

전해 연속 드레싱을 이용한 마이크로 공구 제작

이현우*, 최현종**, 이석우**, 최재영*, 정해도***

A Study on the Micro Tool Fabrication using Electrolytic In-process Dressing

Hyun Woo Lee*, Hon Zong Choi**, Seok Woo Lee**, Jae Young Choi*, Hae Do Jeong***

ABSTRACT

With increasing the needs for micro and precision parts, micro machining technology using micro tools has been studied to fabricate a small part with high density such as electronics, optics, communications, and medicine industry more than before. Though these micro tools have developed rapidly, it is difficult to apply them to micro fabrication technologies, because of the inherent manufacturing. In this study, micro tools (WC) to produce micro structures and parts were manufactured by cylindrical grinding machine employing ELID (Electrolytic In-process Dressing) technique and the micro tools are fabricated as square shape with the dimension less than $100\mu\text{m}$. With the micro tools on the same machine, characteristics of micro grooving and drilling are evaluated. Also we compare normal micro machining with ultrasonic micro machining on the vibration table. It is confirmed that the developed micro tools are fully applicable to micro grooving, micro drilling and free form cutting.

Key Words : Micro Tool(마이크로 공구), Cylindrical Grinding Machine(원통형 연삭기), Electrolytic In-process Dressing(전해 연속 드레싱), Micro grooving(그루빙), Micro drilling(드릴링)

1. 서론

현재 많은 기능성 부품과 제품들은 점차 소형화, 정량화, 고정밀화되어 가는 추세에 있으며, 특히 마이크로 가공에 의한 마이크로머신 부품의 개발과 가공기술 확보가 주요 국가 경쟁력으로 떠오르고 있다. 이러한 상황에 부응하여 최근에는 3차원 형상의 미세부품과 다양한 물리적, 기계적 성질을 가진 소재를 효율적으로 가공하기 위하여 절삭(cutting)과 연삭(grinding)을 이용한 마이크로 가공

(micro machining)기술이 대두되고 있다. 또한 공구에 있어서는 단결정 다이아몬드와 초경(WC)소재를 방전가공(EDM)과 연삭을 이용하여 마이크로 공구(micro tool)를 제작함과 동시에 마이크로 단위의 구조물이라든지 부품 생산에 적용되고 있다.¹⁾²⁾ 그러나 방전가공을 이용한 마이크로 공구 제작과정에 있어서 가공력(machining force)은 적으나 공구 표면에 가공 변질층이 발생하는 문제가 있으며, 연삭을 이용하는 경우에도 연삭력(grinding force)을 줄여야 하는 문제점을 가지고 있다. 한편 마이크로 공구의

2002년 3월 11일 접수

* 부산대학교 정밀기계과 대학원
** 한국생산기술연구원 나노가공팀
*** 부산대학교 기계공학부

치수가 작아짐에 따라 가공 중에 파단되어지거나 치수정도가 좋지 않게 되며 또한 공구의 형상을 작게 하여도 표면거칠기가 나쁘게 되어 표면 스크래치(scratch)로 인해 쉽게 파손됨에 따라 가공이 곤란하다.

이러한 이유로 본 연구에서는 마이크로 공구 가공에 전해 연속 드레싱(Electrolytic In-process Dressing)을 적용하여 연삭 가공시 발생하는 연삭력을 감소시킴과 동시에 마이크로 공구의 표면에 생기는 스크래치를 감소시켜 강도향상의 효과를 얻고자 하였다.³⁾ 또한 제작되어진 마이크로 공구를 이용하여 스테인레스 스틸(stainless steel)에 있어서의 마이크로 그루빙(micro grooving)과 실리콘 웨이퍼(silicon wafer)에 있어서의 마이크로 드릴링(micro dilling)을 수행하여 가공특성을 평가하고자 하였으며 가공성을 향상시키는 방안으로 초음파 테이블을 이용하여 일반적인 마이크로 가공과의 비교도 하고자 하였다.

2. 가공 메카니즘

약전도성 전해액에 의한 전해 드레싱에 연속성을 부여함으로써 연삭 스톨의 미세 입자를 안정적으로 가공에 이용할 수 있는 드레싱 방법을 전해 연속 드레싱(Electrolytic In-process Dressing)이라고 한다.

Fig.1은 본 연구에서 전해 연속 드레싱의 일부를 도입한 가공 메카니즘(mechanism)을 나타낸 것으로서 미세한 다이아몬드 연마입자를 가진 메탈본드 스톨은 트루잉(truing) 작업 후에는 입자와 결합재는 평탄화 되며(①)연삭성이 저하된다. 그래서 초기 전해 드레싱을 통하여 결합재를 용출하여 입자를 돌출시킨다.(②) 이 전해현상에서는 연삭 스톨의 결합재가 수 μm 용출한 후 빠르게 부도체 피막(수산화철, 산화철등)에 의한 절연층이 스톨 표면에 형성되고 과도한 용출은 방지된다.(③) 그리고 가공을 시작하면 공작물이 이 부도체 피막과 접촉하여 입자가 마멸된 분량만큼 피막이 벗겨진다.(④) 스톨의 메탈 결합재를 전기 분해에 의하여 필요 최적량을 제거하여 연삭 입자를 돌출 시켜 안정된 가공을 유지한다.(⑤)

아래의 수식은 스톨 표면에서 일어나는 산화 반응식을 표현한 것으로서 전극(-)과 메탈본드 스톨(+)사이 에 전해액을 통과시키고 펄스형 전류를 인

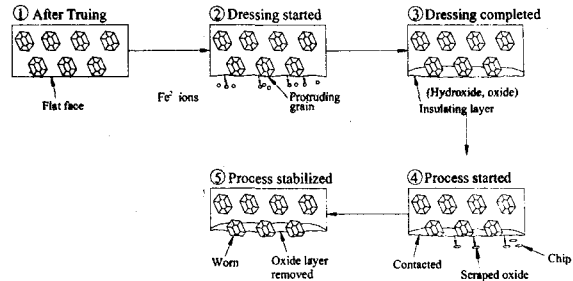
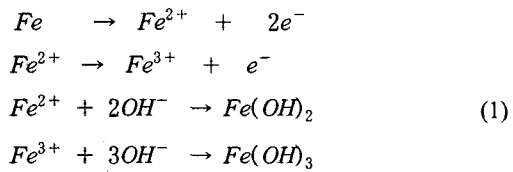


Fig. 1 Process mechanism of ELID Grinding

가하면 철은 2가 양이온 및 3가 양이온이 되며 OH 음이온과 결합하여 수산화 철($\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$)을 형성하여 스톨 표면에 부착이 되면서 산화막이 형성된다.⁴⁾⁵⁾



3. 실험방법

3.1 실험장치도

Fig. 2와 3은 전체적인 실험 장치도와 개념도를 나타낸다. 소형 Desk top장치이며 3개의 리니어 축

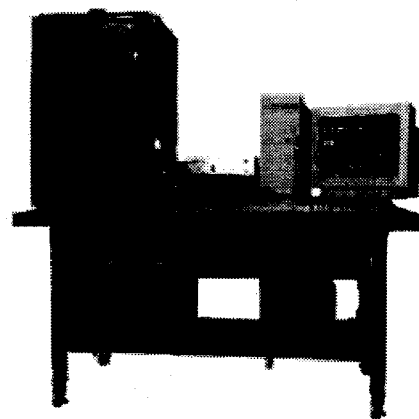


Fig. 2 External View of Compact Cylindrical Grinding Machine

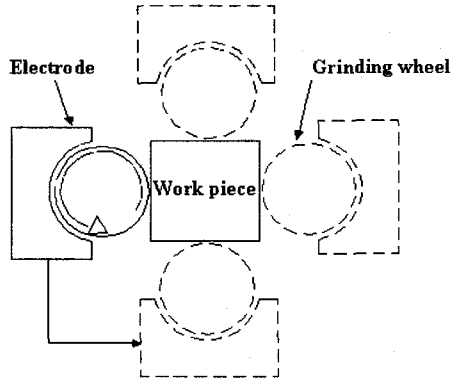


Fig. 3 Schematic of Grinding method

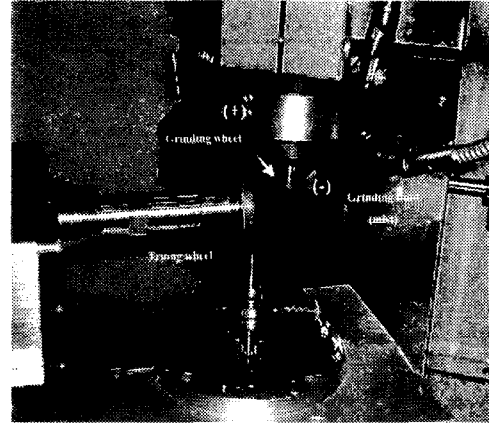


Fig. 4 Close-up View of ELID Grinding System

(linear axis, X,Y,Z)과 Z축상에는 연삭 스피들(spindle)을 장착하고 있다. 모든 축은 cross roller guide의 stepping motor에 의해 높은 직진성을 실현하고 있으며 X,Y,Z축의 최고 분해능은 각각 $0.25\mu\text{m}$ 로 제어할 수 있다. 또한 반복위치정도는 $\pm 0.5\mu\text{m}$ 을 실현하고 있고 주축 최고 회전수는 40000rpm이며 기계의 모든 이송장치는 NC unit를 토대로 컴퓨터에 의해 제어되어진다.

3.2 실험방법 및 가공조건

실험에 들어가기 전에 모든 숫돌은 트루잉(truing)과 드레싱(dressing)과정을 거치게 된다.

Fig. 4는 ELID grinding system을 나타내며 트루잉과 드레싱 작업시에 사용된 조건을 Table 1에 나타내었다. 트루잉 작업시 (+)전극은 연삭 숫돌, (-)전극은 트루잉 숫돌에 고정하고 냉각제를 미스트(mist)의 형태로 공급하여 플라즈마 방전 트루잉(plasma discharge truing)을 수행하였다.

본 연구에서는 내식성, 기계적 강도, 고강성의 마이크로 공구 제작을 목적으로 하여 소재를 초경(WC)으로 선택하였으나 재료의 난삭성과 취성이 높아 효율적으로 가공하기 위하여 결합력이 크고 가공 중에 연마 입자의 탈락이 적기 때문에 가공능률이 높고 숫돌의 탄성 변형이 다른 결합제의 숫돌보다 낮은 메탈 본드 숫돌(metal bonded wheel)을 이용하였다. 하지만 메탈 본드 숫돌의 이용에 있어서 가장 큰 문제점은 드레싱의 어려움이다. 따라서 숫돌의 메탈 결합재를 전기 분해에 의하여 필요 최적량을 제거하여 연삭 입자를 돌출 시켜 안정된 가

Table 1 Truing and Dressing condition

Truing Condition	
Peak current	1 A
Open voltage	150 V
Truing wheel	1000 rpm
Grinding wheel	3000 rpm
Dressing Condition	
Peak current	0.5 A
Open voltage	90 V
Grinding wheel	20000 rpm
Electrolytic gap	0.1~0.3 mm
Electrolytic fluid	solution type(50:1)

공을 유지하도록 하여 난삭성, 경취성 재료의 고품위 가공과 연삭력을 감소하도록 하였다. 한편, 전해 드레싱시 안정적으로 전류를 공급하기 위하여 일반적으로 고주파 직류 펄스 전압을 사용하는 전용 전원 장치를 사용하였으며 이는 드레싱량과 부도체 피막 두께 제어성을 높이기 위함이다. 펄스 전압은 전해 강도가 높은 사각파를 이용하였으며 전해액은 메탈 본드 숫돌(+)과 전극(-)사이를 흐르면서 전류를 흐르게 하며 또한 절삭유제의 역할을 한다.⁶⁾

Fig. 5는 전해 드레싱 시 시간이 지남에 따라 전압과 전류의 거동을 표시한 것이다. 전해 드레싱을 시작한지 30초가 지남에 따라 전류값은 급격히 감소하고 전압값은 증가하고 있다. 2분 20초가 경과하면 거의 일정한 전류값과 전압값을 유지하게 된다. 이렇게 전류값과 전압값이 변화하는 것은 전해

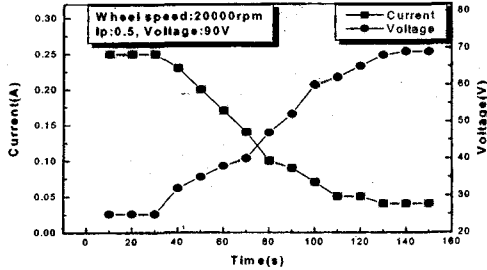
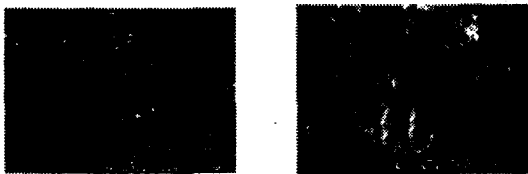


Fig. 5 Electrical behavior of dressing

드레싱이 진행됨에 따라 금속이온이 용출되고 산화철 등의 생성물로 스톨 표면이 짙은 갈색으로 변화하여 표면에 쌓이게 되어 이 절연 피막의 증가로 인하여 스톨과 전극간의 전도성의 저하로 연결되고 드레싱 전류는 저하되는 반면에 전압은 상승하게 된다.

Fig. 6은 트루잉 후와 드레싱 후의 스톨표면의 SEM(Scanning Electron Microscope)사진이다. 트루잉 직후 스톨의 표면은 방전트루잉에 의해 평평한 형상이 되었으며 드레싱 작업 후 스톨표면은 메탈 결합재가 충분히 용출되어 스톨과 공작물 사이에 완충작용을 하는 절연피막이 형성되었다. 또한 다이아몬드 입자를 적절히 유지시켜 주어 가공저항을 감소시킬 수 있어 고능률, 초정밀 가공이 가능하게 된다. 실험에 사용된 가공 조건을 Table 2에 나타내었다.



(a) after truing (b) after dressing

Fig. 6 SEM image of surface of grinding wheel

Table 2 Experimental Condition

Raw material	WC(150 μ m)
Grinding Wheel	#2000
Depth of cut	1 μ m
Rotation speed	20000 rpm
Grinding fluid	Solution type(50:1)

4. 실험결과 및 고찰

4.1 다양한 형상의 마이크로 공구 가공

트루잉과 드레싱 과정을 수행하고 난 뒤 사각형 단면의 마이크로 공구를 연삭 가공하였다. 마이크로 공구의 형상은 컴퓨터에 의해 NC-unit을 토대로 하여 70 × 70 μ m의 단면 치수를 가지는 초경 합금 미세 공구로 가공하고자 하였다. 가공되어진 마이크로 공구의 진직도와 가공 정도를 관측하기 위하여 측정 위치를 Fig. 7에 나타내었으며 측정 결과를 Table 3에 표시하였다. 측정에는 SEM을 이용하여 각 부분을 관측하였으며 가공에 의해 얻어진 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 가공되어진 단면의 형상은 깨끗한 사각형 형상을 얻을 수 있었으나 진직도 및 치수정도에는 오차가 발생하는 것을 알 수가 있었다. 이러한 오차가 발생하는 이유로는 트루잉 작업 시 스톨의 연삭 입자와 결합재가 평탄화되지 못하여 표면이 불균일하여 생긴 결과로 볼 수가 있으며 또한 드레싱 작업 시 스톨 표면에 고르게 전해 현상이 일어나지 않아 연삭 입자인 다이아몬드의 돌출이 안정적이지 못하거나 빨리 산화되어 드레싱을 마친 후 두껍게 생성된 산화막에 의해 연삭 입자가 덮히거나 용출되었다고 생각되어진다.

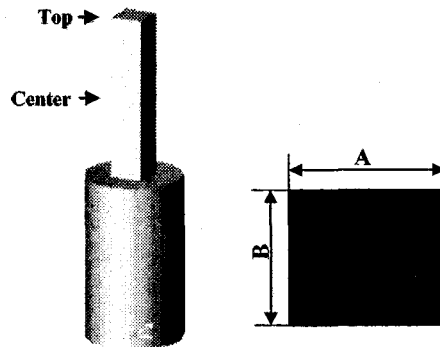


Fig. 7 Schematic of Measurement Points of Micro Tool

Table 3 Dimensions of Micro Tool at A and B

	A dimensions	B dimensions	Aspect ratio
Top	64.2 μ m	62 μ m	9
Center	69.14 μ m	66.94 μ m	

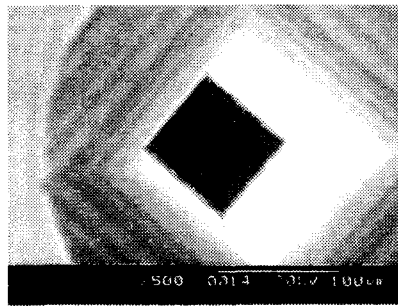
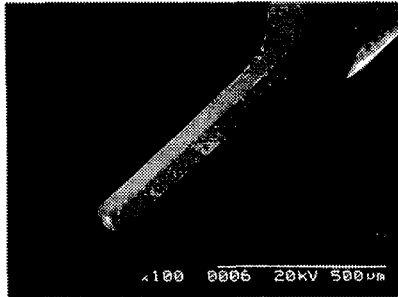


Fig. 8 SEM image of Micro Tool

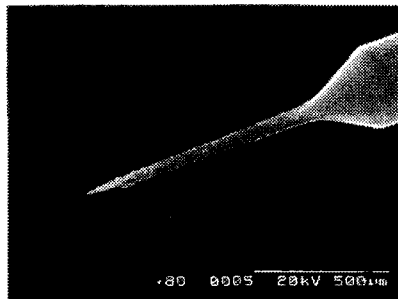


Fig. 9 SEM image of fractured Micro Tool

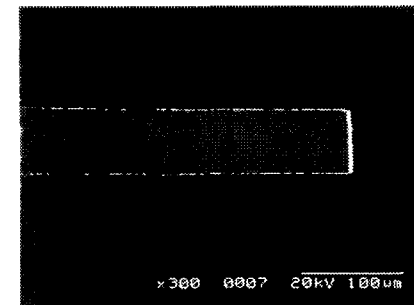
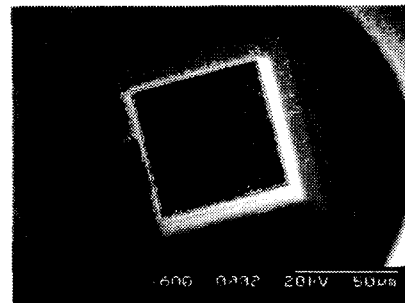


Fig. 10 SEM image of Micro Tool

이용하여 마이크로 공구 가공시 파손의 원인이 되는 연삭력의 감소와 표면 스크래치를 줄여 마이크로 공구를 제작할 수가 있었다.

Table 4 Dimensions of Micro Tool at A and B

	A dimensions 60 μ m	B dimensions 60 μ m	Aspect ratio
Top	62.3 μ m	62.3 μ m	9
Center	63.3 μ m	63.3 μ m	

Fig. 9는 직경 30 μ m의 원형 단면을 가지는 마이크로 공구를 가공하고자 하였으나 이상과 같은 이유로 인해 끝단 부분이 파단되어진 결과이다.

이상의 실험결과를 토대로 트루잉과 드레싱 과정을 개선하여 마이크로 공구를 연삭 가공한 결과, Table 4와 Fig. 10과 같이 가공정밀도가 크게 향상되었다. 또한 Fig. 11은 AFM(Atomic Force Microscope)을 이용하여 제작된 마이크로 공구의 표면 거칠기를 측정한 결과 Ra 55~95nm의 표면 품질을 얻을 수 있었다. 따라서 전해 연속 드레싱을

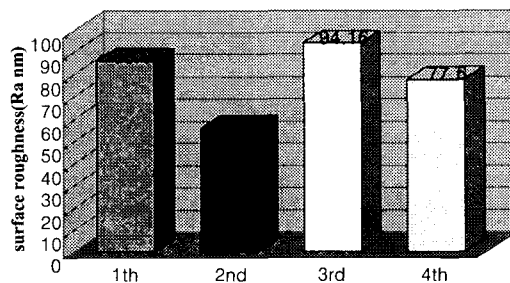


Fig. 11 AFM measurement of surface roughness of micro tool

4.2 마이크로 공구를 이용한 드릴링 테스트

앞에서 제작된 마이크로 공구를 이용하여 드릴 가공에 적용시켜 일반적인 마이크로 드릴 공구 (diameter 250 μ m)와 사각형 단면(84 \times 86 μ m)을 가진 마이크로 공구와 비교 실험을 하였다.

가공 소재로써 일반적으로 잘 알려진 경취성 재료인 Si wafer를 사용하였으나 마이크로 공구를 사용한 경우는 드릴 공구와는 달리 절삭날이 없으므로 드릴 가공을 수행하지 못하고 공구가 바로 파단이 되었으므로 마이크로 공구를 드릴 테스트에 이용한 경우에는 초음파진동(ultrasonic vibration)테이블에 Si wafer를 부착시켜 실험을 하였다.

가공에 사용된 장비는 앞서 마이크로 공구 가공 시 사용된 장치를 그대로 사용하여 Z축의 주축에 연삭 스톨 대신 공구를 장착하여 드릴링 테스트를 수행하였다. Fig. 12는 실험에 사용된 드릴 공구의 형상을 나타내며 드릴링 테스트에 사용되어진 가공 조건을 Table 5에 나타내었다.

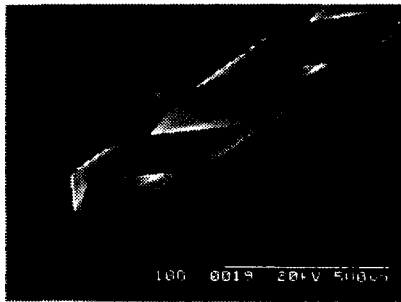


Fig. 12 SEM image of Drill tool

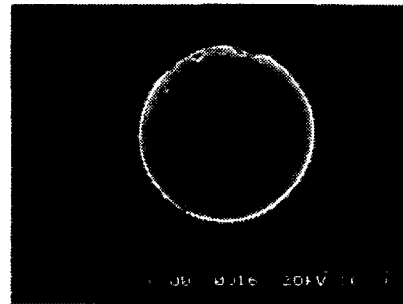
Fig. 13은 마이크로 드릴 가공을 수행한 결과를 나타낸다. 드릴을 사용하여 Si wafer를 가공하여 얻은 결과를 보면 취성재료에서 흔히 볼 수 있는 심한 크랙(crack)현상과 칩핑(chipping)현상을 관측할 수가 있었으며 가공 부위의 주위에도 그 영향으로 인해 진원도 및 가공품위가 좋지 않았으나 초음파를 적용시켜 마이크로 공구를 이용하여 드릴링 테스트를 한 결과를 보면 칩핑이라든지 크랙현상이 많이 감소하는 것을 알 수 있으며 진원도 및 가공품위도 보다 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 결과는 초음파의 영향으로 볼 수가 있었다.⁷⁾

Table 5 Drilling Test Condition

Rotation speed	20000 rpm
Feed rate	30 μ m/s
Dwell time	500 μ s
Depth of drilling	250 μ m
Workpiece	Si wafer
Vibration table	Frequency (20kHz) Amplitude (5 μ m)
Cutting fluid	water



(a) Conventional micro drilling



(b) Ultrasonic machining using vibration table

Fig. 13 SEM image after drilling test in Si wafer

4.3 마이크로 공구를 이용한 패터닝 테스트

다음으로 앞서 드릴링에 적용시킨 마이크로 공구를 사용하여 스테인레스 스틸(stainless steel)에 있어서 마이크로 패터닝(micro patterning)을 수행하였다. 또한 일반적인 마이크로 가공과 초음파를 적용시킨 마이크로 가공과의 가공특성을 비교 분석하였다. Table 6은 가공 조건을 나타낸다.

Fig. 14는 가공되어진 결과를 나타낸다. 일반적인 마이크로 가공한 결과를 보면 가공되어진 부위에 버(burr)가 많이 발생한 것을 알 수가 있으며 그 크기 또한 상당히 큰 것을 알 수가 있었으나 초음파를 적용시킨 마이크로 가공에서는 가공되어진 부위에 버의 크기가 감소할 뿐만 아니라 깨끗한 가공형상정밀도를 얻을 수 있었다. 이 때의 가공되어진 선 폭은 $130\mu\text{m}$ 이었다. 이러한 현상은 초음파를 적용시켜 가공시 초음파 진동에 의해 마이크로 공구가 소재(workpiece)를 다듬질함으로써 일어나는 현상이라고 볼 수가 있었다.

Table 6 Pattern Test Condition

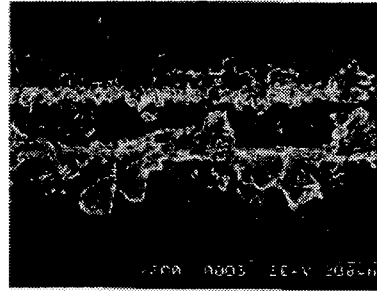
Shape and size of tool	Square($84\times 86\mu\text{m}$)
Rotation speed	20000 rpm
Feed rate	$400\ \mu\text{m/s}$
Depth of cut	$5\ \mu\text{m}$
Total depth of patterning	$10\ \mu\text{m}$
Workpiece	SUS plate
Vibration table	Frequency (20kHz) Amplitude ($5\ \mu\text{m}$)

5. 결론

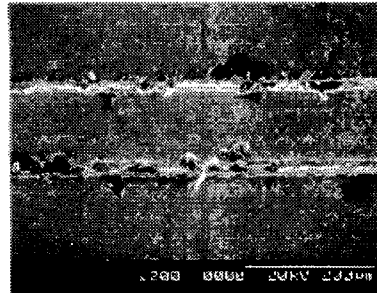
본 연구에서는 전해 연속 드레싱(Electrolytic In-process Dressing)시스템을 이용하여 $100\mu\text{m}$ 이하의 사각형 단면을 가지는 마이크로 공구를 연삭 가공하였으며 AFM측정결과로부터 $Ra\ 55\sim 95\text{nm}$ 인 표면 품질을 얻을 수 있었다. 따라서 가공 중 연삭력을 감소시킴과 동시에 소재의 표면에 생기는 스크래치를 감소시켜 강도를 향상 시켰으며 난삭재인 초경(WC)에 있어서 진직도가 높은 깨끗한 단면 형상을 가지는 마이크로 공구를 제작하였다.

또한 제작되어진 마이크로 공구를 드릴 가공과 패턴 가공에 적용시켜 일반적인 마이크로 가공과 초음파를 적용시킨 마이크로 가공과의 비교 분석을 함으로써 초음파의 특성과 공구로써의 적용 가능성을 확인하였다. 이러한 결과들로부터 향후 제작된 마이크로 공구를 밀링(milling)가공에 적용하여 micro-groove를 필요로 하는 부품의 제조라든지 micro-patterns, high machining accuracy를 필요로 하

는 micro channels 등의 가공에 충분히 적용되어질 수 있다고 생각되어진다.



(a) Conventional micro pattern



(b) Ultrasonic micro pattern

Fig. 14 Compare conventional with ultrasonic machining in micro patterning(stainless steel plate)

참고문헌

1. Masuzawa T, Fujino M., Kobayashi, K., "Wire Electrodischarge Grinding for Micro Machining," Annals of the CIRP, Vol. 34/1, pp. 431-434, 1985.
2. Yeo, S. H, Balon, S. A. P, "Development of a New Grinding Set-up for Micro-cylindrical Parts Fabrication," Proc. of the EuSpEn, pp. 155-158, 1999.
3. YoshihiroUehara, HitoshiOhmori, "Development of micro tool by ELID micro fabrication system," Journal of the Japan Society for Abrasive Technology, Vol. 46, No. 1, pp. 38-43, 2002.
4. Eun Sang LEE, Jae Young Choi, "Technology of Environmentally Conscious Machining for

- Ultra-precision Lapping with In-process Electrolytic Dressing," Journal of the Korea Society of Precision Engineering, Vol. 18, No. 9, pp. 18-24, 2001.
5. N. Itoh and H. Ohmori, "Mirror Surface Finishing on Double Sided Lapping Machine with ELID," International conference and general meeting of the european society for precision engineering and nano-technology, pp. 329, 1990.
 6. N. Itoh and H. Ohmori, "Finishing Characteristics of ELID-lap grinding Using Fine Grain Lapping Wheel," International Journal of JSPE, Vol. 30, pp. 305-308, 1999.
 7. Bong Gu Lee, Hon Zong Choi, "A Study on Micro-hole machining for Ceramics Using Ultrasonic vibration," Spring Conference of KSPE, pp. 988-992, 2002.