

## MoSi<sub>2</sub> 기지 복합재의 ED-Drilling ED-Drilling of MoSi<sub>2</sub>-matrix Composites

김 창 호, 윤 한 기 (동의대 기계산업시스템 공학부)  
Chang-Ho Kim, Yoon Han-Ki (Dong-Eui University)

### Abstract

This paper describes the machining characteristics of the MoSi<sub>2</sub>-based composites by electric discharge drilling with various tubular electrodes. MoSi<sub>2</sub>-based composites has been developed in new materials for jet engine of supersonic-speed airplanes and gas turbine for high-temperature generator. By combining a nonconducting ceramics with more conducting ceramic it was possible to raise the electrical conductivity. In drilling by EDM, the dielectric flushed down the interior of the rotating tube electrode, in order to facilitate the removal of machining debris from the hole. Various metal-coated tubular electrodes of which core are copper and brass are used to know the effect of coating material on machinability of ED drilling.

Key words : Electric Discharge Machining(EDM: 방전가공), ED-Drilling(방전에 의한 드릴링), Dielectric (방전액),

### 1. 서 론

차세대 항공기의 제트 엔진과 고온 발전용 가스터빈 등과 같이 고온, 고압 환경에서 사용되는 신소재인 니켈합금, MoSi<sub>2</sub>재, Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Ti-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 금속간 화합물 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 MoSi<sub>2</sub>재는 1200℃ 이상의 고온에서 크리프 강도와 내산화성은 우수하지만 취성이 강하고, 기계가공이 어려운 단점이 있으므로 실온취성을 개선하기 위해, SiC, ZrO<sub>2</sub>, NbSi<sub>2</sub> 등의 세라믹과 니오븀(Niobium:Nb)과 같은 금속 강화재와의 복합화가 행해지고 있다.<sup>(1)-(4)</sup> 특히 Nb 강화상은 우수한 연성을 갖고 있으며 MoSi<sub>2</sub>와 유사한 열팽창계수를 가지고 있으므로 MoSi<sub>2</sub>의 상대재료로써 적합할 뿐 아니라 고융점 실리사이드와 알루미늄나이트 금속간 화합물 같은 저온 취성재료의 인성을 증가시키는데 효과적이라고 보고하고 있다.<sup>(5)</sup>

금속기지 복합재(metal-matrix composite: MMC) 및 세라믹기지 복합재(ceramic-matrix composite)의 개발과 더불어 전통적인 절삭가공방식으로는 이

들을 가공하는 것이 부적절하게 되었다. 따라서 이러한 복합재들을 가공하기 위하여 레이저가공, 워터젯트(water jet: WJ), 연마제 워터젯트(abrasive water jet: AWJ) 및 방전가공, 전해방전가공 및 초음파가공 등이 종래의 가공방법을 대체하게 되었다. B.H.Yan 등은 동전극으로 카아바이드에 미세한 구멍을 방전가공 할 때 전극의 소모와 구멍의 크기, 방전분(debris)등의 특성을 연구하였다.<sup>(6)-(8)</sup>

Gadalla 등은 TiB<sub>2</sub>를 포함한 다양한 세라믹재료들에 대한 와이어방전가공 대한 연구를 수행하였는데, 알루미늄에 TiC를 첨가시킴으로 전도성이 향상되게 하는 등 비전도체인 세라믹을 전도체인 세라믹과 결합시켜 전기저항율이 낮아지게 하였다.<sup>(9)-(11)</sup>

### 2. 본 론

방전에 의한 드릴링(Electrical Discharge-Drilling)은 종래의 드릴과 같은 기계가공으로는 곤란한 미세하고 긴 구멍을 방전현상을 이용하여 고속으로 구멍가공하는 것으로서 Fig.1과 같이 동합금계의 파이프

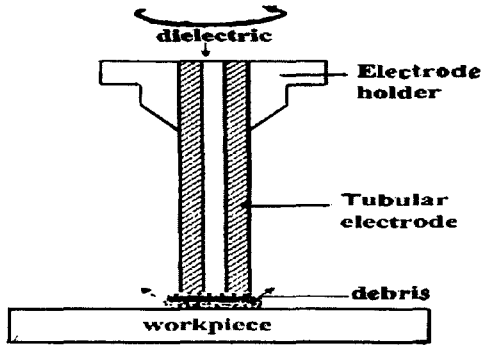


Fig.1 Principle of Ed-Drilling

전극(외경  $\phi 0.1 \sim 4.0\text{mm}$ )을 저속으로 회전함과 동시에 세라믹으로 된 전극가이드를 따라 아래로 이송시키면서 방전시 발생한 고열에 의해 금속을 용융 가공하는 것이다. 전극 안으로 분사되는 방전액은 방전액은 방전가공유 혹은 증류수에 흑연분말이 섞인 특수가공액으로서 방전가공분(debris)을 제거하며 전극과 공작물의 냉각작용을 한다.

ED-Drilling은 와이어방전가공의 개시구멍(start hole), 터어빈 블레이드 등의 항공기부품의 냉각구멍, 플라스틱 금형의 공기취출 핀(air bleeding pin)과 이젝터 핀, 타이어 금형 및 신발금형의 공기구멍, 초경합금 등 난삭재의 구멍가공, 시계부품 등 긴 구멍가공 건 드릴링(gun drilling)의 대체가공으로 응용되고 있다. 방전가공에 필요한 전기전도율은  $100^{-1}\text{S/cm}$  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. 따라서 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.

본 연구는 전극은 구리 파이프 전극을 사용하여 MoSi<sub>2</sub> 및 Nb/MoSi<sub>2</sub> 기지재(matrix)에 SiC, ZrO<sub>2</sub>, NbSi<sub>2</sub> 등의 강화재를 첨가시킨 복합재의 판재를 ED-Drilling하였을 때 강화재의 종류 및 도금재료가 방전가공속도에 미치는 영향을 비교하였다. 또 방전가공후의 구멍을 절단하여 입구측과 출구측의 구멍

의 크기와 경사각, 표면특성 등을 광학현미경 및 주사식 전자현미경 등을 이용하여 분석하였다.

### 3. 실험방법 및 장치

#### 3.1 실험기계

본 실험에 사용된 ED-Drilling기계는 구멍의 직경  $\phi 0.1 \sim 4.0\text{mm}$ 의 가공이 가능한 세혈방전가공기(SD-1M: KTC사, 한국)로서 전극이 안내되는 이송거리는 250mm, 최대 가공전류 30A, 테이블의 이송거리는  $300 \times 200\text{mm}$ 이다. 전극은 외경  $\phi 1.0 \times 300\text{mm}$ 의 구리 파이프에 Zn, Sn, Ag, Cu 등을 약  $5\mu\text{m}$  도금한 전극이며 방전가공 전용의 방전액을 사용하였다.

#### 3.2 실험 재료

실험에 사용한 기지재로서는, 평균입자지름  $2.8\mu\text{m}$ 의 MoSi<sub>2</sub> 분말(일본신금속(株) 제작: MoSi<sub>2</sub>-F)을 사용하였다. MoSi<sub>2</sub> 분말의 화학성분을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical Composition of Molybdenum Disilicide Powder(MoSi<sub>2</sub>) (mass %)

Mo	Si	C	O	Fe
63.67	35.80	0.05	0.42	0.06

Table 2 Properties of materials

Material composition	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Density (mg/m <sup>3</sup> )	Melting point (°C)
MoSi <sub>2</sub>	325	440	6.23	2030
Nb	170	103	8.57	2467
ZrO <sub>2</sub>	-	206	6.05	2227
SiC	20.6	480	3.18	2690

실험용 시편은 MoSi<sub>2</sub> 및 Nb/MoSi<sub>2</sub> 기지재에 SiC, ZrO<sub>2</sub> 분말강화재 혹은 두께 0.2mm의 NbSi<sub>2</sub> 판재로 적층하여 조합시킨 예비성형체를 (강화재의 Table2는 각 재료의 물성치를 나타낸 것이다.) 고진공, 고온에서 진공 열간압축하여 제작하였다. 강화재의 체적비는 20%이며 열간압축기는 모델 P20VSR-16/20을 사용하였다. 방전드릴이 끝난 표면을 #100에서 #1500의 사포로 연마한 뒤  $0.5\mu\text{m}$ 의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말로 polishing

을 실시하였다.

Table3 Chemical Composition of Composites

composites	composition in wt %			
	MoSi <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	NbSi <sub>2</sub>	Nb/MoSi <sub>2</sub>
MoSi <sub>2</sub>	100			
MoSi <sub>2</sub> -ZrO <sub>2</sub>	80	20		
MoSi <sub>2</sub> -SiC	80	20		
MoSi <sub>2</sub> -NbSi <sub>2</sub>	80		20	
Nb/MoSi <sub>2</sub> -ZrO <sub>2</sub>		20		80

Table. 4 ED-Drilling Condition

Machining condition		12
Servo voltage		4
Condenser		C5
Electrode	core	Ø1.0 Cu
	plating	5µm thickness Cu
Dielectric		Oil for EDM
Workpiece plate	material	MoSi <sub>2</sub> MoSi <sub>2</sub> -SiC MoSi <sub>2</sub> -ZrO <sub>2</sub> MoSi <sub>2</sub> -NbSi <sub>2</sub> Nb/MoSi <sub>2</sub> -ZrO <sub>2</sub>
	dimension (W×T×L)	20×2×80 (mm)

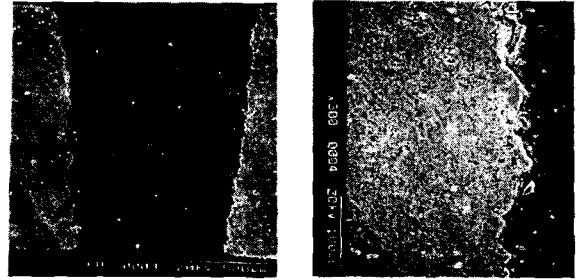


Fig.3 Cross-Section of ED-Drilled Hole (SEM by (a) X 60 and (b) X 300)

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 표면 특성

Fig.2는 Cu 파이프전극으로 MoSi<sub>2</sub> 판재를 ED-Drilling 의해 가공한 구멍으로서 Fig.3은 Fig.2의 단면이다. Fig.2(b)는 (a)를 Fig.3(a)는으로 구멍의 표면에서부터 모재의 안쪽으로 방전에 의한 심한 크랙이 생겼음을 볼 수 있다. Fig.3(a)는 Fig.2의 MoSi<sub>2</sub> 판재의 구멍을 중앙에서 수직으로 절단한 단면이며 Fig.3(b)는 Fig.3(a)의 일부를 확대한 것이다. Fig.3의 (a)와 같이 입구쪽이 출구쪽 보다 크고 경사진 구멍이 만들어진 것은 전극의 외벽을 따라 분사되는 방전액에 의해 방전액 속의 가공분이 공작물과 전극의 측면에서 접촉하여 발생한 2차방전에 의한 것과 방전의 진행과 더불어 그 끝과 측면이 마모로 인하여 작아진 전극에 의해 방전이 진행되었기 때문이라고 생각된다. 경사각은 5.62° 였다. Fig.3(b)는 (a)를 300배 확대한 것으로 방전에 의해 용융된 금속의 일부가 표면에 재고된 것을 볼 수 있다. 이 층은 기계적 성질이 모재에 의해 떨어지므로 lapping이나 polishing에 의해 제거하는 게 좋다.

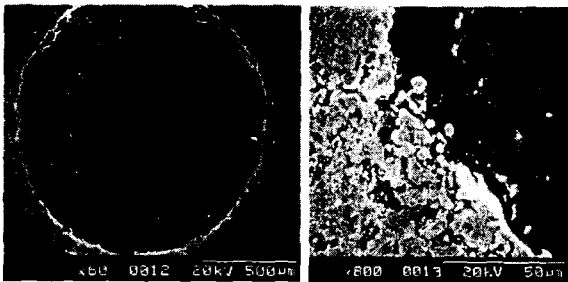


Fig.2 ED-Drilled Hole (SEM by (a) X 60 and (b) X 800)

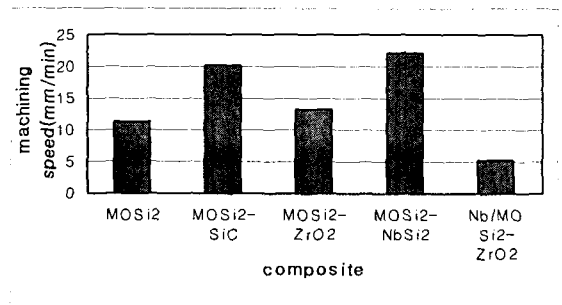


Fig. 4 Machining Speed of Composites

## 4.2 방전 가공속도

Fig.4는 Cu도금된 동 파이프 전극으로 여러 복합 재를 가공하였을 때의 가공속도(mm/min)로서 MoSi<sub>2</sub>-NbSi<sub>2</sub>, MoSi<sub>2</sub>-SiC, MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>, MoSi<sub>2</sub>, Nb/MoSi<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 순으로 나타났다. 이것은 MoSi<sub>2</sub>-NbSi<sub>2</sub> 내에 다른 재료에 비해 용융점(1382℃)이 낮은 Si가 많이 포함되었기 때문에 나타난 결과로 생각된다.

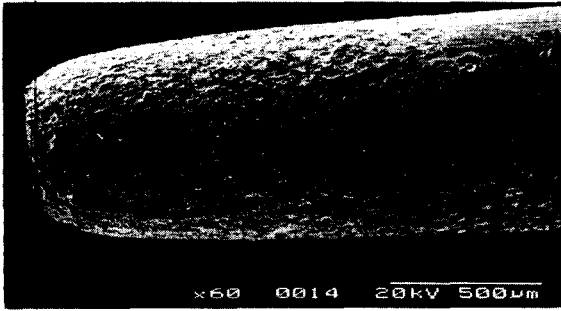


Fig. 5 Tubular Electrode after ED-Drilling

Fig.5는 5회 방전가공 후의 전극으로서 방전시 발생한 고열에 의해 측면이 경사지게 마모되었으며 특히 끝이 심하게 마모된 것은 구멍의 드릴링에 있어서 공작물에 수직으로 닿는 전극의 맨 끝에서 스파크주로 발생하기 때문이라고 생각된다.

## 5. 결 론

전통적인 절삭가공에 의한 방법으로는 구멍가공이 불가능하였던 난삭재인 MoSi<sub>2</sub> 복합재를 방전을 응용한 ED-Drilling에 의해 가공함으로써 기타 다른 복합소재도 그 가능성을 볼 수 있게 되었다. 용융점(1332℃)이 낮은 Si를 많이 포함한 MoSi<sub>2</sub>-NbSi<sub>2</sub> 복합재가 가공속도가 가장 빠른 것으로 나타났다. 그러나 가공된 구멍은 크랙의 크기가 심하고 열영향층이 깊기 때문에 모재에 비해 기계적 성질이 크게 약화될 것으로 보인다. lapping이나 polishing에 의한 광택에 의해 제거할 수 있는 방법을 모색하거나 크랙을 방지할 수 있는 전원장치를 추후 개발해야 할 것으로 보인다.

## Reference

1. D.E. Alman and N.S. Stoloff, "Effect of Ductile

Reinforcement Morphology on Toughening of MoSi<sub>2</sub>", *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol. 273, pp. 247-252, 1992.

2. L. Shaw and R. Abbaschian, "Toughening MoSi<sub>2</sub> with Niobium Morphology Metal-Effects of Size and Orientation of Ductile Laminate", *Metall. Trans.*, Vol. 24A, pp.403-415, 1993.

3. Y. Suzuki, A. Nakahira, T. Sekino and K.Nihara, "Microstructure and Mechanical Properties of MoSi<sub>2</sub>/SiC Composites", *American Ceramic Society, Ceramic Transactions*, Vol. 44, pp. 427-434, 1994.

4. Y. Suzuki, T. Sekino and K.Nihara, "Effect of ZrO<sub>2</sub> Addition on Microstructure and Mechanical Properties of MoSi<sub>2</sub>", *Scripta Metall. et Mater.*, Vol. 33 pp. 69-74, 1995.

5. 이상필, 윤한기, "Nb/MoSi<sub>2</sub> 적층복합재료의 경도 특성에 미치는 제조온도의 영향", *한국해양공학회지*, Vol. 13, No.4, pp.37-44, 1999.

6. Danqing Yi and Changhai Li, "MoSi-ZrO<sub>2</sub> Composites-Fabrication, Microstructures and Properties", *Materials Science and Engineering A261*, pp. 89-98, 1999.

7. T. Masuzawa, J. Tsukamoto, M. Fujino, "Drilling of Deep Microholes by EDM", *Annals of the CIRP*, Vol. 38, No. 1, pp.195-198, 1989.

8. B.H. Yan, F.Y. Huang, H.M. Chow and J.Y. Tsai, "Micro-hole Machining of Carbide by EDM", *Journal of Materials Processing Technology* 87, pp. 139-145, 1999.

9. A.De Silva and J. Rankine, "Electrical Discharge Machining of Metal Matrix Composites", *Proc. of ISEM XI*, pp. 75-84, 1995.

10. A.M. Gadalla, B. Bozkurt and N.M. Faulk, "Modelling of Thermal Spalling during EDM of Titanium Diboride", *J. American Ceramic Society* Vol. 74, No. 4, pp. 801-806, 1991.

11. J. Kozak, L. Dabrowski, M. Rozenek and J. Cepiak, "WEDM of Multilayer Metal Matrix Composites and Laminate Structures", *Proc. of the 11th Inter. Symp. Electromachining(ISEM-11)*, pp. 427-436, 1995.