

MoSi₂ 금속간화합물 복합재료의 미세구조와 방전가공특성

윤한기* · 이상필* · 윤경욱** · 김동현***

*동의대학교 기계공학과

**동의대학교 산업기술대학원 기계공학과

***동의대학교 대학원 기계공학과

Microstructure and EDM Processing of MoSi₂ Intermetallic Composite

Han-Ki Yoon*, Sang-Pill Lee*, Kyong-Wok Yoon**, Dong-Hyun Kim***

*Dept. of Mechanical Engineering, Dong-Eui University, Busan 614-714, Korea

**Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School of Industrial Technology, Dong-Eui University, Busan 614-714, Korea

***Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Dong-Eui University, Busan 614-714, Korea

KEY WORDS: Intermetallics 금속간화합물, Nb/MoSi₂ Laminate Composite Nb/MoSi₂ 적층복합재료, Electrical Discharge Machine (EDM) 방전가공, ED-Drilling 방전에 의한 드릴링, Workability 가공성, Fabricating Temperature 성형온도, Micro Vickers Hardness 마이크로 비커스 경도

ABSTRACT: This paper describes the machining characteristics of the MoSi₂-based composites by electric discharge drilling with various tubular electrodes, besides, Hardness characteristics and microstructures of Nb/MoSi₂ laminate composites were evaluated from the variation of fabricating conditions such as preparation temperature, applied pressure and pressure holding time. MoSi₂-based composites has been developed in new materials for jet engine of supersonic-speed airplanes and gas turbine for high- temperature generator. Achieving this objective may require new hard materials with high strength and high temperature-resistance. However, With the exception of grinding, traditional machining methods are not applicable to these new materials. Electric discharge machining (EDM) is a thermal process that utilizes a spark discharge to melt a conductive materia.,the tool electrode being almost non-unloaded, because there is no direct contact between the tool electrode and the workpiece. By combining a nonconducting ceramics with more conducting ceramic it was possible to raise the electrical conductivity. From experimental results, it was found that the lamination from Nb sheet and MoSi₂ powder was an excellent strategy to improve hardness characteristics of monolithic MoSi₂. However, interfacial reaction products like (Nb, Mo)SiO₂ and Nb₂Si₃ formed at the interface of Nb/MoSi₂ and increased with fabricating temperature. MoSi₂ composites which a hole drilling was not possible by the conventional machining process, enhanced the capacity of ED-drilling by adding NbSi₂ relative to that of SiC or ZrO₂ reinforcements.

1. 서 론

차세대 초음속 항공기의 제트 엔진, 선박 엔진용 부품, 고온 발전용 가스터빈 등의 개발에 따른 내열성, 내마모성, 내식성, 경량성이 뛰어난 신소재 개발에 관심의 초점이 모아지고 있다. 이와 관련된 연구는 니켈합금, 알루미늄아이드 금속간화합물, 실리사이드 금속간화합물, 실리콘 카바이드(silicon carbide)등이 연구되고 있다.(Stoloff and Alman, 1991; Yoon and Lee, 2001) 실리사이드 금속간화합물 중의 하나인 MoSi₂는 높은용융점 (2303K)과 적당한 밀도 (6.3g/cm³), 우수한 내산화성을 가지고 있어 고온, 고압의 환경에서 사용하기에 적합한 재료로 주목받고 있다. 그러나, MoSi₂는 고온 크리프 강도와 내산화성은 우수하나 전온도영역에서 취성거동을 나타내며, 기계 가공이 어려운 결

점을 갖고 있어 전통적인 절삭가공방식으로는 이들을 가공하는 것이 부적절하다. 따라서 이러한 복합재를 가공하기 위하여 레이저가공, 워터젯트(water jet: WJ), 방전가공, 전해방전가공 및 초음파가공 등이 대체 가공법으로 제시되고 있다. Yan 등은 동전극으로 카아바이드에 미세한 구멍을 방전가공 할 때 전극의 소모와 구멍의 크기, 방전분(debris) 등의 특성을 연구하였다.(Yan et al., 1999) Gadalla 등은 TiB₂를 포함한 다양한 세라믹재료들에 대하여 와이어방전가공에 대한 연구를 수행하였는데, 알루미늄에 TiC를 첨가 시킴으로 전도성이 향상되게 하는 등 비전도체인 세라믹을 전도체인 세라믹과 결합시켜 전기저항율이 낮아지게 하였다.(Gadalla et al., 1991) 그러나, MoSi₂의 가공특성에 대한 연구는 아직 미비한 상태이다. 어떤 연구자들은 MoSi₂의 실온취성거동을 개선하기 위해 세라믹과 금속 강화상과의 복합화를 행하고 있다. 그 중에서 Nb 강화상은 뛰어난 연성 및 MoSi₂와 동급의 열팽창계수를 가지고 있어서 MoSi₂의 상대재료로 아주 활발한 연구가 행해지고 있다.(Venka-

제1저자 윤한기 연락처: 부산시 부산진구 가야3동 동의대학교 051-890-1642 hkyoon@dongeui.ac.kr

teswaea Rao et al., 1992; Alman and Stoloff, 1995) 또한, Nb 강화상은 고용점 실리사이드와 알루미늄사이드 금속간화합물 같은 고온 취성재료의 인성증대에 대해서도 아주 효과가 있다고 보고되어 있다.(Deve et al., 1990; Kajuch et al., 1995) Nb/MoSi₂복합재료에 대한 연구는 국내외적으로 아직 연구되고 있지 않은 상태이며 소결밀도와 제조조건의 최적화 및 제조온도에 따르는 계면반응층의 성장에 대한 기초 연구가 매우 중요하다. 특히, Nb판은 소성가공을 억제하므로 정확한 반응층의 특성평가는 매우 중요하다고 생각된다.

본 연구에서는 MoSi₂ 금속간화합물계 복합재료로서 Nb 판과 MoSi₂분말을 조합시켜 제조온도, 가압력, 가압유지시간을 변수로하여 핫프레스에 의한 제조실험을 행하여 제조조건이 Nb/MoSi₂ 적층복합재료의 소결밀도 및 계면반응층의 성장에 미치는 영향을 검토하였다. 또한, 마이크로 비커스 경도기, 광학현미경 및 EPMA를 사용하여 제조온도의 상승에 따라 변화하는 Nb/MoSi₂ 적층복합재료의 경도와 미세조직을 조사하였다. Nb와 다른 강화재를 첨가시킨 MoSi₂계 복합재료의 판재를 동일 방법으로 제조한 후 구리파이프전극을 사용한 ED-Drilling 가공을 수행하여 Nb/MoSi₂ 적층복합재료의 방전가공특성을 조사하였다.

2. 실험방법

2.1 재료

실험에 사용한 기지재로서는 평균입자직경 2.8 μm의 MoSi₂분말(일본신금속(株) 제작 : MoSi₂-F)을 사용하였다. MoSi₂분말의 화학성분을 Table 1에 나타내었다.(日本新金屬株式會社) 강화판재는 순도 99.9%, 두께 0.2 mm의 Nb 판을 사용하였고, 강화입자로는 평균 직경이 0.1 μm인 ZrO₂ 분말, 3.5 μm인 NbSi₂ 분말, 3.0 μm인 SiC 분말을 사용하였다.

MoSi₂와 Nb의 물성치를 Table 2에 나타내었다.(Badrinabrayanan et al., 1996)

Nb판재의 표면에 존재하는 산화막을 제거하기 위해 전해연마를 실시하였다. 전해연마액은 체적율로 황산(농도 97% H₂SO₄) 90%, 불산(농도 46% HF) 10%의 혼합용액을 사용하였다. 플라스틱 비이커에 연마액을 넣어서 양극에는 20 mm×85 mm로 절단한 Nb판을, 음극에는 스텐인레스판을 접속하였다. 전해연마는 전류 0.4 A(전압 약 14 V)로 유지해 3분간 처리하였고, 연마액의 온도상승을 방지하기 위해 연마는 빙수 탱크내에서 행하고, 용액은 상시교반을 행하였다. 전해연마 종료후, Nb판을 꺼내어 이온교환수로 세정하여 건조시켰다.

Table 1 Chemical composition of molybdenum disilicide powder(MoSi₂). (mass %)

Mo	Si	C	O	Fe
63.67	35.80	0.05	0.42	0.06

Table 2 Physical and mechanical properties of MoSi₂ and Nb.

Property	MoSi ₂	Nb
Crystal structure	bct	bcc
Density (Mg/m ³)	6.23	8.57
Melting point (K)	2303	2688
Coefficient of thermal expansion, α(K ⁻¹)		
at 293 K	~6.8×10 ⁻⁶	~7.3×10 ⁻⁶
at 1473 K	~10×10 ⁻⁶	~9.6×10 ⁻⁶
Young's modulus, E(GPa)	440	103
Tensile strength at 293 K(MPa)	325	170
Yield strength at 1473 K(MPa)	325	55
Elongation (%)	-	30
Brittle-ductile transition temperature(°C)	1000~1200	-100

2.2 제조방법

Nb/MoSi₂ 적층복합재료는 고온프레스장치(모델 P20VS R-16/20)을 사용하여 고진공에서 가압하는 고온프레스법에 의해 제조하였다.

Nb/MoSi₂ 적층복합재료는 Fig. 1과 같이 MoSi₂와 4장의 Nb판을 조합시킨 예비성형체를 진공속에서 일정온도로 가열한 후 가압하여 제작하였다. Table 3과 Fig. 2는 Nb/MoSi₂ 적층복합재료의 고온프레스 제조조건과 도식도를 나타내고 있다. 또한, MoSi₂ 분말에 ZrO₂, SiC, NbSi₂ 분말을 체적율로 20vol% 첨가한 MoSi₂ 금속간화합물계 복합재료를 온도1623K, 가압력 30MPa, 가압시간 3.6ks의 조건으로 고온프레스법으로 제조하였다.

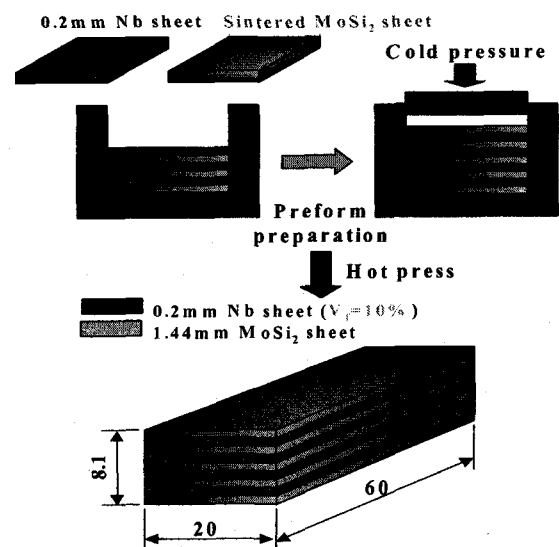


Fig. 1 Fabricating process of Nb/MoSi₂ Laminate Composites.

Table 3 Fabricating conditions of Nb/MoSi₂ laminate composites by hot pressing.

Volume fraction of Nb sheet (%)	10
Fabricating temperature (Maximum) (K)	1473, 1523, 1573, 1623, 1773
Fabricating pressure (Mpa)	30
Fabricating time (ks)	3.6
Vacuum pressure (Pa)	1.33 X 10 ⁻²

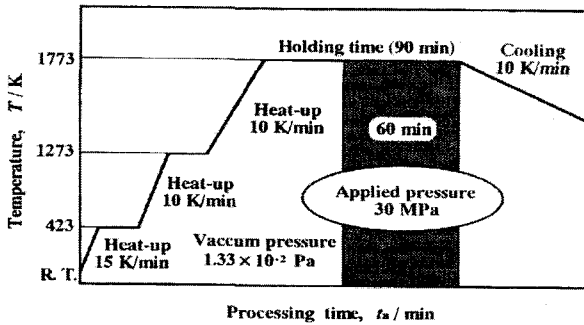


Fig. 2 Schematic diagram of hot press processing for the preparation of Nb/MoSi₂ laminate composites

2.3 미세조직 분석

고온프레스법으로 제작한 Nb/MoSi₂ 적층복합재료의 계면조직은 파장분석형 X선 분광분석기(WDS)가 내장되어 있는 EPMA(Electron probe micro analyzer, 모델 JXA-8900)를 사용하여 분석하였다. Nb와 MoSi₂의 계면반응층의 두께는 WDS의 선분석에 의해 정성분석을 행하고, Nb의 성분감소범위로서 결정하였다. 또, 계면반응층의 성분은 WDS의 점분석에 따라 반정량분석을 행하였다. 분석에 사용한 시료는 표면을 #100에서 #1500까지 연마하여 Al₂O₃ 분말로 polishing을 실시하였다. 또한, Nb/MoSi₂ 적층복합재료를 구성하는 공시재의 미세조직을 광학현미경(모델 PMG-3)으로 관찰하여 제조온도에 따른 입계성장의 변화를 관찰하였다. Nb판의 입계성장은 고온프레스로 뜨임한 시료를 사용해서 관찰하였다.

2.4 경도시험

MoSi₂ 금속간화합물계 복합재료의 계면반응층 및 각 구성재료에 대해 마이크로 비커스 경도시험기(MVK-G2)를 사용하여 측정하였다. 시료는 #1500 까지 연마를 한 후 Al₂O₃분말로 polishing하였고, 측정조건은 550배율로 하중 100g(9.8N), 가압시간 5초로 하였다. 9점을 측정한 것들 중에서 최대치 및 최소치를 뺀 나머지의 7점의 평균치를 재료의 경도로 하였다.

2.5 가공성 평가

방전에 의한 드릴링(Electrical Discharge-Drilling)가공은 종래의 기계가공으로는 곤란한 미세하고 긴 구멍을 방전현상을 이용하여 고속으로 구멍을 가공하는 것으로 ED-Drilling은 구멍직경 ϕ 0.1 - 4.0 mm의 가공이 가능하다. 전극이 안내되는 이송거리 250mm, 최대 가공전류 30 A, 테이블의 이송거리는 300X200mm인 서열방전가공기(SD-1M)을 사용하였다. Table 4는 MoSi₂계 복합재료의 ED-Drilling 조건을 나타내었다. Fig. 3과 같이 동합금재의 파이프 전극(외경 ϕ 0.1~4.0mm)을 저속으로 회전함과 동시에 세라믹으로 된 전극가이드를 따라 아래로 이송시키면서 방전시 발생한 고열에 의해 금속을 용융 가공하는 것이다. 전극 안으로 분사되는 방전액은 방전가공유 혹은 증류수에 흑연분말이 섞인 특수가공액으로서 방전가공분(debris)을 제거하며 전극과 공작물의 냉각작용을 한다.

ED-Drilling가공은 와이어방전가공의 개시구멍(start hole), 터빈 블레이드 등의 항공기부품의 냉각구멍, 플라스틱 금형의 공기취출 핀(air bleeding pin)과 이젝터 핀,

Table 4 ED-Drilling Condition for MoSi₂ based composites

Machining condition		12
Servo voltage		4
Condenser		C5
Electrode	core	ϕ 1.0 Cu
	plating	5 μ m thickness Cu
Dielectric		Oil for EDM
Workpiece plate	material	MoSi ₂ MoSi ₂ -SiC MoSi ₂ -ZrO ₂ MoSi ₂ -NbSi ₂ Nb/MoSi ₂ -ZrO ₂
	dimension (W×T×L)	20×2×80 (mm)

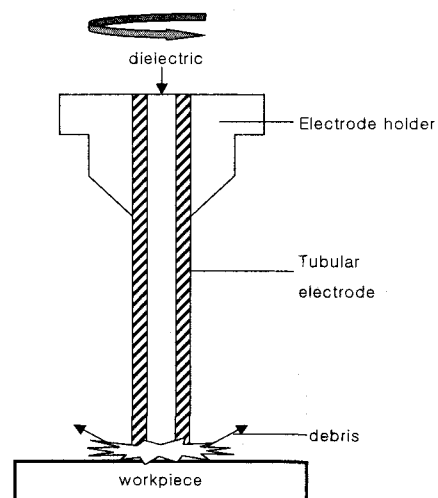


Fig. 3 Schematic diagram for ED-drilling process.

타이어 금형 및 신발금형의 공기구멍, 초경합금 등 난삭재의 구멍가공, 시계부품 등 긴 구멍을 가공하는 건 드릴링(gun drilling)의 대체 가공으로 응용되고 있다. 방전가공에 필요한 전기전도율은 100^1S/cm 이상으로서 복합재 중에서도 부도체인 폴리머기지 복합재(polymer-matrix composite)는 방전가공에 부적합하므로 금속 필러(Cu, Al, Ag 분말 등)를 침투시키면 전도체가 될 수 있다. 특별히 복잡한 형상의 고정밀도가 요구되는 금속기지 복합재(Metal Matrix Composite: MMC)가 방전가공에 이상적인 재료이며, 세라믹기지 복합재 중에는 전도체인 일부 재료만이 방전가공이 가능하다. 질화실리콘 기지의 복합재는 TiN를, 알루미늄 기지 복합재는 TiC를 첨가하여 전기적인 도체로 만들 수 있다.(김과 윤, 2000)

전극은 구리 파이프 전극을 사용하여 MoSi₂ 및 MoSi₂에 SiC, ZrO₂, NbSi₂ 등의 강화재를 첨가시킨 복합재의 판재를 ED-Drilling하였을 때 강화재의 종류가 방전가공속도에 미치는 영향을 비교하였다. 또 방전가공후의 구멍을 절단하여 입구측과 출구측의 구멍의 크기와 경사각, 표면특성 등을 광학현미경 및 주사식 전자현미경(Hitachi S-800)으로 분석하여 MoSi₂ 금속간화합물계 복합재료의 가공성에 대해 평가하였다. 방전드릴이 끝난 표면을 #100에서 #1500의 사포로 연마한 뒤 0.5 μm 의 Al₂O₃분말로 polishing을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미세조직

3.1.1 MoSi₂ 소결체와 Nb 판의 조직

Fig. 4는 1523K와 1773K의 온도에서 고온프레스법으로 소결한 MoSi₂ 단체의 미세조직을 관찰한 것이다. 가압력과 가압유지시간은 각각, 30MPa, 3.6ks이다. 제조온도의 상승에 따라, 1773K에서 소결한 MoSi₂단체에서 나타난 공극(혹색상)은 현저히 감소되며, 치밀한 조직을 형성한다. 이에 따라 1523K 온도에서 제작한 MoSi₂단체의 소결밀도는 약 79%인것에 비해 1773K의 온도에서는 약 94%를 나타내었다.

Fig. 5는 뜨임한 Nb판의 결정립을 관찰한 것이다. 뜨임 온도는 1473K와 1623K이다. 뜨임온도 1623K쪽 Nb판의 결정립이 약간크다.

3.2 비커스 경도 특성

Fig. 7은 1773K, 30MPa, 3.6ks의 제조조건으로 제작한 Nb/MoSi₂적층복합재료의 계면반응층에 대한 경도시험결과이다. 비교를 위해 그림에서는 동일조건으로 제작한 MoSi₂단체의 경도를 나타내었다. Nb와 MoSi₂와의 계면에서 형성된 (Nb, Mo)Si₂상과 Nb₅Si₃와의 경도는 각각 HV1247과 HV1421을 나타내어, MoSi₂단체의 경도(HV1160)에 비해 확연히 높다. 이와 같이, 계면반응층은 매트릭스보다 단단하며, 경도시험에서 취약

함을 확인하였다. 그리고, 탄성계수가 높을 것으로 예상된다.(이와 윤, 1999; 이와 윤, 1999)

3.3 방전가공 특성

3.3.1 표면특성

Fig. 8과 Fig. 9는 Cu 파이프전극으로 MoSi₂판재를 ED-Drilling가공을 실시한 구멍을 나타낸 것이다. Fig. 9는 Fig. 8의 단면이다. Fig. 9(b)는 (a)를 확대한 것으로 구멍의 표면에서부터 모재의 안쪽으로 방전에 의한 심한 균열이 발생하였음을 볼 수 있다. Fig. 9(a)는 Fig. 8의 MoSi₂판재의 구멍을 중앙에서 수직으로 절단한 단면이며 Fig. 9(b)는 Fig. 9(a)의 일부를 확대한 것이다. Fig. 9의 (a)와 같이 입구쪽이 출구쪽 보다 크고 경사진 구멍이 만들어진 것은 전극의 외벽을 따라 분사되는 방전액에 의해 방전액속의 가공분이 공작물과 전극의 측면에서 접촉하여 발생한 2차방전에 의한 것과 방전의 진행과 더불어 그 결과

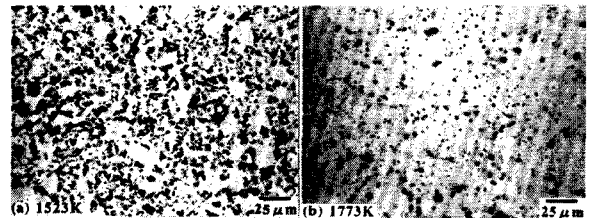


Fig. 4 Optical microscope images of monolithic MoSi₂ materials sintered at different temperatures. (a) 1623K, (b) 1773K

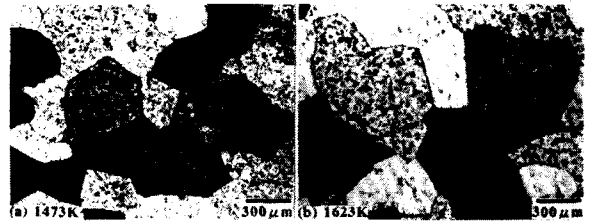


Fig. 5 Optical microscope images of Nb sheet after tempered at different temperatures. (a) 1473K, (b) 1623K

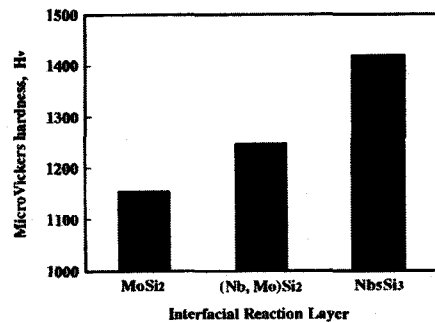


Fig. 7 Micro Vickers hardness of interfacial reaction layers in Nb/MoSi₂ laminate composites fabricated at 1773K under 30MPa and 3.6ks.

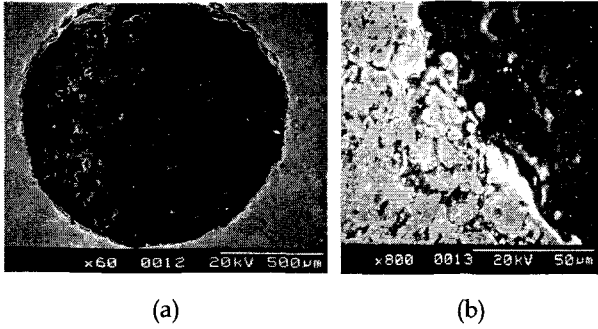


Fig. 8 ED-Drilled Hole (SEM by (a) X 60 and (b) X 800)

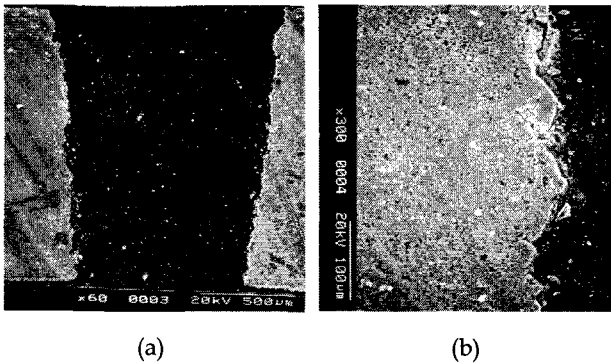


Fig. 9 Cross-Section of ED-Drilled Hole (SEM by (a) X 60 and (b) X 300)

측면이 마모로 인하여 작아진 전극에 의해 방전이 진행되었기 때문이라고 생각되며, 그 경사각은 5.62° 였다. Fig. 9 (b)는 (a)를 300배 확대한 것으로 방전에 의해 용융된 금속의 일부가 표면에 재응고된 것을 볼 수 있다. 이 층은 기계적 성질이 모재보다 떨어지므로 lapping이나 polishing에 의해 제거하는 것이 좋을 것으로 사료된다.

3.3.2 방전가공속도의 영향

Fig. 10은 Cu도금된 동 파이프 전극으로 ED-drilling 가공한 MoSi_2 금속간화합물계 복합재료의 가공속도(mm/min)를 나타낸 것이다. 가공속도는 MoSi_2 - NbSi_2 , MoSi_2 - SiC , MoSi_2 - ZrO_2 , MoSi_2 , Nb/MoSi_2 - ZrO_2 순으로 나타났다. MoSi_2 - NbSi_2 의 가공속도가 빠른 것은 MoSi_2 - NbSi_2 내에 다른 재료에 비해 용융점(1382°C)이 낮은 Si가 많이 포함되어있기 때문에 나타난 결과로 생각된다.

Fig. 11은 5회 방전가공 후의 전극을 나타낸 것이다. 방전시 발생한 고열에 의해 측면이 경사지게 마모되었으며 특히 끝이 심하게 마모된 것은 구멍의 드릴링에 있어서 공작물에 수직으로 닿는 전극의 맨 끝에서 스파크가 주로 발생하기 때문이라고 생각된다.

4. 결 론

Nb판과 MoSi_2 분말을 조합하고, 제조온도를 파라미터로하

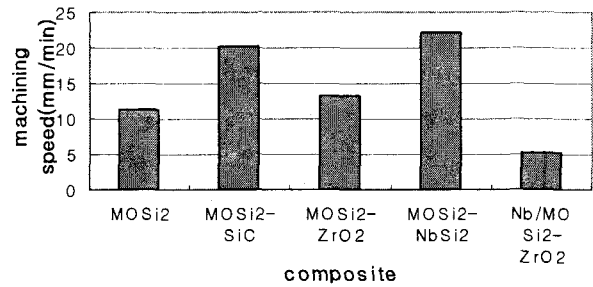


Fig. 10 Machining Speed of Composites

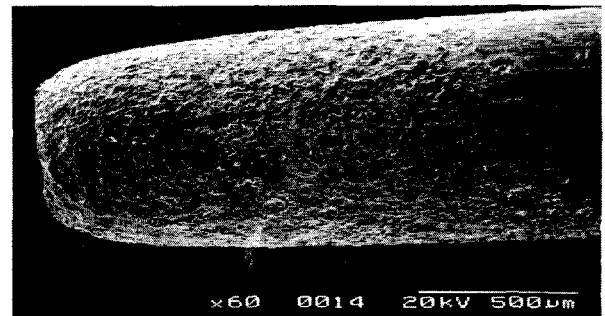


Fig. 11 Tubular Electrode after ED-Drilling

여 진공 고온프레스법으로 적층복합재료를 제작하여 소결 밀도, 계면반응층, 마이크로 비커스 경도를 평가하였다. 또한, MoSi_2 - ZrO_2 , MoSi_2 - SiC , MoSi_2 - NbSi_2 복합재료를 고온 프레스법으로 제조하여 ED-drilling 가공성을 검사하였다. 이들 결과에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) Nb/ MoSi_2 적층복합재료의 소결밀도는 일정한 압력과 유지시간에서 제조온도가 상승함에 따라 증가하여 온도 1773K , 가압력 30MPa , 가압유지시간은 3.6ks 의 제조조건에서 94%의 소결밀도를 나타내었다.
- (2) Nb/ MoSi_2 적층복합재료의 계면영역에서는 Nb층으로 확산하는 Mo와 Si의 원소에 의해 $(\text{Nb}, \text{Mo})\text{Si}_2$ 상과 Nb_5Si_3 상이 생기는 것을 알았다. 또, 적층복합재료의 제조온도 상승에 따라 계면반응층은 크게 성장하였다. 반응층의 성장은 Mo보다 빨리 Nb쪽으로 확산되는 Si의 양에 지배된다고 생각할 수 있다.
- (3) Nb/ MoSi_2 적층복합재료의 제조온도 상승에 의해, MoSi_2 판의 경도는 증가하지만, Nb판의 경도는 거의 동일한 정도(Hv150)를 나타내었다. 또, 계면반응층의 경도는 동일조건에서 제작된 MoSi_2 판에 비해 높고, Nb판 부근에 Nb_5Si_3 상의 경도가 $(\text{Nb}, \text{Mo})\text{Si}_2$ 상보다 높게 됨을 알았다.
- (4) 전통적 절삭가공으로는 구멍가공이 불가능하던 난삭재 MoSi_2 복합재료는 SiC, ZrO_2 와 같은 강화재에 비해서 NbSi_2 의 ED-Drilling 가공속도가 증가한다는 것을 알았다.

후 기

본 연구는 동의대학교 BK21사업단의 지원에 의해 수행된 연구로서 관계자에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김창호, 윤한기(2000). "MoSi₂기지 복합재료의 ED-Drilling", 한국정밀공학회, 춘계학술대회논문집, pp 886~889.
- 이상필, 윤한기(1999). "Nb/MoSi₂ 적층복합재료의 경도특성에 미치는 제조온도의 영향", 한국해양공학회지, 제13권, 제4호, pp 37~44.
- 이상필, 윤한기(1999). "Nb/MoSi₂ 적층복합재료의 제조온도에 의한 경도특성 평가", 한국해양공학회 춘계학술대회 강연논문집, pp. 220-225.
- 日本新金屬株式會社, Data Sheet.
- Alman, D. E. and Stoloff, N. S.(1995). "The effect of niobium morphology on the fracture behavior of MoSi₂/Nb composites", Metall. Mater. Trans., Vol. 26A, pp 289~303.
- Badrinarayanan, K., Mckelvey, A. L., Venkateswara Rao, K. T. and Ritchie, R.O.(1996). "Fracture and fatigue-crack growth behavior in ductile-phase toughening molybdenum disilicide: effect of niobium wire vs particulate reinforcements", Metall. Mater. Trans., Vol. 27A, pp 3781~3793.
- Deve, H. E., Evans, A. G., Odette, G. R., Mehrabian, R., Emiliani, M. L. and Hecht, R. J.(1990). "Ductile reinforcement toughening of γ -TiAl: effects of debonding and ductility", Acta metall. mater., Vol. 38, pp 1491~1502.
- Yoon H. K. and Lee S. P.(2001). "Bending Strength Characteristic of Al18B4O33W/AC4CH Composites by Heat Treatment", Int. J. of KCORE, Vol 4, No 2, pp 31~35.
- Gadalla, A.M., Bozkurt, B. and Faulk, N.M.(1991). "Modelling of Thermal Spalling during EDM of Titanium Diboride", J. American Ceramic Society, Vol. 74, No. 4, pp 801~806.
- Kajuch, J., Short, J. and Lewandowski, J. J.(1995). "Deformation and fracture behavior of Nb in Nb₅Si₃/Nb laminates and its effect on laminate toughness", Acta metall. mater., Vol. 43, pp 1955~1967.
- Stoloff, N. S. and Alman, D. E.(1991). "Powder processing of intermetallic alloys and intermetallic matrix composite", Mater. Sci. Eng., A144, pp 51~62.
- Venkateswara Rao, K. T., Soboyejo, W. O. and Ritchie, R. O.(1992). "Ductile-phase toughening and

- fatigue-crack growth in Nb-reinforcement molybdenum disilicide intermetallic composite", Metall. Mater. Trans., Vol. 23A, pp 2249~2257.
- Yan, B.H., Huang, F.Y., Chow, H.M. and Tsai, J.Y.(1999). "Micro-hole Machining of Carbide by EDM", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 87, pp 139~145.