

## 전기점성유체를 이용한 단결정 실리콘의 초정밀 연마에 관한 연구

이성재\*, 김욱배\*, 박성준#, 이상조\*\*

### A Study on the Ultraprecision Polishing of Single Crystal Silicon using Electrorheological Fluids

Sung-Jae Lee\*, Wook-Bae Kim\*, Sung-Jun Park#, Sang-Jo Lee\*\*

#### ABSTRACT

The Electro-Rheological (ER) fluid has been used to the ultraprecision polishing of single crystal silicon as new polishing slurry whose properties such as yield stress and particle structure changed with the application of an electric field. In this work, it is aimed to find the effective parameters in the ER fluid on material removal in the polishing system whose structure is similar to that of the simple hydrodynamic bearing. The generated pressure in the gap between a moving wall and a workpiece, as well as the electric field-induced stress of the mixture of ER fluid-abrasives, is evaluated experimentally, and their influence on the polishing of single crystal silicon is analyzed. Moreover, the behavior of abrasive and ER particles is described.

**Key Words** : ER fluid (Electrorheological fluid, 전기점성유체), Ultraprecision polishing (초정밀 연마), Yield stress (항복응력), Hydrodynamic pressure (유체동압), Surface roughness (표면거칠기)

#### 1. 서론

글래스 및 실리콘 기관의 경면연마를 위해 발달하기 시작한 초정밀 연마기술은 CMP와 같이 대규모 집적회로 생산에서 주된 프로세스로 정착되었으며 각종 광학, 통신 및 기계부품의 생산에도 매우 중요한 기술이 되었다. 최근에는 각 공정 혹은 최종제품에 요구되는 표면거칠기 수준이 매우 높아져 그 한계가 원자군의 크기에 상응하는 정도의 초평탄면에까지 이르렀을 뿐 아니라 일부

프로세스에서는 가공 후 존재하는 표면내부의 가공변질층까지 매우 중요하게 되어 이를 제거 또는 저감하기 위한 프로세스들이 개발되기도 하였다.

현재까지 보고된 초정밀 연마공정의 공통적인 재료제거에 관한 특징을 살펴보면 부스러기 생성을 동반한 스크래치, 표면원자 및 분자의 배열을 산란시키는 마찰 효과와 같은 기계적인 작용과 수화막 같은 반응 생성물의 피막생성과 가공액에 의한 용해 등으로 발생하는 화학적 작용을 언급할 수 있다<sup>1</sup>. 위와 같은 작용을 이용한 초정밀 연마

.. 2002년 12월 23일 접수  
\* 연세대학교 대학원  
# 교신저자, 연세대학교 NT 연구단  
Email : sjpark@yonsei.ac.kr, Tel : (02) 2123-5813  
\*\* 연세대학교 기계공학부

공정은 CMP를 비롯해 mechano-chemical polishing, P-MAC polishing(Progressive Mechanical and Chemical Polishing), EEM(Elastic Emission Machining)<sup>1</sup> 등으로 명명되기도 하였으나 근원적인 구현 원리에 있어서 큰 차이는 없다고 판단된다. 위에서 언급한 원리가 아닌 다른 연마공정으로는 ELID 연삭, Nano 연삭<sup>2</sup>과 같이 고정지립에 의한 방법을 비롯하여 전기영동연마<sup>3</sup>, 자성유체연마<sup>4</sup> 등의 기능성 유체(smart fluid)에 의한 방법도 개발 및 발표되었다.

상기의 공정들 중에서 가장 첨단화되고 활용도가 높고 중요한 기술로 인식되고 있는 것은 두 말할 나위 없이 CMP라고 할 수 있는데, 초정밀 연마기술로서 뿐만 아니라 차세대 대규모 집적회로 공정의 일부로 인식되어가고 있다. 따라서 많은 요소기술들이 덧붙여지고 복잡 다단해져 왔다. 즉 가공, 세정에 따른 슬러리, 패드, 컨디셔닝, 압력조절, 세정액, 브러시, 세정유닛, 건조, 폐액처리 등에 대한 철저한 관리가 필요하다. 그럼에도 불구하고 가공결함(damage, scratch), 오염들이 지속적으로 발생하고 있으며 광역평탄화, 복합재료의 균일 연마 및 요철면의 선택적 제거 등의 문제는 앞으로 개선시켜나가야 할 기술이다<sup>5</sup>.

현재의 CMP 기술을 대체할만한 공정을 개발하기가 매우 어렵지만, 기존 기술을 개량하고 새로운 원리의 초정밀 연마기술을 개발하기 위한 연구가 반드시 필요하다고 생각된다. 이는 CMP의 난점을 보완하여 역할을 분리해야 할 필요성 뿐만 아니라 신기술 개발을 통한 반도체 및 기타분야에서의 정밀 가공기술 확보 역시 필요하기 때문이다.

본 연구에서는 위와 같은 배경을 바탕으로 ER 유체(Electro-Rheological fluid)를 이용한 연마공정에 대하여 검토하였다. 이것은 전기장으로 유체의 점도를 증가시켜 가공량을 제어하려는 의도로 시작하였다. MR유체(Magneto-Rheological fluid)의 경우에는 강력한 점도 향상 효과로 인해 이미 초정밀 광학렌즈의 연마에 응용되고 있다<sup>6</sup>. 이러한 기능성 유체를 활용하면 접촉식 공구가 필요없는 가공 방식으로 인해 가공결함이 대폭 줄어드는 장점이 있다. ER유체의 경우 MR유체에 비해 점도상승효과가 낮은 것이 단점이긴 하나 이것은 오히려 낮은 재료제거단위의 관점에서 보면 오히려 장점이 될 수도 있다. 한편 ER유체를 활용한 평탄면 연구 결과가 일부 보고된 적이 있으나<sup>7-8</sup> 연마원리에 대한 충분한 고찰이 부족한 편이다.

본 연구에서는 새로운 기능성 연마 슬러리로 ER유체의 가능성을 파악하기 위하여 가공기구를 제안하고 주요한 공정 변수를 ER유체의 고유한 특징들을 중심으로 평가하였다. 즉 입자거동, 전단응력 및 유체압력에 대해 고찰하였다. 특히 ER유체는 전기장을 통하여 전단응력과 유체압력을 제어할 수 있으므로 이것은 초정밀 연마에 중요한 역할을 할 것으로 생각된다. 마지막으로 단결정 실리콘 웨이퍼 연마에 적용하여 가공 특성을 종합적으로 살펴보았다.

## 2. ER 유체

ER 유체는 절연 용액 내에 분산되어 있는 수 내지 수십 마이크론 크기의 고체입자로 구성된 서스펜션(suspension)이며 수 kV/mm 정도의 전기장을 가하면 겔보기점도(apparent viscosity)가 급속하게 증가하는데 이러한 특성은 전단변형 거동에서 Fig. 1의 형태로 나타낼 수 있다. 즉 인가된 전기장이 없을 경우는 Newtonian 거동을 하지만 전기장이 인가되면 일정항복응력 이상에서 유동이 발생하는 Bingham 소성거동을 한다. 대부분의 ER유체들이 이와 같이 Bingham 유체로 모델링 되며<sup>9</sup> 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

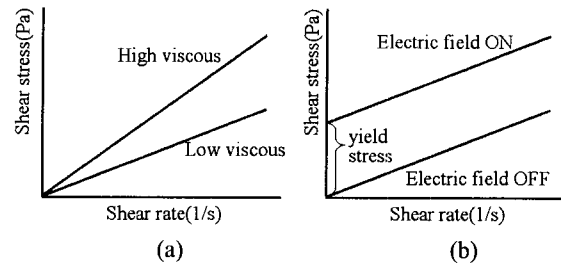


Fig. 1 Newtonian(a) and Bingham plastic behavior(b)

$$\tau_x(E, \dot{\gamma}) = \tau_y(E) + \eta_{pl} \dot{\gamma} \quad \text{for } \tau_x \geq \tau_y \quad (1)$$

$$\dot{\gamma} = 0 \quad \text{for } \tau_x < \tau_y$$

여기서  $\tau_x$  는 전단응력,  $\tau_y$  는 전기장의 크기( $E$ )에 따른 항복응력이며  $\dot{\gamma}$  는 전단율,  $\eta_{pl}$ 는 소성점도(plastic viscosity)이다.

이러한 거동이 발생하는 원인은 다음과 같다. 외부의 강한 전기장은 절연 용액내의 전기적으로 중성인 입자들을 분극(polarization)시켜 입자 내에

서 동일한 크기의 극성이 반대인 전하를 갖게 한다(단, 입자의 전도도 및 유전율이 용액의 그것들보다 커야한다). 따라서 입자들은 전기장의 방향으로 강력한 인력을 발생시켜 입자들이 두 전극 사이를 가로지르는 사슬구조(chain)를 형성하고 이러한 입자의 배열은 유체의 흐름에 저항하므로 거시적인 전단력의 증가를 보이게 된다.

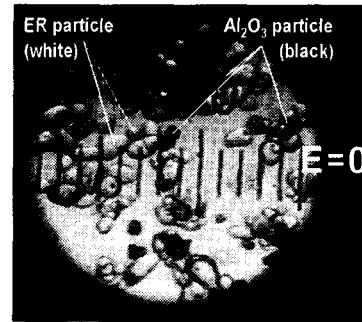
ER효과의 원인이 되는 분극 메커니즘은 매우 다양하지만 통상 입자의 계면분극(interfacial polarization)이 주된 요인이 되며<sup>9</sup> 입자가 적정 크기의 전도도와 유전율을 가질때 강력한 ER효과를 얻을 수 있다. ER유체의 제조방법은 매우 다양하므로 자세한 내용은 생략한다. 본 연구에서 사용한 ER유체는 표면 화학처리된 전분(starch) 입자를 실리콘오일(silicone oil)에 분산(disperse)시킨 유체이며 입자의 크기는 SEM 측정결과 평균 직경 10 $\mu$ m 정도로 추정되었다. 유체의 응력측정결과는 4장에서 제시한다.

주목할만한 사실은 ER입자의 거동과 그에 따른 연마입자의 거동이다. 위에서 언급한 바와 같이 전기장내에서 입자들은 분극되어 전기장 방향으로 인력이 작용하는데 ER입자들 뿐만 아니라 연마입자와 ER입자 사이에서도 같은 원리에 의해 인력이 작용하게 된다. 다만 특정입자가 분극할 때 그 정도의 강약에 따라 인력의 크고 작음이 지배된다. 이러한 사실은 연마제로 가장 많이 사용되는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>나 SiO<sub>2</sub>입자가 절연 용액 속에서 뚜렷한 ER효과를 보이는 데서 확인할 수 있으며<sup>9</sup> 이외에 Green SiC, diamond 등도 분극성을 띤다.

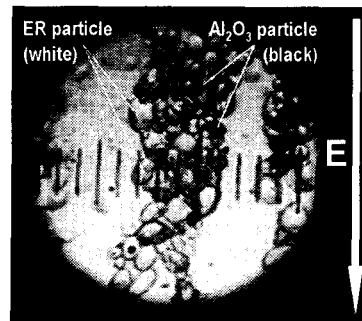
ER입자를 실리콘오일에 대해 5 wt% 로 분산한 ER유체에 연마입자(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, #2000)를 약 20wt% 섞은 혼합 슬러리에 전기장(약 2kV/mm)을 인가하였을 때 입자들의 거동을 현미경으로 촬영한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 설명한 바와 같이 전기장이 인가되지 않았을 때는 자유롭게 현탁되어 있는 입자들이 전기장이 인가되면 두터운 사슬구조를 형성하는 것을 볼 수 있으며 그 거동은 ER입자와 연마입자가 동일하다.

이와 같이 연마입자가 전기적인 효과에 의해 분극성이 강한 ER입자들과 결합되는 힘은 연마입자가 수력학적(hydrodynamic) 힘만 받고 있는 흐름 상태에 비해 보다 더 큰 힘을 가공물 표면에 전달할 것으로 판단할 수 있다.

### 3. 가공 구조



(a) Without electric field



(b) With electric field

Fig. 2 Microscopic behavior of ER & Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles dispersed in silicon oil with and without E-field

ER유체를 이용하여 표면 연마를 할 수 있는 가공구조는 여러 가지 형태로 설정할 수 있다. ER유체의 단순 전단흐름(simple shear flow)에 의한 방법은 시편과 다른 전극이 평행하게 간극을 유지한 상태에서 시편을 운동시켜야 하기 때문에 슬러리를 지속적으로 공급·순환해야 하는 단점이 있다. 또한 ER유체의 단순 전단응력만을 가공력으로 활용할 수 밖에 없다. 따라서 본 연구에서는 ER유체를 효율적으로 사용하고 ER효과에 의한 전단응력 이외의 유효효과에 의한 압력을 동반하여 생성하기 위해 Fig. 3과 같은 가공기구를 제안하였다. 즉 실린더 형태의 전극과 가공물 사이에 일정한 간극을 두고 스피ن들의 회전에 따라 유체가 간극 사이로 공급될 때 발생하는 유체동압(hydrodynamic pressure)을 연마공정에서 중요한자인 가공압력으로 활용하였다. 단, 이 때의 간극은 입자의 평균크기보다 크며 전단응력과 발생압력은 직간접적으로

평가할 수 있다. 이러한 연마 구조는 가공량을 전체표면에 있어서 동일하게 할 수 있는 부수적인 장점이 있다. 연마 장치의 구체적인 설명은 4.2절과 5.1절에서 제시한다.

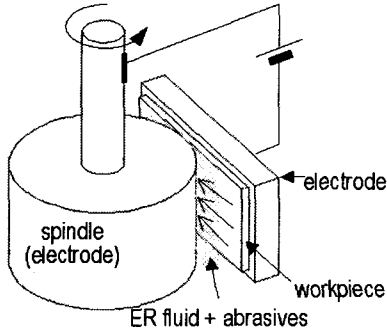
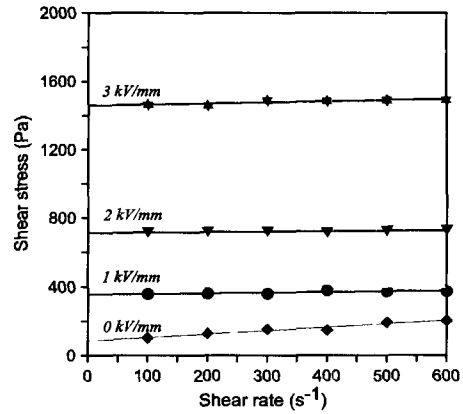


Fig. 3 Schematic of polishing structure using ER fluid

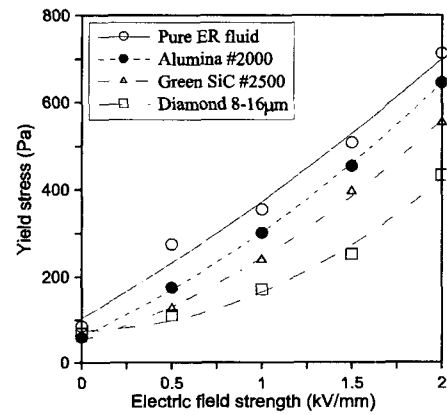
#### 4. 가공변수에 대한 고찰

##### 4.1 전단응력

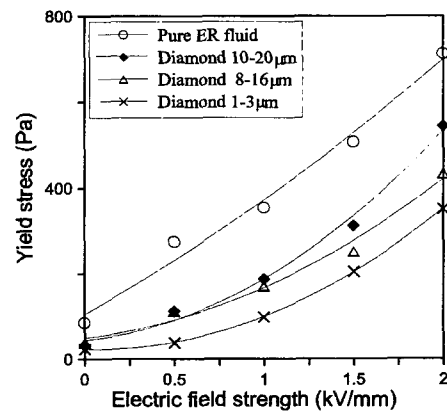
전단응력은 ER유체의 물성 중에 가장 고유한 특징이자 일반적인 성능지표이다. 따라서, 연마에 있어서도 중요한 변수가 될 수 있는데 그 이유는 유체와 고체 계면에서의 전단응력은 연마에서 가공물 표면에서의 마찰력과 동등하게 여겨지기 때문이다. 마찰력은 연마입자에 의해 abrasion이나 마이크로 스크래치를 발생시켜 가공을 일으킬 것으로 생각된다. 이러한 전단응력은 상기의 가공구조상에서는 측정이 어렵고, 보통 Couette 유동을 이용한 점도계에서 측정하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 내경이 29mm인 실린더와 중심이 27mm인 실린더가 삽입되는 구조의 동심원 원통형 점도계를 사용하였다. ER유체와 연마입자 ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ , diamond, Green SiC)의 혼합 슬러리의 전기적 상승 응력을 이전 연구에서 측정, 보고한 바 있는데<sup>[10]</sup>, 일반적으로 연마입자를 ER유체에 첨가하면 응력특성이 저감되며 그 정도는 연마입자의 종류와 크기, 첨가량에 따라 달라지게 된다. 그 요약된 측정결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)는 입자 대 오일의 혼합비가 30wt%인 순수 ER유체의 전단응력 특성으로서 비교적 Bingham 모델로 적절히 근사되며 전기장에 따른 항복응력의 증대가 뚜렷하다. Fig. 4(b)는 (a)에서 계산된 순수 ER유체의 항복응력과 ER유체에 대해 세가지



(a) Shear rate-stress relation of pure ER fluid



(b) Yield stress of pure ER fluid and its mixture with 3 kinds of abrasive (4 wt% for ER fluid)



(c) Yield stress of mixture of ER fluid & diamond particle with different size

Fig. 4 Electrically-induced stress characteristics of pure and abrasive-mixed ER fluid<sup>12</sup>

연마입자가 4wt%씩 첨가된 혼합 슬러리의 항복응력을 나타낸다. 첨가되는 입자의 크기가 상호 유사할 때, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자의 영향력이 가장 작고 diamond 입자에 의한 응력저감이 가장 크다. 한편 입자크기에 의한 영향을 파악하기 위하여 첨가 연마입자 중에서 ER효과의 저감이 가장 큰 diamond를 세가지 크기에 대하여 ER유체에 혼합하였을 때 항복응력 측정결과를 Fig. 4(c)에 제시하였다. 나타난 바와 같이 입자의 크기가 작을수록 혼합 슬러리의 전기적 항복응력 증가량이 줄어드는데 이것은 입자 분극성이 입자 크기에 비례하기 때문이다<sup>9,10</sup>.

## 4.2 압력

### 4.2.1 Bingham 유체 윤활이론

압력을 고려해야 하는 이유는 서론에서 짧게 언급한 바와 같이, ER유체를 사용할 때 전기장의 크기에 따라 윤활효과에 의한 생성압력이 변동되므로 이를 통해 가공량의 제어가 가능하기 때문이다. ER유체, 즉 Bingham 거동을 하는 유체의 윤활효과가 Newtonian 유체의 윤활효과와 다른 이유는 다음과 같다. 제한한 연마구조에 있어서 가공물과 스펀들 사이에는 Fig. 5와 같은 기하 형태를 가지게 된다. 만약 유체가 이상적인 Newtonian 거동을 한다면 간극에서 발생하는 압력장의 해석은 간단하고 전형적인 문제가 된다. 그러나, ER유체의 경우에는 앞서 언급한대로 Bingham 거동을 하므로

해석을 달리하여야 한다. 즉, 윤활이론의 기본식인

$$\frac{dP}{dx} = \frac{d\tau_x}{dy} \quad (2)$$

을 활용할 때, 식(2)의 우변이 식(1)과 같은 관계를 가지게 되는데 이 때 압력구배는 간극에서 전단응력의 변화에 의존한다. 항복응력의 존재는 압력 발달 구간( $dP/dx > 0$ )에서 특정한 경우, 즉 항복응력이 상당히 큰 유체에서 전단응력이 항복응력보다 미만인 ( $|\tau_x(y)| < \tau_y$ ) 경우에 식(1)에서와 같이 전단변형율이 0인 구간, 코어(core)가 발생하게 된다(Fig. 5의 속도계적 참조). 이러한 코어는 유체의 흐름구간을 감소시켜 유속을 빠르게 하고 결과적으로 압력을 증대시키는 것으로 보고되었다<sup>11</sup>. 이러한 Bingham 유체의 윤활에 대한 몇몇 연구를 참조할 때, 이것은 해석적으로나 수치적으로도 매우 복잡한 문제로 여겨진다. 또한 입자와 유체의 2상(phase) 서스펜션을 좁은 간극에서 이상적인 연속체로 가정할 수 있는가에 대한 문제를 고려해야 하는데 이점에 대해서도 충분히 논의되고 있지 않다. 이러한 문제점을 고려하여 Bingham 윤활에 따른 발생압력의 이론적 해석은 행하지 않았다. 대신에 가공부위, 즉 Fig. 5에서 가장 간극이 좁은 부분에서 압력을 측정하여 가공변수로 평가하고자 하였다.

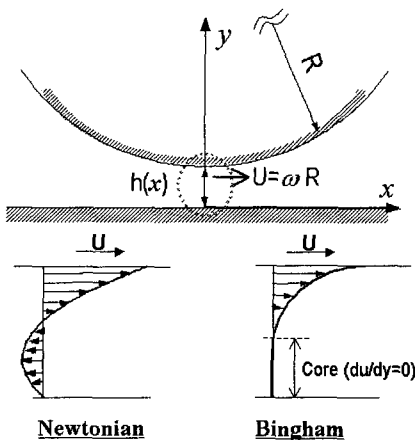


Fig. 5 Geometry of the gap between rotating spindle & workpiece, and possible velocity profile at  $dP > dx$  in Newtonian and Bingham fluids

### 4.2.2 실험방법 및 결과

측정구조와 장치의 사양을 Fig. 6과 Table 2에 제시하였다. 3축 수직형 머시닝센터를 이용하여 압력측정과 가공실험을 실시하였다. 측정에 있어서 유체의 누설(side leakage) 및 스펀들의 런아웃(run-out) 등을 능동적으로 고려하지 않아 발생 압력을

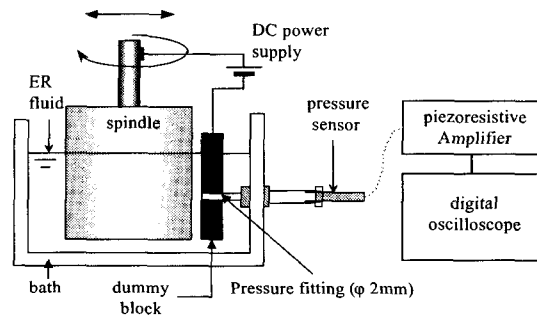


Fig. 6 Schematic of the pressure measurement apparatus

Table 2 Spec. of pressure measuring device & conditions

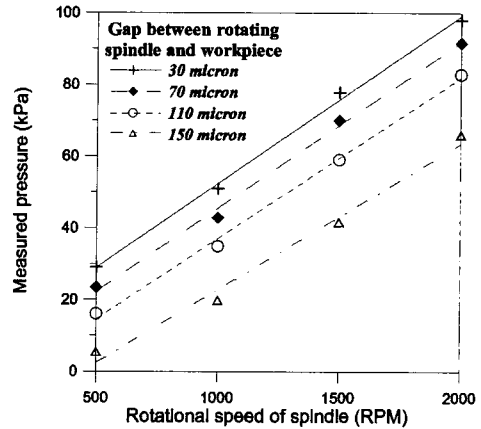
Pressure sensor	
type	piezoresistive
manufacturer / model	KISTLER / 4073A
range	0~20Mpa
Amplifier	
manufacturer / model	KISTLER / 4630B
input range	±0.1 ... 1 volt
Base machine	
Spindle	3-axis machining center
shape	cylinder
rotational speed	0~2000 rpm
material	brass
diameter	75mm
run-out	±5μm
Gap between spindle and workpiece	30~150 μm
Applied voltage	0~300 volt

정밀하게 측정하기에는 다소 무리가 있으나 측정 압력을 통해 연마성능에 미치는 영향을 파악하는 것은 가능할 것으로 생각된다.

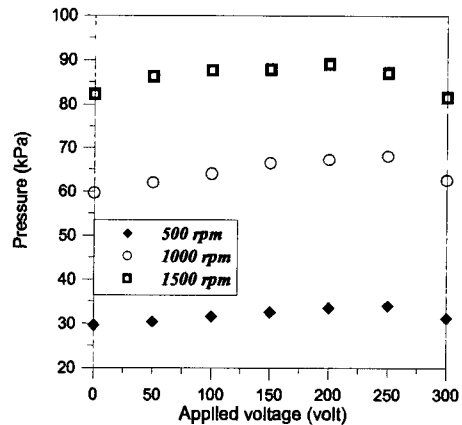
사용한 ER유체는 절대점도 0.05 Pa·sec의 실리 콘오일과 ER입자(밀도 0.63g/ml)가 40 wt%로 혼합된 ER유체를 사용하였고 연마재는 첨가하지 않았다.

인가 전기장, 스핀들의 회전속도 및 스핀들과 가공물간의 간극에 대한 압력 측정결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a)에 회전속도에 따른 발생압력을 간극에 따라 표시하였는데, 이 때의 인가전압은 200 volt이다. 회전속도의 증가에 따라 비교적 선형적인 압력증가가 발생하였으며 간극이 좁아짐에 따라 역시 압력이 상승하였다. 다만 간극이 30μm로 좁아지는 경우 압력상승폭이 다소 감소되었는데 이러한 현상은 간극이 입자직경 크기로 접근한 것이 주된 원인으로 생각된다. Fig. 7(b)는 간극을 30μm으로 고정하고 각 회전속도에서 인가전압을 달리하여 압력을 측정한 결과이다. 전압을 증대시킬수록 압력이 미세하게 증가하였다. 이는 앞 절에서 설명한 바와 같이 윤활효과에서 본 ER유체가 Bingham특성을 나타내는 것으로 생각할 수도 있으나 본 결과를 통해서 명확히 설명하기는 어렵다. 200~250 volt 구간에서 압력이 강하하는 이유는 전기장이 7~8kV/mm 이상으로 증가하여 ER유체의 절연파괴(dielectric breakdown)가 발생하였기 때문이다. 보통 절연파괴가 발생하면 입자들이 손상되므로 ER유체로서의 기능을 상실한다.

결국, Fig. 7의 결과를 통해서 예측한 바대로 전기장에 따라 ER유체의 윤활압력이 증가하였으나 압력의 증가량은 속도의 영향에 비해 매우 작음을 알 수 있다.



(a) Effect of the spindle rotating speed & gap thickness



(b) Effect of the applied voltage

Fig.7 Measured pressure in the gap

## 5. 연마 결과

### 5.1 실험방법

Fig. 3 과 Fig. 6과 같은 구조에 ER유체를 적용하여 단결정 실리콘 웨이퍼를 연마하고 그 결과를 통해 연마 슬러리로서 ER유체의 고유한 특징을 파악하고자 하였다. 가공장치는 압력측정을 할 때와 동일한 사양이다. 다만 피연마소재인 실리콘 웨이퍼를 진공압을 이용하여 고정하기 위해 압력

측정시 사용한 블록을 교체하고 튜브를 삽입하여 압축기에 연결하였다. Fig. 8에 장치를 촬영한 사진을 제시하였다.

ER유체는 입자 중량비 40 wt%로 하였으며 첨가연마재는 전단응력 저감량이 가장 낮은  $Al_2O_3$ 를 ER유체와의 혼합비 5 wt%로 첨가하여 사용하였다.

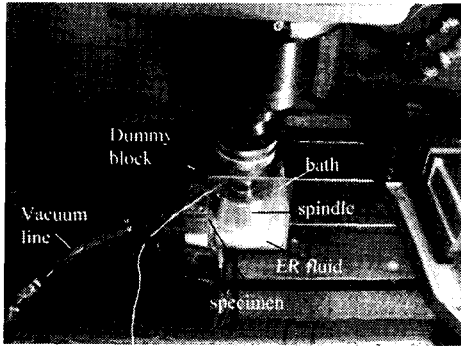


Fig. 8 Experimental setup for polishing tests

시편의 크기는 20×20mm 이며 웨이퍼는 SiC #1200 입자로 래핑(lapping)하여 초기의 표면거칠기가 약 Ra 0.2 $\mu$ m, Rmax 1.3 $\mu$ m를 유지하도록 하였다. 전체적인 실험조건들을 Table 3에 정리하였다.

Table 3 Experimental conditions for the polishing test

Workpiece size	single crystal silicon 20×20mm
surface	lapped with SiC#1200
ER fluid	
particle concentration	40wt%
base oil	silicone oil 50cSt
Abrasives	$Al_2O_3$ ( $\phi$ 0.3, 1 $\mu$ m)
concentration for ER fluid	5wt%
Rotational speed	~2000 rpm (~7.8m/sec)
Gap b.w. spindle & workpiece	30 $\mu$ m
Applied voltage	0~300 volt
Machining time	~10min
Feed length	5mm

일정한 조건하에서 시편을 연마한 후 표면거칠기의 변화량을 통해서 실험결과를 분석하였다. 측정은 촉침(stylus)방식의 표면거칠기 측정장치(surface profiler)를 이용하여 서로 다른 3군데의 표면을 측정하여 평균값을 구하였다.

## 5.2 결과

Fig. 9는 스피들 속도를 2000rpm, 간극 30 $\mu$ m으로 하고 연마재는 평균직경 1 $\mu$ m를 사용하여 8분간 연마했을 때의 각각의 표면거칠기의 개선 상황을 나타낸다. 평균 표면거칠기(Ra)의 저감 정도는 완만한 반면, 최대 표면거칠기(Rmax)는 뚜렷하다. 전기장의 세기를 증대 시킬수록 가공량이 많아지는 것을 유추할 수 있는데 이것은 앞장에서 언급한 바와 같이 ER유체의 전단응력이 재료제거에 지배적인 영향을 미친것으로 판단된다. 200 volt부근에서 표면거칠기는 더 이상 개선되지 않고 오히려 증가하는 경향을 보이는데 압력측정결과에서 나타난 바와 같이 ER유체의 절연파괴로 인해 전단응력이 크게 감소되었기 때문이라 판단할 수 있다.

Fig. 10에 인가전압을 0 및 200 volt로 하였을 때 스피들 회전속도에 따른 표면거칠기의 변동을 표시하였다. 스피들의 회전속도가 증가할 때 표면거칠기도 함께 줄어드는 것을 보아 회전속도 증가에 따른 압력 상승이 가공에 영향을 미친것으로 생각된다. 그러나 인가전압의 차이에 따라 거칠기 값의 저하는 뚜렷하게 차이가 난다. 이러한 결과를 통해 가공량에 미치는 영향이 압력보다는 항복응력이 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 9에 나타난 결과를 뒷받침하며, 실험조건에서 ER유체의 전단응력이 가공에 지배적인 영향을 끼쳤음을 알 수 있다.

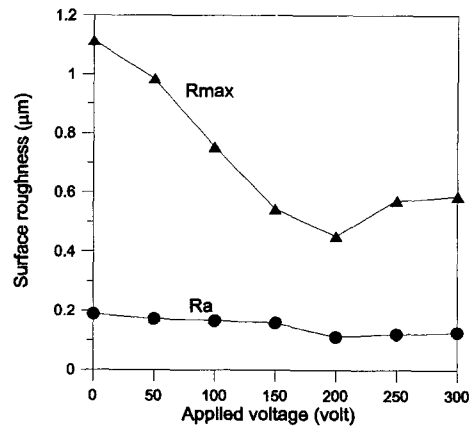


Fig. 9 Influence of applied voltage on surface roughness (2000rpm,  $Al_2O_3$   $\phi$ 1 $\mu$ m, gap 30 $\mu$ m, 8min)

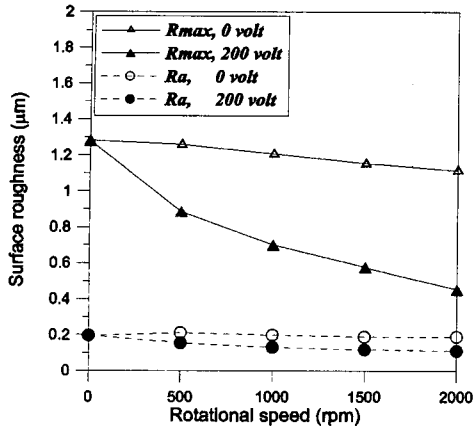


Fig. 10 Influence of rotating speed on surface roughness (200volt, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> φ1µm, gap 30µm, 8min)

Fig. 11은 가공 시간에 따른 표면거칠기의 변화를 나타내는데 Rmax값을 참조할 때 5분까지는 가공이 빠르게 진행되고 이후에는 다소 느려진다. 실험시에 실리콘 뿐만 아니라 스피들 역시 재료제거가 발생하여 ER유체가 변색되는 것을 관찰할 수 있었는데 ER유체에 불순물이 침입함에 따라 ER유체의 성능이 다소 저하되었을 것으로 추정된다.

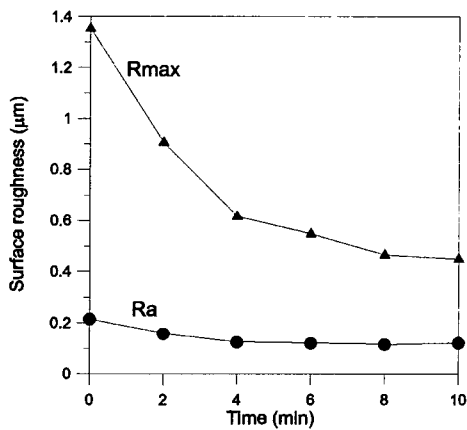
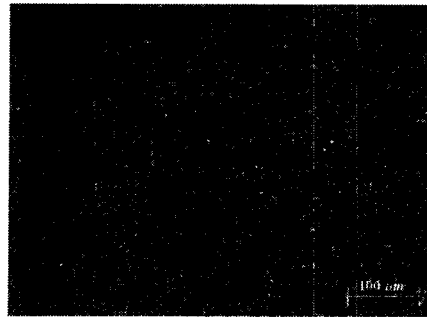


Fig. 11 Surface roughness with machining time (200volt, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> φ1µm, gap 30µm)

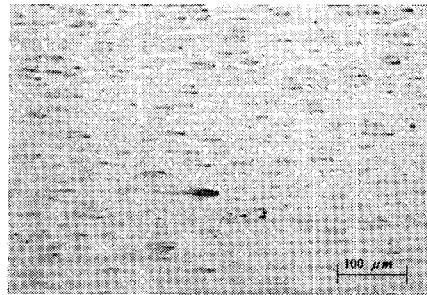
이외에 연마재의 첨가량을 변경하여 실험을 실시한 결과 4~8wt%의 범위에서 그다지 큰 차이가 보이지 않았다. 또한 연마입자를 SiC, Diamond로 변경하여 실험하였는데 표면거칠기의 변동 경향은 유사한 것으로 판단되어 제시를 생략하였다.

다만 언급한 바와 제시한 결과들을 통해서 ER유체의 성능이 가공 성능과 직결됨을 추정할 수 있었다.

가공 전후의 표면을 현미경으로 200배 확대하여 촬영한 결과를 Fig. 12에 제시하였다. Fig. 12(a)는 초기 표면이며 Fig. 12(b)는 Fig. 11의 실험조건과 동일하게 하여 5분간 연마한 실리콘 표면의 사진이다. 가시적으로 경면에 도달하지는 못하였으나 상당히 개선된 것을 알 수 있다. 수평방향으로 가공흔적이 보이며 1개의 단결정 규모의 요철면이 제거되지 않았음을 파악할 수 있다.



(a) Initial silicon surface (lapped with SiC #1200)



(b) Surface after polishing with ER fluid & Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> φ1µm

Fig. 12 Photograph of surface before and after polishing

가장 우수한 표면을 얻을 수 있었던 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> φ0.3µm를 ER유체에 분산(5wt%)시켜 연마한 결과를 보다 자세하게 관찰하기 위해 AFM(Atomic Force Microscope)으로 측정하여 Fig. 13에 나타내었다. 연마조건은 Fig. 11과 동일하며 가공시간은 10분이다. 표면이 상당히 유연하게 개선되었음을 확인할 수 있다. 다만 Fig. 12에서와 같이 결정 규모의 미세한 요철이 여전히 제거되지 않아 파상도(waviness)가 그대로 잔존하는 것을 볼 수 있는데



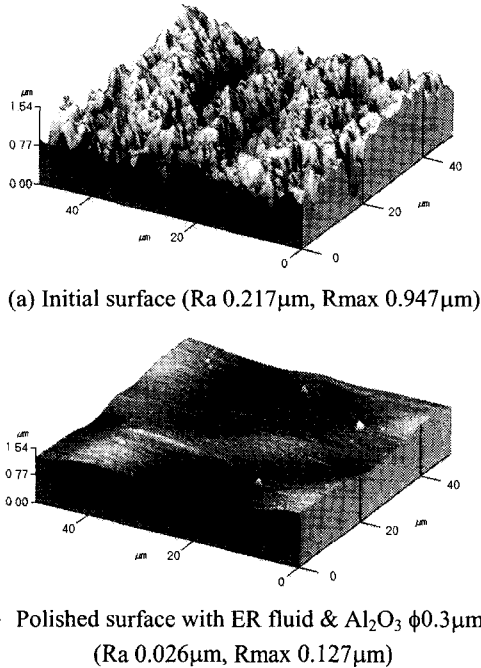


Fig. 13 AFM image of surface before and after polishing

이는 ER유체에 의한 전반적인 가공력이 다소 부족하기 때문으로 생각된다. 따라서 현재의 ER유체의 성능 수준으로는 보다 세밀한 가공량이 필요한 연마에서 적합할 수 있겠으나 초정밀 연마기술로서 활용되기 위해서는 ER유체의 항복응력의 증대 성능이 보다 우수해야 할 것이다.

## 6. 결론

본 연구에서는 전기장으로 유체의 물성을 제어할 수 있는 ER 유체를 초정밀 연마공정에 적용하고자 할 때, 공정상의 주요한 변수를 파악하고 연마 메커니즘을 분석하여 ER 유체의 효용성을 검토 하였다. 우선 ER 유체와 연마입자의 혼합 슬러리 내에서 입자들의 거동에 대해 설명하였다. 또한 ER 유체를 사용할 때 적합한 연마기구를 제안 하였고 이 때 주요한 특성이 되는 전단응력과 발생 압력이 재료제거에 어떤 역할을 하는지 파악 하하였다. 이러한 과정을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. ER유체를 초정밀 연마에 적용할 경우 전기장의 세기를 이용하여 가공력을 제어할 수 있

다. 그 이유는 ER유체에서 전기장의 크기에 따라 증대하는 항복응력이 가공물 표면에서 마찰력으로 작용하기 때문이다. 이러한 결과는 전기장의 세기에 비례하여 표면거칠기가 개선되는 결과를 통해 알 수 있다.

2. 전기장을 통한 가공력의 제어에서 유막에서의 압력은 전단응력에 비해 가공에 미치는 영향이 작았는데 이는 전기장에 따라 압력 상승의 폭이 매우 작고, 또한 생성압력이 연마입자를 통해 표면에 전달될 수 있는 구간이 매우 좁아 실질적인 가공압력으로서 효과적으로 활용되지 못하였기 때문이다.
3. ER유체와 연마입자를 혼합하여 전기장이 인가된 경우 입자거동을 촬영한 결과 입자들간의 상호 인력으로 인해 두 입자가 전극 사이에서 서로 사슬구조를 형성하였다. 이러한 입자거동을 관찰함으로써 연마입자에 가해지는 힘이 외부 전기장에 따라 증대되어 표면 연마에 작용할 것임을 예측할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단의 2001 특정기초연구(R01-2001-000-00391-0)로부터 지원되었습니다.

## 참고문헌

1. Komanduri, R., et.al., "Technological advances in fine abrasive processes," Annals of CIRP, Vol. 46(2), pp. 545-596, 1997.
2. Hans, H., et.al., "Nanogrinding," Precision Engineering, Vol. 21, pp. 134-139, 1997.
3. Suzuki, J., et.al., "Electrophoresis-Polishing with A Partial Electrode Tool," 2<sup>nd</sup> Conf Advance in Abrasive Technology, pp. 48-52, 1997.
4. Tani, Y., et.al., "Development of high efficiency finishing process using magnetic fluid," Annals of CIRP, Vol. 33(1), pp. 217-220, 1984.
5. 이충훈, 송형수, 명중재, 박진구, 반도체 평탄화 CMP 기술, pp. 1-23, 2001.
6. Kordonski, W. I., Jacobs, S. D., "Mangetorheological Finishing," 5<sup>th</sup> Int. Conf. ER and MR, pp. 1-12, 1995.
7. Akagami, Y., et.al., "Development of Fine Finishing Process using Diamond Particle Dispersion Type

- Functional Fluid” J. of JSME(C), Vol. 66, No. 649, pp. 3168-3173, 2000.
8. Lee, J. J., et.al., “Micro-Polishing of Complex and Flat Parts using ER Fluid” 4<sup>nd</sup> Conf. Advance in Abrasive Technology, pp. 319-323, 2001.
  9. Parthasarathy, M., Klingenberg, D., “Electrorheology : Mechanisms and Models,” Mat. Sci. Eng. R, Vol. 17, pp. 57-103, 1996.
  10. Kim, W. B., et.al., “Ultraprecision Polishing Technique for Micro 3 Dimensional Structure using ER Fluids,” submitted to J. of the KSPE, 2002.
  11. Tichy, J. A., “Bingham Fluid Lubrication Studies,” J. Rheology, Vol. 35, No. 4, pp. 477-496, 1991.