

소결된 텅스텐 재료의 용매에 의한 특성 평가

Evaluation on Mechanical Properties of Sintered Tungsten Materials by Solvents

박광모¹, 이상필¹, 이진경^{1*}

Kwang-Mo, Park¹, Sang-Pill Lee¹, Jin-Kyung Lee^{1*}

〈Abstract〉

Tungsten (W) is used as a facing material for nuclear fusion reactors, and it is used in conjunction with structural materials such as copper alloy (CuCrZr), graphite, or stainless steel. On the other hand, since tungsten is a material with a high melting point, a method that can be manufactured at a lower temperature is important. Therefore, in this study, tungsten, which is a facing material, was attempted to be manufactured using a pressure sintering method. Material properties of sintered tungsten materials were analyzed for each solvent using two types of solvents, acetone and polyethylene glycol. The sintered tungsten material using acetone as a solvent exhibited a hardness value of about 255 Hv, and when polyethylene glycol was used, a hardness value of about 200 Hv was shown. The flexural strength of the sintered tungsten material was 870 MPa and 307 MPa, respectively, when acetone and polyethylene glycol were used as solvents. The sintered tungsten material using acetone as a solvent caused densification between particles, which served as a factor of increasing the strength.

Keywords : Facing Material, Nuclear Fusion Reactor, Melting Point, Pressure Sintering Method, Solvent, Flexural Strength

¹ 동의대학교 기계공학과

^{1*} 정희원, 이진경, 동의대학교 기계자동차로봇부품공학부, ^{1*} Division of Mechanical, Automotive, Robot Component Engineering, Dongeui University

E-mail: leejink@deu.ac.kr

E-mail: leejink@deu.ac.kr

1. 서론

핵융합에너지는 다른 에너지원에 비하여 큰 장점을 가지고 있기 때문에 상용화된다면 대체 에너지원으로 사용 될 수 있다.[1-4] 따라서 핵융합 실험로의 건설을 위한 국제 공동 프로젝트인 국제 열핵융합 실험로(ITER, International Thermonuclear Experimental Reactor) 개발이 진행중에 있고 국내에서는 차세대 초전도 핵융합 연구 장치(KSTAR, Korea Superconducting Tokamak Advanced Research)를 독자적으로 개발하여 상용화를 위한 기술개발을 추진하고 있다. 핵융합 구동 과정에서 플라즈마 입자가 1차 내벽에 충돌하여 스퍼터링(Sputtering) 현상이 발생하고 이로 인한 불순물은 에너지 효율을 감소시켜 플라즈마 순도를 감소시킨다. 한편, 다이버터(Divertor)는 노심 내 불순물을 제거하여 플라즈마의 오염을 최소화시키고, 플라즈마의 고온으로부터 진공용기 및 진단장치 등을 보호하는 주요한 장치로서 플라즈마 주변에 불순물을 외부로 유출시키는 역할을 한다. 이와 같이 다이버터는 고성능 플라즈마 대면재 부품(Plasma Facing Component, PFC)으로 핵융합로에서 중요한 장치로써 많은 연구가 국내외에서 진행되고 있다. 이에 적합한 대면재료의 선정, 열속 제어를 위한 대면재료, 구조적 안전성을 가지는 설계와 구조재의 접합 방법 등에 대한 연구가 진행되고 있다.[5-8] 핵융합로의 대면재료로서 텅스텐(W)이 있으며, 구조재료인 구리합금(CuCrZr)이나 흑연 또는 스테인리스강과 접합하여 사용하고 있다. 한편 텅스텐은 고용점의 재료이기 때문에 보다 낮은 온도에서 제조할 수 있는 방법이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 대면재료인 텅스텐을 가압소결방법을 이용하여 제조하고자 하였다. 다양한 제조인들이 있지만 텅스텐 분말 및 소결첨가제가 잘 혼합하도록

용매를 첨부하는데 본 연구에서는 아세톤과 폴리에틸렌글리콜(PEG)의 두 종류의 용매를 이용하여 각 용매에 따른 텅스텐 소결재료의 재료적 특성에 대해 분석하고자 하였다. 그리고 용매에 따른 경도 및 굽힘강도의 기계적 특성변화도 평가하였으며 텅스텐 소결재의 각 부분에 대한 경도 산포도를 분석하기 위하여 와이블 확률분포를 이용하여 경도계수를 측정하였다.[9]

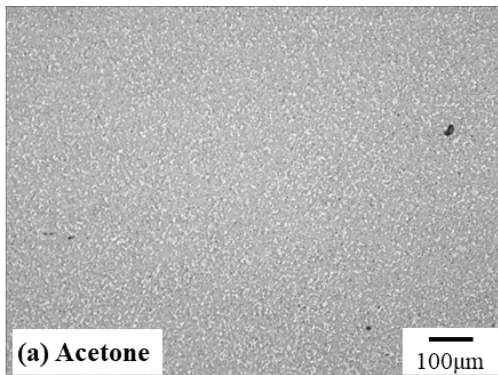
2. 시험방법

본 연구에서는 텅스텐분말과 소결첨가제인 타이타늄을 혼합 후 고온 가압 소결하여 제조하였다. 고온 가압 소결법은 널리 쓰이고 있는 소결 방법으로 소결이 어려운 공유결합 재료의 소결을 가능하게 하고 압력에 의해 소결 구동력을 높여 재료의 미세 기공을 최소화 할 수 있는 장점이 있다. 일반적으로 첨가제의 성분에 따라 소결 시간 및 조건이 달라지지만 대개의 소결 조건에 비해 상대적으로 소결 온도를 낮출 수 있으며 소결 시간을 1-2시간 이하로 유지하여 소결입자의 성장을 최소화 할 수 있다. 텅스텐 입자의 치밀화와 사용온도의 저하를 위하여 소결 첨가제로 타이타늄을 사용하였다. 텅스텐 분말과 소결 첨가제로 사용된 타이타늄 분말과 두 분말을 균질한 성형을 위해 분산제로 아세톤과 폴리에틸렌글리콜의 혼합물을 유선형 볼 밀링 장비를 사용하여 혼합하였다. 혼합 분말의 제조를 위해 혼합물의 배합 속도와 유지시간은 각각 160 rpm과 6 시간으로 하였다. 볼밀을 사용하여 만들어진 슬러리 상태의 혼합물을 건조하여 분말의 형태로 만들어 200 μm 의 mesh를 가진 체를 이용하여 입자를 과립상태로 만들었다. 분말을 흑연으로 제작된 사각 금형에 채워 넣어 1700°C 소결온도에서 가압소결하여 제

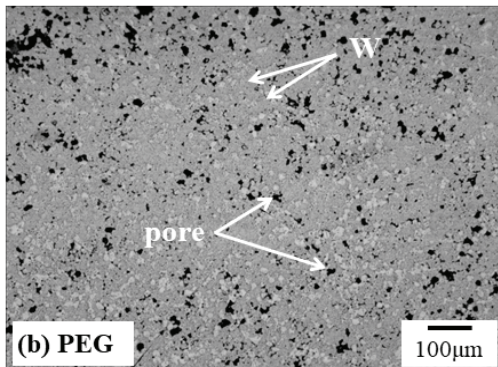
조하였다.[10]

3. 용매에 따른 텅스텐 소결재의 특성 평가

Fig. 1은 용매에 따른 텅스텐 소결재료의 미세 조직을 나타낸다. 텅스텐 재료의 소결온도는 1700 °C이다. 텅스텐 소결재료의 미세조직은 용매로 아세톤을 사용한 경우(Fig. 1(a)) 미세기공감소와 텅스텐 입자 조직이 치밀하게 소결된 것이 확인이



(a) Acetone



(b) PEG

Fig. 1 Microstructure of tungsten materials depending on the solvent types

되며, 용매로 폴리에틸렌글리콜을 사용한 경우 (Fig. 1(b)) 텅스텐 재료의 소결시 폴리에틸렌글리콜의 연소로 인해 헬륨, 이산화탄소 등의 가스의 영향으로 인하여 용매로 아세톤을 사용한 소결재료보다 미세기공이 상대적으로 증가한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 2는 용매에 따른 텅스텐 소결재료의 소결 밀도와 상대밀도를 나타낸다. 상대 밀도는 측정된 소결밀도에 대한 이론밀도의 비율(소결밀도/이론밀도)로서 정리하였다. 텅스텐 소결재료의 상대밀도 결정에 사용한 텅스텐의 이론 밀도는 19.25 g/cm³이다. 텅스텐 소결에 사용한 용매의 변화는 소결재료의 소결밀도에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 텅스텐 소결재료의 소결밀도는 용매로 아세톤을 사용하였을 때 상대적으로 높은 밀도를 나타내고 있으며, 각각 약 16.93 g/cm³ (93 %), 약 15.95 g/cm³ (83 %) 로서 용매로 아세톤을 사용하였을 때 우수한 소결밀도와 상대밀도를 나타내었다.

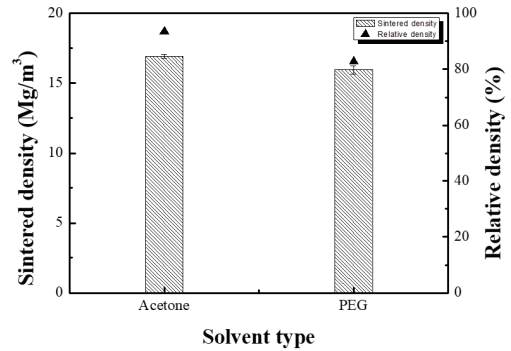
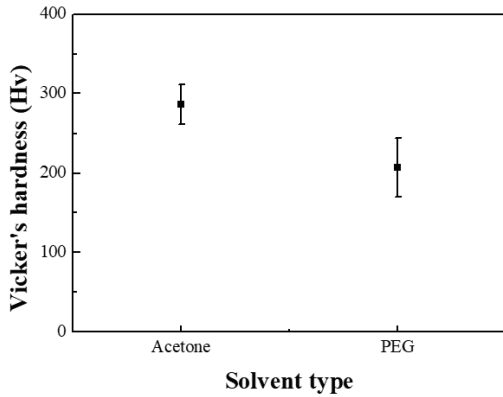


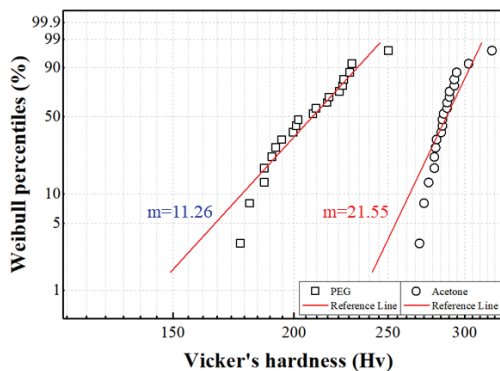
Fig. 2 Effect of solvent type on the sintered density and relative density of tungsten materials

Fig. 3은 용매에 따른 텅스텐 소결재료의 비커스 경도와 와이블 분석을 나타낸다. 20회 이상의 비커스 경도 측정을 통하여 평균 경도값을 산출하

였으며 이를 이용하여 와이블 통계분석을 하였다. 텅스텐 소결재료의 용매로 아세톤이 사용됨에 따라 비커스 경도값이 상승하는 것을 알 수 있다. 이는 텅스텐 소결재료의 미세기공 감소와 미세조직이 치밀화가 일어난 것으로 사료된다. 이에 따라 용매로 아세톤을 사용한 텅스텐 소결재료는 약 255 Hv의 경도값을 나타내었다. 또한 두 재료 모두 산포도가 있기 때문에 와이블 통계분석을 하여 산포도를 평가하였다. 용매로 폴리에틸렌글리콜을 사용한 경우 상대적으로 큰 미세기공으로 인하여



(a) Vicker's Hardness



(b) Weibull modulus

Fig. 3 Effect of solvent type on the vicker's hardness(a) and Weibull modulus of tungsten materials depending on different solvent types

재료의 변동특성을 나타내는 와이블 계수(weibull modulus)가 상대적으로 낮은 11.26를 나타낸 반면 아세톤을 사용한 경우 21.55로 높은 값을 나타내었다.

Fig. 4는 용매에 따른 텅스텐 소결재료의 굽힘 강도를 나타낸다. 텅스텐 분말을 사용하여 제조된 텅스텐 재료는 최대 굽힘하중에 도달 후 하중이 급격히 감소하면서 파단되는 취성파괴거동을 나타내었다. 텅스텐 소결재료의 굽힘강도는 용매로 아세톤과 폴리에틸렌글리콜을 사용하였을 때, 각각 약 870 MPa, 307 MPa를 나타내었다. 용매로 아세톤을 사용한 텅스텐 소결재료는 입자 간 치밀화가 일어났으며 이는 강도가 증가하는 요인이 된다.

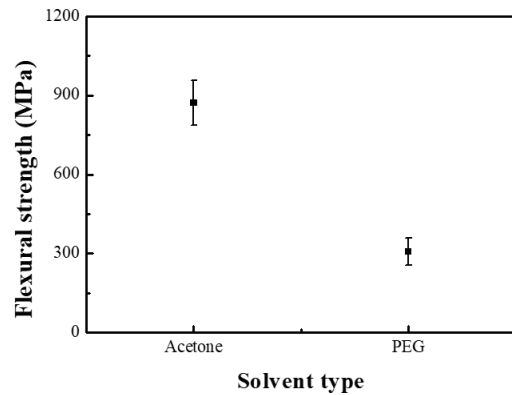


Fig. 4 Relationship between the porosity and the flexural strength in the tungsten materials

Fig. 5는 용매에 따른 텅스텐 소결재료의 굽힘 강도를 나타낸다. 텅스텐 입자 크기는 각 텅스텐 소결재료의 미세조직에서 측정하여 평균값으로 산출하였다. 텅스텐 소결재료의 입자의 평균 입경은 용매로 아세톤과 폴리에틸렌글리콜을 사용하였을 때, 각각 약 5.7 μm , 약 21.2 μm 을 나타내었다. 용매로 아세톤을 사용하였을 때 입자 간 치밀화로 인하여 대부분의 텅스텐 입자들이 입내파괴

현상을 보이고 있으며 이는 굽힘강도 증가의 증거가 된다. 용매로 폴리에틸렌글리콜을 사용하였을 때 텅스텐 입자의 조대화를 보이고 있으며 대부분의 텅스텐 입자들이 입계파괴 현상을 보인다. 이는 굽힘강도 저하의 원인이 되는것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 용매에 의한 텅스텐 소결재에 대한 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 텅스텐 소결재료의 소결밀도는 용매로 아세톤을 사용하였을 때 16.93 g/cm^3 (93 %), 폴리에틸렌글리콜을 사용한 경우 15.95 g/cm^3 (83 %)로서 용매로 아세톤을 사용하였을 때 우수한 소결밀도와 상대밀도를 나타내었다.
- (2) 용매로 아세톤을 사용한 텅스텐 소결재료는 255 Hv의 경도값을 나타내었으며 폴리에틸렌글리콜을 사용한 경우 200 Hv의 경도값을 나타내었다. 와이블 통계분석 결과 폴리에틸렌글리콜을 사용한 경우 와이블 계수가 상대적으로 낮은 11.26를 나타낸 반면 아세

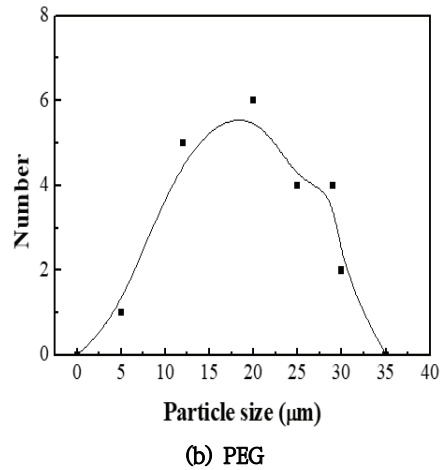
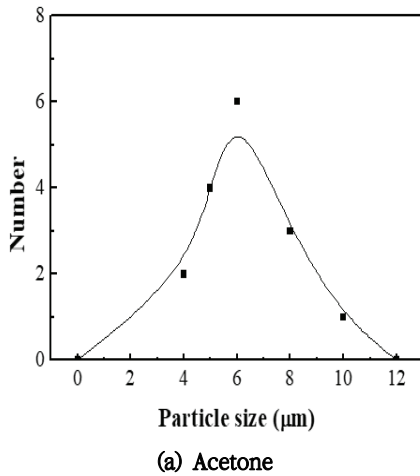
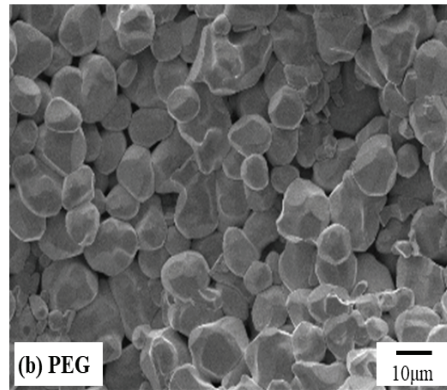
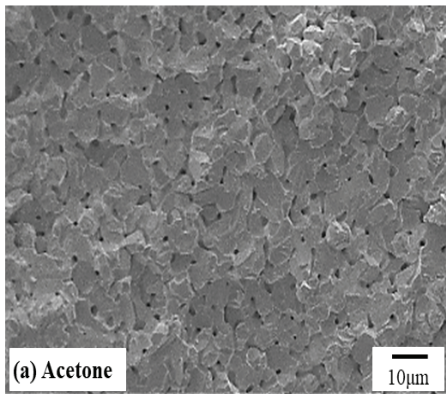


Fig. 5 Average grain size of tungsten materials depending on the solvent

톤을 사용한 경우 21.55로 높은 값을 나타내어 용매로 아세톤이 더욱 효과적이라는 것을 알 수 있었다.

- (3) 텅스텐 소결재료의 굽힘강도는 용매로 아세톤과 폴리에틸렌글리콜을 사용하였을 때, 각각 870 MPa 및 307 MPa을 나타내어. 용매로 아세톤을 사용하는 것이 더 높은 강도를 가지는 텅스텐 소결재료를 제조할 수 있었다.

참고문헌

- [1] 김웅채, 대한전기협회 전기저널, 383, 27-30, (2008)
- [2] Rieth, M., Dudarev, S.L., Gonzales de Vicente, S.M., Aktaa, J., Ahlgren, T. and Antusch, S. J. Nucl. Mate., 432, 482-500, (2013)
- [3] Ongena, J. and Ogawa, Y. Energy Policy 96, 770-778, (2016)
- [4] Pitts, R.A., Carpentier, S., Escourbiac, F., Hirai, T., Komarov, V., Ligo, S., Kukushkin, A.S., Loarte, A., Merola, M., Sashala Naik, A., Mitteau, R., Sugihara, M., Bazylev, B. and Stangeby, P.C. J. Nucl. Mate., 48-56, (2013)
- [5] Carty, C.W. Platinum Metals Review, 30, 184-195, (1986)
- [6] Riesch, J., Buffiere, J.Y., Hoschen, T., Di Michiel, M., Scheel, M., Linsmeier, C., and You, J.H. Acta Materialia 61, 7060-7071, (2013)
- [7] Du, J., Hoschen, T., Rasinski, M., Wurster, S., Grosinger, W. and You, J.H. Composites Science and Technology 70, 1482-1489, (2010)
- [8] Zhang, L.H., Jiang, Y., Fang, Q.F., Zhang, T., Wnag, X.P., Liu, C.S. Mate. Sci. & Eng. A 659, 29-36, (2016)
- [9] 장운근, 한국산업융합학회논문집, 22,2,147-154, (2019)
- [10] 이문희, 김성원, 이종호, 황승국, 이진경, 이상필, 한국산업융합학회논문집, 23,4,669-674, (2020)

(접수: 2021.04.09. 수정: 2021.05.11. 게재확정: 2021.05.12.)