

## 화학 기계적 미세가공 기술

박준민\*(부산대 대학원 정밀기계공학과), 정해도\*\*(부산대 기계공학부),  
김성현, 정상철\*(부산대 대학원 정밀기계공학과), 이응숙\*\*\* (한국기계연구원 정밀가공그룹)

### Chemical Mechanical Micro Machining(C3M) Process

JunMin Park\*(Dept. of Pre. Mech. Engineering, PNU)  
HaeDo Jeong\*\* (School of Mechanical Engineering, PNU),  
SungHeon Kim, Sangcheol Jeong\*(Dept. of Pre. Mech. Engineering, PNU)  
EungSug Lee\*\*\* (Precision Machining Group, KIMM)

#### ABSTRACT

Micro machining technology has been studied to fabricate small size and high accuracy milli-structure products. To perfectly overcome the conventional mechanical machining methods, the chemical mechanical micro machining(C3M) process was developed. The mechanism of C3M process is that chemical solution etches the material and results in the generation of the chemical reacted layer, and the mechanical micro tool subsequently removes the layer. From the fundamental experiments, the C3M process has been founded to have the advantages of lower machining resistance, tool wear, and higher surface quality and form accuracy than conventional methods. This study focuses on the micro grooving of both the metallic material(SKD11, Al) and hard brittle silicon oxide.

**Key Words** : Chemical Mechanical Micro Machining(화학 기계적 미세가공), Chemically reacted layer(화학 반응층), Chemical solution(화학 부식액)

#### 1. 서론

미세 구조물에 대한 생산 기술은 전자부품, 광통신, 의료분야 등에서 요구되는 제품의 소형화, 고집적화의 요구에 따라 전기, 전자, 기계, 광학, 의학 등의 다양한 분야에서 그 중요도가 급속도로 확산되고 있다[1]. 이에 반해, 가공방식은 기존의 기계가공 또는 방전가공 및 반도체 프로세스를 응용한 방식들이 제안되고 있으나[2], 이러한 기존의 방식은 재료와 가공 메카니즘에 있어 미세가공에의 적용에 한계성을 드러내고 있다. 미세가공 기술은 미세구조물의 요구조건 및 재료의 물리, 화학적 특성 등을 고려하여 가공방식의 차별적 개발이 필요하다. 이에, 새로운 화학 기계적 미세가공 기술은 재료의 성질에 따라 경질, 연질 및 경취성 재료에 대해 각각 차별화된 방식을 적용함으로써 기존 프로세스의 한계성을 극복하고 미세가공 기술의 새로운 영역을 개척하였다.

#### 2. 화학 기계적 미세가공 기술

Table 1에 각종 재료의 결합상태 및 특성을 나타내었다. 일반적으로 재료는 금속결합, 이온결합, 공유결합, 분자결합 및 수소결합에 의한 구조를 가지는데, 금속결합은 -전자 속에 +이온의 반복되는 구조로 설명되며, 동, 알루미늄과 같이 강력한 결합을 하고 있다. 즉, 전자구름과 이온사이에서 정전기적 인력에 의해 결합력을 유지하고 있다. 금속결합과는 달리, 이온결합의 경우, 강력한 양극자 원소(금속)과 음극자 원소(비금속)사이에서 형성되는데, 결합력은 이온들 사이의 정전기적 인력에 기인하게 된다. 공유결합은 각기 다른 원자가 서로의 최외각 전자를 공유한 형태로 결합력을 유지하며, 분자결합은 수 kcal/mole의 아주 미약한 결합력이 비대칭형을 이룬 쌍극자의 의해 유지된다. 수소결합은 어떤 조건에서 수소원자들이 다른 두 개의 원자에 의해 강력하게 이끌려서 생기는 결합력이다. C3M process는 이러한 재료들의 결합력을 약화(또

는 경화)시키기 위해 화학액을 사용하고, 약화(또는 경화)된 층을 기계적으로 제거함으로써 가공표면의 품질 향상은 물론, 공구의 마멸향상을 기대할 수 있다.

Table. 1 General characteristics of materials [3]

material	bonding	micro structures	advantage	disadvantage
metals and alloys	metallic	crystal grains	strong, stiff, conductive	fracture, fatigue
polymers	covalent and secondary	chain molecules	low cost, light weight, resist corrosion	creep, low strength, low stiffness
ceramics and glasses	ionic-covalent	crystal grains, amorphous	strong, stiff, hard, resist temperature, corrosion	brittleness
composites	various	matrix and fiber, etc	strong, stiff, light weight	high cost, delamination

새로운 개념의 화학기계적 미세가공 기술 (Chemical Mechanical Micro Machining : C3M)은 각종 재료의 표면에 등방적으로(isotropically) 화학반응층을 형성시키고, 고체공구를 이용하여 이방적으로(anisotropically) 반응층만을 선택적 제거함으로써 수백  $\mu\text{m}$ 이하의 미세구조물을 제작할 수 있다. 재료와 화학액에 의한 반응층 생성(Fig. 1)의 개략도와 실험상의 모식도를 Fig. 2에 나타내었다. 또한 화학기계적 미세가공 기술은 chipping and burr free 측면에서 뛰어난 홈가공이 가능하다. 기존의 미세가공 기술은 미세 축을 이용한 방전가공을 통해 구멍가공이 수행되어 왔으며, 홈가공에 대한 연구는 반도체 프로세스에 의존한 연구가 대부분이어서, 재료나 가공상의 한계성을 가진다. 개발된 C3M process에서는 고체공구를 수  $\text{mN}$ ~수  $\text{N}$  범위 내에서 가공력을 부여하면서, 부식층만을 제거하는 메카니즘의 공정을 수행하기 때문에 가공저항력이 적고, 공구의 내마모성에 있어서 우수한 성능을 보인다.

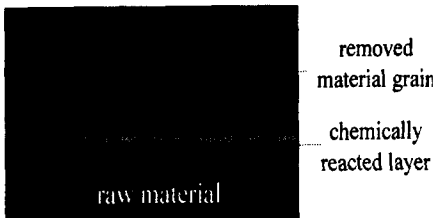


Fig. 1 Chemically reacted layer

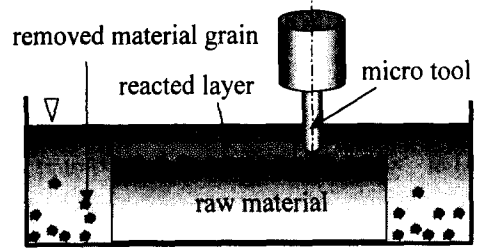


Fig. 2 Schematics of C3M process

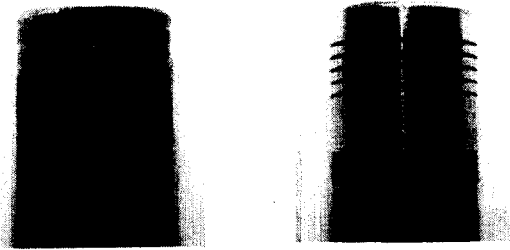
### 3. 미세홈 가공

#### 3.1 경질금속(S45C)의 C3M

경질금속인 강 of 절삭가공은 공구강(HSS : High Speed Steel)이나 초경재료에 의해 이루어졌으나, 다이아몬드에 의한 강 of 절삭가공은 일반적으로 공구의 확산마멸(diffusion wear)로 인하여 불가능한 것으로 알려져 있다. 본 연구의 결과로서 강을 다이아몬드 팁으로 화학기계적 미세가공 기술을 적용하여, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 재료인 강은 표면에 부동태 산화피막( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )을 생성시키고, 이를 공구로써 제거함으로써 원활한 절삭가공이 이루어진다. Table 2의 기계적 가공조건으로 동일한 경질재료를 절삭가공 시, C3M 메카니즘을 적용한 경우 공구의 마멸이 훨씬 감소했음을 Fig. 4에서 알 수 있다. 결과적으로, C3M은 재료의 가공의 표면향상과 공구의 마멸 및 다이아몬드에 의한 경질금속의 절삭에 대한 가능성을 보여준다.

Table 2 Conditions of diamond cutting

tool	PCD(Poly Crystal Diamond)
workpiece	S45C(Hrc:35, $\phi$ 20 mm)
depth of cut	5 $\mu\text{m}$ ( total depth : 1 mm )
rpm	3,000
machine	Vertical Machining Center(MAZAK)
electrolyte	AFG-M, dilution ratio 50 : 1 (NORITAKE)
voltage	30 V



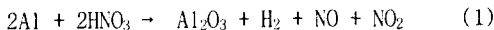
(a) general cutting (b) C3M applied  
Fig. 3 comparison of diamond cutting



(a) Not applied C3M (b) applied C3M  
Fig. 4 Comparison of diamond tool wear

### 3.2 연질금속(Al 5052)의 C3M

일반적으로 연질금속의 가공시에는 소성변형에 의한 에지(edge)부에 버(burr)를 형성시키고, 특히 미세 형상 자체를 변형시키는 등의 문제를 유발한다. 본 연구에서는 알루미늄과 같은 연성재료의 미세 가공에서 많이 볼 수 있는 버를 감소시키며 가공정밀도를 향상시키기 위해 알루미늄표면에 질산(HNO<sub>3</sub>)을 이용하여 강제적으로 경취성 산화층(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)을 생성시킨 후 기계적인 가공을 수행함으로써, 발생하는 버(burr)를 최소화하였다. 일반적으로 알루미늄은 자연대기 조건에서 쉽게 얇은 자연산화막이 생성된다. 이때 형성된 산화막의 두께는 수nm정도로 아주 얇다. 따라서, 본 실험에서는 알루미늄표면에 강제적으로 산화막을 생성시키기 위하여 알루미늄 시편을 질산용액에 일정시간 동안 강제부식을 시키는 방법을 사용하였다. 알루미늄과 질산과의 반응은 식(1)과 같다.



0.1 $\mu$ m의 절입을 주고, 테이블 이송방향의 속도는 3mm/s이며, 피삭재는 Al 5052를 사용하였다. Table 3에 실험조건을 나타내었다. 질산과의 반응으로 인해 생성된 산화피막(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)을 Auger electron

spectroscopy(AES)로 분석을 한 결과 질산과의 반응에 의해 표면에 산소의 농도가 1.5배정도 높아졌음을 알 수 있다(Fig. 5). 그리고 화학적으로 생성된 산화피막을 이용하여 마이크로 절삭가공을 행하였을 때, 버(burr)관찰을 통해 가공특성을 분석하였다. 표면에 산화 피막을 생성시킨 경우 버(burr)의 발생이 극소화 되었음을 알 수 있다(Fig. 6).

Table 3 Experimental conditions of ductile material

chemical solution	HNO <sub>3</sub> (10wt%)
etching time	1hour
cutting depth	2 $\mu$ m
feedrate	3mm/sec
workpiece	Al 5052
measurement	AES analysis

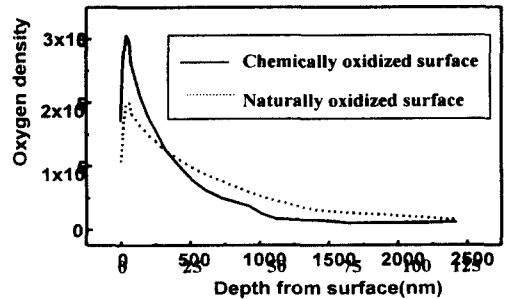
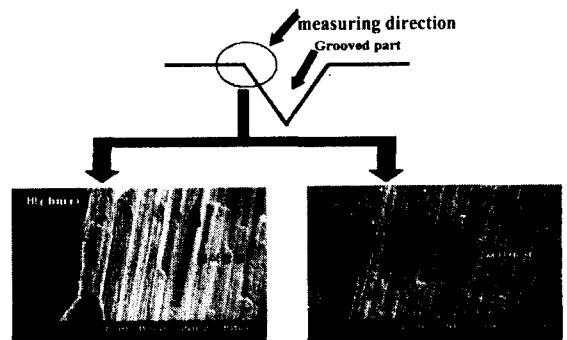


Fig. 5 Comparison of oxygen density



(a) without reacted layer (b) with reacted layer  
Fig. 6 SEM photographs of groove edge

### 3.3 경취성 재료(단결정 실리콘)의 C3M

경취성 비금속 재료에 대한 C3M 가공 예로서 반도체 및 MEMS 공정에서 흔히 사용되는 실리콘 웨이퍼에 적용하였다. Fig. 7은 실리콘 웨이퍼의 최상층에 수화막을 형성시키고, PCD 공구에 의한 가공이 진행되는 순서를 개념도를 나타내고 있다. 측정 결과를 살펴보면, 가공면과 비가공면의 경계면에서 볼 수 있는 치핑은 수화막을 생성시킨 후 가공한 경우, 형상이 깨끗하고, 가공 폭의 경우에서도 수화되지 않은 쪽이  $110\mu\text{m}$ 인 것에 비해, 수화된 쪽은  $55\mu\text{m}$ 으로 더 좁음을 알 수 있다. 광간섭 표면측정기에서 측정된 가공깊이를 비교해 보면 수화되지 않은 쪽은 가공된 최대단차가  $684\text{nm}$  인데 반해서 수화된 층을 가공한 쪽은 가공된 최대단차 폭이  $1.480\mu\text{m}$  정도로 2배이상 차이가 나는 것을 알 수 있다. 즉, 수화된 층의 가공이 더 효율적으로 이루어지는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 홈 가공에서의 가장 중요한 조건인 세장비(aspect ratio)의 측면에서 수화층을 만들어서 하는 가공법, 즉 C3M process가 유리하다는 사실을 알 수 있다. 향후과제로서 수화막인 t1의 두께를 측정하고, 가공깊이 t2를 제어하게 되면 더욱 정밀한 고품위의 가공이 될 것으로 기대된다.

Table 4 Experimental condition of Si wafer machining

machine	lapping machine
workpiece	6" Silicon wafer
chemical	KOH(pH 11)
buffer Chemical	Acetic acid
tool	PCD (R100 $\mu\text{m}$ )
load	150 N
rpm	30
measurement	optical microscope
	ACCURA

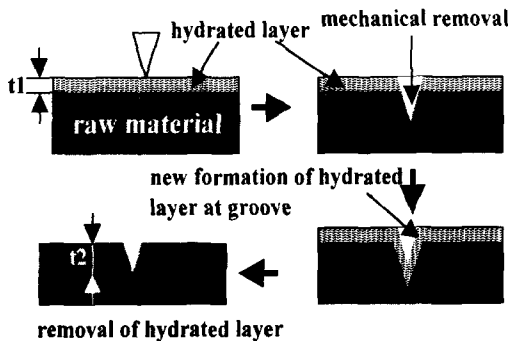


Fig. 7 C3M process flow in Si wafer

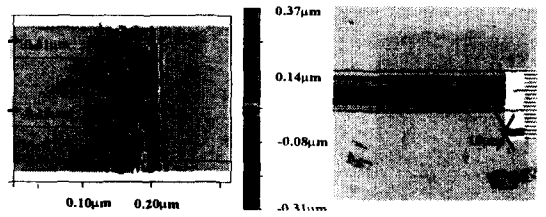


Fig. 8 Optical microscope under unhydrating condition for one pass

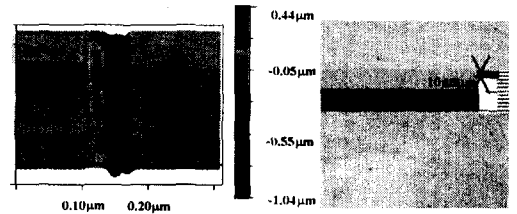


Fig. 9 Optical microscope under hydrating condition for one pass

### 4. 결론

제안한 화학 기계적 미세가공기술은 화학액으로 재료 표면에 등방적으로 화학변질층을 형성시키고, 이를 기계공구에 의해 이방적으로 제거하는 메카니즘을 가진다. 이러한 가공 메카니즘을 통하여 고능률, 고품위, 고정밀 가공이 가능하며, 공구의 내마멸성에도 뛰어난 특성을 보였다. 또한 화학 기계적 미세가공기술의 적용은 재료의 한계성을 극복하고, 복잡한 공정의 단순화 및 재현성에 있어 뛰어난 기술임을 경질재료의 다이아몬드 절삭(S45C), 연질재료(Al 5052) 및 경취성재료(Si)의 미세 홈가공의 실험결과로부터 증명되었으며, 향후 연구에서 화학 반응 생성층의 두께를 보다 정밀/정확하게 정량화하고, 반응 생성층과 기계공구의 정밀제어 시스템을 구축하여면 다양한 요구조건을 갖는 미세 구조물을 제작할 수 있으리라 생각한다.

### 참고문헌

- [1] 산업자원부, "Milli-Structure 생산기술개발(연구기획사업 최종보고서)", 1999. 6. 30
- [2] Y. Yamagata, T. Higuchi, "Three-Dimensional Micro Fabrication by Precision Cutting Technique", JSPE, Vol.61, No.10, pp.1361-1364, 1995
- [3] Craig R. Barrett, William D. Nix, Alan S. Tetelman, "The PRINCIPLES OF ENGINEERING MATERIALS"