

## 탄성방출가공법에 의한 경취재료의 경면 폴리싱에 관한 연구 (A Study on Mirror-like Polishing of Brittle Material by Elastic Emission Machining)

남성호\*, 김정두\*\*

\*: 한국과학기술원 기계공학과 대학원, \*\*: 정희원, 한국과학기술원 기계공학과

### ABSTRACT

The small material removal rate of elastic emission machining (EEM) becomes a serious problem due to using fine powder particles for obtaining finished surfaces of high quality. If a cylindrical polyurethane-wheel is used as a tool for accelerating powder particles, the efficiency of machining may be increased through enlarging the machining region and increasing the surface velocity of the wheel. If these analytical results are compared with experimental ones, characteristics of EEM using polyurethane-wheel can be clarified.

In this study, effects of EEM using cylindrical polyurethane-wheel on the surface roughness and the material removal rate were verified through polishing of the brittle material under various conditions. The high-efficient polishing of silicon wafer has been also carried out using this method.

### 1. 서 론

반도체 부품의 집적회로(integrated circuit)의 제조하는 데에 전자 빔이나 X선과 같은 석판기술들이 적용되고 있다. 이러한 장치의 제작에 사용되는 실리콘 웨이퍼를 결함이 없이 높은 정밀도를 가지도록 가공하기 위한 다들질 가공법이 요구되고 있다. 보통, 실리콘 웨이퍼의 폴리싱에는 연마재와 부직포(unwoven sheet polisher)가 사용된다. 이러한 가공법은 가공물과 폴리셔 사이의 상호 문지름(rubbing)에 의한 기계화학적 작용에 의해 가공이 진행된다. 이러한 폴리싱 기법은 가공물과 폴리셔가 접촉하는 동안 마찰열의 발생이나 폴리셔의 마모 등의 문제를 가지고 있다. 마찰열이 발생하면 화학적 작용이 우세하게 되어 표면거칠기가 악화되고, 폴리셔 평판(polisher plate)의 열변형으로 인하여 편평도가 떨어지게 된다. 또한, 폴리셔의 마모는 폴리싱 특성을 불안정하게 한다.<sup>[1-3]</sup> Mori가 제안한 탄성방출가공법(EEM, elastic emission machining)을 이용하면 이러한 소성변형으로 인한 표면의 손상을 수반하지 않는 가공이 가능하다.<sup>[4]</sup> 미세분말입자를 공작물 표면에 충돌시켜 가공재료 내에 존재하는 결함들 사이에서 미소한 탄성파괴(elastic fracture)를 일으킴으로써 손상이 없는 원자 단위의 가공이 가능하다. 탄성방출가공은 초정밀 폴리싱 경면가공의 범주로 구분이 되며, 통상적으로 편평도 0.1 $\mu\text{m}$ , 표면거칠기 0.01 $\mu\text{m}$ 의 표면과 수 nm 정도의 가공변질층을 얻을 수 있다. 그러나, 기존의 탄성방출가공법은 제한된 가공영역으로 인하여 가공

능률이 매우 작다는 단점을 가지고 있다. 따라서, 가공재료의 표면에 결함을 유발하지 않으면서도 가공능률을 향상시킬 수 있는 가공법의 필요성이 대두되었다.

본 연구에서는 탄성방출가공법에 의한 경취재료의 고능률 경면 폴리싱을 달성하기 위하여 원통형 폴리우레탄휠을 이용한 가공장치를 설계하였다. 탄성방출가공에서 분말입자를 가속시키기 위한 장치로 구형의 폴리우레탄구(polyurethane ball)를 사용하면 미소영역에 가공이 집중되므로 수치제어 기법을 도입하여 임의의 형상을 가공할 수 있다는 장점이 있지만, 가공영역의 제한으로 인하여 그 만큼 가공시간이 증가하게 된다. 그러나, 폴리우레탄휠을 사용하게 되면 휠의 폭 만큼의 넓은 영역을 한꺼번에 가공할 수 있고, 휠의 회전주속도를 크게 할 수 있어서 고능률의 탄성방출가공이 가능하며, 기존의 탄성방출가공장치에 비하여 비교적 쉽게 가공장치를 구성할 수 있다. 원통형 폴리우레탄휠을 이용한 탄성방출가공의 중요가공변수로는 휠과 공작물의 간극거리(gap distance), 공작물의 이송속도(feed rate), 분말입자의 크기, 분말입자와 공작물의 재질, 휠의 형상과 회전주속도 등이다. 이러한 각각의 가공조건에 따른 실리콘 웨이퍼의 가공실험을 통하여 경면가공을 위한 최적의 가공조건을 도출하고, 각각의 가공조건이 재료제거율과 표면거칠기에 미치는 영향을 알아보았다. 또한, 실리콘웨이퍼를 가공하여 표면의 손상이 없이 탄성방출가공의 가공능률을 향상시켰다.

## 2. 실험장치 및 구성

원자 단위의 탄성파괴를 일으키기 위해서는 휠과 공작물 사이에 유체윤활 상태를 이용하여 미세분말입자를 가속시킬 수 있는 가공장치가 요구된다. 이때 간극거리(유막두께)를 분말입자의 지름보다 크게 유지시켜 공작물 표면에 공구 마크나 스크래치 등의 손상이 생기지 않도록 주의하여야 한다.

Fig.1은 원통형 폴리우레탄휠을 이용한 탄성 방출가공장치를 도식적으로 나타낸 것이다. 폴리우레탄휠을 이용하여 휠의 폭만큼의 넓은 영역이 한꺼번에 가공되므로 기존의 폴리우레탄구를 이용한 경우보다 고능률 가공이 가능함을 알 수 있다. 이 장치는 폴리우레탄휠, 가공액으로 채워진 용기, 공압실린더(air cylinder), 공유변환기(air-hydro converter), 슬라이딩 베이스(sliding base), 슬라이딩 가이드(sliding guide), 공압제어 밸브(air control valve) 등으로 구성되어 있다.

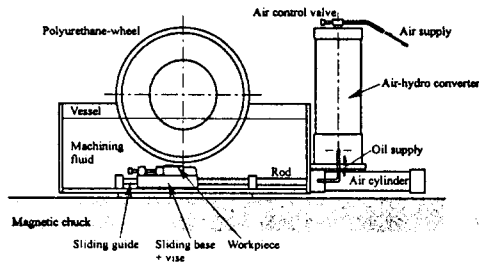


Fig.1 Schematic diagram of EEM apparatus

가공장치는 자체이송장치를 내장하고 있어 가공액을 교환시키지 않으면서도 공작물의 안정된 저속 이송이 가능하다. 공압실린더의 양방향 운동이 로드와 의하여 슬라이딩 베이스에 전달되고, 공작물을 지지해주는 바이스가 장착된 슬라이딩 베이스가 슬라이딩 가이드의 안내를 받아 공작물을 이송시켜 준다. 또한, 공유변환기에 의하여 공압을 유압으로 변환한 후 유압을 공압실린더에 공급하는 방식을 사용함으로써 더욱 안정된 이송이 가능하였다.

알루미늄 분말입자가 혼합된 가공액이 채워진 용기 내에서 공작물의 이송이 원활히 이루어져야 하므로 슬라이딩 베이스와 슬라이딩 가

이드가 미끄러지는 마찰면 사이의 틈새에 분말입자와 가공액이 침투하지 않도록 틈새의 양끝을 실링하였다. 또한, 마찰면에 홈을 내어 윤활제를 저장해 놓음으로서 가공액 내에서도 원활한 윤활상태가 유지되도록 하였다.

이송속도의 조절은 공압제어 밸브를 이용하여 공유변환기에 공급되는 공압을 조절함으로써 가능하다. 스트로크의 조절을 위하여 공압실린더에 부착된 리미트 스위치를 사용함으로써 조절이 가능하다. 테스트 결과 10 ~ 1000mm/min의 이송속도 조절이 용이하였고, 슬라이딩 베이스가 진동 없이 원활하게 이송되었다.

폴리우레탄휠은 주위가 폴리우레탄으로 코팅된 알루미늄 재질의 휠로 만들어져 있다. 폴리우레탄은 탄성과 인성이 모두 우수하므로, 공작물을 긁는 현상 없이 가공액에 안정된 층류를 형성하여 분말입자가 정상적으로 공작물에 충돌하도록 해 준다. 초정밀 연삭기의 수직 이송장치를 이용하여 휠과 공작물 간의 간극거리(gap distance)를 0.5 $\mu$ m의 분해능으로 조절하는 것이 가능하다.

공작물로는 실리콘 웨이퍼가 사용되었다. 본 실험에서는 직경 0.25, 1 $\mu$ m의 알루미늄( $Al_2O_3$ ) 분말입자가 사용되었는데, 가공액 중에 현탁되어 있고, 수용성 연삭유제 3종을 혼합하였다. 가공액 내 분말입자의 중량농도는 10%로 선정하였다. 폴리우레탄휠의 회전주속도는 32m/s로 고정되어 있다. 또한, 휠과 공작물의 간극거리는 -10 ~ 10 $\mu$ m 범위 내로 하였고, 공작물의 이송속도는 30 ~ 150 mm/min으로 하였다.

휠과 공작물의 간극거리, 분말입자의 크기, 공작물의 이송속도 등의 각각의 가공조건이 표면거칠기와 재료제거율에 미치는 영향을 관찰하기 위한 실험을 수행하였다. 표면거칠기는 접촉식 표면거칠기 측정기(stylus type, Rank Taylor Hobson)로 측정하였고, 재료제거량은 전자저울(Ohaus, TP200)을 이용하여 측정하였다. Table 1은 본 실험에 사용된 실험조건 및 측정장비를 정리한 것이다.

Table 1 Experimental conditions and measuring devices

Powder particle	alumina ( $Al_2O_3$ ), diameter : 1/0.25 $\mu m$
Machining fluid	Water + powder particles + grinding fluid
Polyurethane-wheel	Aluminum coated with polyurethane Diameter : 180 mm Width : 30 mm Surface velocity : 32 m/s
Workpiece	Silicon wafer
Surface roughness tester	Stylus type, Rank Taylor Hobson
Weighing machine	Ohaus, TP200

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 탄성방출가공에 의한 표면성상

Fig.2는 본 실험에서 사용된 알루미늄( $Al_2O_3$ ) 분말입자를 나타낸다. 그림의 흰색으로 나타나 있는 덩어리가 분말입자를 나타내며, 어두운 부분이 가공액을 나타낸다.

Fig.3은 가공전의 실리콘 웨이퍼의 표면을 나타낸 사진이다. 표면에 크기가 약 1~5 $\mu m$ 의 결함들(defects)이 존재한다. 전가공면의 표면거칠기는  $R_a$ 가 0.15 $\mu m$ ,  $R_{max}$ 가 1.37 $\mu m$ 이다.

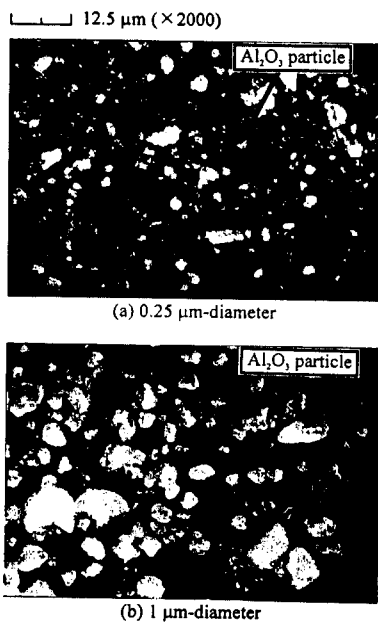


Fig.2 Photograph of  $Al_2O_3$  powder particle by microscope

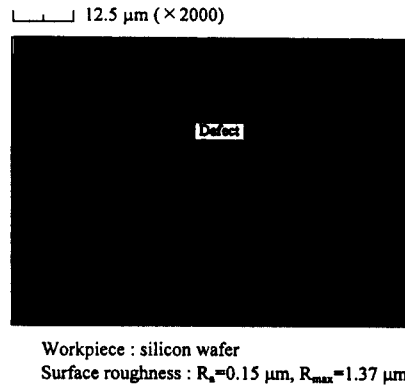


Fig.3 Surface of silicon wafer before machining

Fig.4는 직경 1 $\mu m$ 의 알루미늄 분말입자를 사용했을 경우, 가공 후의 표면성상을 관찰하기 위한 사진이다. 간극거리가 10 $\mu m$ 일 때는 가공이 거의 일어나지 않은 반면, 7 $\mu m$  이하로 했을 때 가공이 일어났음을 알 수 있다. 간극거리를 0으로 했을 경우에는 표면에 공구 마크와 스크래치가 발생하였음을 알 수 있다. 간극거리들 0으로 하였다 것은 휠과 공작물의 접촉시켜 가공했음을 의미한다. 이 경우 폴리우레탄휠과 공작물 사이에 입자가 끼어서 공작물 표면을 긁는 현상이 발생하여, 공작물의 표면에 휠의 회전방향으로 공구 마크와 스크래치가 발생하였다. 툴 마크가 발생한 것으로 보아 폴리우레탄휠의 표면형상이 그대로 공작물 표면에 반영되는 것으로 사료된다. 유체베어링적으로 볼 때 폴리우레탄이 탄성변형하여 미크론(micron) 단위의 간극이 생기지만<sup>[5]</sup>, 스핀들의 진동과 휠의 형상오차로 인하여 알루미늄 입자가 휠과 공작물 사이에서 눌러서 가공되는 것으로 사료된다.

간극거리를 5 $\mu m$ 로 하였을 경우에는 분말입자가 안정적으로 공작물 표면에 충돌하여 탄성파괴에 의한 가공이 진행되어 표면손상이 거의 일어나지 않음을 볼 수 있다. 간극거리가 7 $\mu m$ 인 경우에는 가공전 표면에 존재하던 결함들이 완전히 제거되지 않았음을 알 수 있는데, 이것은 재료제거량이 간극거리 5 $\mu m$ 의 경우에 비하여 재료제거율이 크게 감소하였기 때문으로 사료된다. 그러나, 간극거리가 10 $\mu m$ 인 경우에는 가공이 거의 일어나지 않았다.

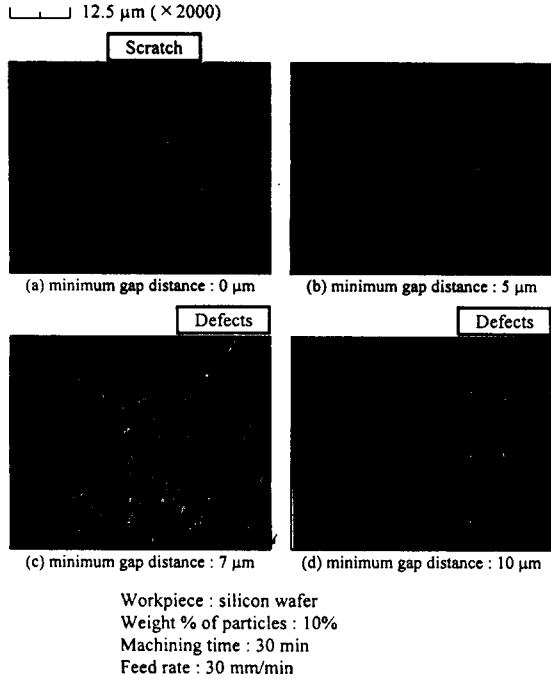


Fig.4 Photographs of machined surface  
(1  $\mu\text{m}$ -diameter particle)

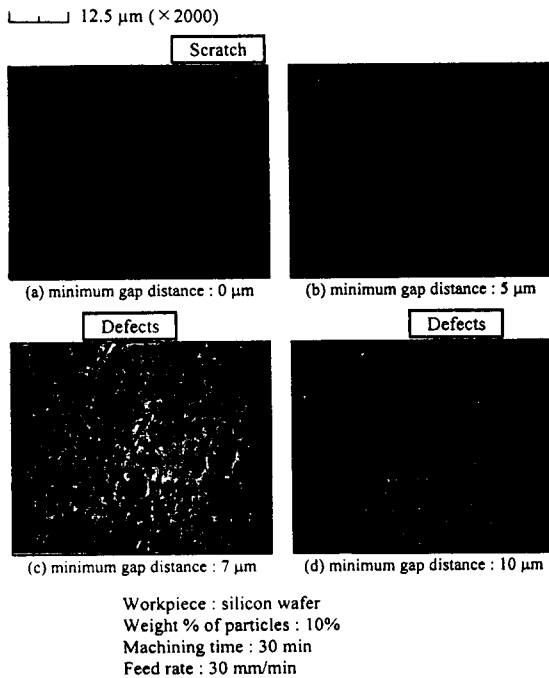


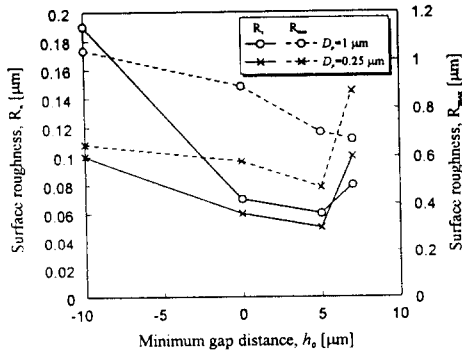
Fig.5 Photographs of machined surface  
(0.25  $\mu\text{m}$ -diameter particle)

Fig.5는 직경 0.25 $\mu\text{m}$ 의 알루미나 분말입자를 사용했을 경우의 표면성상을 관찰한 것이다. 1 $\mu\text{m}$  입자를 사용한 경우와 같은 경향을 나타내지만, 간극거리가 0인 경우에 표면손상의 정도가 감소하였다. 간극거리가 5 $\mu\text{m}$ 일 경우에 알루미나 분말입자에 의한 가공흔적이 거의 나타나지 않고, 탄성파괴에 의한 가공이 진행되었음을 알 수 있다.

### 3.2 재료제거율 및 표면거칠기에 대한 가공조건의 영향

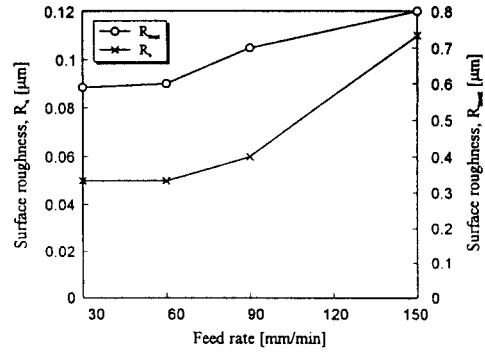
Fig.6은 간극거리에 따른 표면거칠기의 변화를 분말입자의 크기별로 나타낸 것으로서, 간극거리가 감소할수록 표면거칠기가 향상됨을 알 수 있다. 간극거리가 (-)와 0일 경우에는 표면에 스크래치와 공구 마크 등의 표면손상이 발생하여 표면거칠기가 악화되었다. 간극거리가 5 $\mu\text{m}$ 인 경우의 표면거칠기가 가장 양호한 것으로 나타났으며, 간극거리가 7 $\mu\text{m}$ 인 경우에는 재료제거율의 감소로 가공전 표면에 존재하던 결함들이 잔류해 있기 때문에 표면거칠기가 악화되었다. 간극거리가 10 $\mu\text{m}$  이상일 경우에는 가공이 거의 일어나지 않으므로 가공전의 표면거칠기가 그대로 유지된다. 또한, 0.25 $\mu\text{m}$ 의 미세한 알루미나 분말입자를 이용한 경우에 표면의 질이 향상되었다. 30분 동안 가공한 결과 직경 0.25 $\mu\text{m}$ 의 분말입자를 사용했을 경우,  $R_a$  0.05 $\mu\text{m}$ ,  $R_{max}$  0.47 $\mu\text{m}$ 로서 가장 양호한 결과를 나타냈다.

Fig.7은 간극거리에 따른 재료제거율의 변화를 분말입자의 크기별로 나타낸 것으로서, 간극거리가 감소할수록 재료제거율의 크기가 증가하는 경향을 나타냈다. 간극거리가 7 $\mu\text{m}$ 일 경우에는 재료제거율이 크가 감소되었다. 간극거리가 10 $\mu\text{m}$ 보다 커지면 재료제거율이 거의 0이 되는데, 탄성방출가공 해석에서 간극거리가 10 $\mu\text{m}$  이하일 때 가공이 가능해진다는 결과와 부합됨을 알 수 있다. 또한, 직경 0.25 $\mu\text{m}$ 의 미세한 알루미나 분말입자를 사용했을 경우에는 표면거칠기는 향상되는 반면, 재료제거율이 감소되었음을 알 수 있다.



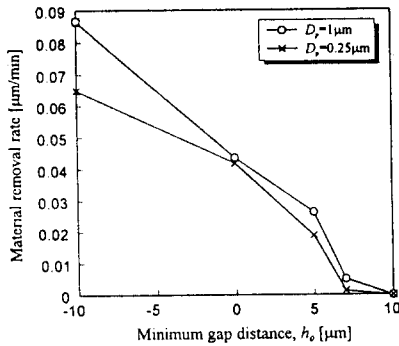
Workpiece : silicon wafer  
 Powder particle : alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )  
 Weight % of particles : 10 %  
 Surface velocity of wheel : 32 m/s  
 Machining time : 30 min  
 Feed rate : 30 mm/min

Fig.6 Relationship between gap distance and surface roughness



Workpiece : silicon wafer  
 Powder particle : alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), 1  $\mu\text{m}$ -diameter  
 Weight % of particles : 10 %  
 Surface velocity of wheel : 32 m/s  
 Machining time : 30 min  
 Minimum gap distance : 5  $\mu\text{m}$

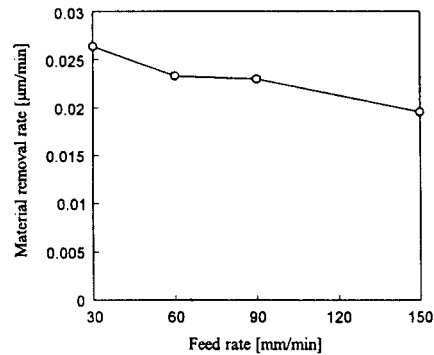
Fig.8 Relationship between feed rate and surface roughness



Workpiece : silicon wafer  
 Powder particle : alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )  
 Weight % of particles : 10 %  
 Surface velocity of wheel : 32 m/s  
 Machining time : 30 min  
 Feed rate : 30 mm/min

Fig.7 Relationship between gap distance and material removal rate

Fig.9는 공작물의 이송속도에 따른 재료제거율의 변화를 나타낸 것으로서 이송속도가 커짐에 따라 재료제거율이 감소하였다. 이송속도에 따른 실험결과로부터 원통형 폴리우레탄휠을 이용한 탄성방출가공에서 표면거칠기와 재료제거율을 모두 향상시키기 위해서는 저속의 안정된 이송이 요구됨을 알 수 있다.



Workpiece : silicon wafer  
 Powder particle : alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), 1  $\mu\text{m}$ -diameter  
 Weight % of particles : 10 %  
 Surface velocity of wheel : 32 m/s  
 Machining time : 30 min  
 Minimum gap distance : 5  $\mu\text{m}$

Fig.9 Relationship between feed rate and material removal rate

Fig.8은 공작물의 이송속도에 따른 표면거칠기의 변화를 나타낸다. 이송속도가 증가할수록 표면거칠기가 악화되었다.

이상의 결과에서 휠과 공작물이 접촉하지 않는 범위 내에서 간극거리를 약  $5\mu\text{m}$ 로 했을 때 탄성파괴에 의한 가공이 가능하고, 표면거칠기가 향상됨을 알 수 있다. 또한, 표면거칠기를 더욱 향상시키기 위해서는 미세한 분말입자를 사용해야 함을 알 수 있다.

### 3.3 실리콘 웨이퍼의 경면 폴리싱 가공

위에서 선정된 최적의 가공조건으로 실리콘 웨이퍼를 정밀 다듬질 가공하였다. 직경  $0.25\mu\text{m}$ 의 미세한 알루미나 분말입자, 간극거리  $5\mu\text{m}$ , 이송속도  $30\text{mm/min}$ 의 가공조건으로 실리콘 웨이퍼를 다듬질 가공하였다. 가공시간은 1시간으로 하였다. Fig.10은 실리콘 웨이퍼를 정밀 다듬질 가공하여 가공 전의 것과 비교한 결과이다. 가공 후의 반사도와 표면거칠기가 가공 전에 비하여 개선되었음을 알 수 있다.  $R_a$   $0.05\mu\text{m}$ ,  $R_{\text{max}}$   $0.41\mu\text{m}$ 의 결과를 얻었다.

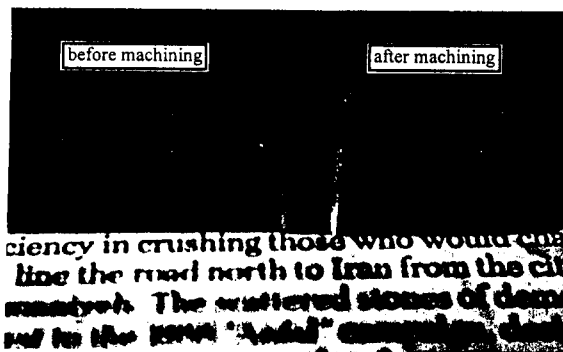


Fig.10 External view of silicon wafer polished by EEM using polyurethane-wheel

## 4. 결 론

탄성방출가공법에 의한 실리콘 웨이퍼 경취 재료의 경면 폴리싱을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 원통형 폴리우레탄휠을 이용하여 기존의 폴리우레탄구에 의한 탄성방출가공보다 가공 영역이 증가되어 가공능률을 향상시켰다.
- (2) 휠과 공작물의 간극거리를 작게 할수록 재료제거율이 증가하였다.
- (3) 폴리우레탄휠을 이용한 탄성방출가공의 간극거리가  $5\mu\text{m}$ 일 때 표면의 손상이 최소화하였으며, 표면거칠기가 향상되었다.

## 참고문헌

- [1] Norio Taniguchi, 1992, "Future Trends of Nanotechnology", *Int. J. JSPE*, Vol.26, No.1, pp.1-7
- [2] Nobuo Yasunaga, 1994, "Recent Advances in Ultra-precision Surface Finishing Technologies in Japan", *JSPE*, Vol.28, No.3, pp.191-192
- [3] Watanabe and J. Suzuki, 1981, "High Precision Polishing of Semiconductor Materials Using Hydrodynamic Principle", *Annals of CIRP*, Vol.30, No.1, pp.91-95
- [4] Yuzo Mori, Toru Okuda, Kazuhisa Sugiyama and Kazuto Yamauchi, 1985, "Numerically Controlled Elastic Emission Machining —Consideration of Machining Property by Motion Analysis of Powder Particle in Fluid—", *JSPE*, Vol.51, No.5, pp.1033-1039
- [5] D. Dowson and G. R. Higginson, 1977, *Elasto-hydrodynamic Lubrication*, Pergamon Press Ltd., pp.65-77
- [6] Bernard J. Hamrock, 1994, *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*, McGraw-Hill, Inc., 1994, pp.373-387
- [7] Robert W. Fox and Alan T. McDonald, 1985, *Introduction to Fluid Mechanics, 3rd Edition*, John Wiley & Sons, Inc., pp.331-332
- [8] J. G. A. Bitter, 1963, "A Study of Erosion Phenomena, Part I and II", *Wear*, Vol.6, pp.5-21 and 169-190