국재료학회지, 18(5): 229-234, 2008.
- Amy J. Wagoner Johnson, Brad A. Herschler. A review of the mechanical behavior of CaP and CaP/polymer composites for applications in bone replacement and repair. Acta Biomaterialia, 7, 16-30, 2011.
- Ik-Hyun Oh, Naoyuki Nomura, Naoya Masahashi, Shuji Hanada. Mechanical properties of porous titanium compacts prepared by powder sintering. Scripta Materialia, 49, 1197-1202, 2003.
- Jung-Hoon Lee, Jin-Young Ju, Cheol-Ho Kim, Yong-Deck Shin. A Study on Optimum Spark Plasma Sintering Conditions for Conductive SiC-ZrB₂ Composites. Journal of Electrical Engineering & Technology, 6(4), 543-550, 2011.
- Y. B. An, W. H. Lee. Synthesis of porous titanium implants by environmental-electro-discharge-sintering process. Materials Chemistry and Physics, 95, 242-247, 2006.