Journal of Korean Powder Metallurgy Institute
Vol. 14, No. 1, 2007

Spark plasma sintering에 의한 Ti-6Al-4V 합금분말의 성형성

김재호 · 이진규 · 김택수*
한국생산기술연구원 신소재본부 나노소재팀

Consolidation Behavior of Ti-6Al-4V Powder by Spark Plasma Sintering

J.H. Kim, J.K. Lee and T.S. Kim*
R&D Division for Advanced Materials, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 406-130, Korea
(Received January 29, 2007; Accepted February 12, 2007)

Abstract Using spark plasma sintering process (SPS), Ti-6Al-4V alloy powders were successfully consolidated without any contamination happened due to reaction between the alloy powders and graphite mold. Variation of microstructure and mechanical properties were investigated as a function of SPS temperature and time. Compared with hot isostatic pressing (HIP), the sintering time and temperature could be lowered to be 10 min. and 900°C, respectively. At the SPS condition, UTS and elongation were about 890 MPa and 24%, respectively. Considering the density of 98.5% and elongation of 24%, further improving the tensile strength would obtain by increasing the SPS pressure.

Keywords : Ti-6Al-4V alloy, Spark plasma sintering, Powder metallurgy, Mechanical property

1. 서 론

Ti 합금은 비강도, 내식성 및 고온강도 등이 우수한 대표적 경량 고강도 재료로서, 항공 우주산업은 물론 자동차 및 중화학 공업의 핵심부품으로 활용되어지고 있지만, 그 응용범위를 확대시키려는 연구 또한 매우 활발히 진행되고 있다.[1-2] 예를 들면 Ti 합금은 F22 전투기 무게의 약 40%, 헬기 무게의 약 20%를 차지하고 있으며, 최근에는 생체재료로서의 활용도 지속적으로 증가되고 있다[3].

이와 같은 중요성에도 불구하고, 대부분의 Ti 합금 부품은 복잡한 주조공정의 반복과 절삭공정을 이용하여 제조되고 있으며, 결과적으로 소재의 대량손실이 불가피하게 이루어지고 있다. 예를들어, 다양한 Ti 합금 중 가장 보편화 및 실용화 되어, 항공기 및 발전기용 압축기, 팬디스크, 베인 또는 블레이드, 화학탱크, 경량베어링, 스포츠 유틸리티 등으로 활용되고 있는 Ti-6Al-4V의 경우, 기계가공 시 디스크의 경우 약 80%, 베인은 50%, 임펠러는 30%의 가공손실이 발생되고 있는 실정이다.[4] 그러므로, 이를 개선하기 위해서는 분말야금과 같은 정밀성형 기술을 활용하여 소재 손실 및 절삭가공을 최소화 할 필요가 있다.

일반적으로 사용하는 Ti합금분말의 제조 및 성형공정은 각각 HDH(hydration-dehydration)[5] 및 고온등압성형(Hot Isostatic Pressing; HIP)을 들 수 있다.[6] 그러나, HDH Ti 분말제조공정의 경우, 고온재료이며 산화가 매우 잘되는 Ti합금을 비교적 손쉽게 제조할 수 있다는 장점이 있지만, 그 일련의 수소화-분쇄-탈수소화 공정이 다소 복잡하고 분말의 형상이 불균일한 각형이며 조성의 제어가 매우 어렵다는 단점이 있다. HIP 공정의 경우, 매우 정밀하여 고부가가치의 Ti합금부품을 제조하는데 있어서는 적합하지만, 부품

*Corresponding Author : [Tel : +82-32-850-0409; E-mail : tskim@kitech.re.kr]

단가 인하 및 범용부품으로의 활용에 대한 수요를 맞추기 위해서는 생산성이 확보된 새로운 성형기술의 개발이 절실한 형편이다.

본 연구의 목적은 가스분무 Ti-6Al-4V 합금분말을 성형하는데 있어서, spark plasma sintering(SPS) 기술을 활용하고, 그에 따른 최적 성형조건을 도출하는데 있다. SPS 기술은 기존의 대표적 분말야금기술인 Hot Pressing Sintering 기술에 비해, 비교적 저온 및 고속 가압소결이 가능하여 합금분말의 장점 -급속응고조직- 을 유지할 수 있다고 보고되어지고 있다.

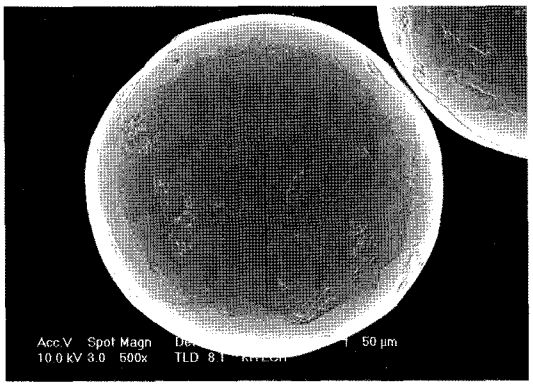

Fig. 1. Optical micrograph of Ti-6Al-4V alloy powder.

2. 실험방법

본 연구를 위해 가스분무공정을 이용하여 제조한 Ti-6Al-4V 합금분말(Advanced Specialty Metals 사)을 사용하여 SPS를 실시하였으며, 이때 분말의 입도는 약 63~150 μm이었다. 그림 1에 나타낸 바와 같이 플라즈마 분사공정을 이용하여 제조한 Ti-6Al-4V 합금분말의 형상은 거의 진구형에 가깝고, 표면도 비교적 깨끗하며, 위성분말의 형성을 볼 수 없었다.

SPS를 이용한 본 합금분말의 최적 성형 조건을 도출하기 위해, 온도와 시간의 함수로서, 실험을 실시하였다. 이때 온도의 변화는 950°C, 1000°C, 1050°C로 모두 10분간 유지시켰으며, 시간의 함수로서는 900°C에서 10 min, 20 min, 30 min으로 변화시켜 성

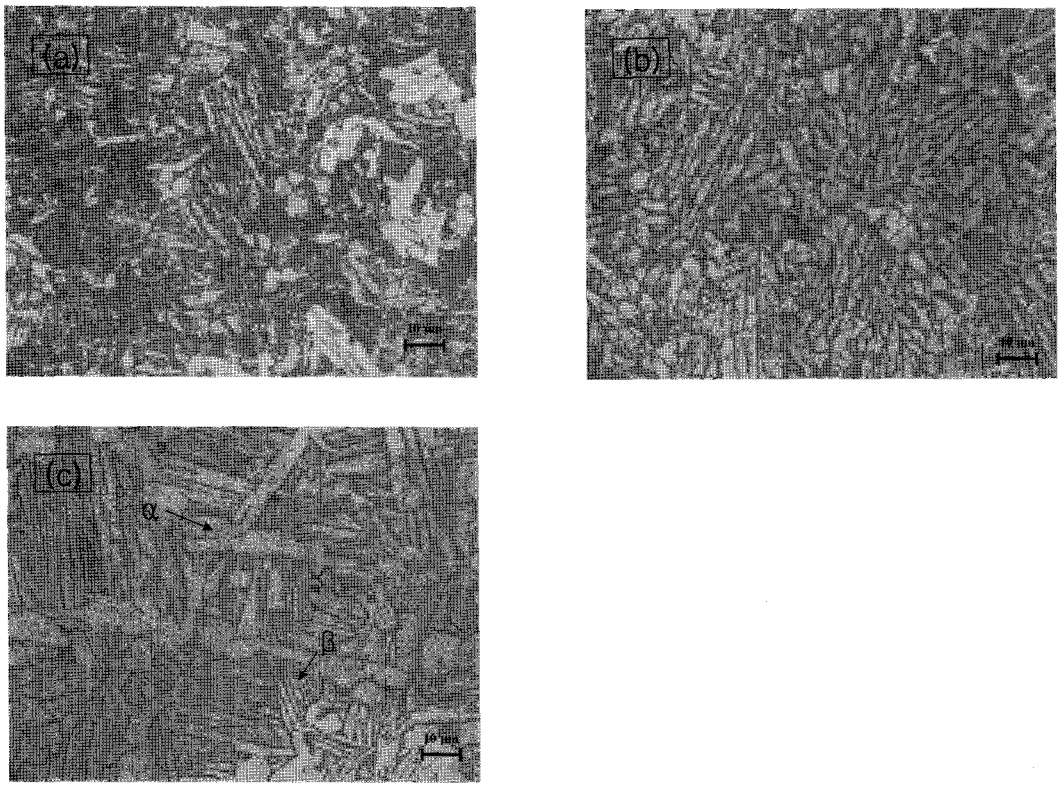

Fig. 2. Microstructure of Ti-6Al-4V alloy powder compacts SPSed with the time of 10 min (a), 20 min (b) and 30 min (c).

말과의 탄화반응을 최소화하기 위해 BN을 금형 내부에 약 0.5 mm두께로 균일하게 도포하였다. 성형 후 몰드와 Ti 합금분말간의 반응여부를 EDS분석을 통하여 분석하였다. 이때, 승온속도는 40°C/min이었다.

SPS 성형체의 특성을 구명하기 위하여, 광학현미경을 이용하여서 SPS 온도와 시간에 따른 성형체의 미세조직을 관찰하였고, 인장시험을 실시하였다. 미세조직은 성형체를 100 ml 증류수에 6 ml 65% 질산, 3 ml 40% 불산 첨가 부식액에서 10초간 부식한 후 관찰하였고, 인장시험은 상온에서 1×10/sec의 속도로 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

그림 2는 Ti-6Al-4V 합금분말의 SPS 시간 -10 min (a), 20 min (b), 30 min (c)-에 따른 미세조직의 변화로서, 소결 온도는 900°C로 고정하였다. 소결밀도는 약 98.7%이었으며, 전반적으로 α 및 α+β 영역이 나타남을 알 수 있다. 여기서 α영역은 흰 부분이고 다른 부분은 Widmannstatten 조직이다. 전반적으로 소결시간이 증가함에 따라서 입자성장이 이루어지지만, 10분과 20분까지의 입자성장보다는 30분 소결 후 약 2~3배 이상 증가됨을 알 수 있다. 그림 3은 소결온도 -950°C (a), 1000°C (b), 1050°C (c)에 따른 미세조직의 변화로서 전반적으로 미세조직의 커다란 차이는 발견할 수 없었다. 일반적으로 보고된 바와 같이 온도가 증가됨에 따라 대체적으로 Widmannstatten 조직으로 부터 바스켓-위브형으로 약간의 상변태가 일어남을 확인할 수 있다. 온도의 증가에 따라 약간의 미세조직의 성장을 확인할 수 있지만, 전반적으로 급속응고 조직의 미세화는 유지되어 있어서 특성의 향상을 예상할 수 있다.

그림 4는 SPS 공정 중 금형과 시편의 반응을 확인하기 위해 각 조건별로 성형한 시편의 EDS 분석

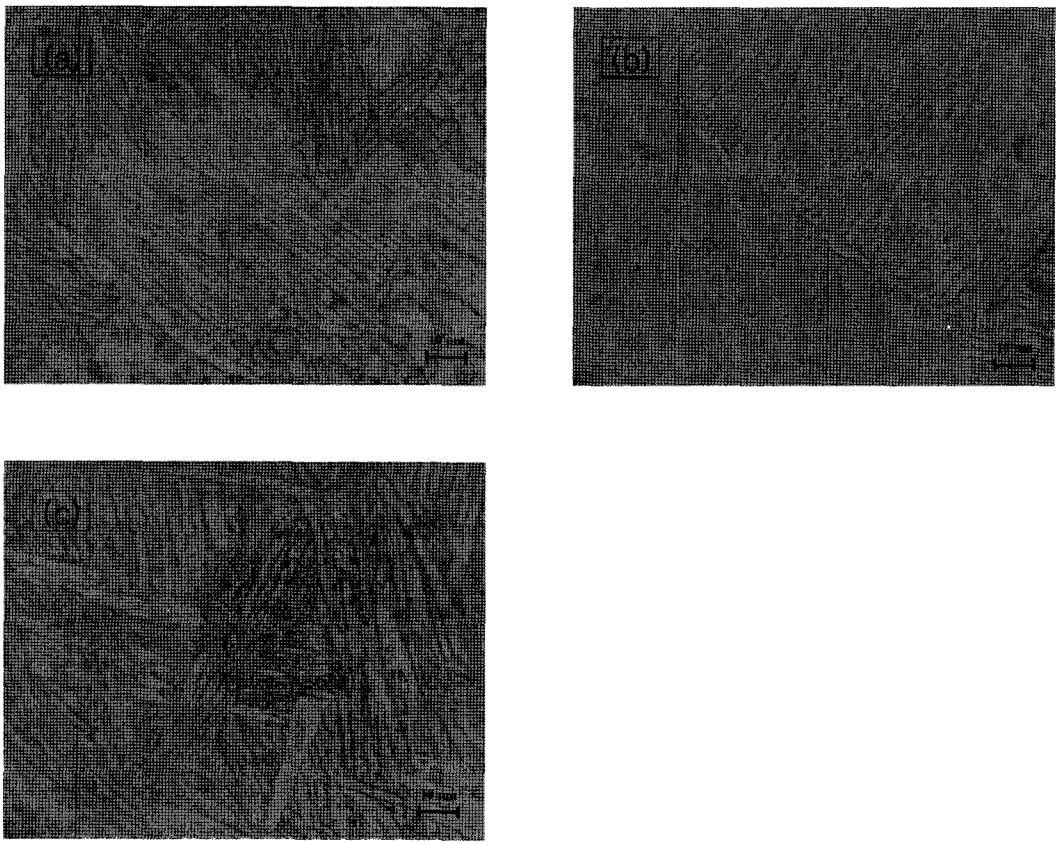

Fig. 3. Microstructure of Ti-6Al-4V alloy powder compacts SPSed with the temperature of 950°C (a), 1000°C (b), 1050°C (c).

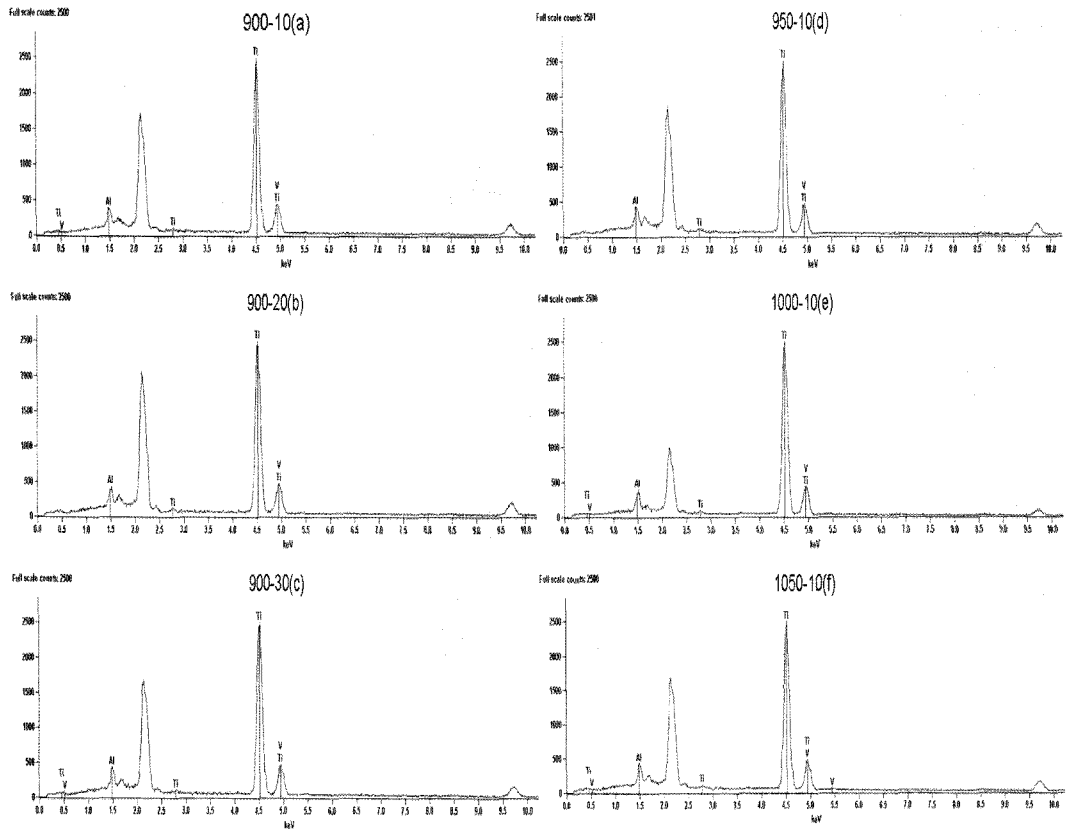

Fig. 4. EDS traces of the SPSed bulk for detecting the chemical reaction between graphite mold and Ti-6Al-4V with the time of 10 min (a), 20 min (b) and 30 min(c) at 900 °C, and with the temperature of 950°C (d), 1000°C (e) and 1050°C (f) for 10 min.

피크이다. 이는 graphite mold 와 Ti 합금은 Ti+C →TiC 반응을 쉽게 생성하므로 분말 성형에 있어서 일반 몰드나 아주 보편적인 그래파이트 몰드를 사용할 수 없다고 알려져 있기 때문이다. 분석결과 모든 조건에서 C(Carbon) 피크가 검출되지 않았음을 알 수 있으며, 이로서 그래파이트 몰드와 Ti-6Al-4V 합금분말과의 소결 시 탄화반응이 발생되지 않았다고 판단하였다. SPS 공정은 pulsed current 및 그래파이트 몰드의 저항열이 동시에 시편에 작용하여 소결을 이루는 공정이므로, HIP 등과 같이 단순한 저항열에 의한 소결에 비해 성형속도가 신속하다는 장점이 있다. 그럼에도 불구하고, 그래파이트 몰드와 Ti 합금분말간의 반응에 기인하여, Ti 합금분말의 성형에 있어서 SPS 공정의 활용이 극히 제한적으로 시행되어져 왔다. 본 공정 중에서 SPS의 비교적 신속한 소결특성 및 BN을 이용한 적절한 도포두께의 제어에 기인하여 탄화반응의 발생없이 성형이 이루어질 수 있

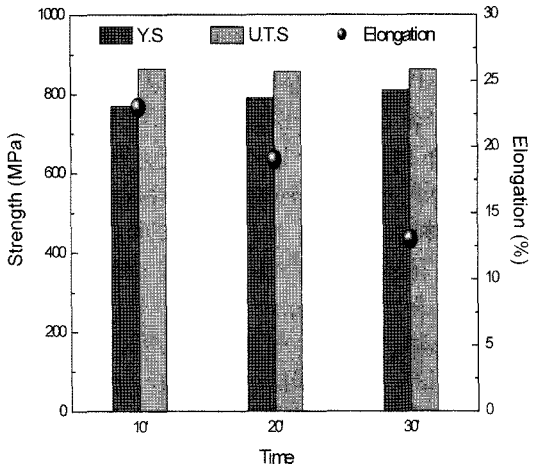

Fig. 5. Tensile strength and elongation of SPSed Ti-6Al-4V alloy powder compacts with the time (min.).

었다고 판단된다.

SPS 시간과 온도에 따른 기계적 특성을 확인하기

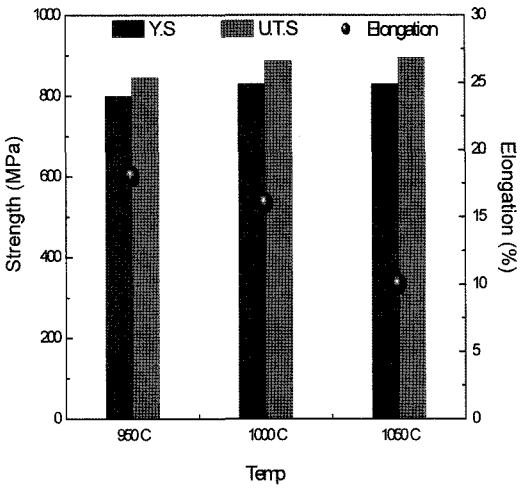

Fig. 6. Tensile strength and elongation of SPSed Ti-6Al-4V alloy powder compacts with the temperature (°C).

위해 인장 시험을 실시하고 그 결과를 그림 5 및 그림 6에 나타내었다. 그림 5는 SPS 온도를 900°C로 고정하고 SPS시간(10분, 20분, 30분)의 효과를 확인하기 위한 것으로서, 시간이 증가함에 따라서 항복강도와 UTS는 약 790 MPa 및 약 890 MPa로 거의 유사하게 유지되나, 연신율은 10분 소결 시 약 24%로부터, 20분과 30분 후에는 각각 19% 및 13%로 감소됨을 알 수 있다. 이는 소결시간의 증가에 따라 입자의 성장에 기인한 것으로 판단된다. 그림 6은 SPS 온도변화(950°C, 1000°C, 1050°C)에 따른 인장강도 및 연신률의 변화로서, 이때 SPS 시간은 그림 5에서의 최적 조건인 10분으로 고정하였다. SPS 시간의 변화에 따른 인장특성의 변화와 유사하게 SPS 온도의 증가에 따른 항복강도와 UTS가 각각 800~815 MPa 및 880~890 MPa 로 비슷하였다. 반면에, 연신률은 온도가 증가함에 따라 18%에서 10%까지 떨어짐을 알 수 있었다. 그림 5와 6을 정리하여 보면, SPS 공정을 활용한 Ti-6Al-4V 합금분말의 성형 시에는 저온에서 신속하게(900°C에서 약 10분) 실시함이 가장 적당하며, 이는 급속응고 조직의 유지와 관련이 있다고 판단된다. 또한 SPS 공정 중 pulsed current에 의한 분말의 cleaning 효과 및 분말 표면 활성화 효과에 기인하여, 비교적 저온에서 양호한 성형이 이루어질 수 있었을 것이다. 기존의 HIP 공정 등이 수 시간 동안 작은 시편을 제조하는 것에 비하여, canning 및 degassing 공정을 생략한

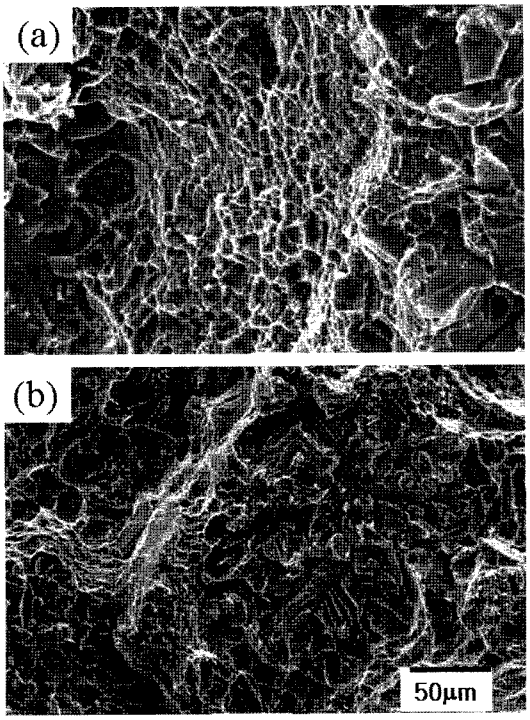

Fig. 7. Fractography of SPSed and tensile tested Ti-6Al-4V alloy powder compacts at the temperatures of 900°C and 1050°C.

SPS 공정은 Ti 합금의 PM응용 범위를 확장 할 수 있는 단초가 될 수 있으리라 판단된다. 또한, 약 98.5%의 성형체 밀도 및 20%이상의 연신률을 고려할 때, SPS 압력을 증가시킬 경우 강도의 증가가 예상된다.

그림 7은 SEM을 이용하여 관찰한 성형체의 파단면으로서, 저온(900°C)에서는 전형적인 연성파괴의 증거인 딤플조직이 나타나는 반면, 1050°C에서는 주로 벽계파괴가 발생하고 국부적인 연성파면을 나타내고 있어서, SPS 온도 증가에 따른 연신률 감소를 잘 설명해주고 있다.

4. 결 론

Ti-6Al-4V 합금분말을 SPS 공정을 이용하여 성형한 결과, 탄화반응 등이 발생되지 않은 밀도 약 98.5%의 건전한 성형체를 얻을 수 있었다. 미세조직의 변화는 시간 및 온도가 증가함에 따라 조대해졌다. SPS시간 및 온도의 변화에 따른 항복 및 인장강

도는 커다란 차이를 보이지 않았지만, 연신률은 시간 및 온도가 증가함에 따라 급격히 저하되었다. 최적 성형 조건은 900°C-10분으로 최대인장강도 및 연신률이 각각 890 MPa 및 24%를 나타내었다. Ti 합금 분말의 SPS 성형에 있어서, 본 결과와 더불어 성형 압력의 증가 및 분말입도의 변화 등을 고려한 추가 연구 시 더욱 우수한 성형체 제조가 가능하리라 여겨진다.

참고문헌

1. R. Boyer, G. Welsch and E. W. Colling: ASM International, (1994) 483.
2. A. Gysler and G. Lutjering: Metal. Trans. A, **13A** (1982) 1435.
3. R.R. Boyer: Mater. Sci. Eng. A, **213** (1996) 103.
4. E.O. Ezugwu, J.Bonney and Y.Yamane: J. mater. Proc. Tech., **134** (2003) 233.
5. J.H. Moll and C.F. Yolton: Production of Titanium Powder, ASM HANDBOOK, Vol.7 Powder Metal (1990) 160.
6. J.J. Conway and F.J. Rizzo: Hot Iso Static Pressing of Metal Powders, ASM Handbook, Vol.7 Powder Metal (1990) 605.