

Mo/Al₂O₃ 경사기능재료의 제조와 물리적특성

최 연구

한국과학기술원 재료계면연구센터

*Max Planck Institute for Metall Research, Stuttgart, Federal Republic of Germany
(1999년 2월 9일 접수)

Fabrication and Physical Properties of Mo/Al₂O₃ Functionally Graded Materials

Yeon Gyu Choi

Center for Interface Science and Engineering of Materials, Korea Advanced Institut of Science and Technology, Chungnam, Taejeon 305-701, Korea

(Received February 9, 1999)

초 록

Mo/Al₂O₃ 경사기능재료를 고온가압소결법으로 제조하였다. 혼합 분말을 attrition mill로 25시간 분쇄하였으며 graphite 몰드에 100Al₂O₃, 80Al₂O₃-20Mo, 65Al₂O₃-35Mo, 50Al₂O₃-50Mo, 35Al₂O₃-65Mo, 20Al₂O₃-80Mo, 및 100 Mo(vol %) 층을 차례로 쌓은 후 고온가압소결 하였다. 고온가압소결된 시편의 소결밀도는 이론 밀도의 98%에 도달하였으며 미세 조직은 단계적으로 변화하였다. 순수 Al₂O₃ 층에서 순수 Mo층으로 갈수록 Vickers 경도는 18 GPa에서 3 GPa로 감소하였다. 4점 쪼임강도의 값은 377±60 MPa 이었다. Notch beam 방법으로 측정된 파괴인성은 홈의 깊이에 의존하는 경향을 보여주었는데 홈의 침두가 0Mo-100Al₂O₃ 층에 있을 때는 4.66MPa^{1/2}, 35Mo-65Al₂O₃ 층에 있을 때에는 6.16 MPa^{1/2} 값을 나타내었다. Laser flash 방법으로 측정된 열전도도는 상온에서 13.46×10⁶ m²/s 이었으며 1000°C에서 6.99×10⁶ m²/s 으로 감소하였다.

ABSTRACT

Functionally graded Mo/Al₂O₃ composites have been fabricated by hot pressing. Powder premixes of different mixing ratios were prepared by attrition milling for 25h. Green compacts were made by stacking 100Al₂O₃, 80Al₂O₃-20Mo, 65Al₂O₃-35Mo, 50Al₂O₃-50Mo, 35Al₂O₃-65Mo, 20Al₂O₃-80Mo, and 100 Mo(vol.%) layer in a graphite die and hot-pressing. Specimens were densified over 98% theoretical density. The microstructure changed stepwise from layer to layer; vickers hardness decreased from 18 GPa of an Al₂O₃ layer to 3 GPa of a Mo layer. The fracture toughness measured by the notch-beam method depended on the notch depth. When the notch tip was in the first layer of 100Al₂O₃, K_{Ic} was 4.66 MPa^{1/2}. On the other hand, K_{Ic} increased to 6.16 MPa^{1/2} when the notch tip was introduced up to the second layer of 35Mo-65Al₂O₃. The thermal conductivity measured by the laser flash method decreased from 13.46×10⁶ m²/s at room temperature to 6.99×10⁶ m²/s at 1000°C.

Key words : Mo/Al₂O₃ Composite, Functionally Graded Material, Hot Pressing, Fracture, Toughness, Thermal Conductivity

1. 서 론

우주항공산업의 발달은 극심한 열적 환경에서 견딜 수 있는 세라믹-세라믹 또는 세라믹-금속 복합체의 개발을 요구하고 있다. 경사기능재료(FGM)는 재료의 내부조성, 미세조직, 열전도도 등이 점진적으로 변화하도록 설계된 새로운 형태의 복합체이다. 우주선 엔진 전문가들의 평가에 의하면 우주선의 동체표면과 연소실(Combustion chamber)의 벽은 약 2000K까지 올라가고 액체수소로 냉

각시키는 재료 내면과의 온도차이는 1000K 이상이다.¹⁾ 이 온도차이에 의해 발생하는 열응력에 견딜 수 있는 복합체를 제조하기 위해서 다양한 제조 방법들을 적용할 수 있지만 분말을 이용한 성형 방법이 경사기능재료를 제조하기 위한 가장 좋은 방법이다. 분말을 이용한 방법은 재료 설계에 따라 내부조성과 미세조직을 다양하게 변화시킬 수 있고 또한 자유롭게 여러 가지 형태의 제품을 생산할 수 있기 때문이다.²⁾

금속-세라믹 접합의 경우 heterointerface 근처에서는

과도한 열응력이 발생하고, 세라믹 층에 균열이 쉽게 생성되기 때문에 직접적으로 접합재료를 제조하는 것은 쉽지 않다. 지금까지 이러한 열응력에 견딜 수 있는 디스크 형태의 경사기능재료가 다양한 소결 방법, 즉 상압소결(pressureless sintering),³⁾ 고온가압(Hot pressing),⁴⁾ 열간 정수압(Hot isostatic pressing)^{2,3)}에 의해 제조되었다. 경사기능재료를 제조할 때는 다음의 세 가지 사항을 특히 고려하여야 한다. 1) 높은 온도와 산화 분위기에 노출되는 재료표면에 대한 열 저항력과 부식 저항력 2) 낮은 온도 쪽의 면에 관계하는 재료의 기계적 인성 3) 열응력 이완 작용.¹⁾

Mo/Al₂O₃의 복합체는 높은 고온강도를 가지고 있어 고온재료로 사용되고 그 외에도 특히 전자 분야에서 사용되는 열 이온 에너지 변환기(thermoionic energy converters) 또는 용탕에서 온도 측정을 위해서 사용하는 thermoelement의 보호 관으로 사용되기 때문에 많은 연구가 진행되고 있다.⁶⁾ 본 연구의 목적은 분말의 혼합 비율에 따라 총상적으로 설계하여 Mo/Al₂O₃ 복합체의 경사기능재료를 제조하고 열적, 기계적 성질 즉 굽힘 강도, 파괴인성, 열전도도 등을 측정함으로써 우주항공 재료로서의 응용 가능성을 보고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 출발원료 및 성형체 제조

본 실험에서 사용한 출발원료인 Al₂O₃(A16, Alcoa, USA) 분말의 평균 입도 크기는 0.68 μm, 순도는 99.5%이며 Mo(H.C. Starck Germany) 분말의 평균 입도는 15.62 μm 순도는 99.95% 이었다. 이들 분말의 특성은 Table 1에 나타내었다. 총상적으로 구성된 경사기능재료의 성형체를 제조하기 위하여 분말을 부피 비율에 따라 원하는 조성으로 칭량한 후 isopropanol을 용매로 하고 Al₂O₃분과 Al₂O₃용기를 이용하여 attrition mill로 25시간 동안 습식 혼합 분쇄하였다. 혼합 분쇄된 분말은 oven에서 isopropanol을 증발 건조시키고 45 mesh, 100 mesh체로 과립화한 후 Granulometer HR 850(Cilas-Alcata, France)을 이용하여 평균입도를 측정하였다. 본 실험에서 사용했던 분말의 혼합비율과 그 비율에 따라 계산한 각 조성의 이론 밀도 값을 Table 2에 나타내었다. 혼합 분

Table 2. Mixing Ratio of Powder for Mo/Al₂O₃-FGM and Calculated Density

	Mixing ratio (Vol.%)	Density(g/cm ³)
Mo/Al ₂ O ₃	0 : 100	3.96
Mo/Al ₂ O ₃	20 : 80	5.21
Mo/Al ₂ O ₃	35 : 65	6.15
Mo/Al ₂ O ₃	50 : 50	7.09
Mo/Al ₂ O ₃	65 : 35	8.03
Mo/Al ₂ O ₃	80 : 20	8.97
Mo/Al ₂ O ₃	100 : 0	10.22

쇄하는 중에 Mo 분말의 표면이 산화되므로 산화 층이 형성된 Mo 분말은 950°C에서 수소 분위기 하에서 환원 시켰고 밀폐된 공간에 저장하였다. 일정한 두께의 층으로 구성될 수 있도록 미리 계산된 이론 밀도에 의해 혼합 분말을 칭량한 후 직경 3.5 cm의 graphite몰드에 한 층씩 일축 가압하여 시편을 제조하였다. 이 때 몰드와 시편과의 반응을 방지하기 위하여 가압하기전 graphite die 내벽은 BN으로 도포 하였다.

고온가압소결은 감압장치가 있는 유도 가열로 에서 10⁻⁴~8×10⁻⁴ mbar 진공 하에서 하였다. 시편은 27.5 MPa 초기 압력 하에서 상온에서 650°C까지 15 K/min으로, 650°C에서 1750°C까지는 10K/min으로 승온하였으며 동시에 압력은 계단식(stepwise)으로 50 MPa까지 증가시켰고 1750°C에서 2시간 유지하였다. 온도는 수정창(quartz window)을 통하여 pyrometer로 측정하였다.

2.2. 측정 및 분석

소결밀도는 ASTM C20에 따라 Archimedes의 원리를 이용하여 측정하였다. 혼합비율에 따라 점진적으로 변화하는 미세구조를 조사하기 위하여 시편을 15, 6, 3, 1, 및 0.25 μm의 다이아몬드 페이스트로 차례로 경면 연마한 후 주사전자현미경(SEM, Cambridge-Instruments)으로 관찰하였다. 탄성률은 Puls-Echo 방법에 의한 측정기(USIP 11, Krautkraemer, Germany)로 longitudinal(C_l)과 transversal(C_t)의 파장을 측정해 다음의 식을 이용하여 계산하였다.

$$E = G * \frac{3 - 4 * (\frac{C_l}{C_t})^2}{1 - (\frac{C_l}{C_t})^2} \quad (1)$$

$$G = \rho * C_t^2 \quad (2)$$

ρ : density

Table 1. Characteristics of Raw Materials

Substance	Density (g/cm ³)	Average particle size(μm)	Purity (%)	Impurity (%)
Al ₂ O ₃	3.96	0.68	>99.5	Na ₂ O, SiO ₂ , Fe ₂ O ₃
Mo	10.22	15.62	>99.95	Fe, K, W

기계적 성질을 측정하기 위해 시편을 4×5×25 mm이 되도록 절단한 후 각각 30, 15, 6, 9, 3, 1 μm의 다이아몬드 페이스트에서 차례로 연마하였고 각 시편의 모서리도 연마를 함으로서 미소결함에 의한 강도저하요소를 제거하였다. Vickers 경도계를 이용하여 하중 0.5 Kg, 시간 10s에서 생긴 압흔으로 경도를 측정하였고 만능시험기(Zwick, Germany)를 이용하여 4점 꺾임 강도와 파괴인성을 측정하였다. 상부 지지 점간 거리 7 mm, 하부 지지 점간 거리 20 mm인 치구를 이용하여 0.1 mm/min의 크로스헤드 속도로 측정하였다. 이때 인장응력이 걸리는 층은 Mo/Al₂O₃=0/100이다. 파괴인성은 notch-beam 방법으로 측정하였는데 인장응력이 걸리는 면에 Diamond saw로 각각 0.65 mm, 2 mm 홈(notch)을 냈다. 열전도도는 직경 10 mm, 높이 5 mm 실린더 형태로 시편을 절단한 후 laser flash 방법을 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

경사기능재료를 제조하기 위해 평균 입도가 각각 15.6 μm, 0.68 μm인 Mo분말과 Al₂O₃ 분말을 혼합비율에 따라 칭량한 후 attrition mill로 혼합 분쇄하였다. Fig. 1은 25시간 분쇄한 Mo/Al₂O₃ 혼합 분말의 평균 입도 크기를 나타낸다. Mo의 출발 분말의 입도가 크기 때문에 Mo 분말의 양이 증가할수록 혼합 분말의 평균 입도가 증가하였다. attrition milling 동안에 Mo의 표면에 산화 층이 형성되었기 때문에 분쇄된 각 조성의 분말은 환원시켜야만 한다. Petrdlik에 의하면 Mo의 환원 온도는 700°C에서 850°C 사이이고 Espe에 의하면 1000°C~1100°C 사이에 일어난다고 하였다.⁷⁾ 이 논문들의 결과에 의해서 혼합 분쇄된 분말을 950°C에서 수소 분위기에서 환원시켰고, 그 분말에 잔존하는 산소의 양을 측정하기 위해 화학 분석해 본 결과 500 ppm이었다. 환원된 분말은 진공

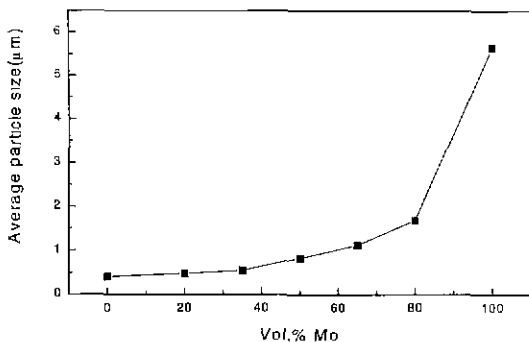


Fig. 1. Average particle size with the mixing ratio of Mo- and Al₂O₃ powder after attrition milling for 25 h.

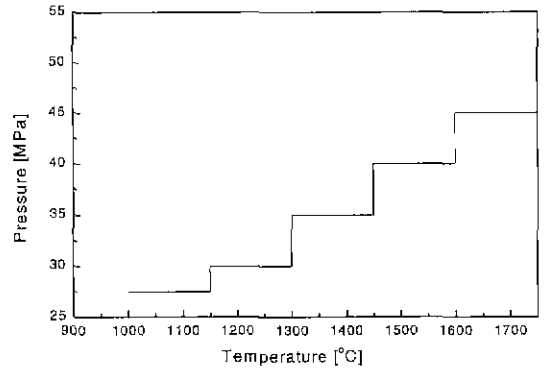


Fig. 2. Pressure increase during heating to hot pressing temperature of 1750°C.

건조기(desiccator)에 보관하였다.

입축 성형할 때 Mo 표면에 산화된 층이 금속 분말의 접촉을 방해하고 이 산화층은 Mo/Al₂O₃ 복합체의 소결에 부정적인 영향을 미치며 또한 소결체의 강도를 저하시킨다.⁸⁾ 이 산화층이 미치는 영향을 조사하기 위해 환원된 분말과 환원되지 않은 분말로 성형체를 제조한 후 소결 하였다. 환원된 분말로 제조한 시편의 소결 밀도는 6.92 g/cm³으로 이론 밀도의 98%에 도달한 반면, 환원되지 않은 분말로 만든 시편의 소결 밀도는 6.66 g/cm³으로 이론 밀도의 91%밖에 되지 않았다. 즉 환원된 분말로 제조한 시편의 소결 밀도가 환원되지 않은 시편보다 약 7% 높았다.

금속 몰드에서 경사기능재료의 성형체를 성형한 후 고온가압소결을 하기 위해 성형체를 흑연(graphite) 몰드에 옮기는데에는 층간의 분리 또는 성형체의 부피 증가로 흑연 몰드에 넣을수 없는 문제가 있기 때문에 곧 바로 흑연 몰드에서 일축 압축으로 성형체를 제조하였다. 고온가압소결할 때에는 승온 속도에 맞추어 가압 속도도 동시에 조절하여야 한다. 따라서 고온가압소결할 때 승온 속도와 일정한 관계를 유지하도록 압력을 조절하였다. Fig. 2는 본 실험에서 실행했던 온도와 압력과의 관계를 나타낸다 또한 소결후 냉각할 때 Mo과 Al₂O₃의 서로 다른 열팽창계수와 그로 인한 이방성의 수축률 때문에 균열이 발생할 수가 있다. 이 균열을 방지하기 위하여 냉각 중에는 압력을 제거하였다. Fig. 3은 서로 다른 열팽창계수를 가지고 있는 두 물질을 직접 접합했을 때 열팽창계수의 차이 때문에 냉각 중에 발생할 수 있는 응력을 Hsueh 와 Evans⁹⁾의 모델로 만들어진 컴퓨터 프로그램을 이용하여 계산한 값을 보여준다. Fig. 3(a)는 Al₂O₃ 층에 최대의 인장응력(250 MPa)이 발생함을 보여준다. 이 인장응력을 감소시키기 위해 시편 중앙에 Mo/Al₂O₃ 50/50 층을 삽입하여 조사해보니 최대 인장응력이 160

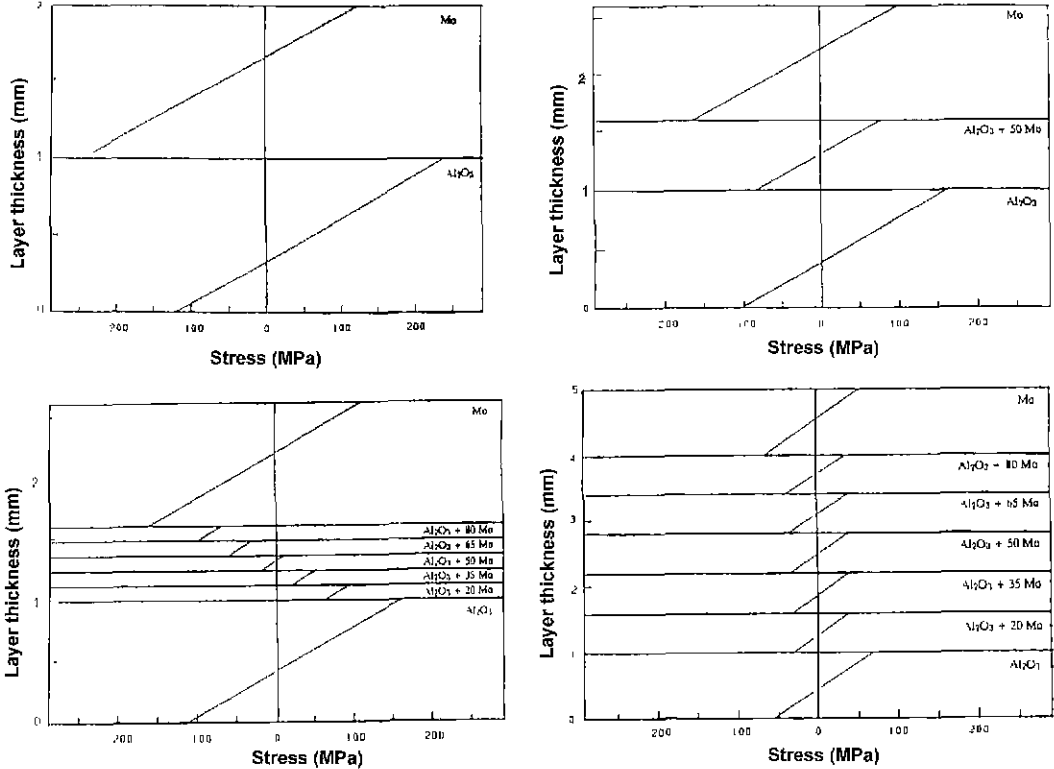


Fig. 3. Calculated thermal residual stresses of different Mo/Al₂O₃ Composites. a) bilayer bonding of Mo and Al₂O₃, b) trilayer bonding of Al₂O₃/50Al₂O₃ · 50Mo/Mo, c) multilayer bonding of Al₂O₃/Al₂O₃ · xMo/Mo and d) multilayer bonding such as Al₂O₃/Mo-FGM.

MPa로 감소하였다(Fig. 3 (b)). 계속해서 Mo/Al₂O₃ 50/50 층 대신에 똑같은 두께를 가진, 혼합비율에 따라 5층으로 구성된 경사기능재료를 삽입하였다. Fig. 3(c)에서 보는 것처럼 Al₂O₃ 층에서 인장응력의 감소는 없었다. 그래서 본 실험에서 제작한 Mo/Al₂O₃ 경사기능재료를의 시편에 대해 조사해보니 Al₂O₃ 층에 가장 적은 인장응력을 나타내었다(Fig. 3(d)). 즉 Fig. 3(a)에서 처럼 Mo와 Al₂O₃를 직접 접합했을 때 보다 분말의 혼합비율에 따라 시편 내부의 조성을 단계적으로 변화시킨 Mo/Al₂O₃ 경사기능재료를의 열팽창계수의 차이가 작기 때문에 인장응력이 감소되었다. 발생할 수 있는 균열을 살펴보고자 고온가압소결된 시편을 경면연마한 후 광학현미경과 주사전자현미경으로 조사해보니 미세 균열이 나타나지 않았다. 따라서 혼합비율에 따라 내부 조성을 단계적으로 변화시키면 열응력을 감소시킬 수 있어서 여러 층으로 구성된 경사기능재료를의 층과 층 사이에서 발생할 수 있는 균열을 방지할 수 있다.

50 MPa 압력 하에서 1750°C에서 2시간 동안 고온가압한 소결체의 밀도는 6.95 g/cm³으로 98% 이상의 이론

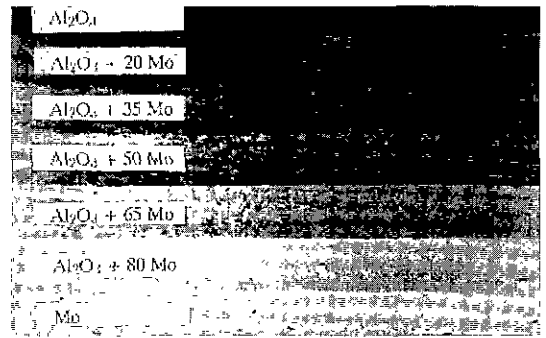


Fig. 4. Cross Section of fabricated Mo/Al₂O₃-FGM.

밀도에 도달했다. Fig. 4는 주사전자현미경으로 조사한 소결체의 단면으로 내부의 5개 층은 두께가 일정한 반면 외부의 두개 층은 두께가 다르다. 그 이유는 소결 후 후 연 몰드에 도포된 BN이 시편과 반응하여 소결체 표면에 잔존하기 때문에 밀도를 측정하기 전에 외부층을 연마하였기 때문이다. 내부층만 비교할 경우 이론적으로 계산한 두께와 소결체의 두께는 잘 일치한다. Fig. 5는 주사전자현미경사진으로 분말의 혼합비율에 따라 단계적으로

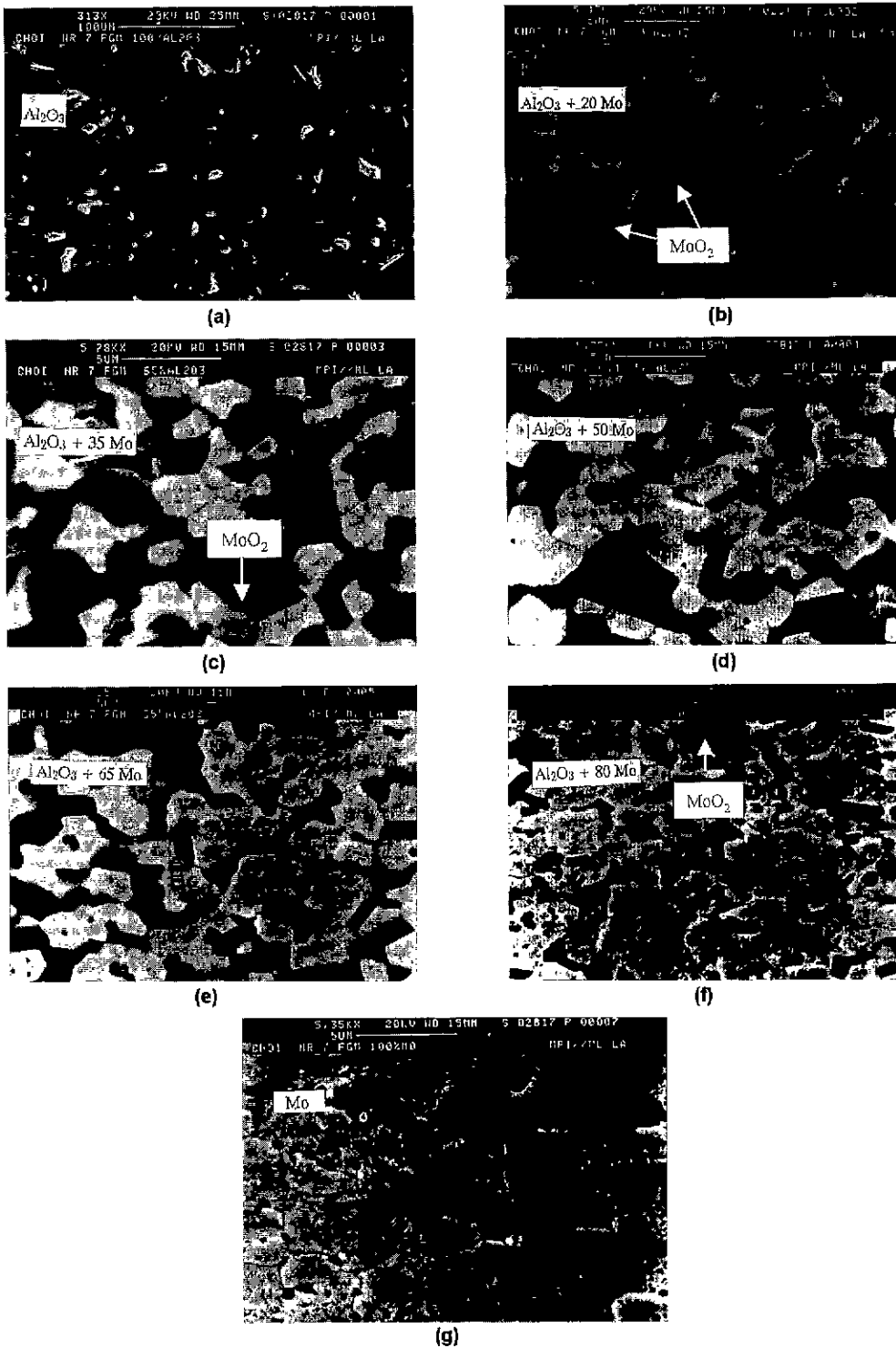


Fig. 5. Microstructures of hot pressed Mo/Al₂O₃-FGMs: (a) 0% Mo, (b) 20% Mo, (c) 35% Mo, (d) 50% Mo, (e) 65% Mo, (f) 80% Mo and (g) 100% Mo.

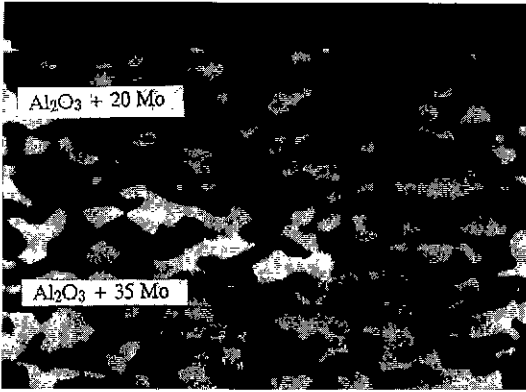


Fig. 6. Microstructure of interface region between Mo/Al₂O₃ 20:80 layer and Mo/Al₂O₃ 36:65 layer.

변화하는 미세구조를 볼 수 있다. 환원된 분말에 약 500 ppm 잔존해 있는 Mo의 산화층과 시편 성형할 때 새롭게 형성된 Mo의 산화층을 Fig. 5(b), (c), (f)에서 볼 수 있다. Mo의 혼합비율이 증가할수록 Mo의 입자 경계층이 증가하는 것을 알 수 있고, 세라믹 분말의 혼합비율이 높아짐에 따라 Al₂O₃의 입자와 입자의 접촉면이 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉 이것은 Al₂O₃ 분말속에 Mo 분말이 잘 분산되어 있음을 보여주는 것이다. Fig. 6은 Mo/Al₂O₃ 20/80층과 Mo/Al₂O₃ 35/65층의 경계영역으로 경계층을 쉽게 구별할 수 없을 정도로 혼합 비율에 따라 Mo 분말은 Al₂O₃ 분말속에 Al₂O₃분말은 Mo 분말속에 잘 분산되었다.

Fig. 7은 각 층에 대한 Vickers 경도치로 Mo/Al₂O₃ 0/100 층의 경도 값이 Mo/Al₂O₃ 100/0 층보다 크며 Mo의 혼합비율이 높을수록 18 GPa에서 3 GPa로 감소하였다. 이 경도 값은 혼합비율에 따라 각각의 층을 따

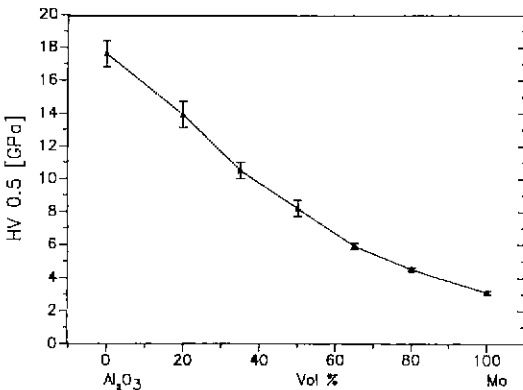


Fig. 7. Variation of Vickers hardness with mixing ratio of Mo/Al₂O₃.

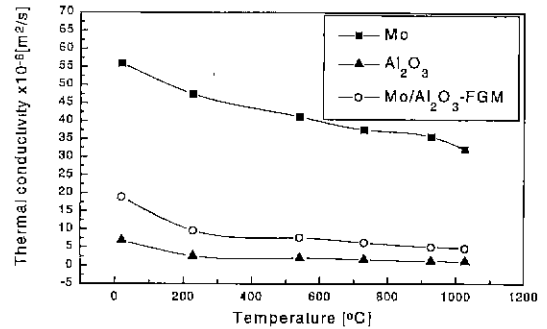


Fig. 8. Temperature dependence of calculated thermal conductivity of Mo/Al₂O₃-FGM, pure Mo¹³⁾ and pure Al₂O₃.¹³⁾

로 제조하여 측정된 값과 일치하였다.¹⁰⁾ 꺾임 강도의 값은 377±60 MPa 이고 notch-beam 방법으로 측정된 파괴인성 값은 홈(notch)의 깊이에 따라 변화하는 것을 볼 수 있다. 홈(notch)의 깊이가 0.65 μm 일 때, 즉 홈(notch)의 침투가 Mo/Al₂O₃ 0/100 층에 있을 때는 4.66 MPa¹²⁾ 이고, 2 μm 일 때, 즉 홈(notch)의 침투가 Mo/Al₂O₃ 35/65 층에 있을 때에는 6.16 MPa¹²⁾ 값을 나타내었다. Mo를 35 vol.% 함유한 Mo/Al₂O₃ 층이 순수한 Al₂O₃ 층보다 높은 연성과 인성을 가지고 있기 때문에 파괴 에너지와 파괴인성 값이 크다.¹¹⁾ 따라서 Mo/Al₂O₃ 35/65 층의 파괴인성 값이 Mo/Al₂O₃ 0/100 층의 파괴인성 값보다 크다.

Fig. 9은 laser flash 방법으로 측정된 열전도도 (thermal conductivity) 값을 보여준다 열전도도 값은 온도가 증가할수록 상온에서 13.46×10⁶ m²/s 값이 1000°C에서 6.99×10⁶ m²/s로 감소하였다. 이 값과 이론적으로 계산한 값을 비교하기 위하여 다음의 식을 이용하여 Mo/Al₂O₃ 경사기능재료의 이론 열전도도 값을 계산하였다.¹³⁾

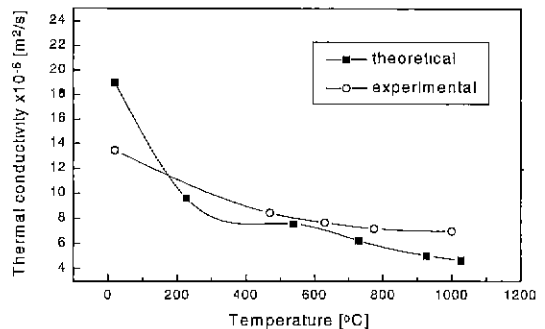


Fig. 9. Temperature dependence of calculated and experimentally measured thermal conductivity of Mo/Al₂O₃.

$$\alpha_n = \frac{l_1 + l_2 + \dots}{\frac{l_1}{\alpha_1} + \frac{l_2}{\alpha_2} + \dots} = \frac{l}{\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\alpha_i}}$$

여기서 l_1, l_2, l_3 는 n층으로 구성된 시편의 각 층 두께를 나타내고 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \dots$ 는 각 층의 열전도도를 나타낸다. 내부온도의 소거법에 의하여 계산된 열전도도 값은 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 보는 것처럼 열전도도는 온도가 증가할수록 감소하고 Mo/Al₂O₃ 경사기능재료의 열전도도 값은 순수한 Mo⁽¹³⁾와 Al₂O₃⁽¹³⁾ 사이에 놓여 있음을 알 수 있다. Fig. 9에는 Mo/Al₂O₃ 경사기능재료 시편의 실험 값과 이론적으로 계산한 값을 도시하였다. 실험 값과 계산한 값이 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 출발원료로 Mo 분말과 Al₂O₃ 분말을 사용하여 Mo/Al₂O₃의 경사기능재료를 고온가압법으로 제조하고 그 특성을 평가하였다. Attrition mill로 혼합된 분말을 Mo/Al₂O₃ 비가 0/100에서 100/0으로 7단계 변화도록 충전하고 50 MPa 압력하에서 1750°C에서 2시간 동안 가압소결하여 소결밀도가 이론밀도의 98%인 소결체를 얻었다. Al₂O₃ 분말의 혼합비율이 증가할수록 Al₂O₃의 입자와 입자의 접촉면이 증가하는 Matrix 구조가 형성되었고, 세라믹 분말의 비율이 높은 곳에서 Mo 분말이 Al₂O₃ 분말 속으로 잘 분산되었다. 예상했던 것처럼 Al₂O₃층의 경도 값이 Mo 층보다 높고 Mo 비율이 증가할수록 18 GPa에서 3 GPa로 감소하였다. 4-Point 방법으로 측정했던 꺾임 강도 값은 377±60 MPa 이고 notch-beam 방법에 의해 측정된 파괴인성 값은 홈(notch)의 깊이에 따라 변화하는 것을 보여주었다. Laser flash 방법으로 측정된 열전도도 값은 이론적으로 계산하였던 값과 비교적 잘 일치하였다. 본 연구 결과는 Mo/Al₂O₃ 계 재료를 경사기능재료로서 응용 가능성을 보여준다

REFERENCES

1. R. Watanabe and A. Kawasaki, "Recent Development of Functionally Gradient Materials for Special Application to Space Plane," Proc. of Symp. on Composite Materials of ICAM 91, Strasbourg, France, 197-208 (1991).

2. A. Kawasaki, M. Tanaka and R. Watanabe, "Powder Metallurgical Fabrication of SiC-AlN/Mo Functionally Gradient Materials"; pp. 189-196 in Ceramic Transactions, Vol. 34, Functionally Gradient Materials. Edited by J. Birth Holt, M. Koizumi, T. Hirai, Zuhair A. Munir, The American Ceramic Society, OH, 1995.
3. K. Atarashiya, Y. Ishhida and T. Nagai, "Functionally Gradient Materials of the System Ni-AlN by Pressureless Sintering"; pp. 141-148 in Ceramic Transactions, Vol. 34, Functionally Gradient Materials. Edited by J. Birth Holt, M. Koizumi, T. Hirai, Zuhair A. Munir, The American Ceramic Society, OH, 1995.
4. A. Kawaski and R. Watanabe, "Fabrication of Disk-Shaped Functionally Gradient Materials by Hot Pressing and Their Thermomechanical Performance"; pp. 157-164. in Ceramic Transactions, Vol. 34, Functionally Gradient Materials. Edited by J. Birth Holt, M. Koizumi, T. Hirai, Zuhair A. Munir, The American Ceramic Society, OH, 1995.
5. H. Yamaoka, M. Yuki, K. Tahara and T. Irisawa, "Fabrication of Functionally Gradient Materials by Slurry Stacking and Sintering Process"; pp. 165-172 in Ceramic Transactions, Vol. 34, Functionally Gradient Materials. Edited by J. Birth Holt, M. Koizumi, T. Hirai, Zuhair A. Munir, The American Ceramic Society, OH, 1995.
6. G.H.M. Gubbels, "Interface in Composites of Alumina in a Molybdenum Matrix," *Mater. Sci. Eng.*, **A135**, 135-139 (1991)
7. C. Agte and J. Vacek, "Wolfram und Molybdaen," pp. 72-73, Akademie-Verlag, Berlin, 1989.
8. H.J. Balschin, "Pulvermetallurgie," pp. 82-150, VEB Wilhelm Knapp Verlag, 1954.
9. C.H. Hsueh, A.G. Evans, "Residual Stresses in Metall/Ceramics Bonded Strips," *J. Am. Ceram. Soc.*, **68**(5), 241-248 (1985).
10. D. Bai, "Mechanische und physikalische Eigenschaften von Metall/Keramik-Verbundwerkstoffen fuer den Einsatz bei hohen Temperaturen." Ph. D. Thesis, Stuttgart, Germany 1992.
11. D.T. Rankin and J.J. Stigkich, "Hot Pressing and Mechanical Properties of Al₂O₃ with an Mo-Dispersed Phase," *J. Am. Ceram. Soc.*, **54**(6), 277-281 (1971).
12. W.J. Parjer, R.J. Jenkins, C.P. Butler, G.L. Abbott, "Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity and Thermal Conductivity," *J. Appl. Phys.*, **32**, 1679-1684 (1961).
13. Y.S. Touloukian, "Thermal Diffusivity," IFI/Plenum Press, New York Washington, 1973.