

실리콘 웨이퍼의 반경 방향에 따른 연삭 특성 평가

김상철[†] · 이상직^{*} · 정해도^{**} · 이석우^{***} · 최헌종^{***}

Evaluation of Grinding Characteristics in Radial Direction of Silicon Wafer

Sangchul Kim, Sangjik Lee, Haedo Jeong, Seokwoo Lee, Heonjong Choi

Key Words: Wafer grinding(웨이퍼 연삭), Wheel path density(휠 패스 밀도), Relative velocity(상대 속도), Radial direction on wafer(웨이퍼의 반경 방향)

Abstract

As the ultra precision grinding can be applied to wafering process by the refinement of the abrasive, the development of high stiffness equipment and grinding skill, the conventional wafering process which consists of lapping, etching, 1st, 2nd and 3rd polishing could be exchanged to the new process which consists of precision surface grinding, final polishing and post cleaning. Especially, the ultra precision grinding of wafer improves the flatness of wafer and the efficiency of production. Furthermore, it has been not only used in bare wafer grinding, but also applied to wafer back grinding and SOI wafer grinding. This paper focused on the effect of the wheel path density and relative velocity on the characteristic of ground wafer in in-feed grinding with cup-wheel. It seems that the variation of the parameters in radial direction of wafer results in the non-uniform surface quality over the wafer. So, in this paper, the geometric analysis on grinding process is carried out, and then, the effect of the parameters on wafer surface quality is evaluated

1. 서론

기호설명

| | |
|------------|--------------------------|
| ω_W | : 웨이퍼의 각속도 |
| ω_T | : 휠의 각속도 |
| R_W | : 웨이퍼의 반경 |
| R_T | : 휠의 반경 |
| S_W | : 웨이퍼 상의 미소 면적 |
| S_a | : S_W 에 포함되는 입자의 궤적 면적 |
| D_a | : 슷돌 입자의 직경 |
| r | : 웨이퍼 중심에서의 거리 |

최근 반도체 산업은 끊임없는 발전을 거듭하여 마이크로 프로세서와 메모리를 비롯한 각종 반도체 디바이스는 점차 고집적화·고기능화 되어가고 있으며 패턴의 미세화만으로는 완전히 대처하기 곤란하므로 칩의 크기도 증가하고 있는 추세이다. 특히 디바이스 공정에서 다층 배선을 위한 평탄화에 대한 요구가 날로 심해짐에 따라, 현재 공정을 형성하고 있는 래핑, 에칭, 1, 2, 3차 폴리싱으로는 이러한 요구조건을 충족시키기 어렵고 생산 단가도 높아져 가격 경쟁이 힘들다, 웨이퍼 고정밀 연삭 가공 기술을 확보함으로써 surface grinding - final polishing - post cleaning을 구현할 수 있으므로 제품 요구 사양을 만족시키면서 생산 효율 측면에서 상당한 이점을 가질 수 있다. 또한 고정밀 연삭 가공 기술은 웨이퍼 후면 연삭(back grinding), Direct Bonded SOI 웨이퍼의 박막 형성, 화합물 반도체의 초정밀 경면 연삭 가공,

[†] 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

E-mail : whitenext@hanmail.net

TEL : (051)510-3210 FAX : (051)513-8442

^{*} 한국공작기계

^{**} 부산대학교 기계공학부

^{***} 한국생산기술 연구원

디바이스 집적 중 손상된 웨이퍼의 표면 재생 가공 등에 절대적으로 필요한 기술이라 할 수 있다.

하지만 최근들어 고강성 연삭기의 개발, 슛들 입자의 미립화, 연삭 기술의 발전으로 초정밀 경면 연삭이 이루어지고 있다할지라도 고정 입자를 이용한 가공의 한계상 유리 입자를 사용하는 래핑, 폴리싱에 비해 아직까지 상대적으로 가공 결함의 수준이 높으며 이를 해결해야 하는 숙제를 안고 있다. 특히 연삭 공정에서의 가공 결함은 이후에 시행되는 폴리싱 공정의 추가공량을 결정하는 지배적인 인자로서 가능한 결함 정도를 향상시키는 연구가 진척되어야 하며 아울러 결함의 분포나 정도를 정확히 파악하는 연구도 수행되어야 할 것이다.

본 논문에서는 웨이퍼 연삭 특성상 필연적으로 발생하는 웨이퍼 반경 방향의 불균일한 가공 인자들이 웨이퍼 전면에 걸쳐 불균일한 가공 품위를 형성시킬 것으로 예상되어, 연삭 공정과 메커니즘에 대해 이론적 고찰을 수행한후 실험을 통해 규명해 보고자 하였다.

2. 이론적 고찰

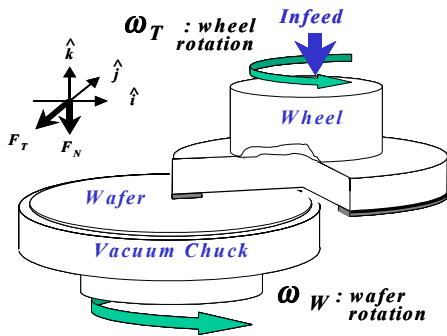


Fig. 1 Grinding process in silicon wafer

Fig. 1에서 보는 것과 같이 웨이퍼 연삭 가공은 휠과 웨이퍼의 회전운동과 휠의 절입으로 구성되어 있다. 휠과 웨이퍼가 항상 일정하게 접촉하여 연삭저항이 일정하게 되도록 설계되었기 때문에 웨이퍼의 형상 정밀도와 표면 품위를 동시에 구현하면서 가공 능률을 높일 수 있다. 하지만 웨이퍼 연삭 공정의 기구학적 특성상 웨이퍼의 반경 방향에 대해 휠 입자의 상대 속도와 패스 밀

도가 균일하지 않으며 이런 차이는 웨이퍼 전면에 대해 불균일한 가공 품위와 평탄도의 악화를 초래할 것으로 예상된다. 따라서 가공전 가공 품위의 예측과 가공후 정확한 측정을 위해서는 웨이퍼 반경에 따라 발생가능한 불균일한 인자에 대한 고찰이 필요할 것으로 사료된다.

2.1 반경 방향에 따른 휠 패스 밀도

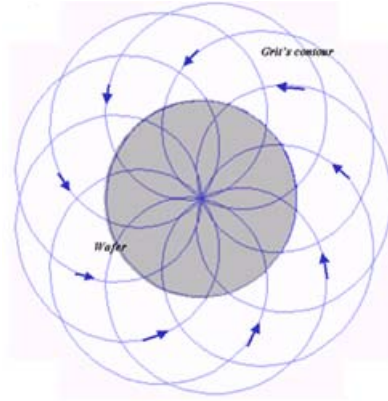


Fig. 2 Simulation of single grit's contour

웨이퍼에 대한 휠 입자의 궤적을 분석해 보면 Fig. 2와 같다. 궤적의 형태는 휠과 웨이퍼의 회전 속도 비, 그리고 휠의 직경에 의해 결정되며 다음의 방정식에 의해 쉽게 정리할 수 있다.

$$\vec{P} = P_x \vec{i} + P_y \vec{j} \text{ 에서}$$

$$P_x = R_T [\cos \omega_W t + \cos \omega_T t (1 + \frac{\omega_W}{\omega_T})] \quad (1)$$

$$P_y = R_T [\sin \omega_W t + \sin \omega_T t (1 + \frac{\omega_W}{\omega_T})] \quad (2)$$

반경 방향에 따른 휠 패스 밀도는 웨이퍼 중심으로부터 반경 r의 위치에 있는 미소 면적 S_W를 지나는 궤적의 넓이 S_a로 정의할 수 있다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 S_a는 웨이퍼의 반경에 따라 조금씩 커지는 경향을 보이나 그 정도는 미소하며, 현재 웨이퍼 가공에 쓰이는 입자의 직경이 수 μm에서 수십 μm에 불과하여 웨이퍼의 넓이에 비해 극히 미소한 양인 것을 감안하면 휠의 궤적을 직선으로 가정할수 있으며, 이로써 휠 패스 밀도를 아래와 같이 간략화하여 정리할 수 있다.

$$Density = \frac{S_a}{S_w} = \frac{D_a \times dr}{2\pi r \times dr} = K \left(\frac{1}{r} \right) \quad (3)$$

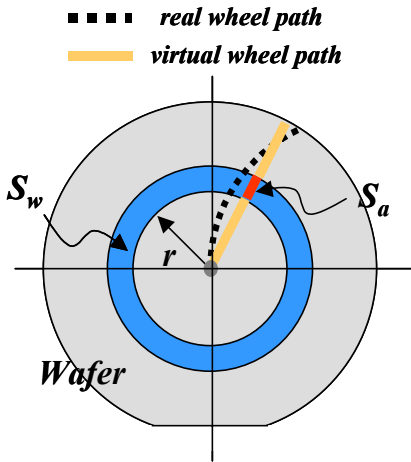


Fig. 3 Modeling(1) of Grinding Process

여기서 K 는 휠 입자의 수, 휠 날의 넓이 등을 포함하는 비례계수이다. 반경 방향에 대한 휠 패스 밀도는 웨이퍼 중심에서의 거리 r 에 반비례하는 함수임을 알 수 있다. 따라서 휠 패스 밀도는 웨이퍼 중심부에서 가장 높고 외곽에서 가장 낮다. 일정한 양으로 점차적인 강제절입을 수행하는 In-feed 연삭에서 이런 휠 패스 밀도의 차이는 재료 제거율과 표면 거칠기에 직접적인 영향을 미칠 것으로 예상된다.

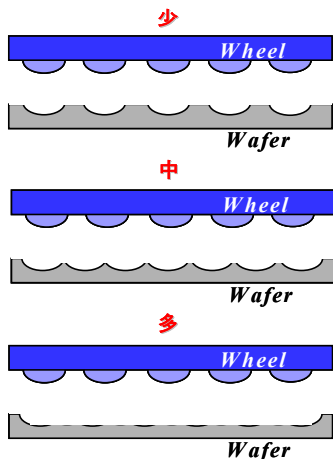


Fig. 4 Mechanism of wheel path density's effect

Fig. 4에서 보이는 메커니즘에 의해 휠 패스 밀도가 높을수록 재료 제거율이 높으며 따라서 오목한 형태의 가공물을 기대할 수 있다. 이것은 웨이퍼의 평탄도에 악영향을 미치는 요소이지만

언급하였듯이 공정 특성상 불가피하게 발생하는 현상이므로 이를 보완해 주기 위해서는 웨이퍼의 회전축과 휠의 회전축을 평행 상태가 아닌 약간의 틸팅각을 부여하는 방법이 있겠다.

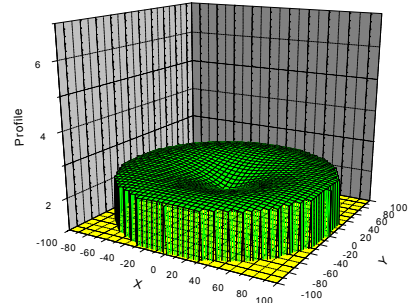


Fig. 5 Prediction of ground wafer according to wheel path density

같은 메커니즘으로 표면 거칠기는 중심부가 외곽부보다 양호할 것으로 예상된다. 연삭 가공된 웨이퍼의 휠 마크를 살펴보면 중심부에서 작은 동심원 형태의 마크(singularity point)를 볼 수 있다. 웨이퍼 전면에 걸쳐 균일한 휠마크를 띄는데 비해 중심부에서만 동심원 형태의 마크를 띄어 이 부분에서 가공 결함이 심각할 것으로 보이나 실제로 마크의 형태와 무관하게 휠 패스 밀도가 무한대에 가까운 부분으로써 표면 품질은 가장 좋을 것으로 예상된다. 웨이퍼 연삭에서 휠은 휠날의 중심부가 웨이퍼 중심에 정확히 일치되게 설치되는데 휠날의 중심에서 임의의 거리 a 상에 위치한 스톤입자는 웨이퍼 중심에서 반경 a 인 부분을 항상 가공하게 되므로 반경 a 를 갖는 동심원이 만들어지는 것으로 사료된다.

2.2 반경 방향에 따른 상대속도

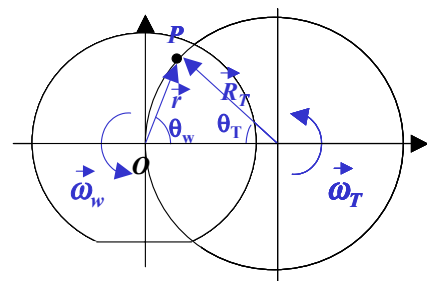


Fig. 6 Modeling(2) of Grinding Process

웨이퍼에 대한 스톤 입자의 상대 운동 방정식

을 유도하기 위해 연삭 공정을 Fig. 6과 같이 모델링할 수 있으며 아래와 같이 웨이퍼에 대한 슷돌 입자의 상대 속도를 정리할 수 있다.

$$\vec{V}_{TW} = \vec{\omega}_T \times \vec{R}_T - \vec{\omega}_W \times \vec{r} \quad (4)$$

x, y 각 성분에 대해서 다음과 같이 정리된다.

$$V_{(TW)x} = r\omega_W \times [1 - \frac{1}{4}(\frac{r}{R_T})^2]^{\frac{1}{2}} \times (1 - \frac{\omega_T}{\omega_W}) \quad (5)$$

$$V_{(TW)y} = -[\frac{1}{2}\omega_W(\frac{r^2}{R_T})(1 - \frac{\omega_T}{\omega_W}) + R_T\omega_T] \quad (6)$$

위의 식에서 알 수 있는 것과 같이 슷돌 입자의 상대 속도는 웨이퍼와 휠의 회전 속도비 ($\frac{\omega_T}{\omega_W}$)와 임의의 위치에 대한 반지름비($\frac{r}{R_T}$)에 대한 함수이다.

정리한 식을 이용하여 반경 방향과 회전 속도에 따른 상대속도를 Fig. 7에 나타내어 보았다. 시뮬레이션 결과, 웨이퍼와 휠의 회전 속도비에 따라 그 차이는 있지만 공통적으로 웨이퍼 중심에서 가장 상대속도가 높고 웨이퍼 반경 r 이 커질수록 상대속도는 감소한다. 또한 그 차이는 회전 속도비가 작을수록 더욱 두드러지는 것을 알 수 있다. 일반적으로 상대속도가 클수록 취성재료의 가공에서 소성변형으로 인한 연성모드 가공이 이루어져 표면 품질은 향상되는 것으로 알려져 있다. 따라서 중심부가 외곽부보다 표면 거칠기가 양호할 것으로 예상된다.

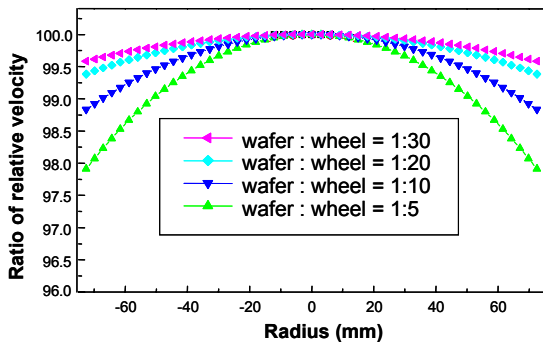


Fig. 7 Relative velocity in wafer according to RPM ratio of wafer and Wheel

3. 기초 실험

3.1 실험 방법

앞절에서 고찰한 웨이퍼 반경 방향에 대한 휠 패스 밀도와 상대속도의 차이가 가공 특성에 미

치는 영향을 알아보기 위해 기초 실험을 수행하였다. 웨이퍼 연삭에 쓰이는 컵휠을 사용한 In-feed 연삭 방식은 휠 패스 밀도와 상대속도 외에 연삭열 분포, 슷돌의 탄성 변형등 여러 가지 요인이 중첩되어 가공 특성을 형성시키므로 휠 패스 밀도와 상대 속도의 인자 각각에 대한 연삭 특성을 고찰하기 위해 Fig. 8에 나타난 것과 같은 평면 연삭 방식으로 실험에 임하였다.

실험에 사용된 재료는 6in 단결정 실리콘 웨이퍼이며 EPG-52S (NAGASE INTEGRAX) 평면 연삭기를 이용하였다. 휠 패스 밀도의 차이는 Spark out time 을 조절하여 같은 효과를 얻게 하였다. 기타 자세한 실험 장치와 조건은 각각 Fig. 8과 Table 1에 나타내었다.

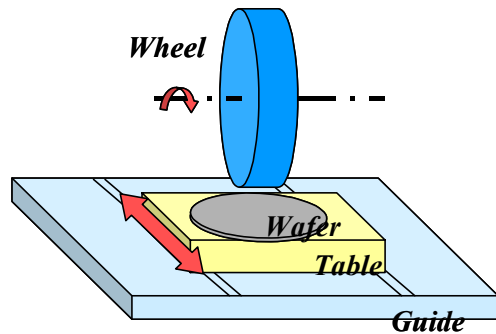


Fig. 8 Experimental Setup

Table 1 Experimental conditions(1)

| Parameters | Conditions |
|---------------------|-------------------------|
| Machine | EPG-52S (NAGASE) |
| Workpiece | 6in Silicon wafer (100) |
| Wheel | SD400N100W |
| Coolant | Water (25 °C) |
| Wheel Speed | 1000 ~ 2500 rev/min |
| Table speed | 0.08 m/s |
| Feed rate | 0.1 μm/stroke |
| Stock removal | 20 μm |
| Cut | Down cut |
| Spark out time | 0 ~ 20 stroke |
| Dressing Conditions | |
| Wheel Speed | 2000 rev/min |
| Feed rate | 0.5 μm |
| Stock removal | 50 μm |

3.2 실험 결과

표면 연삭 가공 결과를 분석할 때 일반적으로 화학적 성분 분석, 표면 거칠기 측정, 표면 하부 결함 측정, 평탄도 측정등이 있으나 기초실험을 통한 간단한 규명에 수행함에 있어 표면 거칠기의 측정이 가장 용의하고 보편적인 연삭 특성을 가장 잘 나타내어주며 웨이퍼링 공정에서 평탄도와 함께 표면 품질이 가장 중요한 요구 사양이므로 표면 거칠기를 측정함으로써 기초실험의 가공 특성을 파악하고자 하였다. 측정은 Mitutoyo 사의 Stylus SJ-301을 이용하였다.

Fig. 9는 휠 패스 밀도에 따른 표면 거칠기를 나타낸 것이다. 예상한 바와 같이 휠 패스 밀도가 높을수록 표면 거칠기가 양호하게 나타났다. 실제 웨이퍼 연삭시에 발생하는 휠 패스 밀도의 차이는 이론적으로 웨이퍼 중심에서 무한대에 가깝기 때문에 중심부와 외각부의 패스 밀도비를 예측하기 힘들지만 기초 실험 결과에서 20배 정도의 휠 패스수로 표면 거칠기는 0.1 μm 정도 차이가 나는 것으로 나타났다.

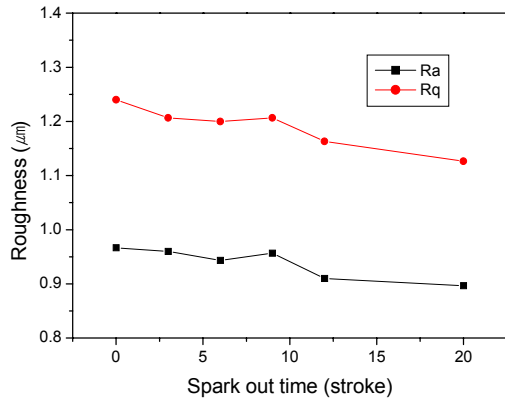


Fig. 9 Roughness according to wheel path density

Fig. 10은 상대속도에 따른 표면 거칠기를 나타낸 것이다. 전체적으로 상대속도가 높을수록 표면 거칠기는 양호한 경향을 나타내었다. RPM 2400에서 거칠기가 높게 나타나는 것은 장비의 고유특성에 기인하는 것으로 사료된다. EPG-52S 평면 연삭기로 실험할 당시 위의 속도 영역에서 주축의 편심율이 다른 영역에 비해 0.2 μm 정도 크게 측정되었으며 이런 편심은 공진의 영향으로 볼 수 있다. 위의 실험 조건상에서 0.1 μm 정도의 거칠기 차이를 보였다.

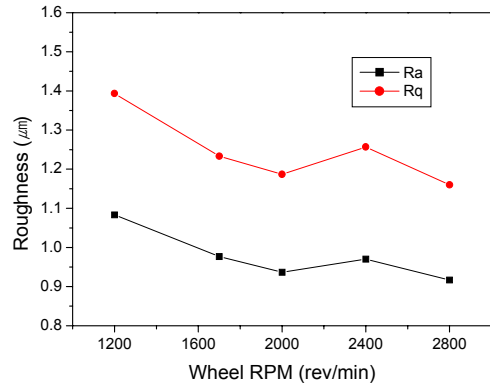


Fig. 10 Roughness according to relative velocity

4. 웨이퍼의 반경 방향에 따른 가공 특성

4.1 실험 방법

앞절에서 수행한 기초실험의 결과에서 휠 패스 밀도는 재료 제거율에 비례하고 휠 패스 밀도와 상대속도가 클수록 표면 거칠기는 양호해지는 것을 확인할 수 있었다. 2절에서 수행한 이론적 고찰과 3절에서 수행한 기초 실험을 토대로 웨이퍼의 중심부에서 표면 품질이 가장 양호할 것을 예상할 수 있었으며, 실제 컵휠을 이용한 In-feed 연삭을 시행한 후 이를 규명해 보고자 하였다.



Fig. 11 Experimental equipment

현재 웨이퍼 양산 공정에 사용되는 DFG-830 (DISCO)를 이용하여 8in 단결정 실리콘 웨이퍼를 연삭가공하였다. 기타 실험 조건 역시 기본적으로 현장에서 사용되는 조건을 사용하였다. 측정

은 반경 방향에 따른 표면 거칠기, 표면 하부 결함을 측정 대상으로 삼았으며 표면 거칠기는 Mitutoyo 사의 Stylus SJ-301, 표면 하부 결함은 High resolution X-ray Diffractometer을 이용한 정도 측정, 그리고 angle 폴리싱 후 전자 현미경으로 깊이를 직접 측정하는 방법을 이용하였다.

Table 2 Experimental conditions(2)

| Parameters | Conditions |
|---------------|-------------------------|
| Machine | DFG-830(DISCO) |
| Workpiece | 8in Silicon wafer (100) |
| Wheel | SD2000N100W |
| Coolant | N-3 Soluble Type |
| Wheel Speed | 4000 rev/min |
| Table speed | 40 rev/min |
| Feed rate | 0.3 $\mu\text{m/s}$ |
| Stock removal | 10 μm |

4.2 실험 결과

Fig. 12는 반경 방향에 따른 표면 거칠기를 측정한 결과이다. 예상한 것과 같이 대체적으로 중심부에서 표면 거칠기가 가장 양호하고 외곽부일 수록 표면 거칠기가 악화되는 경향을 보였다. 측정 범위 내에서 약 0.3 μm 정도의 거칠기 차이를 보였는데 웨이퍼가 차츰 대구경화 되는 추세로 볼 때 하나의 웨이퍼 상에서 이런 차이는 더욱 커질 것으로 예상된다.

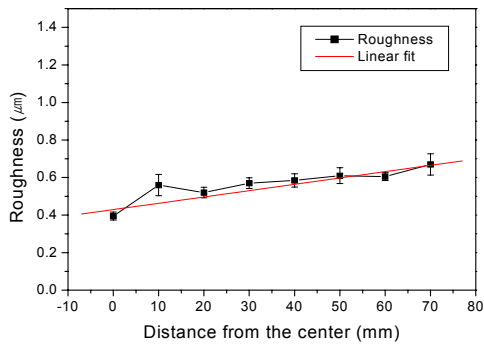


Fig. 12 Roughness according to Radial direction

다음 Fig. 13은 XRD를 이용하여 반경 방향에 따른 표면 하부 결함을 측정한 결과이다.

XRD는 X선을 시편에 조사할 때 발생하는 회절 강도와 반가치(FWHM : Full Width Half Maximum)를 통해 내부의 결함 정도를 정성적으로 평가하는 방법이다. 즉 균일한 결정 구조를 가진 입자는 회절 강도가 높고 반가치가 낮는데 비하여, 결함에 의해서 결정 구조가 불균일 하면 회절각이 분산되어 회절 강도가 낮고 반가치가 높게 나타난다. Fig. 13는 반경 방향에 따른 회절 강도를 나타내었다. 중심부에서 가장 높게 나타나고 외곽부에서 낮아지는 경향을 나타내었으며 이것으로 중심부의 표면 하부 품질이 가장 양호하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 14은 angle polishing 후 전자 현미경으로 직접 결함 깊이를 측정한 결과이다. 중심부가 다른 부분에 비해 표면 하부 결함이 적은 것으로 나타났지만 측정 시료수가 부족하고 뚜렷한 경향을 나타내지 않아 가공 특성을 파악하는 것에 무리가 있었다.

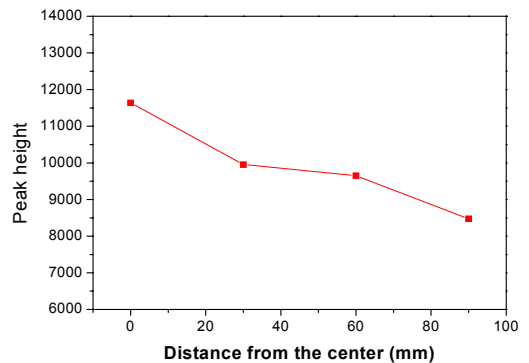


Fig. 13 Subsurface Damage according to Radial direction (by DXRD)

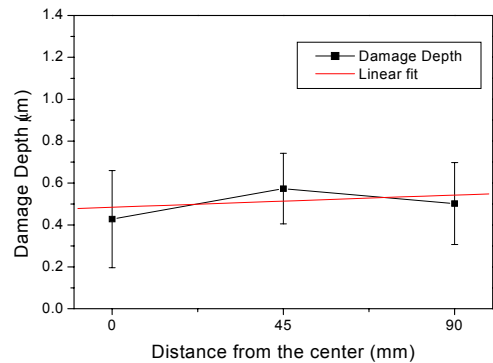
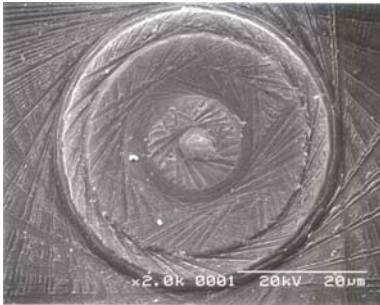
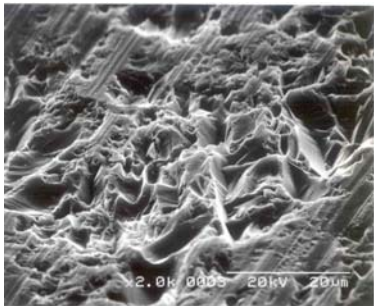


Fig. 14 Subsurface Damage according to Radial direction (by angle polishing)

다음 Fig. 15는 웨이퍼 표면을 SEM 촬영한 결과를 보여준다. 두 사진을 비교하였을 때 중심부분의 표면 상태가 더욱 양호한 것을 알 수 있다. 특히 중심부에서는 소성 변형에 의한 가공이 지배적으로 이루어졌으나 외곽부에서는 취성 파괴에 의한 가공이 지배적으로 이루어졌음을 볼 수 있다. 그리고 Fig. 15-a에서 웨이퍼의 동심원이 생기는 과정을 짐작할 수 있다. 동심원 사이에 단차가 생기는 것은 숫돌 입자의 크기가 이상적으로 균일하지 않으며 그로 인해 지배적으로 가공에 참여하는 입자가 존재한다는 것을 보여준다.



a. Wafer center



b. Wafer fringe

Fig. 15 Surface quality according to position

4. 결론

본 연구에서는 In-feed 연삭 방식에서 필연적으로 발생하는 불균일 요소에 대해 이론적인 고찰을 수행한 뒤 인자로 예측된 휠 패스 밀도와 웨이퍼에 대한 숫돌 입자의 상대 속도에 따른 가공 특성을 기초 실험을 통해 파악하고 실제 웨이퍼 연삭에서 나타나는 반경 방향에 대한 불균일한 가공 특성을 규명하였다. 그 결과 휠 패스 밀도와 상대 속도는 웨이퍼의 중심부가 외곽부 보다

높게 나타났으며 두 인자의 크기가 클수록 표면 거칠기는 양호해지는 것을 기초실험을 통해 확인할 수 있었으며, 실제 웨이퍼 연삭에서도 웨이퍼 중심부에서 표면 및 표면하부 품질이 가장 양호하게 나타났다. 또한 휠 패스 밀도와 재료 재거율은 비례할 것으로 사료되어졌으며 따라서 가공 후 웨이퍼의 표면은 오목한 형상을 띠는 것으로 예상된다.

본 연구에서 웨이퍼 반경 방향에 따른 연삭 특성에 관한 연구를 수행하기 위해 휠 패스 밀도와 상대 속도라는 인자를 사용하였지만 이것 외에도 연삭열 분포, 숫돌의 휨등 또다른 불균일 요소가 존재할 수 있다. 따라서 차후에 이런 인자들에 대한 연구가 병행되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 주관하는 중기거점 사업인 “고기능성 부품 가공용 지능형 연삭 시스템”의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. H.OISHI "400mm-Diameter wafer qualities from slicing to grinding" *Advances in Abrasive Technology*, Vol. 3 , pp. 29-36, 2000
2. J. C. Conway, Jr, H. P. Kirchner "The mechanics of crack initiation and propagation beneath a moving sharp indenter" *Journal of Materials science*, Vol 15, pp. 2879-2883, 1980
3. R.Komanduri(1), N. Chandrasekaran, L. M. Raff "Orientation Effects in Nanometric Cutting of Single Crystal Materials : An MD Simulation Approach" *Annals of CIRP*, Vol 48, pp. 67-72, 1998
4. Winston S. Blackley and Ronald O. Scattergood "Crystal Orientation Dependence of Machining Damage-A Stress Model" *J. Am. Ceram. soc.*, Vol 73-13, pp. 3113-3115, 1990
5. P. L. TSO, W. J. LIAO "A study of surface profile on grinding of silicon wafer" *Advance in Abrasive Technology*, Vol 3, pp. 219-225, 2000