

# Nb/MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 적층복합재료의 제조 및 충격특성

이상필\* · 윤한기\* · 공유식\*\*

\*동의대학교 기계공학과

\*\*동의대학교 산업기술개발연구소

## Fabrication and Impact Properties of Nb/MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> Laminate Composites

Sang-Pill Lee\*, Han-Ki Yoon\*, Yoo-Sik Kong\*\*

\*Development of Mechanical engineering, Dong-Eui University, 24, Gaya Dong, Pusan Jin-Gu, Pusan, 614-714, Korea

\*\*Center for Industrial Technology, Dong-Eui University, 24, Gaya Dong, Pusan Jin-Gu, Pusan, 614-714, Korea

**KEY WORDS:** Nb/MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>, Niobium, laminate composites 적층복합재료, impact properties 충격특성, fabricating temperature 제조온도, niobium volume fraction Nb체적율, interfacial reaction layer 계면반응층, interfacial shear strength 계면전단강도

**ABSTRACT:** Nb/MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> laminate composites have been successfully fabricated by alternately stacking MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> powder layer and Nb sheet, followed by hot pressing in a graphite mould. The fabricating parameters were selected as hot press temperatures. The instrumented Charpy impact test was carried out at the room temperature in order to investigate the relationship between impact properties and fabricating temperatures. The interfacial shear strength between MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> and Nb, which is associated with the fabricating temperature and the growth of interfacial reaction layer, is also discussed. The plastic deformation of Nb sheet and the interfacial delamination were macroscopically observed. The Nb/MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> laminate composites had the maximum impact value when fabricated at 1623K, accompanying the increase of fracture displacement and crack propagation energy. The interfacial shear strength of Nb/MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> laminate composites increased with the growth of interfacial reaction layer, which resulted from the increase of fabricating temperature. there is an appropriate interfacial shear strength for the enhancement of impact value of Nb/MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> laminate composites. A large increase of interfacial shear strength restrains the plastic deformation of Nb sheet.

### 1. 서 론

몰리브덴 실리사이드(MoSi<sub>2</sub>)는 약 2000K의 온도까지 산화 분위기에서도 장시간 사용이 가능하고, 고온강도, 저밀도, 전기전도성, 열전도율 등의 물리적 성질이 우수하므로 (Vasudenvan and Petrovic, 1992; Shah et al., 1992) 우주 왕복선 및 차세대 초음속 항공기의 제트 엔진 혹은 고온 발전용 가스터어빈용으로 기대되는 초고온재료이다. 또한 MoSi<sub>2</sub>는 다양한 종류의 세라믹 강화재료와 열역학적 안정성을 가지고 있기 때문에 복합화에 의한 재질 개선이 가능하다는 장점을 가지고 있다.(Meschter and Schwartz, 1989; Yang et al., 1990) 그러나, MoSi<sub>2</sub>는 실온에서 매우 견고하고 취성이라는 결점을 가지고 있고 실온파괴인성은 3.3MPam<sup>1/2</sup>이다. 세라믹보다도 연성이 풍부한 내열 재료를 강화재료로 첨가하는 것이 MoSi<sub>2</sub>의 인성향상에 가장 유효한 것으로 생각되어지며 Nb 혹은 Ta 등의 고용점 금속을 복합하는 연구가 진행되고 있다. (Badrinarayanan et al., 1996; Xiao and Abbaschian, 1992) 특

히, Nb는 연성이 우수할 뿐만 아니라 Ta 혹은 W에 비해 밀도가 낮고 열팽창계수가 MoSi<sub>2</sub>와 거의 유사하여 (Pickard and Ghosh, 1996) 복합화 과정에서 잔류응력에 의해 발생하는 기지재의 균열 및 계면박리 현상을 방지할 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 관점에서, 저자들은 Nb판과 MoSi<sub>2</sub>분말을 조합한 Nb/MoSi<sub>2</sub> 적층복합재료를 고온 프레스법으로 제작하여 MoSi<sub>2</sub> 재료의 충격특성 개선에 대해 연구하였다. 그 결과, Nb판과 MoSi<sub>2</sub>분말의 적층화 수법은 MoSi<sub>2</sub>단체의 충격특성은 개선할 수 있으나 MoSi<sub>2</sub>와 Nb의 화학반응에 의해 계면반응층이 생성되어 제조조건과 열처리 조건에 따라 충격치가 급격히 감소하는 현상을 나타내었다.(Lee et al., 1998) 또한, MoSi<sub>2</sub>분말에 ZrO<sub>2</sub>입자를 첨가함에 따라 Nb와 MoSi<sub>2</sub>의 계면반응층 두께의 성장은 억제되어 Nb/MoSi<sub>2</sub> 적층복합재료의 충격특성을 개선할 수 있는 유효한 방법이라는 것을 분명히 밝혔다.(Lee et al., 1998; Lee et al., 2000) 그러나, 초고온 재료로서 MoSi<sub>2</sub>를 실용화하기 위해서는 Nb/MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 적층복합재료의 개발에 관한 연구는 제조조건이 아직 확립되어 있지 않고 기초적인 평가에 그치고 있다. 또한, 동적파괴특

제1저자 이상필 연락처:부산 부산진구 가야동 산24 동의대학교  
051-890-1662 splee87@dongeui.ac.kr

성, 소결밀도, 계면반응층의 성장 및 계면전단강도를 체계적으로 평가한 연구는 아직 없는 실정이다.

본 연구에서는  $\text{MoSi}_2\text{-ZrO}_2$  분말과 Nb판을 사용하여 Nb/ $\text{MoSi}_2\text{-ZrO}_2$  적층복합재료를 고온프레스법으로 제조하고 계장화 샤르피충격시험기를 사용하여 제조온도가 충격 특성에 미치는 영향을 평가하였다. 또한, Nb/ $\text{MoSi}_2\text{-ZrO}_2$  적층복합재료의 계면조직을 분석함과 더불어 제조온도와 계면반응층의 성장에 관계하는 계면전단강도를 조사하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 적층복합재료의 제조

기지재료는 평균입경이  $2.8\mu\text{m}$ 인  $\text{MoSi}_2$  분말에 20 vol%의  $\text{ZrO}_2$  분말을 첨가한  $\text{MoSi}_2\text{-ZrO}_2$  혼합분말을 사용하였다.  $\text{MoSi}_2\text{-ZrO}_2$  분말은 회전유성운동식의 보울밀러를 사용하여 제작하였으며 혼합속도와 혼합유지 시간은 각각 150rpm과 3.6ks로 하였다. 강화재료는 순도가 99.9%인 0.2mm 두께의 Nb판재를 사용하였다.

Nb/ $\text{MoSi}_2\text{-ZrO}_2$  적층복합재료는  $\text{MoSi}_2\text{-ZrO}_2$  분말과 5장의 Nb판을 조합하여 고온프레스법으로 제조하였다. Table 1 은 Nb/ $\text{MoSi}_2\text{-ZrO}_2$  적층 복합재료의 제조조건을 나타낸다. 제조변수는 제조온도이며 가압력과 가압유지 시간은 각각 30MPa과 3.6ks로 일정하게 하였다. 제작한 적층복합재료의 치수는 10mm × 20mm × 80mm 이다. 또한, 제조온도의 상승에 따라 변화하는 계면전단강도를 조사하기 위하여 두께 5.0mm의  $\text{MoSi}_2\text{-ZrO}_2$  분말 2층과 두께 0.5mm Nb판 1층으로 구성된  $\text{MoSi}_2\text{-ZrO}_2$  적층복합재료를 Table 1 과 동일 조건으로 제조하였다.

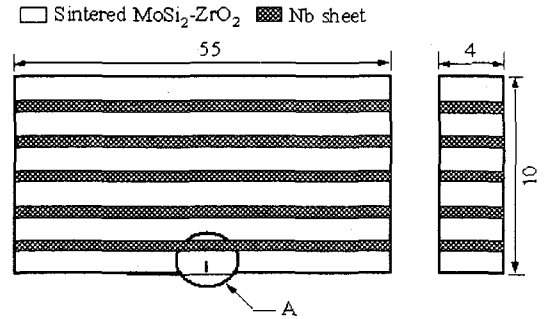
### 2.2 계장화 샤르피 충격시험 및 전단시험

충격시험은 용량 9.8kN · 계장화 샤르피식의 하이드로 쇼드시험기(시마츠(株): HTM-1 MODEL)를 사용하여 상온에서 실시하였다. 충격하중은 균열이 적층면에 수직인 방향으로 진전하는 플랫폼와이즈 방향으로 부하 하였으며, 충격속도와 스패ん길이는 각각 3.3m/s 와 40mm로 하였다. Fig. 1 은 충격 시험편의 형상과 치수를 나타낸다. 6층의  $\text{MoSi}_2$  소결체와 5층의 Nb판으로 제조한 충격시험용 Nb/ $\text{MoSi}_2\text{-ZrO}_2$  적층복합재료는 절단기와 연마지 #100~800을 사용하여 10mm × 4mm × 55mm로 제작하였다. 시험편에 가공한 U노치는 Nb와  $\text{MoSi}_2$ 와의 접합계면에서 손상이 발생하지 않도록 방전가공을 도입하였다. U노치의 폭과 깊이는 각각 2mm와 1.2mm이다. 시험편을 파단하는데 필요한 전충격흡수에너지는 이동평균으로 보정한 충격하중-변위곡선의

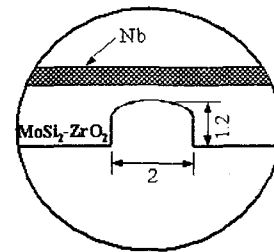
Table 1 Fabricating conditions of Nb/ $\text{MoSi}_2\text{-ZrO}_2$  laminate composites.

Volume fraction of Nb sheet (%)	5, 10, 15
Thickness of Nb Sheet (mm)	0.1, 0.2, 0.3
Fabricating temperature (K)	1523, 1573, 1623, 1673
Fabricating pressure (MPa)	30
Pressure holding time (ks)	3.6
Vacuum pressure (MPa)	$1.33 \times 10^{-2}$

면적을 적분하여 구하였다.(Kobayashi et al., 1981) 샤르피 충격치는 전충격흡수에너지를 시험편의 U노치부를 제외한 면적(4.0mm × 8.8mm)으로 나누어 구하였다. 계면 전단강도의 평가

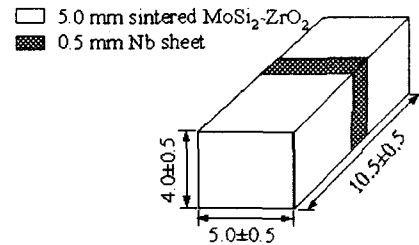


(a) Lamination structure and dimensions of impact specimen

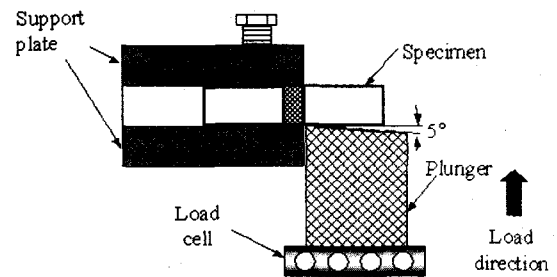


(b) Magnified image of portion A

Fig. 1 Structure of laminate composites and dimensions of the impact test specimen



(a) Geometry and dimensions of shear test specimen



(b) Shear test apparatus

Fig. 2 Schematic diagrams of the test apparatus and the specimen dimension used for the evaluation of the interfacial shear strength

에 이용한 시험편 형상 및 전단시험 방법은 Fig. 2 에 나타낸다. 전단시험편은 연마지 #800까지 연마하고 4.0mm×10.5mm×5.0mm의 치수로 마무리 연마하였다. 계면 전단강도는 인장시험을 이용하고 로드셀 상부에 전단용 플랜지를 고정하여 멤버에 고정된 시험편에 하중을 부하하여 전단시험을 수행하여 측정하였다. 시험편에 급힘하중이 걸리는 것을 가능한 억제시키기 위하여 플랜지에는 Fig. 2 처럼 약간의 각도(약 5°)를 주었으며 플랜지를 그림에서처럼 계면에 가까운 MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 부분을 누르도록 주의 깊게 시험편을 배치하였다. 전단시험은 실온에서 수행하였으며 시험속도는 0.1mm/min으로 하였다

### 2.3 미세조직과 파괴형태의 관찰

Nb/MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 적층복합재료의 계면조직은 전자선프로브마이크로분석기(일본전자(주): EPMA JXA-8900)를 사용하여 분석하였다. MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>와 Nb의 계면반응층 두께는 파장분산형 X선 분광분석(WDS)로 선분석을 실시하여, Nb의 성분변화가 인정되는 범위로서 결정하였다. 계면반응층의 분석은 WDS를 사용하여 반정량분석을 실시하고 상태에서 반응상의 성질을 결정하였다. 또한 충격파단으로 생긴 Nb판의 소성변형이나 계면 분리 현상을 관찰함과 더불어 전단파단면을 분석하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 소결밀도와 미세조직

재료내부에서의 공공은 기계적 성질이나 산화거동에 큰 영향을 미치기 때문에 분말야금법으로 제작한 재료에서는 프로세스 조건에 따른 소결밀도의 향상은 중요한 문제이다. Table 2 는 고온프레스로 제작한 Nb/MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 적층복합재료의 소결밀도를 제조온도의 변수로 표현한 것이다. 본 실험의 범위에서는 가압력 30MPa, 가압유지시간 3.6ks 및 제조온도 1573K 이상에서 적층복합재료의 상대 소결밀도는 96% 이상을 나타내었다.

Fig. 3 은 제조온도 1623K, 가압력 30MPa, 가압유지시간 3.6ks의 조건으로 제작한 Nb/MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 적층복합재료의 계면영역을 관찰한 것이다. 또한 Fig. 3에는 계면영역의 흑선부분에 대해서 WDS의 선분석을 실시한 결과도 나타내었다. 이전의 연구 결과보고에 나타난 것처럼 (Lee et al., 1998; Lee et al., 2000) 선분석 결과에 따르면, 확산계수가 Mo보다 빠른 Si 원소가 Nb 쪽으로 깊게 확산하여 계면에서 Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>상의 반응층을 형성하는 것을 알 수 있다. 또한 계면 부근의 MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>쪽에는 MoSi<sub>2</sub>와

Table 2 Sintered densities of Nb/MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> laminate composites fabricated at different temperatures.

Fabricating temperature (K)	Theoretical density (Mg/m <sup>3</sup> )	Average density (Mg/m <sup>3</sup> )	Relative density (%)
1523	6.48	5.66	87.4
1573		6.24	96.3
1623		6.29	97.0
1673		6.32	97.5
1723			

ZrO<sub>2</sub>와의 화학반응에 의해 ZrSiO<sub>4</sub>상이 생성되어 있다.

Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>상과 ZrSiO<sub>4</sub>상은 WDS 반정량 분석 결과로 결정하였다. 미소경도시험에 의하면, Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>상의 경도는 Hv 1420으로 MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 단체의 경도(Hv 1280)보다 높게 나타났다. 이처럼, Nb/MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 적층복합재료의 계면영역에서는 기지재보다 견고한 계면 반응층이 형성한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4 는 Nb/MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 적층복합재료의 계면반응층 두께에

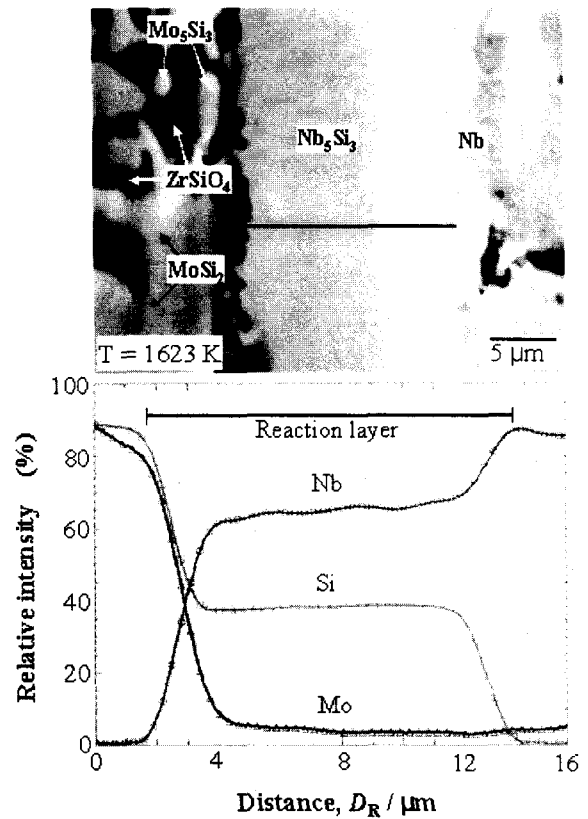


Fig. 3 SEM micrograph and WDS analysis for the interfacial regions of Nb/MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> laminate composites fabricated at 1623 K under 30 MPa and 3.6ks

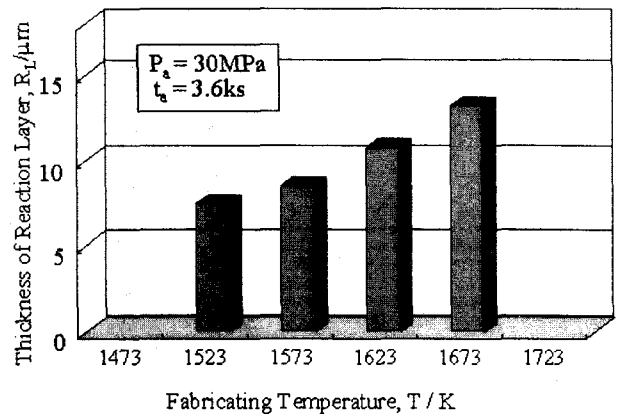


Fig. 4 Thickness of interfacial reaction layer depending on fabricating temperature of Nb/MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> laminate composites

미치는 제조온도의 영향을 표시한 것이다. 계면 반응층 두께는 Fig. 3 에 나타난 WDS 선분석 결과를 사용하여 결정하였다. 제조온도가 상승함에 따라  $\text{MoSi}_2\text{-ZrO}_2$ 와 Nb와의 계면 반응층 두께는 서서히 증대하고 있다. 1523K의 온도에서는 계면 반응층의 두께가  $8\mu\text{m}$ 이지만 1673K의 경우에는 약  $13\mu\text{m}$ 로 증가하고 있다. 계면 반응층의 성장은 제조온도의 상승과 더불어 Si의 확산 속도가 빨라지게 되었기 때문이라고 생각된다.(Xiao et al., 1992)

### 3.2 계면전단강도

Fig. 5 는 Nb/ $\text{MoSi}_2\text{-ZrO}_2$  적층복합재료의 계면전단강도에 미치는 제조온도의 영향을 나타낸다. 계면전단강도의 평가에는 2층의  $\text{MoSi}_2\text{-ZrO}_2$ 분말과 1층의 Nb판으로 구성된 적층복합재료를 사용하였다. 본 실험의 범위에서는 제조온도의 상승에 따라  $\text{MoSi}_2\text{-ZrO}_2$ 와 Nb와의 계면적층강도는 선형적으로 증가하였다. Fig. 4 와 Fig. 5 에 따르면, 제조온도가 상승함에 따라 계면반응층의 두께는 성장하고 이와 더불어 계면전단강도가 증가한다. 따라서 본 실험의 범위내에서는 접합이 진행되고 있는 것으로 생각된다. 전단파괴시험에서  $\text{MoSi}_2\text{-ZrO}_2$ 쪽의 표면에 대해 SEM 과 EDS로 분석한 결과를 Fig. 6 에 나타내었다. 1523K와 1673K 에서 제작한 적층복합재료의 전단 파단면에서는  $\text{Nb}_5\text{Si}_3$ 상이  $\text{MoSi}_2\text{-ZrO}_2$  쪽에서 떨어져 나온 파괴형식을 나타내고 있다. 파면 관찰에 의하면 제조온도가 1523K의 경우에는 1673K의 제조 온도에 비해  $\text{MoSi}_2\text{-ZrO}_2$  상의 면적이 넓게 나타나고  $\text{Nb}_5\text{Si}_3$  상의 면적은 그다지 나타나지 않고 있다. 고온으로 도달할수록  $\text{Nb}_5\text{Si}_3$ 에서 전단파괴되는 확률이 높아지고 있다. 파면 해석에 따르면, 계면 전단강도가 증가하는 것은 제조온도가 증가함에 따라  $\text{MoSi}_2\text{-ZrO}_2$  분말과 Nb판의 반응이 활성화되어  $\text{Nb}_5\text{Si}_3$ 상을 생성하고 계면 접합이 진행되고 있다는 것을 의미한다.

### 3.3 충격특성

Fig. 7 은 제조온도를 변수로 하여 제조한 Nb/ $\text{MoSi}_2\text{-ZrO}_2$  적층재료에 대하여 충격시험을 수행하여 하중-변위곡선에서 구한 최대 충격하중과 파단변위를 나타낸다. 적층복합재료의 최대 충

격하중과 파단변위는 제조온도가 증가함에 따라 증가하고, 1623K의 온도를 경계로 하여 저하하는 경향을 나타내었다. 제조 온도의 상승에 따른 최대 충격하중의 증가는 소결밀도의 증가가 원인이라고 생각된다(Table 2). 그러나, 1673K의 제조온도에서는 소결밀도가 거의 동일하기 때문에 최대 충격하중의 저하는 Fig. 4에 나타난 것처럼 약  $13\mu\text{m}$ (1673K)까지 성장한 견고한 계면반응층 때문이라고 생각된다. 또한, 1673K에서 감소한 파단변위는 계면 반응층의 성장이 계면 전단강도의 증가를 유발하므로 균열의 분산이 생기지 않고 주균열이 직선적으로 노치선단을 진전

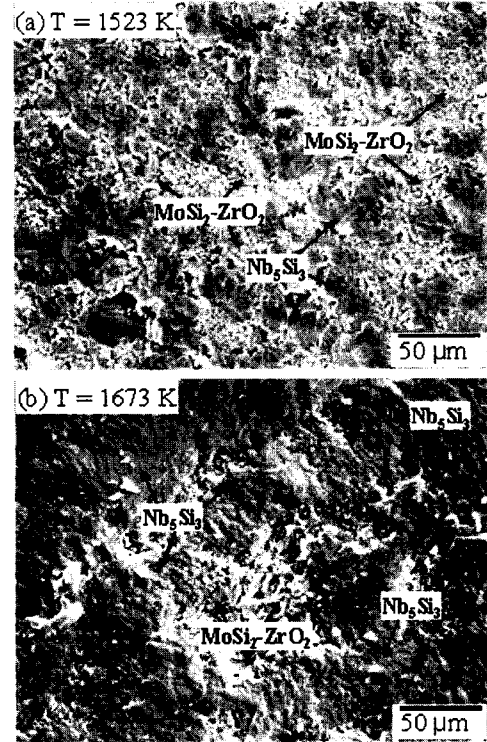


Fig. 6 SEM micrographs on  $\text{MoSi}_2\text{-ZrO}_2$  side in the shear fracture surface of Nb/ $\text{MoSi}_2\text{-ZrO}_2$  laminate composites fabricated at 1523 K and 1673 K

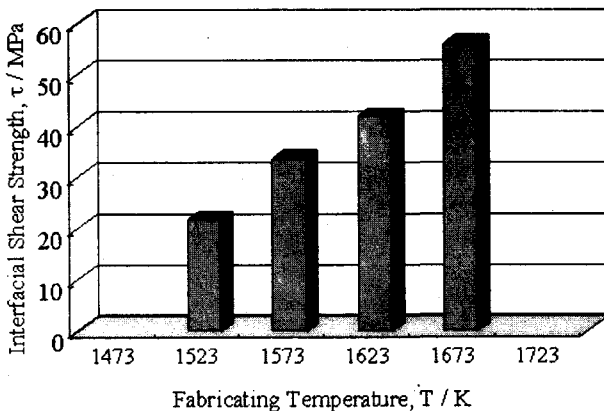


Fig. 5 Effect of fabricating temperature on interfacial shear strength of Nb/ $\text{MoSi}_2\text{-ZrO}_2$  laminate composites

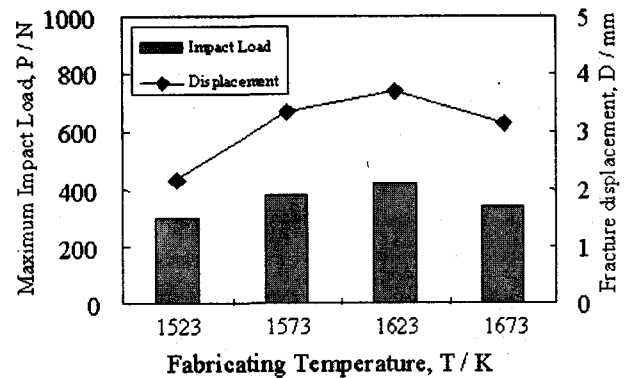


Fig. 7 Maximum impact load and fracture displacement of Nb/ $\text{MoSi}_2\text{-ZrO}_2$  laminate composites fabricated at different temperature

하였기 때문이라고 생각된다.

Fig. 8 은 Nb/MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 적층복합재료의 제조온도가 전체충격흡수에너지에 미치는 영향을 균열발생에너지와 균열진전에너지로 분할하여 나타낸 것이다. 균열발생에너지는 적층복합재료 내의 균열발생 또는 계면분리 등의 결함이 발생할 때까지의 에너지를 의미하며, 균열전파에너지는 균열이 분기 또는 계면분리를 동반하면서 적층복합재료를 균열이 진전하여 파괴에 이르는 데 필요한 흡수энер지를 의미한다. 적층복합재료의 전체충격흡수에너지는 제조온도가 상승함에 따라 증가하여 1623K를 경계로하여 감소하였다. 1623K에서 제조한 경우에 전체충격흡수에너지는 0.69J을 나타내었지만 1673K에서는 0.47J을 나타내었다. 또한 균열전파에너지는 균열발생에너지에 비해 높게 나타났고 전체충격흡수에너지는 균열전파에너지의 변화에 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 균열전파에너지는 충격파 단 동안에 발생하는 파괴변위에 관계하고 계면반응층의 성장에 관계하는 계면전단강도의 크기에 의존하는 Nb판전체의 소성변형에 관계한다고 생각된다.

Fig. 9 는 Nb/MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 적층복합재료의 샤르피 충격치에

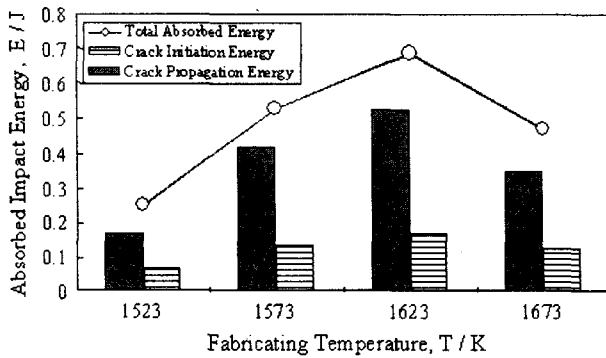


Fig. 8 Effect of fabricating temperature on absorbed impact energy of Nb/MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> laminate composites 미치는 제조온도의 영향을 나타낸다. 또한 Fig. 9 에는 제조온도

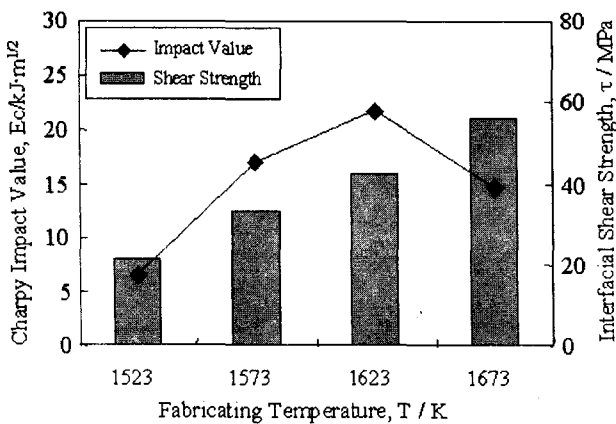
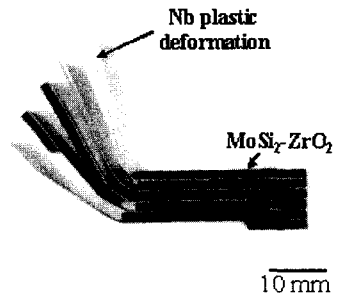
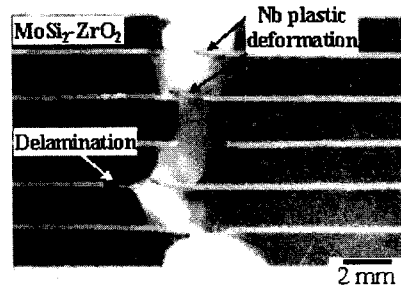


Fig. 9 Relationship among Charpy impact value, interfacial shear strength and fabricating temperature in Nb/MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> laminate composites

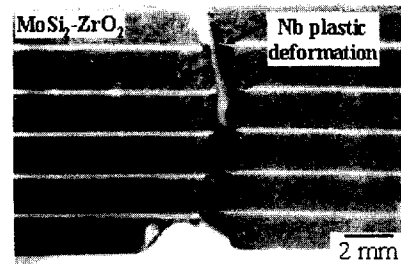
의 상승에 의해 변화하는 계면전단강도를 나타내었다. Nb/MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 적층복합재료의 샤르피 충격치는 1623K의 제조온도에서 최대를 나타내고 제조온도가 상승함에 따라 감소하는 온도의 존재를 나타내었다. 특히, 1523K에서 제작한 경우 충격치는 6.6kJ/m<sup>2</sup>를 나타내었지만, 1623K에서는 21.3kJ/m<sup>2</sup>를 나타내었다. 또한, MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>와 Nb와의 계면 전단강도를 고려하면 샤르피 충격치는 42.5MPa의 계면전단강도에서 최대를 나타내고 있다. 이처럼, 제조온도의 상승에 따라 샤르피 충격치가 증가하는 것은 계면반응층의 성장에 관계하는 계면전단강도가 증가하여 Nb판의 소성변형량에 의존하는 파단변위와 균열전파에너지가 크게 증가한 것이 원인이라고 생각된다. 그러나, 1673K의 제조온도에서 샤르피 충격치가 급격히 저하한 것은 계면 전단강도의 증가에 따라 Nb판재가 국부적으로 소성변형을 일으키면서 파단되기 때문이라고 생각된다. 다시 말하면, Fig. 10 에 나타낸 것처럼, Nb판의 소성변형에 관계하는 Nb/MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 적층복합재료의 파괴양식은 제조온도의 상승에 의해 현저히 다르게 나타



(a) T = 1523 K, τ = 21.2 MPa



(b) T = 1623 K, τ = 42.5 MPa



(c) T = 1673 K, τ = 56.7 MPa

Fig. 10 Typical fractographs of Nb/MoSi<sub>2</sub> laminate composites depending on the interfacial shear strength

나고 있다. Fig. 10(a) 에 나타낸 것처럼 1523K의 제조온도에서 제작한 적층복합재료는 계면반응층의 두께가 얇고 계면전단강도(21.2MPa)가 약하기 때문에 MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>층이 파괴되면서 균열이 계면을 따라 진전하여 Nb판재는 거의 파괴되지 않고 굽어지는 파괴양식을 나타내고 있다. 한편, Fig. 10(b) 와 (c) 에 나타내었듯이, 1623K 이상의 제조온도에서는 계면전단강도의 증가에 의해서 Nb판은 완전히 파단되고 있다. 그러나, 1623K에서 제작한 적층복합재료에서는 계면전단강도(42.5MPa)가 적절한 것으로 추정되므로 Nb판은 큰 소성변형을 일으키면서 파단되고, 계면분리현상도 발생하고 있다. 또한 1673K에서 제작한 적층복합재료에서는 계면반응층이 두껍고 계면전단강도(56.7MPa)가 높기 때문에 Nb판에 대한 계면구속이 크게되어 계면분리를 거의 동반하지 않고 균열이 직선적으로 진전하여 Nb판의 국소적 소성변형과 파괴를 동반하는 파단양식을 나타내고 있다. 이 경우의 Nb판재의 소성변형은 1623K의 제조온도에서 제작한 것보다 작은 것으로 판명되었다. 이러한 파단기구로부터, 1523K이하의 제조온도에서 충격치가 감소하는 것은 계면전단강도가 약하기 때문에 층간전단분리 현상이 쉽게 발생하여 Nb판의 파단에너지가 흡수되지 않았기 때문이라고 생각된다. 또한, 1673K에서의 충격치의 감소는 계면전단강도의 증가에 따라 Nb판재가 국소적으로 파단되었기 때문이라고 생각된다.

이처럼, Nb/MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 적층복합재료의 균열전파에너지 및 샤르피 충격치가 제조온도의 상승에 따라 변화하는 것은 계면반응층의 성장에 관계하는 계면전단강도의 변화에 의해 Nb판이 소성변형 거동과 계면분리현상이 다르기 때문이라고 생각된다.

#### 4. 결 론

Nb판과 MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 분말을 조합하여 제조온도를 변수로하여 Nb/MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 적층복합재료를 고온프레스법으로 제조하였다. 또한, 계장화 샤르피 시험과 계면전단 시험을 수행하여 적층복합재료의 충격파괴특성과 계면전단강도를 평가함과 더불어 파단면의 관찰을 통하여 파괴기구를 명확히 하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) Nb/MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 적층복합재료에서는 최대충격하중과 파단변위는 제조온도가 상승함에 따라 1623K를 경계로 하여 감소하였다. 그 결과, 균열전파에너지와 샤르피 충격치는 1623K의 제조온도에서 최대를 나타내고 제조온도의 상승에 의해 감소하는 온도의존성을 나타내었다.

(2) Nb/MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 적층복합재료의 제조온도가 상승함에 따라 Nb/MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 와 Nb와의 계면반응층 두께는 크게 성장하고 이와 함께 계면전단강도는 크게 증가하였다.

(3) 계면전단강도의 증가는 Nb판재의 국소변형을 조장하여 Nb판재의 소성변형에 의존하는 균열전파에너지와 샤르피 충격치를 감소시키는 원인으로 인정된다. 따라서, Nb/MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 적층복합재료의 충격파괴에너지를 향상시키기 위해서는 Nb판재의 소성변형을 최대로 하는 적절한 계면전단강도를 부여하는 것이 유효하다고 생각된다.

(4) Nb/MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 적층복합재료는 1623K의 제조온도에서는 큰 Nb판재의 소성변형과 계면분리를 동반하는 충격파단면을 형성한다. 그러나, 1673K의 제조온도에서는 계면전단강도의 증가에 따라 계면분리현상을 동반하지 않고 Nb판은 국소적으로 파단된다. 또한 제조온도가 너무 낮게 되면(1523K), 계면전단강도가 낮게되어 확장적인 계면분리현상을 동반하므로 Nb판재는 파단되지 않는다. 이러한 파괴양식의 차이가 제조온도의 상승에 따른 샤르피 충격치의 변화를 유발한 원인이라고 생각된다.

#### 참 고 문 헌

- Badrinarayanan, K., Mckelvey, A. L., Venkateswara, Rao K. T. and Ritchie, R. O. (1996), *Metall.Mater. Trans.*, Vol. 27A, pp 3781~3792.
- Carter, D. H. and Martin, P. L. (1990), *Mat. Res. Soc. Proc.*, Vol. 194, pp. 131~138.
- Castro, G., Smith, R. W., Rollett, A. D. and Stanek, P. W. (1992), *Scrip. Metal.*, Vol. 26, pp. 207~212.
- Kobayashi, T., Matsubara, T. and Ueda, Y. (1981), *J. ISIJ.*, Vol. 67, pp 2216~2225.
- Lee, S. P., Pan, J., Sasaki, G. and Fukunaga, H. (1998), *Composite Interfaces*, Vol. 5, pp. 405~419.
- Lee, S. P., Sasaki, G. and Fukunaga, H. (1998), *J. Japan. Inst. Metals*, Vol. 63, pp 351~357.
- Lee, S. P., Yoshida, M. and Fukunaga, H. (2000), *Metall. Mater. Trans.*, Vol. 31A, pp 2075~2081.
- Lu, T. C. Evans, A. G., Hecht, R. J. and Mehrabian R. (1991), *Acta Metall. Master.*, Vol. 39, pp. 1853~1862.
- Meschter, P. J. and Schwartz, D. S. (1989), *JOM*, Vol. 41 (11), pp 52~55.
- Pickard, S. M. and Ghosh, A. K. (1996), *Mater. Trans.*, Vol. 27A, pp 909~921.
- Shah, D. M., Berezik, D., Alton D. L. and Hecht, R. (1992), *Master. Sci. Eng.*, Vol A155, pp 45~57.
- Shaw, L. and Abbaschian, R. (1995), *Mater. Sci.*, vol. 30, pp 849~854.
- Soboyejo, W. O., Ye, F. and Schwartz, D. S. (1995), *Mater. Trans.*, Vol. 26A, pp 2263~2273.
- Vasudenvan, K. and Petrovic, J. J. (1992), *Master. Sci. Eng.*, Vol A155, pp1~17.
- Xiao, L. and Abbaschian, L. (1992), *Master. Sci. Eng.*, Vol. A155, pp 135~145.
- Xiao, L. and Abbaschian, R. (1992), *Metall. Mater. Trans.*, Vol. 23A, pp. 2863~2872.
- Yang, J. M., Jeng, S. M., Yang, C. J. and Anton, D. L. (1990), *Mat. Res. Soc. Proc.*, Vol. 194, pp 385~392.