

화학 기계적 미세 가공기술에 의한 버 최소화에 관한 연구

이현우*, 박준민*, 정상철*, 정해도**, 이응숙***

A Study on The Burr Minimization by The Chemical Mechanical Micro Machining(C3M)

Hyun woo Lee*, Jun Min Park*, Sang Cheol Jeong*, Hae Do Jeong**, Eung Sug Lee***

ABSTRACT

C3M(chemical mechanical micro machining) is applied for diminishing the size of burr and fabricating the maskless patterning for aluminium wafer(thickness of $1\mu\text{m}$). It is difficult to perform the micro size machining with the radically increased shear stress. While the miniaturization and function-orientation of parts has been needed in the many field such as electronics, optics and medicine, etc., it is not enough to satisfy the industry needs in the machining technology. In this paper feasibility test of diminishing burr and fabricating maskless pattern was experimented and analyzed. In the experiment oxide layer was formed on the aluminium with chemical reaction by HNO_3 (10wt%), then the surface was grooved with tungsten carbide tool for the different condition such as the load and feed rate. The result was compared with the conventional machining to show the improvement of C3M with SEM for burr diminish and XPS for atomic existence, AFM for more precise image.

Key Words : Chemical Mechanical Micro Machining(화학 기계적 미세 가공), Micro Size Machining(미세 가공), Al wafer(알루미늄 웨이퍼), Burr(버), Oxide layer(산화층), Chemical Reaction(화학 반응), Maskless Pattern(마스크리스 패턴), Groove(홈 가공)

1. 서론

현재 전세계는 무한경쟁의 시대에 들어서면서 항공우주, 반도체 등을 비롯한 첨단산업 분야의 기술적 선점과 시장확보를 위해 많은 국가들이 정부 주도하의 적극적인 연구와 투자를 아끼지 않고 있다. 이러한 상황 속에서 많은 기능성 부품과 제품들은 점차 소형화, 정량화, 고정밀화되어 가는 추세에 있으며, 특히 마이크로 가공에 의한 마이크로머

신 부품의 개발과 가공기술 확보가 주요 쟁점으로 떠오르고 있다.

그러나 마이크로 가공은 mm, sub-mm order의 기관에 micro, sub-micro order의 미세 구조물을 가공해야 하므로 공작물의 고정밀도 가공과 표면품질의 제어측면에서 상당한 기술적 어려움을 겪어 왔다. 또한 이러한 구조물은 정보와 필요한 물질의 전달, 힘과 에너지의 전달·전환, 그리고 위치의 이

→ 2001년 7월 13일 접수
* 부산대학교 정밀기계과
** 부산대학교 기계공학부
*** 한국기계연구원 자동화연구부

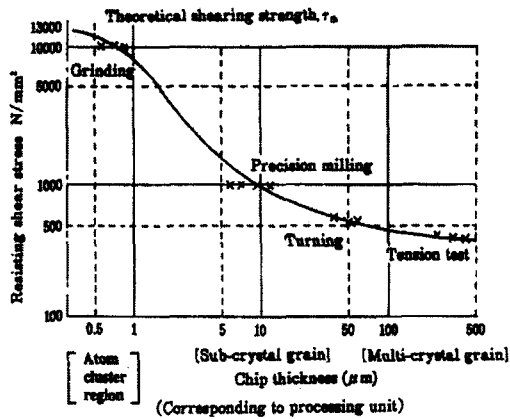


Fig. 1 Example of radical increase for the resisting shear stress

동 등의 이상의 특별한 목적을 수행하기 위한 기능이 필요하다. 그러므로 이런 부품들이 제 기능을 하고 산업현장에 적용되기 위해서는 높은 정밀도를 가지면서도 고효율의 가공성을 갖는 공정이 필요하다. 그러나 Fig. 1에서 나타난 그래프를 보면 미세 구조물의 가공 시에는 단위체적 당 가공에너지가 급격하게 늘어나기 때문에 효율적인 가공이 어렵다.¹⁾

K. Tagashira et al은 희석한 올레인산(oleic acid)을 도포한 순철에 있어서의 직교절삭시의 칩 형성 메커니즘에 대해서 연구하였다. 가공 경화된 Fe에 있어서 0.2mass%와 순수한 올레인산(oleic acid)은 절삭력과 칩 두께의 감소에 효과적이었다. 적외선 스펙트럼 측정으로부터 올레인산(oleic acid)과 Fe 원자 사이에 화학흡착에 의해 절삭된 칩에서의 전위 밀도가 높은 부분이 관측되었다²⁾.

본 연구에서는 이러한 micro-machining 차원에서의 효율적인 가공방법을 제시하고, 이런 각각의 기능들을 수행하기 위한 구조물 가공의 기초가 되는 방법들 중 하나를 제시한다. 그 중 grooving은 2.5차원의 형상을 제작하기 위한 기본적인 방법으로 전자, 광학, 정보통신, 의학산업 등에 있어서 소형, 고집적의 제품제작을 위해서 활용될 수 있다.

특히 반도체 공정에서는 일반적으로 많은 수의 공정과, 고비용의 시스템, 재료의 제한, 재현성 등의 문제점이 있다. 이 공정을 극복하기 위해서,

C3M(Chemical Mechanical Micro Machining) 공정이 개발되었다. C3M 공정의 기본개념은, Chemical Solution이 재료의 표면을 반응시키고, 그 반응으로 표면에 화학적으로 반응된 층(chemically reacted layer)이 생긴다. 이후 반응된 층을 기계적으로 제거하는 것이다.

C3M을 적용한 micro-machining process의 적용예의 하나로서 연질금속의 특성을 가지는 Al wafer(Al(99.5%) Thickness 1μm above Si substrate)를 선택하였다. 일반적인 알루미늄과는 달리 표면이 고품위, 고정면이여서 가공을 하고 난 뒤의 가공된 부위와 버(burr)의 정확한 관측을 할 수 있으며, 본 연구는 미세 가공이므로 절입깊이도 최대 1μm 이내로 조건을 두었으며, 또한 가공된 부위의 형상정도를 관측하기 위한 AFM(Atomic Force Microscope)측정은 표면의 고품위를 요구하였으므로 본 연구에서는 일반적인 Al과는 달리 Al wafer를 선택하였다.

연성재료의 일반적인 기계가공에서 많이 볼 수 있는 버(burr)를 감소시키는 방법으로 표면에 질산(HNO₃)을 이용하여 강제적으로 산화층을 생성시키는 화학적인 처리 이후 기계적인 가공을 행함으로써 절삭저항을 줄이고 이로 인하여 발생할 수 있는 버를 최소화과 동시에 나아가 미세 패턴 가공(micro patterning)을 수행하였다.

2. C3M의 기본적 개념

Fig. 2는 기본적인 C3M(Chemical Mechanical Micro Machining)의 개념을 나타낸다. 우선, 일반적인 기계가공과는 달리 화학적 반응을 일으키기 위한 용액(etchant)에 의해 소재의 표면이 반응한다. 그리고 난 후 화학적 반응에 의해 기계적인 상대량

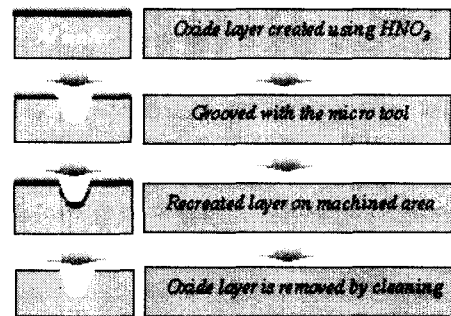


Fig. 2 Machining concept of C3M for Al wafer

(property)이 전혀 다른 반응층이 형성되어진다. 마침내 반응층은 기계적인 방법에 의해 가공되어진다.

3. 실험방법

3.1 실험장치도 및 사용공구

Fig. 3은 전체적인 실험 장치도를 나타낸다. Al에 있어서 미세 가공(micro-machining process)을 적용시키기 위한 3-axis machine은 공구의 수직이송과 patterning 가공시 x, y, z축 방향으로 이송시키기 위하여 3개의 모터(motor)로 구성되어 있으며 모터는 컴퓨터를 이용하여 미세 제어가 가능하며 안정하고 micro-machine processing을 수행할 수 있는 장치이다. 또한 Fig. 4는 실험에 사용된 공구의 형상을 나타낸다. 일반적인 기계가공과는 달리 본 연구에서 수행하고자 하는 가공은 미세한 가공이며 precision machine tool이 꼭 필요하므로 10 μ m의 radius를 가지는 공구로 초경tip(wc)을 선택하였으며, grooving과 patterning 실험에 적용하기 위해 corn shape를 선택하였다.

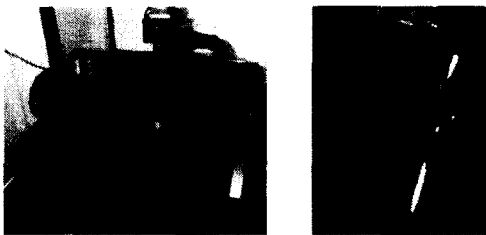


Fig. 3 3-axis machine constructed for advanced machining

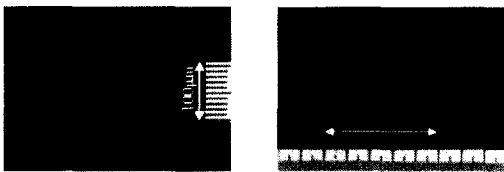


Fig. 4 Tool tip(wc) 10 μ m radius

3.2 가공조건 및 실험방법

실험에 사용된 가공 조건을 Table. 1에 나타내

었다. 절삭시 가해지는 load와 feed rate를 Table. 1의 가변 인자를 변화시켜가면서 가공 시 일반적으로 연질금속에서 발생하는 burr의 발생량과 가공되어진 선 폭의 변화, 절입량에 관해서 실험을 하고자 하였다. 일반적인 기계가공과의 차이를 두고 C3M을 적용시키기 위한 하나의 방법으로 알루미늄의 표면에 화학적 처리를 하기 위한 반응액으로 질산(HNO₃)용액을 사용하여 60min동안 반응을 시켰다. Table. 2는 실험에 사용된 Al wafer의 조성을 나타낸다.

알루미늄은 자연대기 조건에서 주위의 산소와 쉽게 반응을 하여 자연산화막이 생성된다. 하지만 이 산화막의 두께는 수 nm정도로 아주 얇다. 따라서 알루미늄 표면에 강제적으로 산화막을 생성시키기 위하여 질산용액중의 산소가 알루미늄과 결합하여 알루미늄 표면에 산화 알루미늄층(Al₂O₃)이 생성된다. 알루미늄과 질산과의 반응식은 식(1)과 같다.

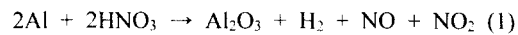


Table 1 Experimental condition of C3M for Al-wafer

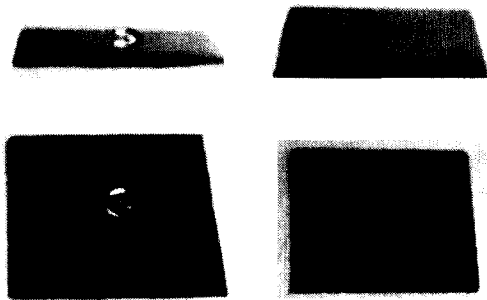
Chemical Condition	
Chemical	HNO ₃ (10wt%)
dipping time	60 min
Machining Condition	
Tool	Stylus tool (wc) radius : 10 μ m
Load	95.7, 46.8 mN
Pass	one times
Feed Rate	75, 150, 600 μ m/s

Table 2 Specification of Al wafer

	Al	Cu
조성비(%)	99.5	0.5
Al Thickness	1 μ m above Si substrate by sputtering	

식(1)은 알루미늄과 질산과의 화학반응에 의해 산화알루미늄이 생성되어지는 것을 나타낸다.

Fig. 5에서는 알루미늄과 질산과의 반응에 의해 표면에서의 반응생성물(Al_2O_3)이 생성되어진 것을 나타낸다. 이 산화물은 흡착성이 있어 이 때문에 공기중의 이물질과 흡착을 하여 표면이 깨끗하지 못하게 되고 표면에 질산(HNO_3)등의 잔류물이 있어 가공을 하고 난 후에는 증류수를 사용하여 표면을 cleaning하였다.⁴⁾



(a) Hydrophobic (b) Hydrophilic(in processing)
Fig. 5 Al wafer surface change in C3M

또한, 화학반응을 하고 난 시편의 깊이 방향으로의 산소의 농도변화와 결합에너지(Binding Energy)를 분석하기 위해서 XPS(X-ray Photoelectron Spectroscopy)분석기에 의해 측정을 하였다. Fig. 6은 깊이 방향에 따른 산소의 농도변화를 나타낸다. 질산과 화학 반응한 표면에서는 산소의 농도가 많이 증가함을 알 수가 있으며, 질산과 반응한 시편에서는 XPS측정으로부터 두 개의 peak(Al과 Al_2O_3)가 나타나며, 그 때의 결합에너지(Binding Energy)는 각각 73eV, 75.7eV이다. 이것은 산소의 농도증가에 따라 알루미늄이 질산과 반응을 일으켜 결합을 강하게 형성함을 알 수가 있으며, 이런 에너지로 인해서 전위(dislocation)를 일으키는 변형 에너지를 전달하는 것을 억제하는 것으로 생각되어진다. 이때의 Al_2O_3 의 결합에너지는 $-1675.7 \Delta H_f$ (kJ/mol)이고 구조식은 식(2)와 같다.⁵⁾

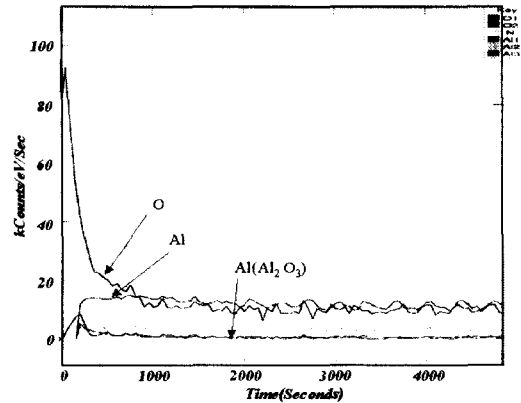
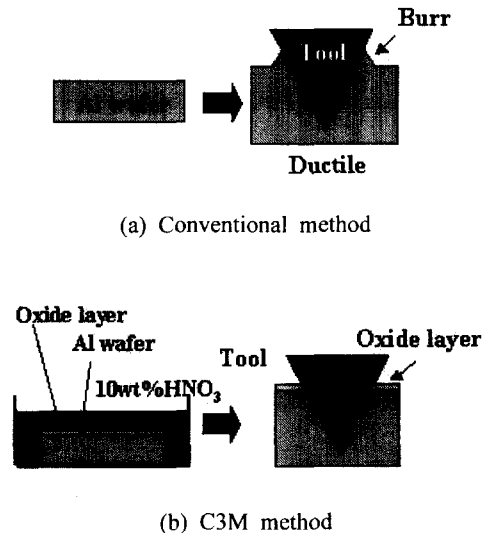


Fig. 6 XPS depth profile for each atomic existence in chemical reacted Al wafer

Fig. 7은 전체적인 가공mechanism을 나타낸다. 본 실험에 사용되어진 Al wafer의 시편의 크기는 $20 \times 20mm$ 이며 반응전 일반적인 상태의 시편과 질산(HNO_3)10wt%용액에 1시간동안 반응을 시킨 후 액중에 있는 시편을 Table 1의 가변 인자를 하나씩 바꾸어 가면서 가공하였다. 일반적인 기계가공과는 달리 화학반응에 의해 생긴 반응층에 의해 가공시 전위가 고착되어 항복응력이 상승되고 변형저항이 증가함에 따라 소성유동이 억제되어 버(burr)가 감소되는 현상을 나타내고 있다.⁶⁾



(a) Conventional method
(b) C3M method
Fig. 7 Schematic diagram of processing mechanism

4. 실험결과 및 고찰

4.1 이송속도에 따른 가공특성

연질금속의 절삭가공시 burr의 발생과 그 크기는 이송속도(Feed rate)에 영향을 받는다.

Fig. 8은 이송속도에 따른 절삭 가공 시 가공되어진 선 폭(the width of groove)의 변화량을 나타낸 그래프이다. C3M을 적용시킨 가공에서나 일반적인 가공방법에서도 이송속도가 증가함에 따라서 가공된 선 폭은 증가함을 알 수가 있다. 그러나 Fig. 9에서 측정된 SEM(Scanning Electron Microscope)의 관측에 따르면 C3M을 적용시키지 않은 일반적인 가공에서는 burr의 발생량과 크기가 상당히 증가함을 알 수가 있다. 한편, C3M을 적용시킨 결과에서도 이송속도가 감소함에 따라서 burr size도 점차 줄어들음을 알 수가 있다.

C3M을 이용한 micro-machining process에서 나타나는 이러한 현상은 질산(HNO_3)과 알루미늄(Al)과의 반응에 의해 상호간에 전자를 공유함으로써 알루미늄의 표면에 생성된 산화알루미늄(Al_2O_3)으로부터 전위(dislocation)가 고착되어 전위밀도가 높아져 변형에너지를 충분히 흡수함으로써 항복응력을 상승시키고 절삭저항이 감소, 가공경화시키는 효과로 인해 burr의 발생과 크기가 감소하는 것으로 생각되어진다. 또 실험은 액중에서 실시함으로써 절삭열의 냉각과 마찰력 감소에 영향을 미친다고 생각할 수 있다.

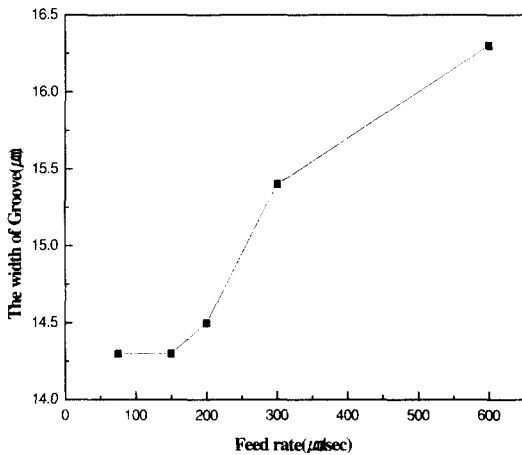
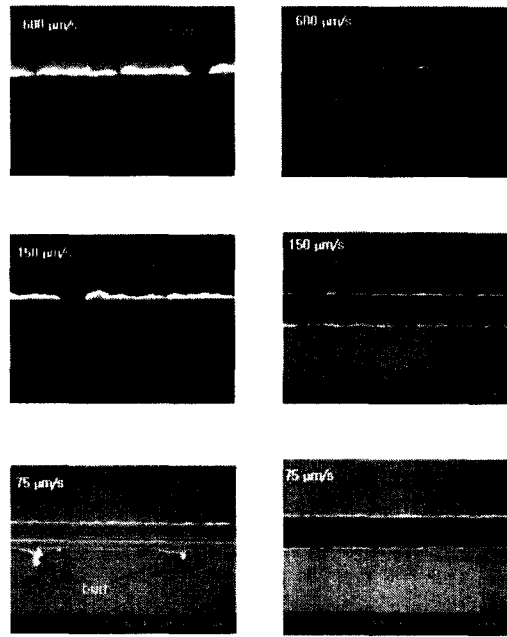


Fig. 8 Groove width change according to feed rate



(a) Conventional (b) C3M method

Fig. 9 SEM image of grooved edge according to feed rate (Load 95.7mN)

4.2 가공력의 변화에 따른 가공특성

연질금속의 절삭가공시 burr의 발생과 그 크기는 하중의 변화(Load change)에 영향을 받는다.

Fig. 10은 하중의 변화에 따른 micro-machining

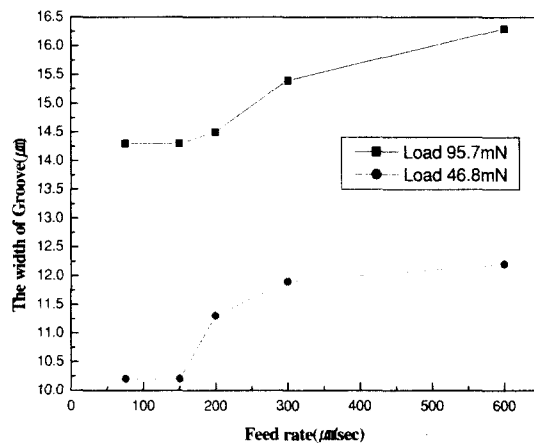


Fig. 10 Groove width change according to Load

process에 따른 선 폭(the width of groove)의 변화량을 나타낸 그래프이다. 이송속도의 변화는 앞절의 실험에서와 동일하며 측정된 결과로부터 하중이 감소함에 따라 선 폭이 줄어들음을 알 수가 있으며 이것은 절삭저항이 작아짐으로 인한 결과로 볼 수가 있다.

Fig. 11은 하중(Load)을 46.8mN로 감소시키고 난 후 SEM(Scanning Electron Microscope)으로 측정된 결과이다. Fig. 9에 보인 양상과는 달리 C3M을 적용시킨 결과에서도 하중이 줄어들음에 따라서 버(burr)의 발생이라든지, 그 크기가 줄어들음을 알 수가 있다. 이상의 결과로부터 연결급속의 C3M을 적용시킨 micro-machining process에서 화학적 반응에 의한 반응 생성물의 영향이 버(burr)의 발생과 그 크기에 대단한 영향을 미치는 것을 확인할 수가 있으며, 또한 기계적인 가공조건 즉, 이송속도, 하중량의 변화, 액 중에서 실험에 의한 마찰력 감소 등에 따라서 선 폭과 선의 형상정도(Fine groove)에 영향을 미치는 것을 확인할 수가 있었다.

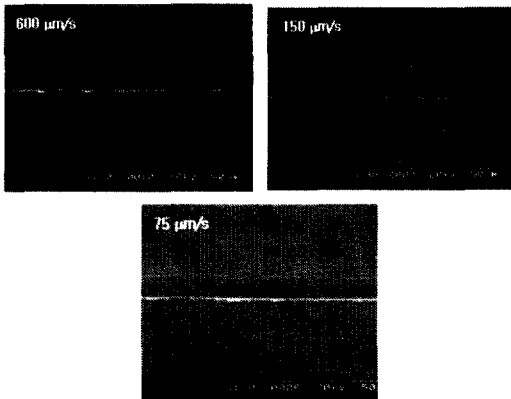


Fig. 11 SEM image of grooved edge by C3M (Load 46.8mN)

4.3 AFM(Atomic Force Microscope) 측정

가공된 피삭면에서의 버(burr)의 발생과 그 크기 도 대단히 중요할 뿐만 아니라 micro scale에서는 가공된 부위의 형상정도 또한 중요하다. C3M을 적용시켜 버(burr)의 발생과 크기는 일반적인 기계가공에 비해 상당히 줄어들음을 알 수가 있었으나 본 연구는 정 하중에 의한 가공이므로 가공되어진 절입 깊이뿐만 아니라 소재의 가공된 부위의 형상정도에 대한 고찰이 필요하였다. 그러므로 AFM측정

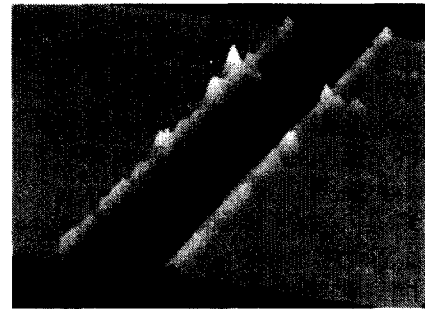
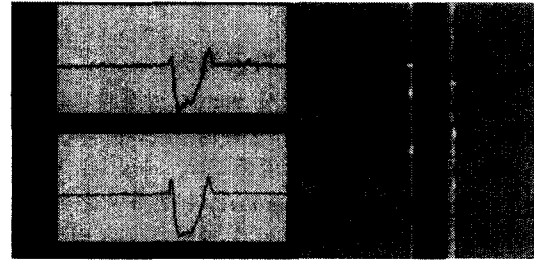


Fig. 12 AFM image of grooved edge by C3M (Load 95.7mN, Feed rate 150μm/s)

으로 가공되어진 소재의 형상정도에 대해서 관측할 필요가 있었다.

우선, C3M을 적용시키지 않은 micro-machine processing에서는 버(burr)의 발생량과 그 크기로 인해 AFM측정 범위를 벗어나 관측되어지지 못하였다. 이상의 결과로부터 C3M을 적용시킨 가공에서는 버(burr)가 상당히 줄어들음을 알 수가 있다.

Fig. 12는 Load 95.7mN, Feed rate 150μm/s로 가공한 시편의 AFM측정결과이다. 이상의 결과로 절입깊이는 734nm로 일정하게 가공되어진 것을 알 수가 있으며, 하중의 변화에 따라 충분히 절입깊이는 제어될 수 있다고 본다. 그러나 가공된 형상은 공구 형상(tool shape)에 영향을 받으므로 본 연구에서는 corn shape의 공구를 택했지만 tool tip의 끝단이 피삭재의 표면에 수직으로 정확하게 닿지 않으면 형상정도에 영향을 미치는 것을 Fig. 12의 측정 결과로 알 수가 있었다. 그러므로, micro-machine processing에서는 공구의 setting이 미세하게 제어될 수 있어야 한다.

위의 실험결과를 토대로 Fig. 13의 AFM측정 결과는 공구의 위치제어를 향상시키고 하중(Load)

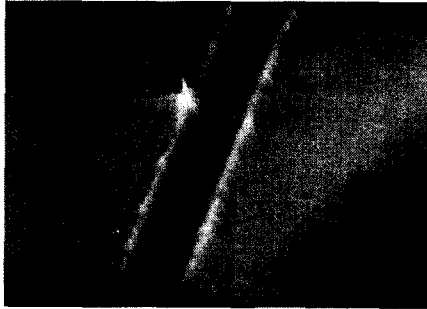
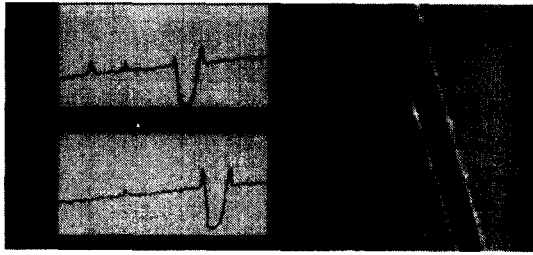


Fig. 13 AFM image of grooved edge by C3M
(Load 46.8mN, Feed rate 150 μ m/s)

46.8mN, 이송속도는 150 μ m/s로 위의 실험과 동일조건에서 측정한 결과이다. 공구의 위치정도에 의해서 가공부위의 형상정도의 향상과 마찬가지로 하중(Load)의 감소에 따른 선 폭, 절입 깊이(569nm)가 줄어들을 알 수가 있었으며, 공구의 위치제어에 따라서도 버(burr)의 발생과 크기를 줄일 수가 있었다.

4.4 C3M을 이용한 다양한 Patterning

이상의 실험으로부터 얻어진 가공조건 즉, 하중(Load), 이송속도, 공구의 위치 정도 등을 바탕으로 다양한 patterning에 C3M을 적용시켰다.

Fig. 14는 C3M을 적용한 Al wafer에서의 line patterning을 수행한 예이다. 질산(HNO₃)10wt%용액을 알루미늄(Al)과 화학반응을 시키고 난 뒤 초경 tip을 이용하여 하중 46.8mN, 이송속도 120 μ m/s로 가공하였다. 이 때, 각각의 선 폭은 15 μ m, 선 간격은 40 μ m이며 규칙적인 형상과 형상정도도 뛰어난 것을 확인할 수가 있다. 그러므로 이송속도, 가공력, 공구의 위치제어 향상 등 가공조건을 조절하여 연결 금속의 복잡하고 정교한 micro-patterning은 충분히 가능하다고 생각되어진다.

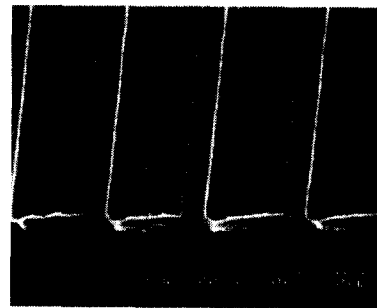
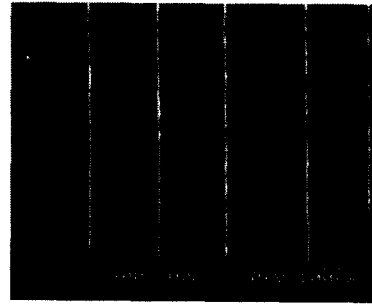
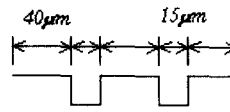


Fig. 14 SEM image of grooved edges by C3M

5. 결론

일반적인 micro-machine processing과 C3M을 적용한 micro-machine processing을 수행하여 여러 가지 조건에 따른 가공 특성을 알아보았다. 그 결과 C3M을 적용시킨 경우에는 버(burr)의 발생과 크기가 줄어들을 알 수가 있었으며, 알루미늄과 질산과의 화학반응으로 생긴 반응생성물(Al₂O₃)에 의해서 전위의 이동을 고착시켜 표면의 항복응력을 상승시킨 결과라 할 수 있다. C3M을 적용시킨 가공에서도 하중의 변화, 이송속도의 변화에 따라서 버의 발생과 크기, 선 폭, 절입 깊이를 감소시킬 수 있었다. 이러한 결과들로부터 C3M의 process는 micro-groove를 필요로 하는 부품의 제조라든지 다양한 연결금속에 있어서의 micro-patterns, high machining accuracy를 필요로 하는 micro heat

radiator, micro channels등에 충분히 적용되어질 수 있다고 생각되어진다.

후기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중, 한국생산기술연구원이 주관하고 있는 Milli-Structure 생산 기술 개발 사업의 세부과제로서 수행중이며, 이에 관계자 여러분들께 감사의 말씀을 올립니다.

참고문헌

1. Norio Taniguchi, Nanotechnology, Oxford Science Publications, pp. 15-16, 1996.
2. Kohsuke TAGASHIRA, "The Chip Formation Mechanism of Orthogonal Cutting for Pure Iron Coated with Dilute Oleic Acid, Vol. 66, No. 12, pp. 1917-1921, 2000.
3. 황호정, 반도체 공정기술, 생능출판사, pp. 338-339, 1999.
4. 이홍로, 표면공학, 형설출판사, pp. 195-215, 1999.
5. Moore, Stanitski와 3명, The Chemical World, 자유아카데미, pp. 397-436, Appendix J, 2000.
6. William D. Callister, Jr, Materials Science and Engineering, John Wiley & Sons, Inc, pp. 148-175, 1995.