

## Machining Properties to Nano-Level Mirror Surface Finishing for Fine Grained WC-Co 18% Alloy using Magnetic Polishing Slurry

Tae-Soo Kwak<sup>†</sup>

Department of Mechanical Engineering, Jinju National University, Gyeongnam 660-758, Korea  
(Received December 1, 2008; Revised December 10, 2008; Accepted December 11, 2008)

### 자성연마슬러리를 이용한 초미립 초경합금(WC-Co 18%)의 나노급 경면가공 특성

곽 태 수<sup>†</sup>

국립진주산업대학교 기계공학과

(2008년 12월 1일 접수 ; 2008년 12월 10일 수정 ; 2008년 12월 11일 승인)

#### ABSTRACT

This study has been focused on an effective surface finishing method combining ELID (Electrolytic In-process Dressing) and MAP (Magnetic Assisted Polishing) for the nano-precision mirror grinding of glass-lens molding mould. ELID grinding is an excellent technique for mirror grinding of various advanced metallic or nonmetallic materials. A polishing process is also required for elimination of scratches present on ELID grinded surfaces. MAP has been used as polishing method due to its high polishing efficiency and superior surface quality. It also presents some techniques for achieving the nanometer roughness of the hard material such as WC-Co, which are extensively used in precision tooling material.

**Key words :** Grinding, Mechanical properties, Magnetic materials, Nano-processing, Tungsten/tungsten compounds

#### 1. 서 론

세라믹스는 강도, 경도 등의 기계적 물성이 우수하고 화학적으로 안정하여 기계적 강도, 내마모성, 내부식성을 이용한 구조세라믹으로 널리 이용되고 있다.<sup>1)</sup> 초경합금(WC)은 고경도로 내식성이 높으며, 내마모성과 함께 고강도, 장수명이 요구되는 공구재료이다. 근래에는 마이크로 가공을 위한 수 마이크론 형상의 미세가공용 절삭공구에 적용되고 있으며, 서브 마이크론의 입자를 이용한 초미립 초경합금이 개발되는 등, 응용성이 매우 높은 재질이다. 절삭공구뿐만 아니라 고경도, 내마모 금형 및 유리렌즈 금형 등의 초정밀 금형 재료로 널리 활용되고 있다. 초경합금은 대표적인 난가공성 재료로서 형상가공 또는 초정밀 가공이 매우 어렵다. 따라서 본 재료를 렌즈 성형과 같은 경면이 요구되는 초정밀 금형 재료로 적용하기 위한 가공법이 제안되어 현업에 적용되고 있다. 초경합금의 경면을 내기 위한 일반적인 가공 공정은 고정(固定)지립을 이용하는 연삭으로 설계된 형상을 실현하고, 유리(流離)지립을 이용한 폴리싱 또는 랩핑으로 경면을 달성하는

방법이다. 최근에는 폴리싱 또는 랩핑공정을 생략하고 연삭에서 렌즈형상과 동시에 경면을 얻을 수 있는 가공법으로서 ELID(Electrolytic In-process Dressing) 연삭법<sup>2,3)</sup>이 있다. 한편, 연삭에서 달성한 정밀 형상을 해치지 않기 위해 최소한의 폴리싱이 요구될 때 응용할 수 있는 방법으로서 자기연마법<sup>4)</sup>이 주목 받고 있다.

ELID 연삭법은 난삭성 경질재료 및 기능성 재료의 고품위 가공에 우수한 능력을 발휘하는 가공법으로서 경면 연삭이 필요한 공정에서 실용화되고 있다. 도전성 결합재와 미세지립으로 구성된 스톨을 이용하여 나노 경면연삭이 가능하여 광학기능을 필요로 하는 고품질의 가공면 형상을 생성할 수 있는 경면 가공법이다. ELID 연삭법은 금속재 가공표면의 내식성 향상과 내마모성을 향상시키는 등 피가공물의 표면에 기능을 부과하고 있음이 최근 연구에 의해 밝혀지고 있다.<sup>5)</sup> Glass Molding Pressing 성형용 렌즈 금형과 같은 초정밀 금형은 2~3 nmRa 이하의 경면이 요구되고 있으나 연삭 공정으로 이와 같은 경면을 얻기 위해서는 복수의 스톨교환이 불가피하고, 스톨 교환 시에는 스톨과 피가공물의 위치를 재셋팅하는 작업으로 인한 오차가 발생하여 형상정밀도를 저해하고 가공시간을 증가시키는 요인이 된다.

자기연마법은 입상(粒狀)의 자성연마입자에 자장을 인

<sup>†</sup>Corresponding author : Tae-Soo Kwak  
E-mail : tskwak@jinju.ac.kr  
Tel : +82-55-751-3317 Fax : +82-55-751-3319

가하여 수직력을 부여하고, 공구를 회전시켜 접선력을 부여하는 연마방법이다. 형상 가공된 부품에 대해서 단시간에 효율이 높은 연마가공이 가능하므로 절삭공구의 날세움, 원통내면 연마 등, 고경도 재료의 표면품질을 높이기 위한 마무리가공에 적용되고 있다.<sup>6)</sup> 특히 코발트(Co)를 결합재로 하는 초경합금은 자성을 띄므로 자기연마를 비교적 용이하게 적용할 수 있다.

따라서 연삭 공정에서 얻어진 형상정밀도를 해치지 않고 효율적인 경면을 얻기 위한 가공법이 요구되고 있다. 본 연구는 초정밀 공구재로서 활용도가 높은 초경합금을 대상으로, 2~3 nmRa 수준의 경면 가공을 위해 ELID 연삭법과 자성연마 슬러리를 이용한 자기연마법을 적용하고, 가공방법을 조합한 복합가공법을 제안하여 나노급 경면가공을 위한 피가공재의 피삭특성을 분석하였다.

## 2. 경면연삭 및 자기연마

### 2.1. ELID 경면연삭

ELID 연삭가공 기술은 주철을 결합재로 한 도전성 연삭숫돌과 펄스파형을 발생하는 전원장치, 비선형 전해현상을 동반하는 수용성 연삭액 등을 이용하여 가공중 숫돌표면에 산화피막을 형성시켜 다이아몬드 입자와 피가공물 간의 피삭특성을 향상시키는 기술로서 나노 경면연삭에 활용되고 있다. 연삭시에 피삭재는 재료의 소성변형에 의한 연성모드(Ductile mode)와 크랙의 생성 및 파단에 의한 취성모드(Brittle mode)로 제거된다.

Fig. 1은 실리콘 단결정을 피가공재로 하여 숫돌의 입도에 따른 표면조도를 측정된 결과이다. 입도가 작아질수록 연성모드에서 제거 가공이 진행되는 것을 보여주고 있다. ELID 연삭법은 연삭을 시작하기에 앞서 약 10~20분간 느린 속도로 전처리 전해드레싱을 필요로 한다. 트루

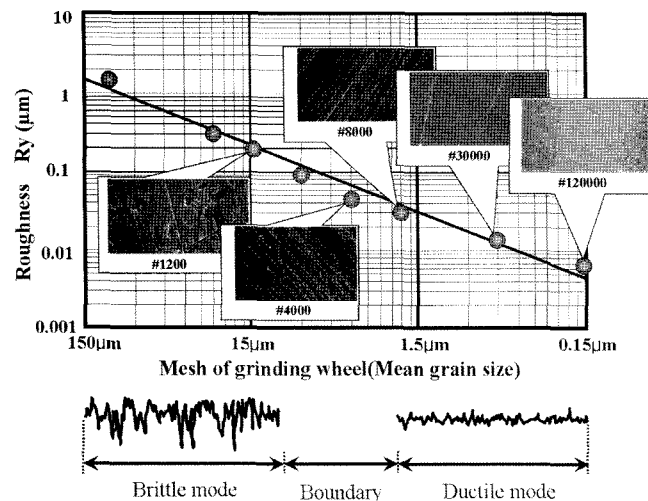
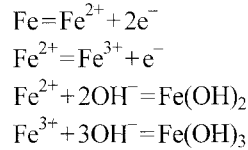


Fig. 1. Grain size and ground surface quality for monocrystalline silicon.

잉(truing) 직후의 숫돌표면은 전기적으로 전도체이므로 전해드레싱 과정에서 적절한 전류와 전압을 +극인 숫돌과 -극의 전극(Copper)에 연결하여 전해 연삭액을 대개로 통전시키면, 결합재인 주철이 이온화되고 전해 연삭액과 반응하여 숫돌표면에 산화철(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)의 부도피막이 형성된다.



전처리 전해드레싱에서 생성된 부도피막은 연삭 과정에서 소모되고 생성되기를 반복한다. 가공중 전해드레싱을 통해 다이아몬드 입자는 주철 결합재로부터 돌출되어 피삭재를 용이하게 제거할 수 있게 되며, 형성된 부도피막은 연삭시 슬러리와 함께 쉽게 떨어져나가므로 가공중 숫돌의 눈매움 현상을 저감시키므로 경면연삭이 가능하다.

가공시간을 산출하고 연삭조건에 따른 가공면의 기초 데이터를 얻기 위해 평면 연삭 및 연마 실험을 수행하였다. 수평형 평면연삭기에서 연삭속도를 나타낼 수 있는 연삭 조건은 가로이송 속도와 좌우 왕복이송 속도, 절입량 등이 있다. 좌우왕복이송 속도는 숫돌의 원주속도에 따라 결정되는 것이 일반적이며, 절입량은 주로 숫돌의 입도에 따라 설정되므로 연삭시간의 지표로서 가로 이송 거리를 선정하였다. 연삭의 경우, 다듬질 면의 최대높이(PV, Peak to Valley)는 연삭방향의 산높이  $h$ 와 연삭방향에 수직한 연삭흔의 깊이  $h'$ 의 합으로 나타낼 수 있다.<sup>7)</sup>

$$\begin{aligned} PV &= h + h' \\ h &= \frac{1}{4} \left( \frac{v}{V} \right)^2 \frac{(n_0 w)^2}{D}, \quad h' = \frac{1}{4d_0} \left( \frac{w}{n_0} \right)^2 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $v$ 는 공작물속도,  $V$ 는 숫돌의 원주속도,  $D$ 는 숫돌의 직경,  $d_0$ 지립의 직경이다.  $n_0 w$ 는 연삭방향으로 피가공재와 접하는 숫돌의 접촉길이를 의미하고,  $w/n_0$ 는 연삭면 최소 가공흔의 폭을 의미한다. 식 (1)에서 연삭방향의 산높이  $h$ 는 좌우 왕복속도에 의존하며, 연삭방향에 수직한 연삭흔의 깊이  $h'$ 는 숫돌의 입도 간격에 의해 결정된다.

### 2.2. 자기연마

자기연마란 자기장이 인가된 자기공구와 공작물 사이에 자성연마재가 자력선을 따라 선형으로 배열되어 공작물을 압착하면서 연마하는 가공법이다. 자기연마법은 자성재료와 연마입자를 섞어 만든 유리(流離)지립을 이용하므로 3차원 복잡형상이 있는 공작물 등의 연마에 효과적이다. 자성연마재는 자성재료에 연마입자를 고정시켜 일체화한 일체형 연마재와 자성재료와 연마입자를 단순히 혼합한 혼합형 연마재가 있다. 일체형은 제조의 어려움과

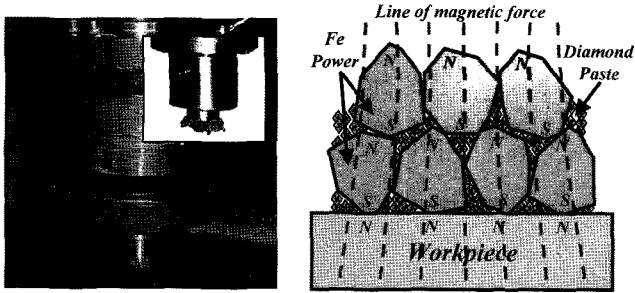


Fig. 2. Tools of magnetic assisted polishing for plane mirror surface.

사용상의 제약이 존재하며, 혼합형은 제조가 쉬운 반면 연마위치에 따라 자성재료와 연마입자의 편중으로 연마 성능에 편차가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 제조가 쉬운 혼합형 연마재를 사용하였다. Fig. 3은 경면연마를 위한 자기연마 공구와 가공원리를 나타내고 있다.

자기연마는 외부에서 전원을 공급받아 자극봉에 감겨진 코일에 전원을 인가하면 자기력이 형성되고, 이러한 자극에 의해서 발생한 자기력은 연마입자를 끌어당겨 연마하게 된다. 자기연마 장치에 자력을 발생시키면 자기력에 의해 연마입자는 자력선 방향과 등자위선 방향에 대해서 각각 자기력이 작용한다. 자성재료의 입자 크기와 자화율( $\chi$ ), 자장강도(H), 자장강도의 변화율( $\partial H/\partial x$ ,  $\partial H/\partial y$ )로서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F = F_x + F_y$$

$$F_x = kD^3 \chi H(\partial H/\partial x)$$

$$F_y = kD^3 \chi H(\partial H/\partial y)$$

가공압력은 자성재료가 자극으로 흡인하는 자력과 공구의 고속회전에 의한 원심력의 합벡터에 의해 생성된다. 자력은 입경의 3승과 자화율과의 곱에 비례하여 증가한다.

### 3. 실험 방법

#### 3.1. 실험재료

초경합금은 결합재에 따라 Co계, Ni계 합금 등으로 구분되며 용도에 따라 Cr, 탄화물(TiC) 등의 첨가물을 포함하고 있다. Ni계는 투자율이 낮아 비자성 합금이라 부르고 비강자성을 요구하는 자장프레스용 금형이나 자기테이프용 공구 등에 적용된다. Co계는 자성체로서 내마모, 내충격용 초정밀 공구강으로서 주로 활용되고 있다.

Table 1. Property Characteristics of WC-Co 18%

Specific gravity	Hardness (HRA)	Impact Strength (KJ/m <sup>2</sup> )	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Compression Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Young's Modulus (kN/mm <sup>2</sup> )
14.30	93.5	20	2260	6280	560

본 실험에서는 고경도로 압축강도가 우수하고 특히 내마모성이 요구되는 공구에 적용되고 있는 초미립 초경합금(Fujillo<sup>TM</sup>, F08)을 사용 하였다. 본 재료는 0.5  $\mu$ m 이하의 균일한 WC 입자로 구성되어 있으며 기계적 물성은 Table 1과 같다.

#### 3.2. 실험방법 및 실험장치

피가공면의 표면조도는 3차원 표면 구조해석 현미경(NewView 5032, Zygo)을 이용하여 측정하였다. ELID 연삭과 자기연마를 조합한 가공공정을 결정하는 예비실험은 동일입도의 연삭 스톨을 이용하여 연삭 속도에 따른 공작물의 표면조도 변화를 관찰하였다. 연삭속도는 레시프로 방식 평면연삭장치의 경우에 가로이송 속도에 의존하므로 이를 조절하였고, 로터리 인피드 방식의 평면 연삭장치에서는 단위시간당 연마 깊이로 조절하였다. Table 1은 두 방식의 연삭가공 조건이다. 연삭스톨의 입도는 연삭면의 표면조도를 결정하는 주요 변수이므로 가공효율과 관련이 깊다. 로터리 인피드 평면연삭기에서 입도에 따른 연삭면 시편을 만들었다. 경면가공의 요구수준인 2~3 nmRa에 도달하기까지 연삭 조건과 자기연마 조건을 선정하였다. 자기연마 실험은 3축 머시닝 센터에 피가공물을 고정 또는 회전시키고 Fig. 3과 같이 자기연마 공구를 이용하였다.

연삭 실험에서 얻어진 평면시편을 자기연마하기 위해 Table 3과 같이 자기연마 조건을 선정하고 철 분말과 다이아몬드 입자, 오일을 섞어 연마재를 구성하였다. 철 분말은 입경 38 $\mu$ m과 75 $\mu$ m 이하로 각각 구분하고, 다이아몬드 입자는 입도 #8000과 #14000으로 각각 구분하여 연삭 시편의 표면조도 상태에 따라 적용하였다. 철

Table 2. Surface Grinding Machine and Experimental Conditions

Grinding machine	Surface grinding machine (GS-CHF, KURODA co.ltd.)	Rotary surface grinding machine (HGS-10A, HUIKOSHI.co.ltd.)
Grinding Wheel	Cast iron bonded diamond grinding wheel $\phi$ 150 mm $\times$ width 10 mm: #325, #1200, #4000	Cast iron bonded diamond grinding wheel (cup type) $\phi$ 143 mm $\times$ width 3 mm: #1200, #2000, #4000, #8000
ELID conditions	Ip10A, Eo90V, ton/off 2 $\mu$ s	Ip10A, Eo60V, ton/off 2 $\mu$ s
Grinding conditions	Grinding wheel revolution: 1200/2000 min <sup>-1</sup> , feed rate: 0.5-3.0 $\mu$ m/round,	Grinding wheel revolution: 1500 min <sup>-1</sup> , Workpiece revolution: 500 min <sup>-1</sup> , feed rate: 1.0-3.0 $\mu$ m/min

**Table 3.** Magnetic Abrasive and MAP Conditions

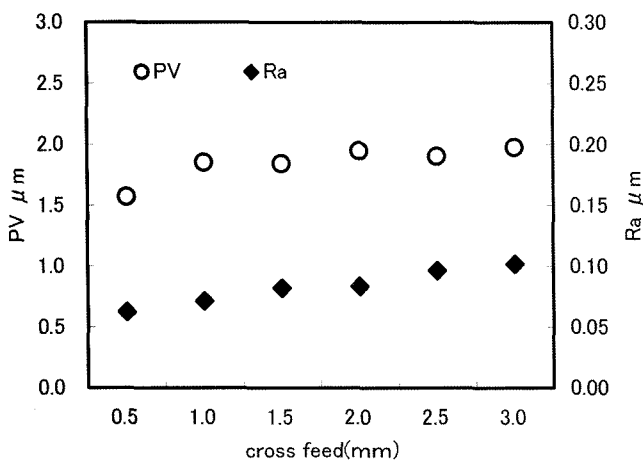
Surface profile	Flat grinding using electro magnet
Tool shape	φ 12 mm, Flat/Slit Type
Magnetic abrasive	Ferrite(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) power: Fe powder(φ 38 μm/ 2 g 75 μm under): 2 g Diamond paste(#8000/ Diamond paste(#8000/#14000): 0.4 g #14000): 0.4 g
Polishing conditions	Tool revolution: 2000 rpm Gap(tool to workpiece): 1.0 mm Feed rate: 100 mm/min

분말과 다이아몬드 입자 사이의 결합제는 오일을 사용하였다. 연삭 시편의 자기연마는 feed pitch별로 연마하고 매 회 표면조도를 측정하였다. 한편, 철 분말은 입경이 대체로 크고 경도가 비교적 높으므로 #8000 슛돌을 이용한 연삭가공면의 자기연마시 공작물의 표면에 스크래치를 발생시킬 수 있다. 따라서 강자성체이며 경도가 비교적 낮은 페라이트 분말을 이용하여 자기연마 실험을 수행하였다.

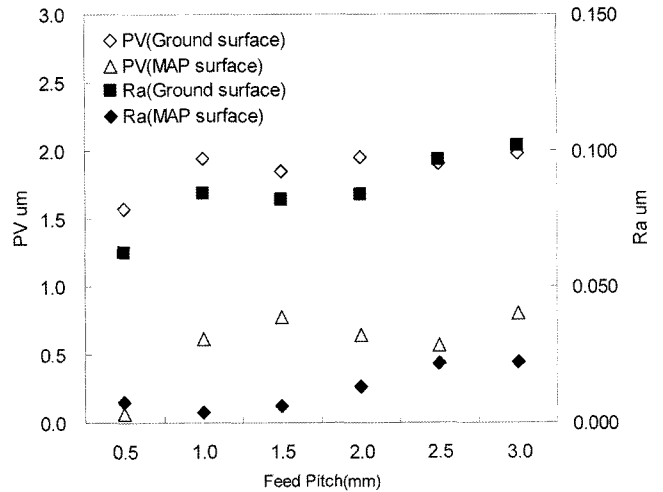
**4. 실험 결과 및 고찰**

**4.1. 경면연삭 실험**

평면연삭 작업에서는 연삭스숫돌의 폭에 비해 공작물의 폭이 큰 경우가 많으므로 가로 이송거리를 설정하여 한 지점에 대해 수회 반복하여 연삭하게 된다. 따라서 일정한 폭을 가진 슛돌에 대해 가로 이송거리로 반복 연삭횟수를 설정할 수 있다. 이론적으로 동일 면을 9회 반복하도록 가로 이송거리를 설정하게 되면 1회 연삭한 표면에 비해 표면조도 Ra는 1/2로 줄어든다.<sup>5)</sup> Fig. 3은 가로 이송거리에 따른 Ra와 PV값의 변화를 보여주고 있다. 실험에서 사용된 슛돌은 폭 10 mm, 입도 #1200였다. 가로 이송거리를 0.5 mm에서 3.0 mm까지 0.5 mm 간격으로 변화시켰을 때 표면조도 Ra는 0.062 μm에서 0.102 μm로 변하는 것을 확인할 수 있었다. PV 값은 1.57 μm에서 1.98 μm



**Fig. 3.** Variation of surface roughness on the cross feed.



**Fig. 4.** Variation of surface roughness on the polishing feed pitch.

사이의 분포를 보였다.

**4.2. 자기연마 실험**

자기연마 효율은 연마재의 구성성분과 공구의 회전속도 및 자력, 연마시간에 따라서 변한다. 연마시간은 피가공물의 연마횟수를 기준으로 산출하였다. Table 3의 평면연마조건에서 최적 연마횟수를 선정하기 위해서 가로이송 속도를 변화시켜 연삭면에 대한 자기연마 실험을 실시하였다. 원형의 자기연마 공구로 연마하는 경우 공구의 끝단부에서 자력이 집중되고, 공구의 원주속도 또한 끝단부에서 빨라지므로 연마율은 공구의 회전중심과 끝단부에 차이가 나게 된다. 표면조도는 회전 연마공구의 중심부와 외곽부에 대해서 각각 측정하고 측정데이터는 각 시편에 대해 평균하였다.

연삭시 가로이송 속도를 0.5 mm에서 3.0 mm까지 변화시켜 얻은 연삭 가공면을 자기연마하고 표면조도를 측정하였다. Fig. 4는 자기연마 전후의 표면조도 변화를 보여주고 있다. 자기연마 전 연삭 가공면의 표면조도는 평균 1.9 μmPV, 0.085 μmRa 이었으나 자기연마 후 평균 0.6 μmPV, 0.012 μmRa의 경면을 얻을 수 있었다. Fig. 5는 가로이송에 따른 연삭시편에 대해 자기연마를 수행한 후 표면조도의 개선율을 정량화 한 것이다. PV 값의 경우 자기연마에 의해 연삭가공면의 표면조도는 평균 69% 개선되었으며 Ra는 평균 85%가 개선되었다.

한편, 슛돌입도 #1200, #4000, #8000으로 연삭 가공하여 생성된 연삭 표면을 자기 연마하여 연마 전 후의 가공 표면을 측정하였다. 자기연마시 사용된 슬러리의 다이아몬드 지립은 #8000 및 #14000의 두 종류이며 #1200과 #4000 슛돌에 의한 연삭가공면을 자기연마 할 때에 #8000의 다이아몬드 지립을 사용하고 #8000 슛돌을 이용한 연삭가공면의 자기연마에는 #14000의 다이아몬드 지립을 사

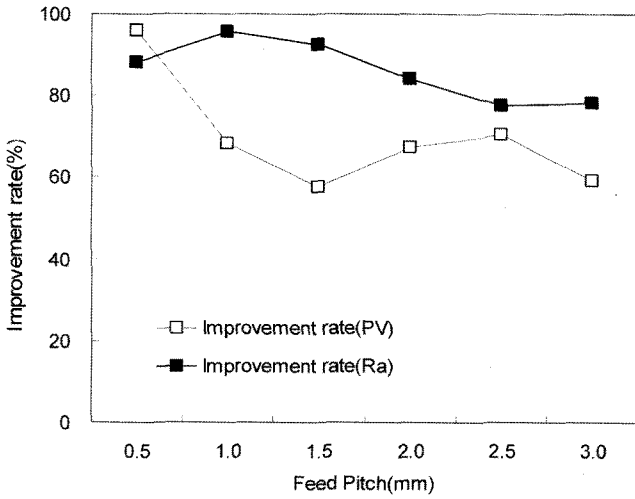


Fig. 5. Improved rate of surface roughness PV and Ra.

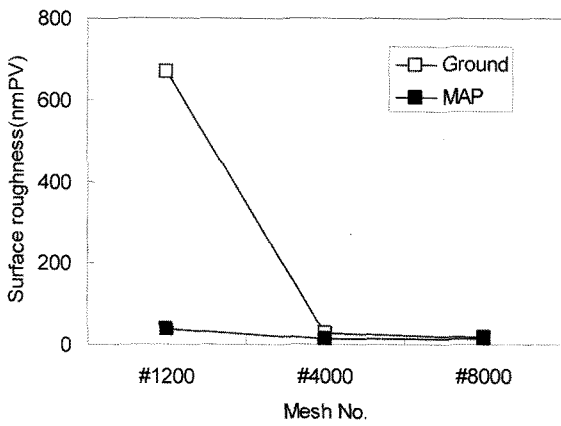


Fig. 6. Surface roughness PV value after MAP classified by types of grinding wheel.

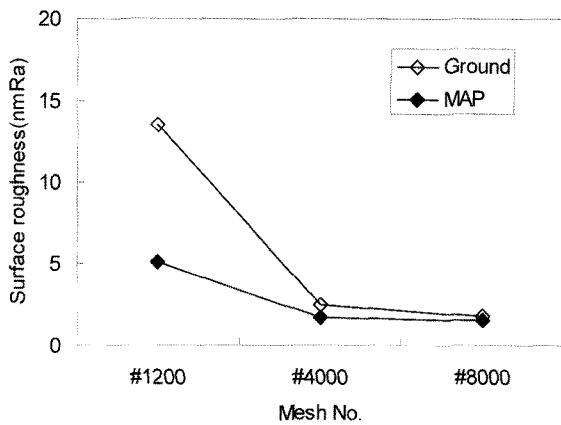


Fig. 7. Surface roughness Ra value after MAP classified by types of grinding wheel.

용하였다.

Figs. 6 및 7은 자기연마 전후의 PV 및 Ra 값을 측정한 결과이다. PV 값은 #1200, #4000, #8000의 연삭가공면에

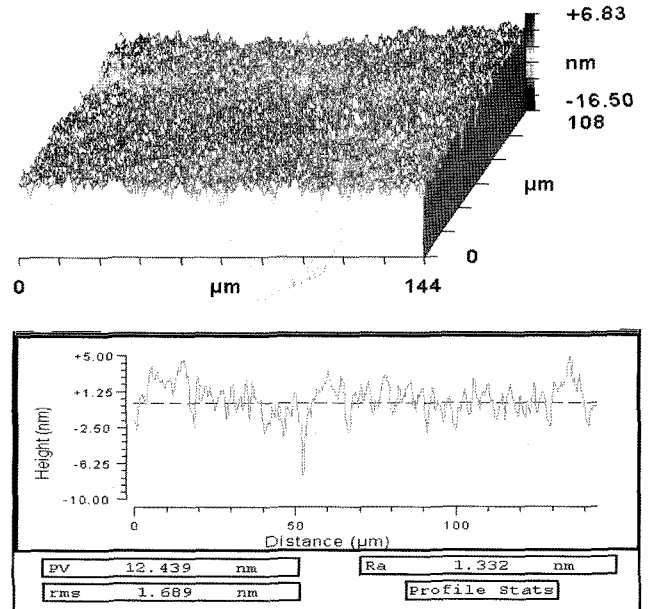


Fig. 8. Measured profile of surface after MAP on #4000 ELID ground surface.

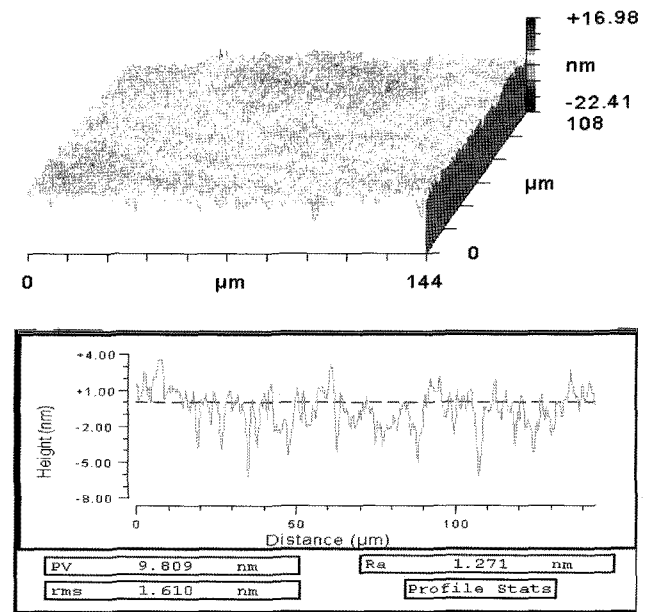


Fig. 9. Measured profile of surface after MAP on #8000 ELID ground surface.

대해 자기연마 전후 각각 667 nm → 37.3 nm, 29 nm → 12.5 nm, 19 nm → 12.4 nm로 개선되었으며, Ra 값은 각각 13.5 nm → 5.1 nm, 2.5 nm → 1.7 nm, 1.8 nm → 1.6 nm로 개선되었다.

본 실험 결과로부터 #4000 숫돌 이상의 ELID 연삭가공면은 자기연마를 수행하지 않아도 3 nmRa 이하의 경면을 얻을 수 있었다. 자기연마 전 후 PV 값의 표면조도 개선

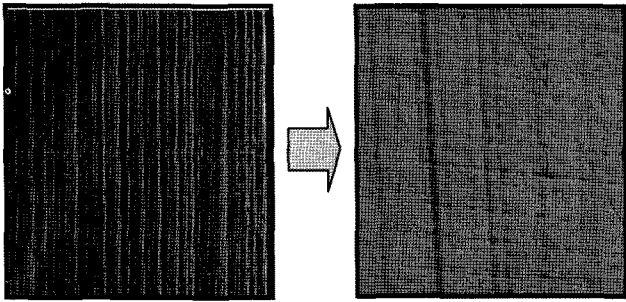


Fig. 10. Magnified pictures( $\times 3000$ ) of MAP surface (right) and ELID ground surface(left).

을은 #1200, #4000, #8000번의 연삭가공면에 대해 각각 94.4%, 56.9%, 34.7%로 나타났다. Ra 값은 표면조도 개선율이 각각 62.2%, 32.0%, 11.1%로 나타났다. 따라서 #4000번과 #8000번 슷돌을 이용한 ELID 연삭가공면은 자기연마를 수행하지 않고도 경면을 얻을 수 있었으며, #4000번 이하의 연삭 가공면에 대해서는 자기연마를 통해 가공표면을 현저하게 개선할 수 있음을 알 수 있다. Figs. 8 및 9는 3차원표면구조해석현미경(Zygo<sup>TM</sup>)을 이용하여 #4000, #8000 슷돌의 연삭가공면에 대해 자기연마 후 연마표면을 각각 측정 한 결과이다. ELID 연삭면에서는 연삭 흔적이 슷돌의 회전방향을 따라 일정한 간격으로 나타났다으나 Figs. 8 및 9에서와 같이 자기연마 후에는 연삭 흔적이 대부분 제거되었으며 자기연마 공구의 회전방향을 따라 미세한 연마흔적이 새롭게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 10의 좌측은 ELID 연삭면에서 나타나는 연삭 흔적을 확인하기 위해 3000배로 확대한 표면 사진이며 우측 그림은 ELID 연삭면에 대해서 자기연마를 한 후 표면 상태를 확인하기 위한 사진이다. 각 가공표면의 가공방법에 따라 연삭 흔적 및 연마 흔적이 나타나고 있다.

### 5. 결 론

본 연구는 초정밀 공구재로서 활용도가 높은 초경합금을 대상으로, 2~3 nmRa 수준의 경면 가공을 위해 ELID 연삭법과 자성연마 슬러리를 이용한 자기연마법을 적용하고, 가공방법을 조합한 복합가공법을 제안하여 나노급 경면가공을 위한 피가공재의 피삭특성을 분석하고 고효율, 고품질 경면가공 기술을 개발하는데 있어서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 폭 10 mm, 입도 #1200 슷돌을 사용하여 ELID 연삭 실험한 결과 가로 이송거리를 0.5 mm에서 3.0 mm까지 0.5 mm 간격으로 변화시켰을 때 표면조도 Ra는 0.062  $\mu\text{m}$ 에서 0.102  $\mu\text{m}$ 로 변화하였으며, PV 값은 1.57  $\mu\text{m}$ 에서 1.98  $\mu\text{m}$ 으로 변화하였으므로 가로 이송거리를 크게 할수록 표면조도는 나빠졌다.

2) 가로이송의 변화에 따른 연삭 시편에 대해 자기연마를 수행한 후 표면조도의 개선율을 정량화 한 결과 PV 값의 경우 자기연마에 의해 연삭 가공면의 표면조도는 평균 69% 개선되었으며 Ra는 평균 85%가 개선되었으나 자기연마 전의 표면조도는 자기연마 후에도 표면조도에 영향을 미쳤다.

3) #4000번과 #8000번 슷돌을 이용한 ELID 연삭가공면은 자기연마를 수행하지 않고도 경면을 얻을 수 있었으며, #4000번 이하의 연삭 가공면에 대해서는 자기연마를 통해 가공표면을 현저하게 개선할 수 있음을 확인하였다.

### REFERENCES

1. S. Beck, M. Cho, and W.Cho, "Mechanical Properties and End-milling Characteristic of AlN-hBN Based Machinable Ceramics," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **45** [1] 75-81 (2008).
2. H. Ohmori, and T. Nakagawa, "Analysis of Mirror Surface Generation of Hard and Brittle Materials by ELID (Electrolytic In-Process Dressing) Grinding with Superfine Grain Metallic Bond Wheels," *Annals of the International Academy for Production Engineering*, **44** [1] 287-90 (1995).
3. H. Ohmori and T. Nakagawa, "Mirror Surface Grinding of Silicon Wafer with Electrolytic In-process Dressing," *Annals of the International Academy for Production Engineering*, **39** [1] 329-32 (1990).
4. T. Shinmura, Y. Hamano, and H. Yamaguchi, "A New Precision Deburring Process for Inside Tubes by the Application of Magnetic Abrasive," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers.C*, **64** [620] 1428-34 (1998).
5. H. Ohmori, K. Katahira, J. Nagata, M. Mizutani, and J. Komotori, "Improvement of Corrosion Resistance in Metallic Biomaterials by a New Electrical Grinding Technique," *Annals of the International Academy for Production Engineering*, **51** [1] 491-94 (2002).
6. M. Anzai, T. Sutou, H. Ohtaki, T. Obana, and T. Nakagawa, "Application of Magnetic Abrasive of Cemented Carbide using Diamond Paste," *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, **39** [6] 510-14 (1992).
7. S.Katuo, "Grinding Mechanics," *YOKEDO*, 46-7 (2004).