

# 전도성을 가지는 하이브리드 $Ti_2AlN$ 세라믹 복합체의 마이크로 방전드릴링에서 가공성 평가

허재영 · 정영근 · 강명창\* · Ahmed BUSNAINA<sup>a</sup>

부산대학교 하이브리드소재 솔루션 국가핵심연구센터(융합대학원), <sup>a</sup>노스이스턴대학교 기계산업공학과

## Machinability Evaluation of Hybrid $Ti_2AlN$ Ceramic Composites with Conductivity in Micro Electrical Discharge Drilling Operation

Jae-Young Heo, Young-Keun Jeong, Myung-Chang Kang\* and Ahmed BUSNAINA<sup>b</sup>

National Core Research Center for Hybrid Materials Solution, Pusan National University, San 30,

Jangjeon-Dong, Geumjeong-Gu, Busan 609-735, Korea

<sup>a</sup>Department of Mechanical and Industrial Engineering, Northeastern University, Boston MA02115, USA

(Received August 20, 2013; Accepted August 23, 2013)

**Abstract**  $Ti_2AlN$  composites are a laminated compounds that possess unique combination of typical ceramic properties and typical metallic(Ti alloy) properties. In this paper, the powder synthesis, SPS sintering, composite characteristics and machinability evaluation were systematically conducted. The random orientation characteristics and good crystallization of the  $Ti_2AlN$  phase are observed. The electrical and thermal conductivity of  $Ti_2AlN$  is higher than that of Ti6242 alloy. A machining test was carried out to compare the effect of material properties on micro electrical discharge drilling for  $Ti_2AlN$  composite and Ti6242 alloy. Also, mixture table as a kind of tables of orthogonal arrays was used to know how parameter is main effective at experimental design. Consequently, hybrid  $Ti_2AlN$  ceramic composites showed good machining time and electrode wear shape under micro ED-drilling process. This conclusion proves the feasibility in the industrial applications.

**Keywords :** Conductivity, Hybrid  $Ti_2AlN$ , Ceramic composite, Micro electrical discharge drilling

### 1. 서 론

최근 구조용 재료는 기능적 한계에 부딪혀 신소재 개발을 통하여 우수한 고온강도, 높은 탄성계수, 내식성, 내마멸성 등의 성질을 가진 복합재료가 실용화 단계에 있다[1]. 그중 세라믹 복합체의 적용은 높은 취성에 의한 가공 등의 어려움이 많아 새로운 가공기술을 필요로 한다. 세라믹 복합체는 선삭, 밀링 등의 전통적인 절삭가공방식으로는 고정밀도와 복잡한 형태의 가공이 어려운 실정이며, 특수가공방식인 레이저가공, 초음파가공, 방전가공 등이 매우 유익한 가공방식으로 추천된다. 그중 방전가공은 취성이 높아 가공이 불가능한 소재도 전기전도성만 있으면 복잡한 형상을 가공하는데 가장 적합한 방법으로 알려져 있다[2].

세라믹(Ceramic)소재는 고분자나 금속보다 열적, 기계적, 화학적으로 안정한 성질로 인해, 가볍고, 강도가 크고, 내열·내식성이 뛰어난 특성을 가지고 있으며, 티타늄(Titanium)은 알루미늄에 비해 용융점이 높고, 비강도와 크리프(Creep) 성질이 우수하며, 내식성이 뛰어나 자동차와 항공기 엔진, 터빈, 우주선 외관 등에 널리 사용되고 있다. 하지만, 티타늄합금 중에서 Ti6242합금은 고온에서의 내산화성이나 조직안정성이 매우 우수하나, 강도가 높아 절삭공구의 파손과 칩핑(Chipping)을 일으키기 쉽고, 열전도도율이 낮아 공구의 급격한 온도상승과 마멸을 촉진시키는 단점이 있다[3].

Bassoum에 의해 제안된 MAX phases는 금속과 세라믹의 독특한 결합을 보여주는데, 육방격자(Hexagonal

\*Corresponding Author : Myung-Chang Kang, TEL: +82-51-510-2361, FAX: +82-51-510-7396, E-mail: kangmc@pusan.ac.kr

lattice)의 C축을 따라 교대로 일어나는 강한 원자가 전자를 공유하는 M-X와 상대적으로 약한 M-A의 금속결합에 의해서 각 층마다의 고유한 특성을 가진다. 지금까지의 연구는 Ti-Si-C계, Ti-Al-N계의 3성분계를 가진 나노박막의 기계적, 전기적, 열적, 트라이볼로지적인 특성평가에 제한적으로 이루어지고 있다[4-6]. 이러한 MAX phases는 자동차, 항공우주분야의 내열부품으로서, 전기적인 회전체, 베어링, 발열체, 열교환기 등에 활용될 것으로 예상된다.

한편, 마이크로 방전가공은 작은 방전에너지를 이용하여 비접촉식으로 소재를 제거하고, 고종횡비의 구멍가공과 복잡한 형상가공이 용이하다. 방전가공의 한 종류인 마이크로 방전드릴링(Micro ED-drilling, Micro Electrical Discharge Drilling)은 비어있는 관형태의 중공축(Hollow shaft)을 공구전극으로 사용하여 수십  $\mu\text{m}$ 부터 수 mm 직경의 비교적 깊은 구멍을 빠르고 정밀하게 가공할 수 있다. 특히, 비어있는 관으로 고압의 방전액이 연속적으로 공급되고 이는 가공 중 발생하는 부스러기(Debris)의 배출을 용이하게 하는 장점이 있다[7].

따라서, 본 연구에서는 티타늄과 알루미늄 그리고 질화 티탄 분말을 1:1:1로 합성하여,  $\text{Ti}_2\text{AlN}$  세라믹 복합체를 스파크플라즈마소결(SPS, Spark Plasma Sintering, SPS-825, SPS Syntex Inc.)법에 의해 제조하였다. 그 복합체의 재료특성으로서 X-선회절, EPMA, 밀도, 경도, 전기전도도, 열전도도를 측정 및 분석하였다. 그리고 마이크로 방전드릴링에 의한 복합체의 가공성을 평가하기 위해, 실험의 효율성을 고려한 혼합직교배열표를 도입하였다. 이를 통해, 방전가공조건에 따른 가공시간과 전극마모길이에 대한 가공성을 평가하였다.

## 2. 실험

### 2.1. $\text{Ti}_2\text{AlN}$ 세라믹 복합체의 제조 및 특성평가

그림 1은 전도성 하이브리드  $\text{Ti}_2\text{AlN}$  세라믹 복합체를 제조하기 위한 일련의 공정과 그 재료의 특성을 평가하는 항목에 대한 흐름도를 나타내었다. 전도성 하이브리드  $\text{Ti}_2\text{AlN}$  세라믹 복합체를 제조하기 위해 Ti(99.5% purity, 10  $\mu\text{m}$ ), Al(99.8% purity, 3  $\mu\text{m}$ ), TiN(99.5% purity, 3  $\mu\text{m}$ )의 분말을 사용하였다. 각각의 분말은 Ti:Al:TiN=1:1:1의 비율로 혼합하여 200 rpm으로 1.5시간동안 어트리션 볼 밀링(Attrition ball milling)을 수행하였다. 균일하게 혼합된 분말은 직경 30 mm의 흑연몰드에 넣어 먼저 성형을 한 후, SPS로 벌크시편을 제조하였다. 이때 시편의 제조조건은 소결온도 1230°C, 가압력 40 MPa, 10분 동안 그 온도와 압력을 유지하여 제조하였고, 그림 2는 소결시간에 따른 소결온도와 압력을 그래프로 나타내었다. SPS는 DC

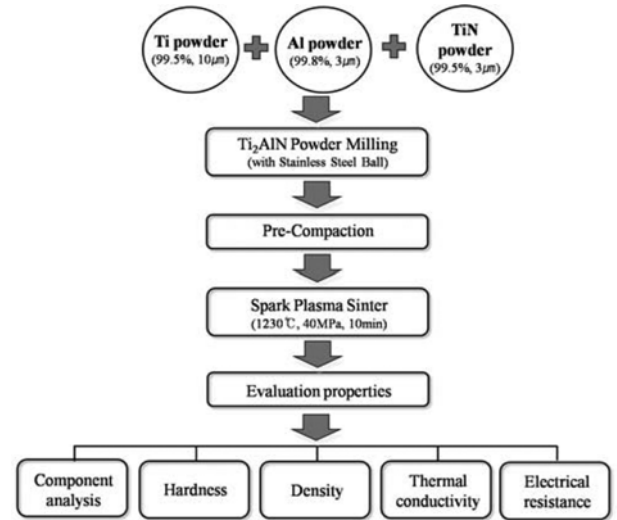


Fig. 1. Schematic diagram for fabrication of  $\text{Ti}_2\text{AlN}$  ceramic composites.

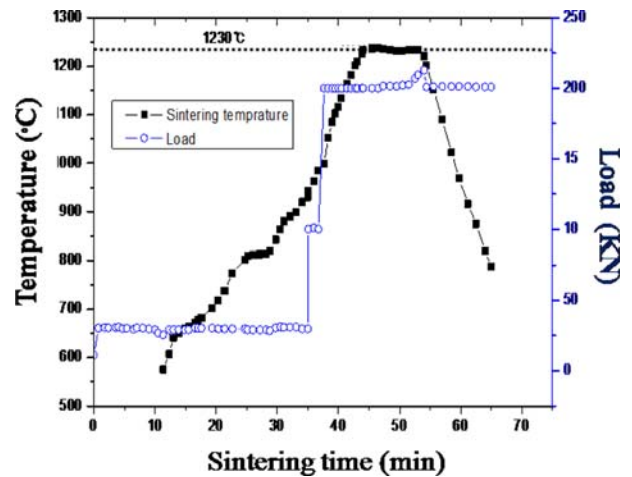


Fig. 2. Sintering temperature and load data optimized by spark plasma sintering method.

전류가 On/Off펄스의 형태로 가해지면서 온도를 상승시키는 통전 가압에 의한 방식으로 단시간에 상대적으로 낮은 온도에서 고밀도의 성형이 가능하며, 빠른 공정시간으로 비정질 합금의 결정립 성장 및 결정화를 억제할 수 있는 효과가 있다[8].

한편, 소결 후 복합체의 재료특성을 조사하기 위하여, 제조된 시편은 X-선회절(X-ray Diffraction, D8 advance, Bruker)분석을 이용하여 결정성 물질의 구조에 관한 정보를 얻었고, EPMA(Electron Probe Micro Analyzer, EPMA1600, Shimadzu)를 이용하여 제조된 복합체의 각 구성 원소들의 양을 분석하였다. 또한 밀도, 경도, 전기전도도, 열전도도 등의 재료특성은 기보고된 저자의 논문을 활용하였다[9].

### 2.2. 마이크로 방전드릴링 장치 및 방법

$\text{Ti}_2\text{AlN}$  세라믹 복합체의 가공성 평가를 위한 마이크로

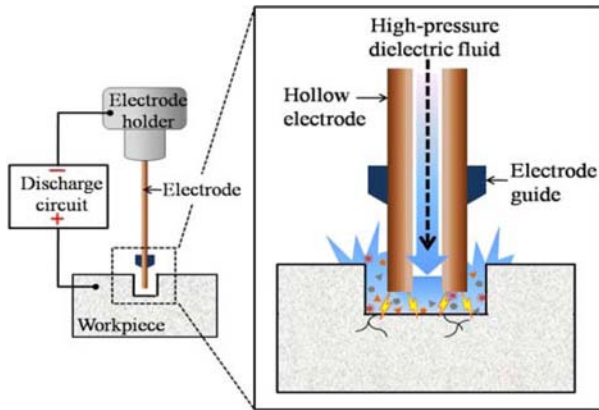


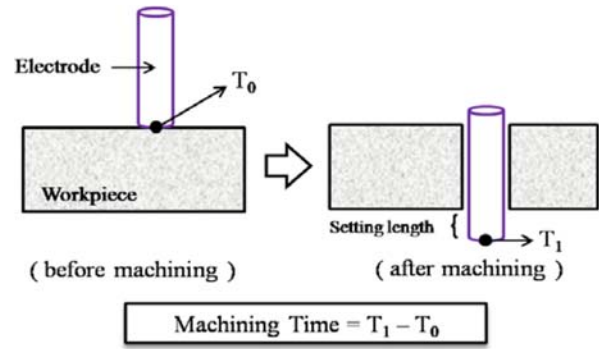
Fig. 3. Schematic diagram of the micro ED-Drilling.

Table 1. Experiment conditions for Micro-ED drilling

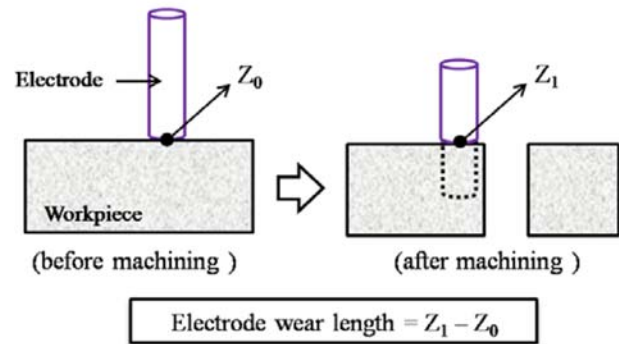
Electrode	
Material	Copper
Outside / Inside diameters	300 μm / 100 μm
Length	300 mm
Workpiece	
Material	Ti <sub>2</sub> AlN, Ti6242
Thickness	1.2 mm (Aspect ratio:4)
Circuit factors	
Levels	
Voltage (V)	30, 60
Peak current (stage)	3, 6, 9 (1stage=15A)
On time (μs)	10, 15, 20
Off time (μs)	10, 30, 50

방전드릴링의 개략도를 그림 3에 나타내었다. 환봉형태의 전극을 사용하는 기존 방전가공에 비하여 방전드릴링은 비어있는 공구전극을 통해 고압의 방전액을 분사시켜 가공부스러기를 원활하게 배출시켰다. 실험조건은 표 1에 나타낸 바와 같이 직경 300 μm의 구리전극을 공구로 사용하였고, 공작물은 제조된 Ti<sub>2</sub>AlN 복합체와 내열성 금속 소재로 자주 쓰이는 Ti6242합금소재를 사용하였다. 공작물의 두께는 종횡비(Asspect ratio) 4에 해당하는 1.2 mm로 하였다.

또한 방전가공 실험은 방전 전원조건(제어인자)들과 가공평가인자(대안인자)들에 의한 많은 실험횟수를 효율적으로 줄이기 위하여 실험계획법(Design of experiments)을 도입하였다. 방전가공 공정에서의 주요요인들은 복잡한 교호작용에 따라 많은 실험적인 분석이 필요하므로, 본 연구에서는 실험의 수를 적게하면서 요인의 주효과(Main effect)를 극대화하기 위한 방법으로 혼합직교배열표를 사용하였다[10]. 제어인자(전압, 피크전류, 펄스 온타임, 펄스 오프타임) 중에서, 주어진 전원회로의 특성상 전압인자는 2수준(30, 60V) 그리고 피크전류인자는 1stage 당 15A 값을 가지며, 3수준(3stage=15A, 6stage=30A, 9stage=45A)



(a) measuring method of machining time



(b) measuring method of electrode wear length

Fig. 4. Measurement method of machinability evaluation.

으로 실험을 수행하였다.

방전가공성 평가방법은 그림 4에 나타내었고, 가공시간은 가공 전 시간을 T<sub>0</sub>, 가공 후 (세팅이 되어있는 지점: 관통 후 2 mm) 시간을 T<sub>1</sub>이라 할 때 T<sub>1</sub>-T<sub>0</sub>를 가공시간으로 측정하였다. 전극마모길이는 공구전극과 시편이 닿은 지점에서 기계좌표의 Z축을 읽어 가공 전 좌표를 Z<sub>0</sub>, 가공 후 좌표를 Z<sub>1</sub>이라 할 때 Z<sub>1</sub>-Z<sub>0</sub>를 전극마모길이를 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 하이브리드 Ti<sub>2</sub>AlN 세라믹 복합체의 특성

소결조건인 1230°C에서 10분 동안 Ti+Al+TiN의 원 분말을 혼합한 Ti<sub>2</sub>AlN 세라믹 복합체의 XRD 패턴을 그림 5에 나타내었다. 고유한 순수 Ti<sub>2</sub>AlN 상이 나타났으며, 비방향성인 막 형성(Random orientation)과 우수한 결정화(Crystallization) 구조를 보였다. 이러한 결과로부터, Ti+Al+TiN→Ti<sub>2</sub>AlN로의 반응은 SPS소결과정 중에 다결정화의 형성에 기인하여 발생함을 알 수 있다. 이는 앞서 보고한 결과와 매우 잘 일치한다[9].

그림 6은 EPMA에 의한 각 구성 원소들의 양(%)을 분석한 결과로서, Ti:Al:N=2:1:1의 비율로 최초 파우더

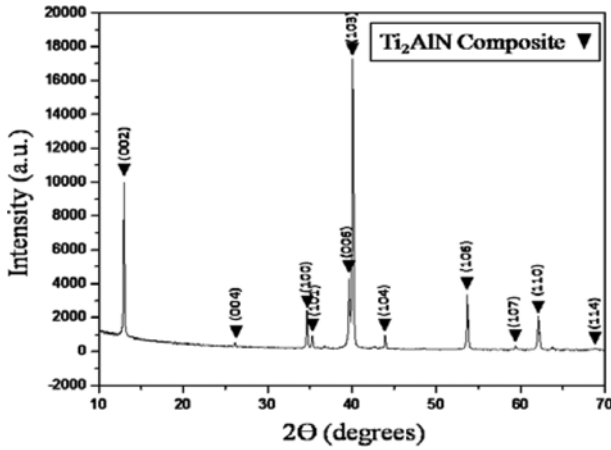


Fig. 5. XRD pattern of sintered Ti<sub>2</sub>AlN composite.

Ti:Al:TiN=1:1:1의 혼합비율과 거의 일치함을 알 수 있다. Ti<sub>2</sub>AlN 복합체와 Ti6242합금소재의 재료적 특성은 표 3에 나타내었다. Ti<sub>2</sub>AlN 복합체는 Ti6242합금소재에 비하여 비커스(Vickers)경도 값은 약 2배 정도 높고, 전기전도도와 열전도도도 더 크다는 것을 알 수 있다. Ti<sub>2</sub>AlN는 세라믹 (TiN)의 비전도성으로부터 새로운 하이브리드 전도성을 가지는 복합체임을 알 수 있다.

3.2. 하이브리드 Ti<sub>2</sub>AlN 세라믹 복합체의 가공성 평가

혼합적교배열표에 의한 18회의 실험조건에 의해서, 전도성 하이브리드 Ti<sub>2</sub>AlN 세라믹 복합체와 Ti6242합금소재에 대해 방전드릴링 실험을 행하여, 각 조건에 따른 가공시간과 전극마모길이에 대해서 측정한 결과를 표 4에 나

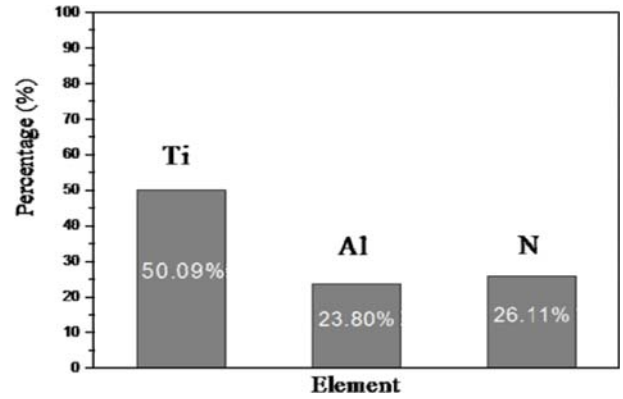


Fig. 6. Quantitative analysis using EPMA for sintered Ti<sub>2</sub>AlN composite.

Table 2. Comparisons of material properties for Ti<sub>2</sub>AlN composite and Ti6242 alloy[6]

Properties	Ti <sub>2</sub> AlN	Ti6242
Hardness (GPa)	6.3	3.5
Density (g/cm <sup>3</sup> )	4.31	4.5
Melting point (°C)	2520	1668
Electrical resistivity (μΩ · cm)	30	42
Thermal conductivity (W/m·K)	55.8	21.9

타내었다. 교호작용은 구하지 않고, 주로 제어인자만 배치하여 얻어진 결과로서, 출력에 대한 특성치 평가는 가공시간과 전극마모길이에 대하여 분석하였다. 이때, 정특성의 평가방법으로 망소개념을 도입하였으며, 다구찌기법을 손쉽게 응용할 수 있는 Minitab 프로그램을 사용하여 산술

Table 3. The results of machinability evaluation through micro ED-drilling of Ti<sub>2</sub>AlN composites Ti6242 alloy

No.	Voltage (V)	Peak current (stage)	On time (μs)	Off time (μs)	Machining time (s)		Electrode wear length (mm)	
					Ti <sub>2</sub> AlN	Ti6242	Ti <sub>2</sub> AlN	Ti6242
1	30	3	10	10	156	1213	0.513	0.575
2	30	3	15	30	141	857	0.393	0.535
3	30	3	20	50	164	619	1.364	0.534
4	30	6	10	10	110	257	1.639	1.199
5	30	6	15	30	267	302	1.362	0.906
6	30	6	20	50	238	257	1.615	0.815
7	30	9	10	30	131	149	5.219	2.309
8	30	9	15	50	82	209	4.853	1.902
9	30	9	20	10	120	373	8.003	3.124
10	60	3	10	50	25	104	2.482	1.760
11	60	3	15	10	84	189	6.397	4.356
12	60	3	20	30	72	148	15.141	3.517
13	60	6	10	30	63	90	15.268	10.316
14	60	6	15	50	79	55	15.363	4.841
15	60	6	20	10	84	92	22.122	17.900
16	60	9	10	50	93	372	22.114	10.266
17	60	9	15	10	110	231	37.477	24.260
18	60	9	20	30	88	333	29.828	33.335



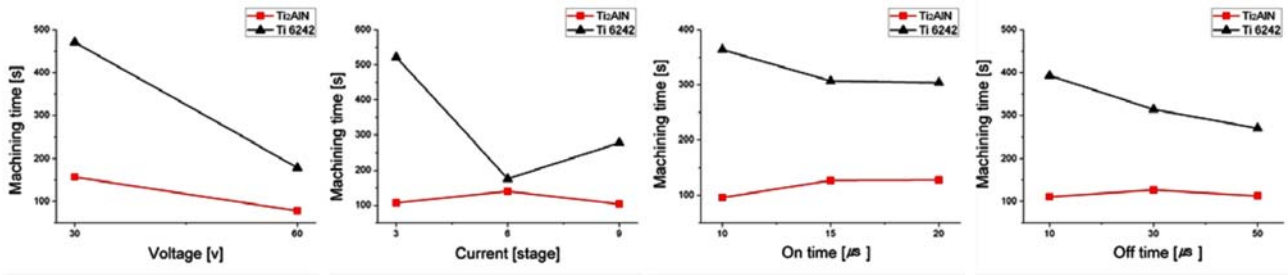


Fig. 7. Main effect of machining time according to controllable factor for Ti<sub>2</sub>AlN composite and Ti6242 alloy.

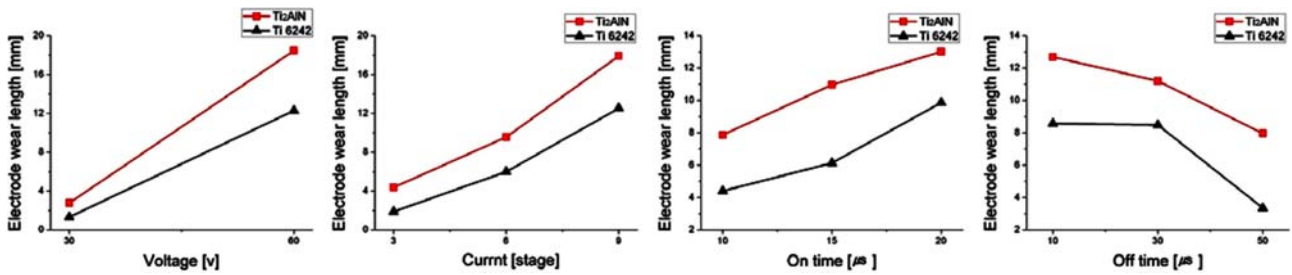


Fig. 8. Main effect of electrode wear length according to controllable factor for Ti<sub>2</sub>AlN composite and Ti6242 alloy.

평균 개념을 적용하여 주효과를 분석하였고, 그 결과는 그림 7과 그림 8에 있다.

그림 7은 4가지 제어인자에 따른 가공시간의 주효과를 분석한 결과로서, Ti<sub>2</sub>AlN 복합체가 Ti6242합금소재에 비하여 가공시간은 모든 제어인자에서 약 2~4배 빠르게 나타났다. 이러한 결과는 Ti6242합금소재에 비하여 Ti<sub>2</sub>AlN 복합체의 우수한 전기전도도와 열전도도 그리고 결정화구조에 따른 결과로 생각된다. 또한 방전가공의 전원파워와 관련된 4가지 제어인자는 방전에너지와 밀접한 관계를 가지고 있으며[11] 일반적으로 전압, 피크전류, 펄스 온타임의 증가에 따라 방전에너지는 증가하고, 가공시간은 감소하게 된다. 따라서 이러한 경향을 가장 잘 반영하고 있는 Ti<sub>2</sub>AlN 복합체의 제어인자는 전압특성으로써, 가공시간의 주효과임을 알 수 있다. 한편, Ti6242합금소재인 경우에 전압이외의 제어인자들은 낮은 열전도율로 플라즈마채널 (Plasma channel) 내에서 Debris가 효율적으로 배출되지 않아서 가공시간의 특성을 일관성있게 잘 반영하지 못함을 알 수 있다[12].

그림 8은 4가지 제어인자에 따른 전극마모길이의 주효과를 분석한 결과로서, Ti<sub>2</sub>AlN 복합체가 Ti6242합금소재에 비하여 전극마모길이가 모든 제어인자에서 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 가공이 진행되면서 급격한 아크 (Arc) 발생이 전극의 길이방향에서 주로 이루어진다는 연구[13]와 가공시간과 음의 상관관계, 즉 한쪽(가공시간)이 좋아지면 다른 한쪽(전극마모길이)은 나빠지는 방전이론과 동일한 결과임을 확인할 수 있다. 한편, 전극마모길이의 주효과는 4가지 제어인자 모두 방전에너지의 효과를 잘 받

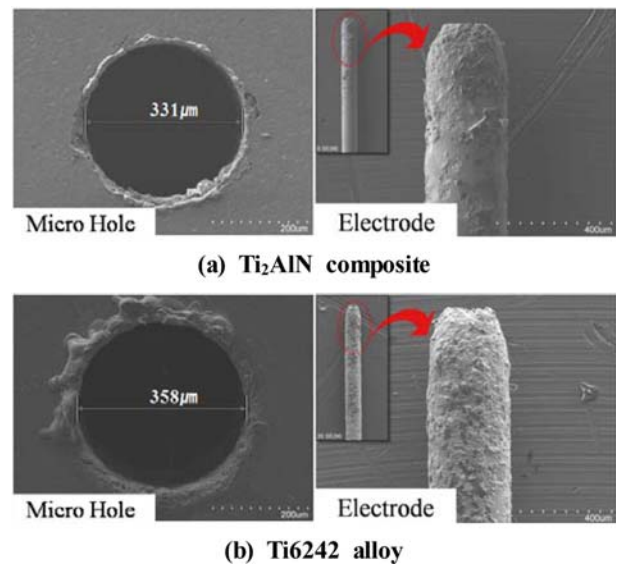


Fig. 9. Comparisons of hole shape and electrode wear for (a) Ti<sub>2</sub>AlN composite and (b) Ti6242 in 30V, 3stage, on time 20 μs, off time 50 μs.

영하고 있음을 알 수 있다. 이상의 결과로부터, 향후 신소재 개발시 가공시간과 전극마모길이에 따른 가공성 평가를 위해서는 전압이 가장 유효한 인자임을 제시할 수 있다.

그림 9는 전압 30V, 피크전류 3 stage, 온타임 20 μs, 오프타임 50 μs에서, FE-SEM에 의한 Ti<sub>2</sub>AlN 복합체와 Ti6242합금소재의 실제 구멍형상과 전극마모형태를 보여주고 있다. Ti<sub>2</sub>AlN 복합체는 Ti6242합금소재에 비하여 가공물의 치수정밀도가 우수하고, 상대적으로 버(burr)의 발생이 현저하게 적음을 알 수 있다. 또한 전극마모길이는

상대적으로 빠른 가공속도에 의해서 다소 빠르게 진행되지만, 마모형태는  $Ti_2AlN$ 소재의 특성으로 상대적으로 더 매끈하게 발생하여 가공물의 치수정밀도가 매우 양호한 결과를 얻었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 금속(Ti)과 세라믹(TiN)의 우수한 특성을 가지는 MAX phases의 하이브리드  $Ti_2AlN$  세라믹 복합체를 합성 및 소결하여, 재료 특성을 파악하고, 실제 마이크로 방전드릴링 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

$Ti+Al+TiN \rightarrow Ti_2AlN$ 로의 반응은 SPS소결과정 중에 다결정화의 형성에 기인하여 순수  $Ti_2AlN$  상이 나타났으며, 비방향성인 막형성과 우수한 결정화구조를 보였다. 재료 특성으로는  $Ti_2AlN$  복합체가 Ti6242합금소재에 비하여 경도는 약 2배 정도 높았고, 전기전도도와 열전도도 역시 더 높은 값을 보였다. 가공성 평가 결과,  $Ti_2AlN$  복합체가 Ti6242합금소재에 비하여 가공시간은 모든 제어인자(전압, 피크전류, 펄스 온타임, 펄스 오프타임)에서 약 2~4배 빠르게 나타났으며, 전극마모길이 또한 모든 제어인자에서 조금 크게 나타났다.

향후 신소재 개발시 가공시간과 전극마모길이에 따른 가공성 평가시 방전전원파위에 있어서 전압변화의 효과를 관찰하는 것이 가장 유효한 파라미터이다.

#### 감사의 글

This work was supported by the Financial Supporting

Project of Long-term Overseas Dispatch of PNU's Tenure-track Faculty, 2011.

#### 참고문헌

- [1] T. J. Ha and T. W. Kim: J. Kor. Soc. Compos. Mater., **17** (2004) 47-54 (*Korean*).
- [2] J. J. Park: J. KSPE., **14** (1997) 80-89 (*Korean*).
- [3] G. Spur and J. Schonbeck: CIRP Annals Manufacturing Technology., **42** (1993) 253-256.
- [4] M. W. Barsoum, T. El-Raghy and M. Ali: J. Metall. Mater. Trans., **31** (2000) 1857-1865.
- [5] A. Djedid, A. MécABIH, O. Abbes and B. Abbar: J. Physical B., **404** (2009) 3475-3482.
- [6] L. Farber, I. Levin, M. W. Barsoum, T. El-Raghy and T. Tzenov: J. Appl. Phys., **86** (1999) 2540.
- [7] K. Y. Kim, D. K. Chung, B. H. Kim and C. N. Chu: J. KSPE., **2007** (2007) 265-266 (*Korean*).
- [8] S. Y. Kim, B. K. Guen, M. H. Lee and B. S. Kim: J. Kor. Powd. Met. Inst., **20** (2013) 33-36 (*Korean*).
- [9] E. S. Choi, J. W. Soung, Q. M. Wang, K. H. Kim, A. BUSNAINA and M. C. Kang: Trans. Nonferrous Met. Soc. China., **17** (2007) 814-817.
- [10] Sang-Bok Lee: Taguchi Design Applying using Minitab Software, Eraetech, Gyeonggi-do (2009) 42-43; 이상복: Minitab을 이용한 다구찌 기법 활용, (주)이레테크, 경기도 (2009) 42-43.
- [11] H. S. Tak, J. H. Kim, H. S. Kim, C. T. Lee, Y. K. Jeeng and M. C. Kang: J. Kor. Powd. Met. Inst., **17** (2010) 319-325 (*Korean*).
- [12] S. L. Chen, S. F. Hseih, H.C. Lin, M. H. Lin and J. S. Huang: Mate. Sci. Eng. A Struct. Mater., **445-446** (2007) 486-492.
- [13] N. Mohri, M. Suzuki, M. Furuya and N. Saito: CIRP Annals Manufacturing Technology, **44** (1995) 165-168.