MoSi₂ 복합재료의 굽힘강도 특성

이상필* · 이현욱* · 이진경* · 배동수**

*동의대학교 기계공학과

**동의대학교 신소재공학과

Flexural strength properties of MoSi₂ based composites

Sang-Pill Lee*, Hyun-Uk Lee*, Jin-Kyung Lee* and Dong-Su Bae**

*Department of Mechanical Engineering, Dong-Eui University, Busan, Korea

**Department of Materials Science & Engineering, Dong-Eui University, Busan, Korea

KEY WORDS: Nb sheet Nb 판재, Fabricating condition 제조조건, Sintered density 소결밀도, Flexural strength 굽힘강도, Microstructure 미세구조

ABSTRACT: The flexural strength of MoSi₂ based composites reinforced with Nb sheets has been investigated, based on the detailed examination of their microstructure and fractured surface. Both sintered density and porosity of Nb/MoSi₂ composites were also examined. Nb/MoSi₂ composites were fabricated by different conditions such as temperature, applied pressure and its holding time, using a hot-press device. The volume fraction of Nb sheet in this composite system was fixed as 10%. The characterization of Nb/MoSi₂ composites were investigated by means of optical microscopy, scanning electron microscope and three point bending test. Nb/MoSi₂ composites represented a dense morphology at the interfacial region, accompanying the creation of two types of reaction layer by the chemical reaction of Nb and MoSi₂. Nb/MoSi₂ composites possessed an excellent density at the fabricating temperature of 1350°C, corresponded to about 95% of theoretical density. The flexural strength of Nb/MoSi₂ composites were greatly affected by the pressure holding time at the same fabricating temperature, owing to the large suppression of porosity in the microstructure. Especially, Nb/MoSi₂ composites represented a good flexural strength of about 310 MPa at the fabricating condition of 1350°C, 30MPa and 60min, accompanying the pseudo-ductile fracture behavior by the deformation of Nb sheet and the interfacial delamination.

1. 서 론

국제유가의 상승에 따라 환경 및 경량화를 고려한 구조용 부품의 시장규모가 크게 증가하고 있다. 특히 선박, 항공기, 자동차 등의 수송기계 분야에서는 차세대 고효율 엔진의 개발을 위하여 연료효율, 경제성을 고려한 초고온 내열재료로서 세라믹스와 금속간화합물에 주목하고 있다. (Petrovic and Vasudervan, 1999; Courtright, 1999; 이상필 등, 2008) 실리사이드(Silicides) 계열의 금속간화합물인 몰리브덴 실리사이드(MoSi₂)는 우수한 고온특성, 2030°C의 높은 용점 및 니켈합금보다 낮은 밀도 (6.3mg/m³) 때문에 차세대 엔진의 여파기, 터빈 블레이드, 베인, 컴버스터, 노즐등과 같은 내열부품의 경량화에 기대되고 있다. 특히, MoSi₂ 재료는 SiC, Si₃N₄, Al₂O₃, TiB₂, TiC와 같은 다양한 세라믹 강화재료와 열역학적 안정성을 가지고 있기 때문에 재질 개선을 위한 복합화가 가능하다. (Meschter and Schwartz, 1989; Yang et al., 1990) 또한 MoSi₂ 재료는 약 1,700°C 까지의 산화분위기에서 산화방지용 피복없이 장시간 사용이 가능하고 니켈합금 및 탄화규소와 동등한 정도의 높은 열전도율과 우수한 전기전도성 때문에 부품의 정형가공을 위한 방전가공이 가능하다. (Shah et al., 1992; 윤한기와 이상필, 2002) 그러나 MoSi₂ 재료의 실용화를 위해서는 상온 취성, 페스트 (Pest) 산화거동, 온도 상승에 따른 항복강도의 감소 등의 결점들이 보완되어야 한다. (Bose, 1992; Chou

and Nieh, 1993) 많은 연구에서 세라믹 강화재 보다 높은 비중을 가지고 있지만 Nb, Ta, W와 같은 연성 내열금속을 사용하는 것이 MoSi₂재료의 인성을 개선하는 것으로 알려지고 있다. 특히, 입자 혹은 단섬유 형태의 내열금속을 강화하여 미세조직의 개선을 추구하는 것 보다 판재 형태의 강화상을 이용하여 구조의 변화를 이용하는 것이 MoSi₂재료의 인성강화에 효과적인 것으로 보고되고 있다. 그러나 이러한 연성 강화재를 첨가한 MoSi₂복합재료에서는 제조공정에서 견고한 계면 화합물이 생성되어 성장하므로 계면반응의 억제가 중요하다. Xiao 등은 Nb 판재를 이용하여 다층구조로 제조한 Nb/MoSi₂ 복합재료에 셰브론(Chevron) 노치를 가공하여 파괴인성시험을 실시하여 MoSi₂ 소결재료의 파괴인성(3.3 MPa · m^{1/2})이 약 5배 정도로 크게 증가함을 보고하였다. (Xiao et al., 1991) Lee 등은 Nb 판재와 MoSi₂ 분말을 조합한 Nb/MoSi₂ 복합재료의 충격특성을 평가하여 고인성화를 위한 적층구조를 평가하였다(Lee et al., 1998). 또한 Nb 판재와 MoSi₂ 판재를 이용하여 제조한 Nb/MoSi₂ 복합재료에서 계면반응층의 성장이 충격특성에 미치는 영향을 평가하여 충격에너지를 최대화할 수 있는 반응층의 두께를 제안하였다. (Lee and Fukunaga, 2000) 특히 MoSi₂ 분말을 ZrO₂ 분말을 소량 첨가한 Nb/MoSi₂복합재료를 제조하여 Si의 확산을 제어함으로써 계면반응층의 성장을 억제할 수 있다는 것을 보고하였다(Lee et al., 2000). 이와 같이 Nb/MoSi₂ 복합재료의 특성에 대한 연구는 연성 강화상을 이용하여

미세구조의 변화를 통한 파괴인성 혹은 충격흡수에너지 등의 인성강화에 주력하고 있다. 그러나 Nb/MoSi₂ 복합재료의 응용범위 확대를 위해서는 제조공정에 관한 소결밀도와 상온강도의 체계적인 평가가 요구된다. 특히, Nb/MoSi₂ 복합재료의 고온 내산화성과 열전도율의 확보뿐만 아니라 열응력의 개선을 위해서는 기지재 영역의 치밀화는 중요한 과제로 생각된다.

본 연구에서는 Nb 판재와 MoSi₂ 분말을 이용하여 상호 적층한 Nb/MoSi₂ 복합재료를 고온가압법으로 제조하여 성형조건에 따른 소결밀도와 상온 굽힘강도 특성을 평가하였다. 또한, Nb/MoSi₂ 복합재료의 굽힘강도 변화를 파악하기 위하여 미세조직 및 굽힘 파단면을 면밀히 관찰하였다.

2. 실험방법

2.1 Nb/MoSi₂ 복합재료의 제조

Nb/MoSi₂ 복합재료의 기지재는 일본신금속(주)의 제품으로서 평균 입자 크기가 약 2.8 μ m 인 MoSi₂ 분말(MoSi₂-F)을 사용하여 제조하였다. 강화재로는 순도가 99.9%인 0.2mm 두께의 Nb판재를 사용하였다. Nb/MoSi₂ 복합재료는 MoSi₂분말과 4장의 Nb판재를 상호 적층하여 사각형상의 흑연금형에 넣고 고온프레스를 사용하여 가압 소결하여 제조하였다. 소결과정 동안 진공도는 1.33 $\times 10^{-2}$ Pa로 유지하였다. Table 1은 Nb/MoSi₂ 복합재료의 제조조건을 나타낸다. Nb/MoSi₂ 복합재료의 제조에서 Nb 판재의 체적율은 10%로 하였으며 제조변수는 제조온도, 제조 가압력 및 가압유지 시간으로 하였다. 제작한 Nb/MoSi₂ 복합재료의 두께는 80mm이고 크기는 8mm $\times$ 20mm이다.

2.2 Nb/MoSi₂ 복합재료의 특성 평가

Nb/MoSi₂ 복합재료의 미세조직과 굽힘강도 특성을 평가하기 위하여 가압소결한 성형체를 시편 크기로 가공하여 표면을 연마하였다. 관찰용 시편편은 #1500의 연마지를 사용하여 연마한 후 0.3 μ m의 입경을 가지는 알루미나(Al₂O₃) 분말로 최종적으로 표면을 연마하여 미세조직을 광학현미경과 주사형 전자현미경으로 관찰하였다. 또한 WD/ED Combined Micro-analyzer(JEOL JXA-8900RL)를 이용하여 Nb/MoSi₂ 복합재료의 계면영역을 분석하였다. Nb/MoSi₂ 복합재료의 소결밀도는 아르키메데스의 원리를 이용한 수중중량법으로 측정하였다. 측정된 소결밀도를 이용하여 Nb/MoSi₂ 복합재료의 기공률을 조사하였다. 기공률(V_p)은 식 (1)을 사용하여 결정하였다. 식 (1)에서 ρ 는 측정된 소결밀도, ρ_c 는 복합재료의 소결밀도를 의미한다. 또한 복합재료의 소결밀도는 식 (2)와 같이 복합법칙으로 산출하였다. 식 (2)에서 ρ_{Nb} 와 ρ_{MoSi_2} 는 각각 Nb (8.57mg/m³)와 MoSi₂ (6.23mg/m³)의 이론밀도를 의미하며 V_{Nb} 와 V_{MoSi_2} 는 복합재료를 구성하는 체적율을 나타낸다. 본 연구에서 Nb/MoSi₂ 복합재료의 이론밀도는 복합법칙에 의해 Nb 강화재의 체적율이 10%인 경우에 6.46mg/m³로 산출되었다.

$$V_p = [1 - (\rho/\rho_c)] \times 100(\%) \quad (1)$$

$$\rho_c = [\rho_{Nb} \times V_{Nb}] + [\rho_{MoSi_2} \times V_{MoSi_2}] \quad (2)$$

Nb/MoSi₂ 복합재료의 강도특성을 평가하기 위하여 0.3 μ m의 알루미나 입자를 사용하여 표면을 연마한 시편편을 사용하여 3점 굽힘시험을 상온에서 실시하였다. 특히 제조온도, 가압력, 가압

Table 1 Fabricating conditions of Nb/MoSi₂ composites.

Volume fraction of Nb sheet (%)	10
Fabricating temperature (°C)	1,200, 1,350, 1,500
Applied pressure (MPa)	20, 30, 40
Pressure holding time (min)	20, 40, 60

Fig. 1 Structure of Nb/MoSi₂ composite and dimensions of its bending test specimen.

시간 변화에 따른 Nb/MoSi₂ 복합재료의 굽힘강도를 평가하였다. Fig. 1은 굽힘 시험편의 치수 및 굽힘하중의 부하방향을 나타낸다. 굽힘 시험편은 두께 8mm, 폭 2mm, 길이 20mm로 제작하였으며 굽힘하중은 외측의 MoSi₂ 층에 부하하였다. 굽힘시험에 사용한 스패(Span) 길이와 크로스헤드(Crosshead)의 속도는 각각 12mm와 0.5mm/min로 하였다. 또한 주사형 전자현미경을 사용하여 굽힘 파괴과정에서 발생하는 Nb 강화재의 파괴형상을 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미세조직과 소결밀도

Fig. 2는 1,350 $^{\circ}$ C의 온도에서 제조한 Nb/MoSi₂ 복합재료의 계면영역을 나타낸다. Nb/MoSi₂ 복합재료는 30MPa의 가압력과 60min의 가압유지시간을 이용하여 제조하였다. 계면 반응층의 성분 및 크기는 WDS (Wave Dispersive Spectrometer)를 사용하여 결정하였다. Nb/MoSi₂ 복합재료의 계면영역의 MoSi₂ 부분에는 소결과정에서 미세한 기공이 많이 형성되어 있는 것을 알 수 있다. 또한 이전의 연구결과에서 나타났듯이, 계면영역에서는 Mo와 Si의 확산에 의해 (Nb, Mo)Si₂와 Nb₅Si₃와 같은 반응 생성물을 형성하였다. (Lee et al., 1998) Nb/MoSi₂ 복합재료의 제조온도가 증가함에 따라 Nb 영역으로 Si원소의 빠른 확산에 의해 계면반응층의 크기는 크게 성장하였다. 계면반응층 두께는 1,200 $^{\circ}$ C의 제조온도에서 약 9 μ m, 1,350 $^{\circ}$ C의 제조온도에서 약 20 μ m, 1,500 $^{\circ}$ C의 온도에서 약 32 μ m를 나타내었다.

Fig. 3은 제조온도의 상승에 따른 Nb/MoSi₂ 복합재료의 소결밀도를 나타낸다. 또한 소결밀도를 이용하여 산출한 Nb/MoSi₂ 복합재료의 기공률을 나타내었다. Nb/MoSi₂ 복합재료는 30MPa의 가압력과 60min의 가압유지시간을 이용하여 제조하였다. 제조온도가 상승함에 따라 Nb/MoSi₂ 복합재료의 소결밀도는 증가하지만 1,350 $^{\circ}$ C의 제조온도 이상에서는 거의 동일하였다. 1,350 $^{\circ}$ C

의 온도에서 제조한 Nb/MoSi₂ 복합재료는 약 6.13mg/m³의 소결밀도를 나타내었다. 이러한 소결밀도는 복합법칙으로 계산한 이론밀도(6.46mg/m³)의 약 95%에 해당하였다. 특히, 1,350 °C의 온도에서 제조한 Nb/MoSi₂ 복합재료의 기공률은 약 3%로서 1,200 °C의 온도에서 제조한 재료에 비해 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 제조온도가 상승함에 따라 MoSi₂ 분말의 결합과 재결정이 원활이 발생한다는 것을 의미한다.

Fig. 4는 Nb/MoSi₂ 복합재료의 소결밀도와 기공률에 미치는 제조 가압력의 영향을 나타낸다. Nb/MoSi₂ 복합재료는 1,350 °C의 온도에서 60min의 가압유지시간을 이용하여 제조하였다. Nb/MoSi₂ 복합재료의 소결밀도는 제조 가압력을 증가함에 따라 거의 일정하게 유지하지만 40MPa의 가압력에서 다소 감소하는 경향을 나타내었다. 40MPa의 가압력에서 Nb/MoSi₂ 복합재료의 기공률은 약 10%로서 30MPa의 가압력으로 제조한 재료의 약 3 배에 해당하였다. 특히, 측정된 소결밀도를 이론밀도로 나눈 상대밀도의 관점에서 보면 Nb/MoSi₂ 복합재료의 소결특성은 약간 차이를 나타내지만 약 90%이상의 상대밀도를 나타내었다. 다시 말하면 가압력을 20MPa, 30MPa, 40MPa로 변화하여 제조한 경우 Nb/MoSi₂ 복합재료의 상대밀도는 각각 약 93%, 약 95%, 약 90%를 나타내었다.

Fig. 2 Interfacial microstructure of Nb/MoSi₂ composites fabricated at 1,350°C and 30 MPa for 60 min.

Fig. 3 Sintered density and porosity of Nb/MoSi₂ composites depending on fabricating temperature.

Fig. 4 Effect of applied pressure on sintered density and porosity of Nb/MoSi₂ composites fabricated at 1,350 °C for 60 min.

Fig. 5는 Nb/MoSi₂ 복합재료의 소결밀도와 기공률에 미치는 가압유지시간의 영향을 나타낸다. Nb/MoSi₂ 복합재료는 1,350 °C의 온도에서 30MPa의 가압력을 이용하여 제조하였다. Fig. 4의 결과와 비교하면 Nb/MoSi₂ 복합재료의 소결밀도와 기공률은 제조 가압력 보다는 가압유지시간에 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다. 다시 말하면 가압유지시간이 증가함에 따라 Nb/MoSi₂ 복합재료의 소결밀도는 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히, 가압유지시간에 따른 Nb/MoSi₂ 복합재료의 상대밀도를 고려하면 가압유지시간을 20분으로 하여 제조한 Nb/MoSi₂ 복합재료는 약 81%의 상대밀도를 나타내는 반면에 가압유지시간이 60분인 경우에는 약 95%의 상대밀도를 나타내었다. 또한 Nb/MoSi₂ 복합재료의 기공률은 가압유지시간이 증가함에 따라 크게 감소하였다. Nb/MoSi₂ 복합재료의 가압유지시간을 20분에서 60분으로 증가함에 따라 기공률은 약 18%에서 약 3%까지 크게 감소하였다.

3.2 굽힘강도 특성

Fig. 6은 제조온도의 변화에 따른 Nb/MoSi₂ 복합재료의 굽힘 하중-변위 곡선을 나타낸다. Nb/MoSi₂ 복합재료는 30MPa의 가

Fig. 5 Effect of pressure holding time on sintered density and porosity of Nb/MoSi₂ composites fabricated at 1,350°C and 30 MPa.

Fig. 6 Load-displacement curve of Nb/MoSi₂ composites depending on fabricating temperatures.

압력과 60min의 가압유지시간을 이용하여 제조하였다. Nb/MoSi₂ 복합재료는 제조온도와 상관없이 세라믹스와 같은 전형적인 취성 파괴거동을 나타내지 않고 균열이 안정적으로 성장하는 준 연성적인 파괴거동을 나타내고 있다. 다시 말하면, 최대 굽힘하중 이후에도 하중이 급격히 감소하지 않고 하중이 서서히 감소하는 파괴거동을 나타내었다. 특히, 1,350°C의 온도에서 제조한 경우, Nb/MoSi₂ 복합재료는 약 230N에서 초기 균열이 발생한 후 하중이 증가하는 파괴거동을 나타내었다. 이러한 준 연성적인 파괴거동은 후술하겠지만 탄성률이 높은 MoSi₂가 초기하중을 지탱하지만 균열이 발생하여 계면으로 진행하면서 Nb 판재의 소성변형을 유발하기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 Nb/MoSi₂ 복합재료의 파단변위는 제조온도가 상승함에 따라 거의 동일하지만 최대 굽힘하중은 차이를 나타내었다.

Fig. 7은 Nb/MoSi₂ 복합재료의 굽힘강도에 미치는 제조온도의 영향을 나타낸다. Nb/MoSi₂ 복합재료는 30MPa의 가압력과 60min의 가압유지시간을 이용하여 제조하였다. Nb/MoSi₂ 복합재료의 굽힘강도는 굽힘하중-변위곡선의 최대하중을 이용하여 산출하였다. Nb/MoSi₂ 복합재료의 굽힘강도는 제조온도의 상

Fig. 7 Effect of fabricating temperature on flexural strength of Nb/MoSi₂ composites consolidated at 30 MPa for 60 min.

승과 더불어 증가하지만 1,500°C의 제조온도에서 급격히 감소하였다. 특히 Nb/MoSi₂ 복합재료는 1,350°C의 제조온도에서 약 310MPa의 굽힘강도를 나타내었다. 이러한 제조온도에 따른 Nb/MoSi₂ 복합재료의 굽힘강도는 Fig. 3에 나타난 소결밀도와 연관된 기공률의 변화에 관계한다. 다시 말하면 제조온도의 증가에 따른 기공률의 감소는 Nb/MoSi₂ 복합재료의 굽힘강도의 상승을 유발하는 것으로 생각된다. 그러나 1,500°C의 온도에서 제조한 Nb/MoSi₂ 복합재료는 비록 1,350°C의 온도에서 제조한 것에 비해 기공률이 다소 증가하지만 굽힘강도는 크게 감소하였다. 이것은 제조온도가 상승함에 따라 크게 성장한 계면반응층이 MoSi₂의 파단과 함께 Nb 판재의 소성변형을 크게 구속하여 급격한 파단을 유발하기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 8은 Nb/MoSi₂ 복합재료의 굽힘강도에 미치는 제조 가압력의 영향을 나타낸다. Nb/MoSi₂ 복합재료는 1,350°C의 온도에서 60min의 가압유지시간을 이용하여 제조하였다. 제조 가압력은 Nb/MoSi₂ 복합재료의 굽힘강도 변화에 크게 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 그러나 Nb/MoSi₂ 복합재료는 제조 가압력이 증가함에 따라 30MPa의 가압력에서 가장 높은 수준을 나타내

Fig. 8 Effect of applied pressure on flexural strength of Nb/MoSi₂ composites fabricated at 1,350°C for 60 min.

Fig. 9 Effect of pressure holding time on flexural strength of Nb/MoSi₂ composites fabricated at 1,350°C and 30 MPa.

었다. 이것은 Fig. 4에 나타난 것처럼 30MPa의 가압력에서 Nb/MoSi₂ 복합재료의 기공률이 감소하기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 9는 Nb/MoSi₂ 복합재료의 굽힘강도에 미치는 가압유지시간의 영향을 나타낸다. Nb/MoSi₂ 복합재료는 1,350℃의 온도에서 30MPa의 가압력을 이용하여 제조하였다. Nb/MoSi₂ 복합재료의 굽힘강도는 제조 가압력에 비해 가압유지시간에 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다. 다시 말하면, Nb/MoSi₂ 복합재료의 제조를 위한 가압유지시간을 증가함에 따라 굽힘강도는 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 5에서 알 수 있듯이 가압유지시간이 증가함에 따라 미세조직에 존재하는 기공률이 현

저히 감소하기 때문인 것으로 생각된다. 이와 같이 Nb/MoSi₂ 복합재료의 밀도 개선에 따른 치밀화는 굽힘강도의 향상에 직접적으로 관계한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 제조온도에 따른 Nb/MoSi₂ 복합재료의 굽힘 파단면을 관찰한 결과를 나타낸다. 30MPa의 가압력과 60min의 가압유지시간을 이용하여 Nb/MoSi₂ 복합재료를 제조하였다. 1,200℃의 온도에서 제조한 Nb/MoSi₂ 복합재료는 MoSi₂ 소결체의 다중 파단이 주로 발생하여 계면분리 현상을 볼 수 있다. 특히 Nb 판재의 소성변형은 조금 발생하지만 확장적인 계면분리에 의해 Nb 판재의 파단없이 계면을 따라 파괴균열이 급속히 진전하였다. 이것은 제조과정에서 계면의 접합을 의미하는 계면반응층이 형성되더라도 두께가 얇고 계면강도가 상대적으로 약하기 때문에 발생한 것으로 생각된다. 이에 비해 1,350℃의 온도에서 제조한 Nb/MoSi₂ 복합재료는 MoSi₂ 소결체의 파단과 더불어 계면분리 현상이 다소 발생하지만 파괴균열이 계면에서 멈춘 후 Nb 판재의 소성변형을 유발하면서 진전하는 경향을 나타내고 있다. 또한 Nb/MoSi₂ 복합재료의 파단면은 1,500℃의 제조온도에서 다른 파괴거동을 나타내고 있다. 다시 말하면 MoSi₂ 소결체의 파단은 발생하지만 계면분리 현상은 거의 발생하지 않고 있다. 특히 Nb 판재의 소성변형을 억제하면서 급격한 균열 진전에 의한 직선적인 파괴양상을 나타내고 있다. 이것은 계면반응층이 과다하게 생성되어 계면강도의 강화로 인해 Nb 판재의 소성변형을 구속하기 때문인 것으로 생각된다. 이러한 파괴양상에 의해 Nb/MoSi₂ 복합재료는 Fig. 6과 같은 준 연성적인 파괴거동을 나타낸 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 MoSi₂ 재료의 특성을 개선하기 위해서 Nb 판재를 강화재료로 하여 고온가압법으로 Nb/MoSi₂ 복합재료를 제조하였다. Nb/MoSi₂ 복합재료의 미세조직 및 굽힘강도 특성을 제조조건에 따라 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) Nb/MoSi₂ 복합재료는 MoSi₂ 소결체에 미세한 기공이 존재하지만 치밀한 미세조직을 형성하였으며 계면영역에서는 (Nb, Mo)Si₂와 Nb₅Si₃와 같은 반응 생성물을 형성하였다. 이러한 계면반응층의 두께는 제조온도가 증가함에 따라 크게 성장하였다.
- (2) Nb/MoSi₂ 복합재료는 1,350℃의 온도, 30MPa의 가압력, 60min의 가압유지시간의 조건에서 이론밀도의 약 95%에 상당하는 우수한 소결밀도(약 6.13mg/m³)와 낮은 기공률(약 3%)을 나타내었다.
- (3) Nb/MoSi₂ 복합재료의 소결밀도와 기공률은 1350℃의 제조 온도에서 제조 가압력이 증가하더라도 크게 변화하지 않지만 가압력 유지시간이 증가함에 따라 크게 증가하였다.
- (4) Nb/MoSi₂ 복합재료는 최대하중 이후에도 하중의 급격한 저하가 없는 준 연성적인 파괴거동을 나타내었다. 특히 1350℃의 온도에서 제조한 Nb/MoSi₂ 복합재료는 균열이 발생한 후에도 하중이 증가하는 파괴거동을 나타내었다. 이것은 계면영역에서 발생한 적절한 박리현상과 Nb 판재의 소성변형에 기인한다.
- (5) Nb/MoSi₂ 복합재료의 굽힘강도는 제조 가압력의 변화에 비해 가압유지시간이 증가함에 따라 기공률의 감소와 더불어 크게 증가하였다. 특히 1,350℃의 온도, 30MPa의 가압력, 60min의 가압

Fig. 10 Fractured surfaces of Nb/MoSi₂ composites depending on fabricating temperatures.

유지시간의 조건에서 Nb/MoSi₂ 복합재료는 약 310MPa의 우수한 굽힘강도를 나타내었다.

후 기

본 논문은 2010년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었습니다(2010AA153).

참 고 문 헌

- 이상필, 이문희, 이진경 (2008), "Al₂O₃와 Y₂O₃입자를 함유한 액상소결 SiC 재료의 특성", 한국해양공학회지, 제22권, 제4호, pp 59-64.
- 윤한기, 이상필 (2002), "고온 선박 엔진용 MoSi₂ 금속간화합물의 경도와 방전가공 특성", 한국해양공학회지, 제16권, 제6호, pp 60-64.
- Bose, S. (1992). "Engineering Aspect of Creep Deformation of Molybdenum Disilicide", Mater. Sci. and Eng., A155, pp 217-225.
- Chou, T.C. and Nieh, T.G. (1993). "Pesting of the High-temperature MoSi₂ Intermetallic", J. Metal., Vol 45, pp 15-21.
- Courtright, E.L. (1999). "A Comparison of MoSi₂ Matrix Composites with Other Silicon-base Composite Systems", Mater. Sci. and Eng. A261, pp 53-63.
- Lee, S.P., Sasaki, G. and Fukunaga, H. (1998). "Effect of Fabricating Conditions on Impact Properties of Nb/MoSi₂ Laminate Composites", J. Japan. Inst. Met., Vol 63, pp 351-357.
- Lee, S.P. and Fukunaga, H. (2000). "Interfacial Reaction Layer of Nb/MoSi₂ Laminate Composites and Its Effect of Fracture Characteristics", Scrip. Mater., Vol 43, pp 795-799.
- Lee, S.P., Yoshida, M. and Fukunaga, H. (2000). "Interfacial Modification and Impact Properties of Nb/MoSi₂ Laminate Composites by the Addition of ZrO₂, NbSi₂, and SiC Particles" Metall. Mater. Trans., Vol 31, pp 2075-2081.
- Meschter, P.J. and Schwartz, D.S. (1989). "Silicide-matrix Materials for High Temperature Applications", J. Metal., Vol 41, pp 52-55.
- Petrovic, J.J. and Vasudenvan, A.K. (1999). "Key Developments in High Temperature Structural Silicides", Mater. Sci. and Eng., A261, pp 1-5.
- Shah, D.M., Berezik, D., Anton, D.L. and Hecht, R. (1992). "Appraisal of Other Silicides as Structural Materials", Mater. Sci. and Eng., A155, pp 45-57.
- Xiao, L., Kim, Y.S., Abbaschian, R. and Hecht, R.J. (1991). "Processing and Mechanical Properties of Niobium-reinforced MoSi₂ Composites", Mater. Sci. and Eng., A144, pp 277-285.
- Yang, J.M., Jeng, S.M., Yang, C.J. and Anton, D.L. (1990). "Chemical Compatibility of High Temperature Intermetallic Compounds with Various Potential Reinforcements", Mater. Res. Soc. Sympo., Vol 194, pp 385-392.

2011년 2월 17일 원고 접수

2011년 6월 22일 심사 완료

2011년 8월 16일 게재 확정