

# 반도체 실리콘재료의 정밀연삭을 위한 공정변수와 연삭후 표면에 형성된 wheel pattern 과의 관계

오한석\*\*\*, 박성은\*, 이홍림\*

## Surface Wheel Pattern Analysis and Grinding Process Parameters of Silicon

Han Seog Oh\*\*\*, Sung Eun Park\*, and Hong Lim Lee\*

### ABSTRACT

For the fine grinding process development of semiconductor monocrystalline silicon, wheel rotational speed, chuck rotational speed, feed rate and hysteresis force were controlled. Magic mirror system was used for grinding wheel pattern analysis. Curvature of wheel pattern was measured by fitting equation. The modeling of surface wheel pattern was related to wheel and chuck rotational speed. The calculated curvature of the model was well matched with the measured curvature. The statistical analysis indicated wheel and chuck rotational speed were significantly effective on.

**Key Words :** Fine grinding (정밀연삭), Back grinding (후면연삭), Silicon wafer (실리콘 웨이퍼), Wheel pattern (휠 패턴), Wafering (웨이퍼링)

### 기호설명

- $v_c$  = Velocity of edge point of chuck
- $r_c$  = Radius of chuck
- $\omega_c$  = Rotational angle velocity of chuck
- $v_w$  = Velocity of grinding wheel
- $r_w$  = Radius of grinding wheel
- $\omega_w$  = Rotational angle velocity of grinding wheel
- O = Center of wafer and chuck
- O' = Center of grinding wheel
- A = Intersect between wafer and grinding wheel

### 1. 서론

반도체 디바이스제조에 사용되는 실리콘웨이

퍼의 연삭가공은 초기연삭에서 후면연삭 (back grinding) 까지 전공정에 걸쳐서 이루어지고있다<sup>(1-6)</sup> (Fig. 1). 본고에서 다루고 있는 식각된 웨이퍼 (etched wafer) 에 대한 정밀연삭은 최근의 device rule 에 따른 단결정 실리콘의 웨이퍼링 공정의 품질향상을 위해서 이루어지고 있다.<sup>(4)</sup> 반도체제조에서의 정밀연삭은 디바이스 최종 조립공정 (assembly process) 시 후면연삭 (back grinding) 에서 시작되어 발전되어 왔으며, 일반적으로 미세다듬질연삭 (microfinish grinding) 이라고 하기도 하며, 보통 2000 mesh (3 ~ 6  $\mu$ m 의 입도) 이상의 다이아몬드 스톨을 사용하는 공정을 의미한다.<sup>(5,6)</sup>

반도체 제조공정에서의 정밀연삭에 있어서는 여러가지 사항들을 고려하여야 하나, 특히 중요한 것은 가공후 손상을 최소화하는 것이다.<sup>(7)</sup> 흔히 손

\*\*\* 2001 년 7 월 20 일 접수  
\* 연세대학교 세라믹공학과, hsoh@html.yonsei.ac.kr  
\*\* 엠이엠씨 코리아 (주)

상은 공유결합물질인 실리콘의 표면을 다이아몬드로 가공하면서 형성되는데, 특히 연삭숫돌의 종류 및 모양과 운동형태에 기인한다.

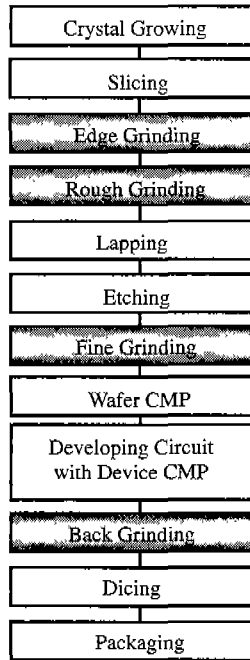


Fig. 1 Various grinding and machining processes in fabrication processes for silicon based devices.

손상을 체계적으로 연구하기 위해서는 손상에 미치는 공정변수에의 영향에 대한 연구가 이루어져야 하며 이에 대한 연구는 이미 발표한바 있다.<sup>(8)</sup> 또한 연삭 가공시 사용된 숫돌에 의해 표면에 형성되는 패턴에 대한 예측도 대단히 중요하며, 이는 연삭공정 이후 공정에서 가공후 잔류 손상의 위치를 이해하여 분류하고 개선하는데 있어서 중요하다. Fig. 2는 최종연마후 연마불충분등의 이유로 남아있는 wheel pattern의 한 예이다.

## 2. 실험방법

### 2.1 실험재료 및 기구

실험은 MEMC Korea Co. (천안소재) 에서 생산되는 혼합산 (mixed acid) 으로 식각된 silicon wafer를 사용하여 진행되었다. 이 때 사용된 silicon wafer는 P type으로 8.5-11.5 Ω-cm의 저항값을 가

지며, (100) 방향성을 가지고 있고 탄소농도는 0.3 ppma, 침입형 산소농도는 12 ppma (ASTM F121-83)인 200 mm 반경을 가지며 Czochralski 방법으로 성장시킨 것이다. 이 웨이퍼를 공정변수를 달리하여 미국 Strasbaugh 사의 정밀수직이송연삭기 (vertical infeed grinder), 모델 MK-7AF를 사용하여 연삭하였다. 연삭숫돌은 미국 Norton사에서 개발한 4000 mesh 입자크기를 가지고 vitrified bond이며 cut type인 연삭숫돌을 사용하였다. wheel pattern의 관찰은 미국 Hologenix사의 YIS-200 magic mirror system을 이용하였다. wheel pattern의 곡률반경은 관찰된 Magic mirror의 이미지 (image)를 이용하여 fitting하여 계산하였고 wheel pattern이 생성되는 모델링을 통하여 얻은 값과 비교하였다.

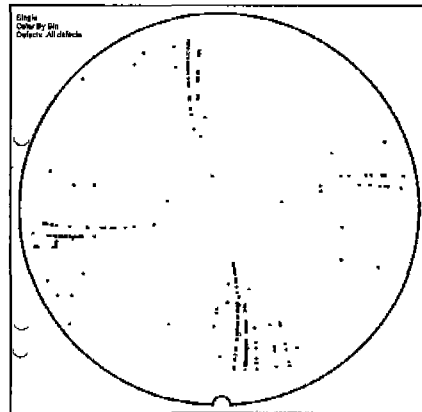


Fig. 2 Residual wheel pattern of polished wafer. (Surface scanning inspection system, WIS CR80, ADE Co. USA)

### 2.2 연삭공정변수

반도체공정에 사용되는 정밀연삭기는 Fig. 3에 도식되어있듯이 고성능, 고회전의 공기베어링 축이 아래 위로 달려 각각 숫돌과 연마재료를 고정하며 각각의 회전수를 가지고 동작된다. 본 실험을 위해 연삭숫돌의 회전속도, chuck의 회전속도, 이송속도 (feed rate) 및 hysteresis force를 공정변수로 조정하였다.

hysteresis force는 상축의 공기베어링이 연삭면으로 수직 강하할 때 작용하는 마찰 값 이상으로 설정되어있는 힘으로, 이 힘 이상이 감지되는 경우에 연삭이 시작되도록 주어진 값이다. 실험계획법으로 위의 네 가지 변수를 사용하는 2 수준

(level), 일부실사법 (fractional factorial model)을 이용하여 여덟 가지 공정변수를 사용 연삭을 실시하였다.

Table 1 The matrix of design of experiment

Test #	Wheel rotational speed (RPM)	Chuck rotational speed (RPM)	Feed rate (μm/sec.)	Hysteresis force (lb)
1	2133	623	2	5
2	4133	200	2	5
3	2133	623	0.5	10
4	4133	623	0.5	5
5	4133	200	0.5	10
6	2133	200	2	10
7	4133	623	2	10
8	2133	200	0.5	5

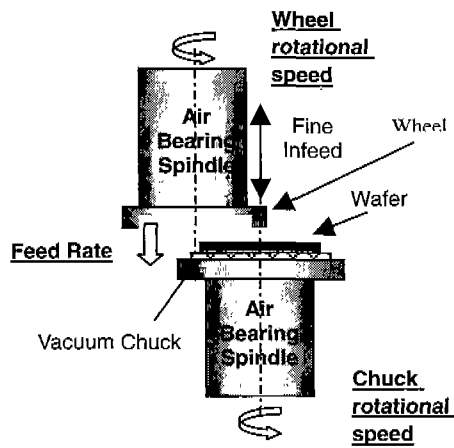


Fig. 3 A schematic diagram of surface fine grinding and process parameters. (Wheel and chuck rotational speed and feed rate)

### 2.3 magic mirror 방법

magic mirror 방법은 (fig. 4) 거울면에서 넓은 영역에 걸쳐 깊이가 얇은 굴곡이 있는 경우 (curvature, waviness) 또는 미세한 영역에서 경사진 굴곡이 있는 경우 (microflaw) 를 관찰할 수 있는 장비이다. 거울면을 magic mirror 법을 사용할 경우 장비화면에 투영된 이미지에 밝고 (Bright : B) 어두운 (Dark : D) 반점이 관찰된다. 밝은 부분은 웨이퍼 표면의 오목한 부분이며 어두운 부분은 볼록한 부분이 된다. 따라서 실리콘 웨이퍼의 가공 공정중 거울면이 형성되는 화학기계적 연마공정 이후 발생한 표면형상을 관찰하는데 유용하게 쓰이고

있다.<sup>(9,10)</sup>

따라서 magic mirror 방법은 반도체용 실리콘 웨이퍼 거울면의 미세하게 발생한 기계적 변형 (strain)을 관찰하며<sup>(11)</sup>, 국지적인 mound 와 dimple 결함을 관찰하는데<sup>(12)</sup> 유용한 장비이다. 이론적으로 표면에서 1-3 nm 크기의 굴곡이나 극단적으로 100 미터 크기의 곡률반경을 가지는 미세한 굴곡을 관찰할 수 있다. 높낮이의 정량화는 한계가 있는 방법이나 열처리를 하지 않는 비파괴 방법으로 결함의 종류에 따라서는 XRT (X-ray topography)와 비슷한 이미지를 얻을 수 있어 반도체 정밀연삭 및 연마공정 연구에 활용되고 있다. 본 실험에서는 이를 이용하여 웨이퍼 연삭후 표면에 발생하는 wheel pattern 을 관찰하였다. 이것이 가능한 것은 정밀연삭기로 4000 mesh 입자의 연삭숫돌로 표면 연삭시 부분적으로 거울면이 형성되기 때문이다.

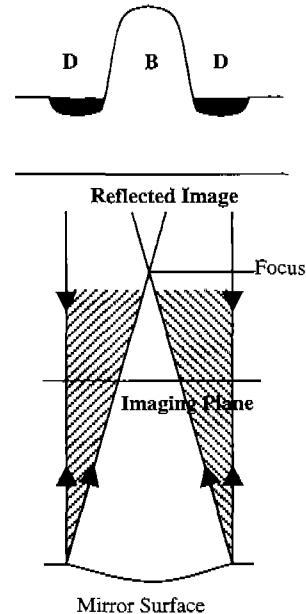


Fig. 4 A schematic diagram of magic mirror system

## 3. 실험결과 및 모델링

### 3.1 wheel patten

Fig. 5 는 magic mirror 법으로 분석한 wheel pattern 의 이미지 사진이다. 이렇게 만든 이미지를 이용하여 곡률반경을 계산하고 아래의 모델링결과

와 비교하였다.

### 3.2 magic mirror image 에 의한 wheel pattern 의 곡률반경

Table 1 과 같이 정밀연삭 조건을 달리하는 8 가지 실험의 결과로 나타나는 실리콘 웨이퍼의 연삭면의 wheel pattern 을 분석하기 위해서 magic mirror 의 image 를 이용하였다. Fig. 5 의 magic mirror image 로부터 wheel pattern 의 곡률반경을 구하기 위해서, 동일한 wheel pattern 궤적에서 10 여 지점을 추출하여 Eq. 1 의 함수로 fitting 하였다.

$$y = b + \sqrt{r^2 - (x - a)^2} \quad (1)$$

x, y 는 각각 추출한 point 의 x, y 좌표이고, r 은 fitting 한 원의 반지름이고, a, b 는 각각 fitting 한 원 중심의 x, y 좌표이다. 이렇게 해서 구한 값이 Table 2 에 정리되어있다. 곡률반경이 가장 크게 나타난 test # 1, 3 에 대해서는 두 번씩 측정하였고, 비슷한 값을 골라 표기하였다.

Table 2 The summary of results

Test Number	Fitted value of curvature (mm)
1	349
2	142
3	291
4	182
5	151
6	177
7	185
8	164

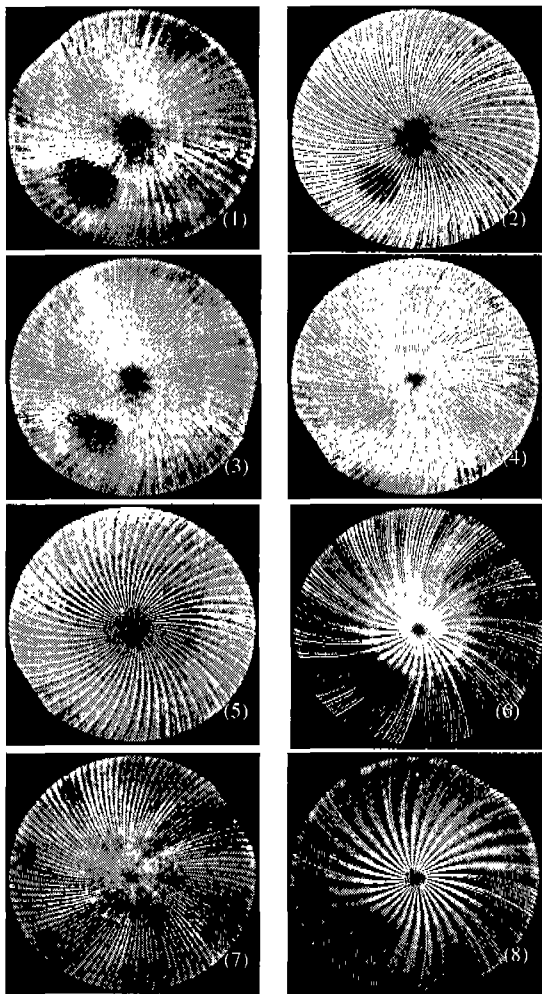


Fig. 5 The test numbers and images of magic mirror system. (1), (2), (3), (4), (5), (6), (7), (8)

위의 fitting 에 의해 얻은 곡률 값의 변동요인을 통계 분석한 결과가 Table 3 이며, 연삭숫돌의 회전속도와 chuck 의 회전속도 및 둘의 교호작용 (interaction) 의 곡률에 대한 유의수준 (level of significance) 이 대단히 높고 ANOVA 의 R<sup>2</sup> 가 0.91747 로 이 두 가지 요인과 교호작용이 곡률 변동의 91.747%를 설명한다는 것을 알 수 있다. 따라서 이송속도와 hysteresis force 는 변동에 기여하지 않는다. 이 결과를 바탕으로 wheel pattern 의 모델링시 연삭숫돌의 회전속도와 chuck 회전속도만을 고려하였다.

Table 3 The table of analysis of variance (ANOVA)

R<sup>2</sup> = 0.95284, Adjusted = 0.91747

MS residual = 452.875

	SS	df	MS	F	p
(1)	12880.13	1	12880.13	28.44079	<b>0.005953</b>
(2)	17391.13	1	17391.13	38.40160	<b>0.003448</b>
1 by 2	6328.13	1	6328.13	13.97323	<b>0.020155</b>
Error	1811.50	4	452.87		
Total SS	38410.88	7			

Note : (1) Wheel rotational speed (RPM),

(2) Chuck rotational speed (RPM)

SS; Sum of Squares, df; Degrees of Freedom

MS; Mean of Square

### 3.3 grinding wheel pattern 모델링

실리콘 웨이퍼의 정밀연삭 공정에서 발생하는 wheel pattern 을 분석하기 위해서 다음과 같은 가정하에 모델을 세웠다.

- 1) 정밀연삭 공정에서 발생하는 wheel pattern 은 연삭숫돌과 chuck 의 회전속도에만 영향을 받는다. Hysteresis force 와 feed rate 는 wheel pattern 에 영향을 미치지 않는다.
- 2) cup type 연삭숫돌의 날 (tooth) 의 두께는 충분히 얇다고 가정한다.
- 3) chuck 과 연삭숫돌의 상호 회전에 의한 마찰에 대한 효과는 무시한다.
- 4) 정밀연삭시 wheel pattern 을 발생시키는 힘은 chuck 과 연삭숫돌의 회전에 의한 실리콘 웨이퍼와 연삭숫돌과의 경계면에서 발생하는 전단력이다. 또한 이 힘들은 각각의 회전에 의해 발생하는 속도에 비례한다.
- 5) 정밀연삭 공정에서 발생하는 wheel pattern 은 정확한 원운동을 하지 않지만 모델의 간소화를 위해 원궤적으로 생각한다.

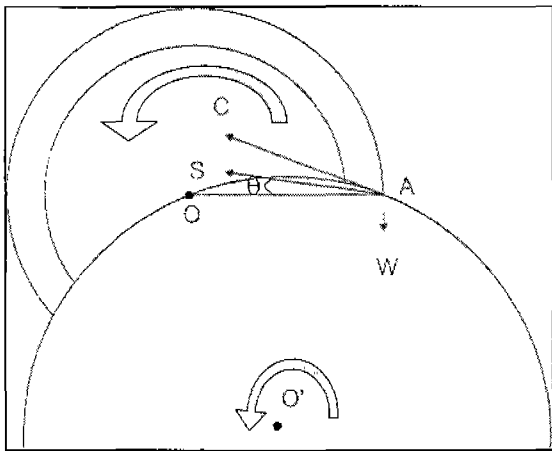


Fig. 6 A schematic diagram for wheel pattern analysis

Fig. 6 에 정밀연삭 wheel pattern 모델링에 대한 개략도를 도시하였다. 실리콘 웨이퍼는 chuck 위에 고정되어 점 O 를 중심으로 반시계 방향으로

회전하고, cup type 정밀연삭용 숫돌은 점 O' 를 중심으로 반시계 방향으로 회전한다. chuck 회전에 의한 실리콘 웨이퍼 가장자리 A 점에서의 속도( $v_c$ )는 Eq. 2 에서와 같이 chuck 의 반지름( $r_c$ )과 회전각속도( $\omega_c$ )에 의해 결정된다.

$$v_c = r_c \cdot \omega_c \quad (2)$$

또한, 연삭숫돌의 회전에 의한 실리콘 웨이퍼 가장자리 A 점에서의 속도( $v_w$ )는 Eq. 3 에서와 같이 연삭숫돌의 반지름( $r_w$ )과 회전각속도( $\omega_w$ )에 의해 결정된다.

$$v_w = r_w \cdot \omega_w \quad (3)$$

실리콘 가장자리 A 점에서 연삭숫돌이 회전하지 않고 chuck 만 반시계 방향으로 회전한다고 생각하면 정밀연삭 숫돌에 의해 AW 방향으로 힘을 받고, 이 때 wheel pattern 을 발생시키는 전단력은 chuck 의 회전에 의해 발생하는 속도에 비례한다고 가정하였으므로, AW 의 크기는  $v_c$  에 비례할 것이다. 그리고 wafer 가장자리 A 점에서 chuck 이 회전하지 않고 연삭숫돌만 반시계 방향으로 회전한다고 생각하면 연삭숫돌의 회전에 의해 AC 방향으로 힘을 받고, 이 때 wheel pattern 을 발생시키는 전단력은 연삭숫돌 회전에 의해 발생하는 속도에 비례한다고 가정하였으므로, AC 의 크기는  $v_w$  에 비례할 것이다.

실제로는 chuck 과 연삭숫돌이 동시에 회전하므로 wheel pattern 을 발생시키는 전단력은 AW 와 AC 의 합, 즉 AS 가 된다. AS 는 wafer 중심(점 O) 방향과  $\theta$  ( $\angle SAO$ )의 각도를 이룬다.  $\theta$  은 연삭숫돌 및 chuck 의 회전속도, 연삭숫돌의 반경, 실리콘 웨이퍼 중심에서의 거리에 의해 결정된다. 일정한 정밀연삭 조건 하에서는 연삭숫돌 및 chuck 의 회전속도와 연삭숫돌의 반경이 일정하므로,  $\theta$  은 실리콘 웨이퍼 중심에서의 거리에 대한 함수가 된다. 연삭숫돌의 반경이 140 mm 이고, 연삭숫돌의 회전속도가 4133 RPM, 2133 RPM, chuck 의 회전속도가 623 RPM, 200 RPM 인 경우, 실리콘 중심에서의 거리에 따른  $\theta$  의 변화를 Fig. 7 에 나타내었다.

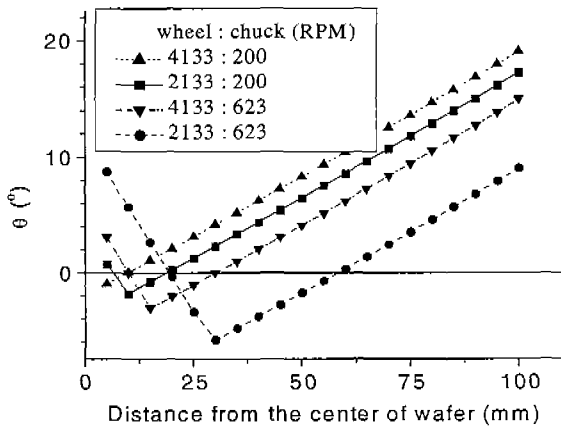


Fig. 7 A schematic diagram for wheel pattern analysis

Fig. 8 은 실리콘 웨이퍼 가장자리 A 점에서 시작된 wheel pattern 의 궤적을 추적하기 위한 모델의 개략도를 나타낸 것이다. wafer 의 반지름  $r_1$  을 n 등분한 값을  $\Delta r (=r_1/n)$  이라고 할 때, 반지름이  $r_2$  인 원과 위에서 계산된  $\theta_1$  을 이용하여 그은 직선과 만나는 점  $S_1$  을 구한다. 이와 같은 방법으로  $S_2, S_3$  등을 구한다. 점  $A_1, S_1, S_2, S_3$  등을 연결하면 wheel pattern 이 완성되고,  $\Delta r$  이 충분히 작다면 더욱 정확한 궤적이 될 것이다. 본고에서는 n 을 20 으로 하여 모델링하였다.

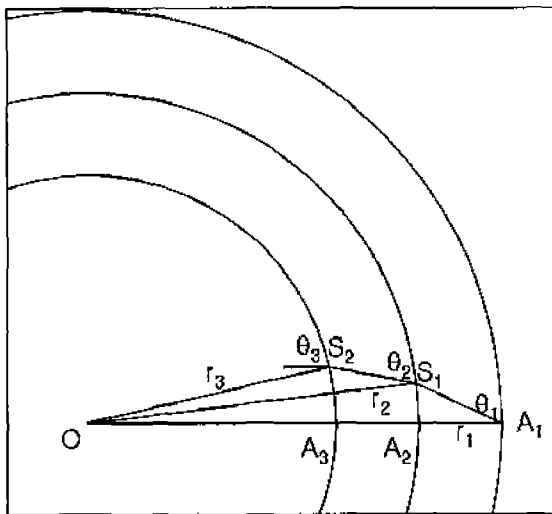


Fig. 8 The mathematical model to calculate the trajectory made by grinding

각각의 test 에 대하여 magic mirror image 로부터 앞서 구한 wheel pattern 의 fitting 한 결과와 위에서 설명한 model 의 방법으로 계산한 wheel pattern 을 Fig. 9~12 에 나타내었다.

연삭숫돌의 회전속도가 빠르고 chuck 의 회전속도가 느린 test # 2, 5 의 경우, 위의 모델에서의 q 값이 다른 test 의 경우보다 상대적으로 높은 값을 보이고 (Fig. 9 참조), 이에 따라 wheel pattern 의 곡률반경이 가장 작게 나타났다. 이와는 반대로 연삭숫돌의 회전속도가 느리고 chuck 의 회전속도가 빠른 test # 1, 3 의 경우, 위의 모델에서의 q 값이 다른 test 의 경우보다 상대적으로 낮은 값을 보이고 (Fig. 12 참조), 이에 따라 wheel pattern 의 곡률반경이 가장 크게 나타났다.

magic mirror image 로부터 구한 wheel pattern 과 model 에 의해 계산한 wheel pattern 에 대하여 Eq. 3 에 의해 fitting 하여 곡률반경을 구하였다. 곡률반경이 가장 크게 나타난 test # 1, 3 에 대해서는 두 번씩 측정하였다. 정리된 결과를 Table 4 와 Fig. 13 에 나타내었다 모든 test 8 가지에 대하여 fitting 한 곡률반경과 모델에 의한 곡률반경은 잘 일치하였다. 각각의 test 에 따른 wheel pattern 의 곡률반경은 test # 2, 5 < # 6, 8 < # 4, 7 < # 1, 3 의 순으로 나타났고, 이는 모델링의 결과와도 잘 일치하였다.

Table 4 The summary of results

Test Number	Fitted value of curvature (mm)	Calculated value of curvature (mm)
1	349, 379	310
2	142	147
3	259, 291	310
4	182	201
5	151	147
6	177	165
7	185	201
8	164	165

#### 4. 결론

정밀연삭의 공정변수와 연삭숫돌에 의해 연삭 표면에 형성되는 wheel pattern 을 분석한 결과 연삭숫돌과 chuck 의 회전속도와 그 교호작용이 상당히 높은 유의수준을 가짐을 확인하였다. 연삭숫돌의 회전속도가 느리고 chuck 의 회전속도가 빠

른 경우에 곡률반경은 크게 형성되었다.

위의 결과를 바탕으로 연삭숫돌과 chuck 의 운동에 따른 wheel pattern 생성을 모델링을 한 결과 실제로 측정된 값과 모델링의 결과가 잘 일치하여 공정변수 변동에 따른 예측이 가능함을 알 수 있었다.

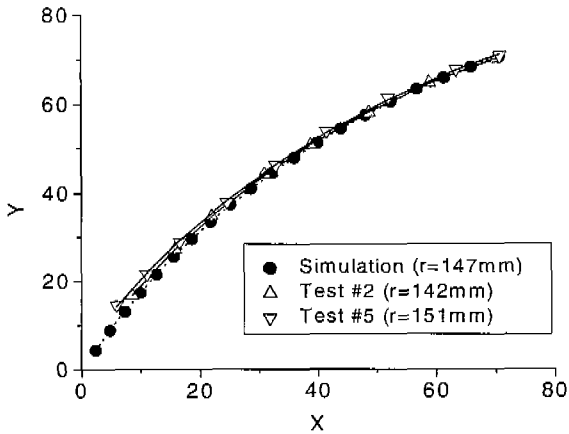


Fig. 9 Fitted and calculated wheel pattern for Test # 2, 5

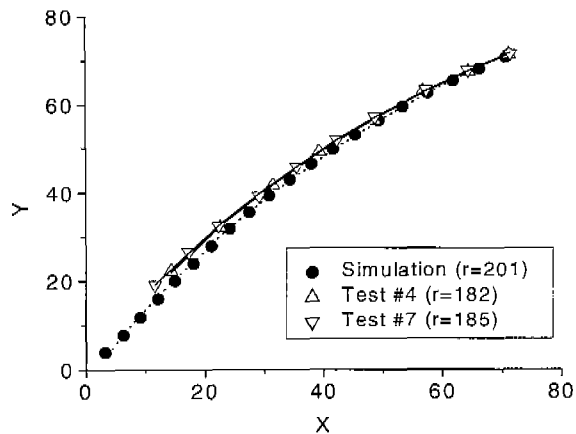


Fig. 10 Fitted and calculated wheel pattern for test # 4, 7

### 후 기

본 연구는 MEMC Korea Co. (주) 의 지원에 의해 이루어 졌으며 이에 감사드립니다. 또한 MEMC Korea 기술연구소의 류기훈, 최지숙님의 도움에 감사드립니다.

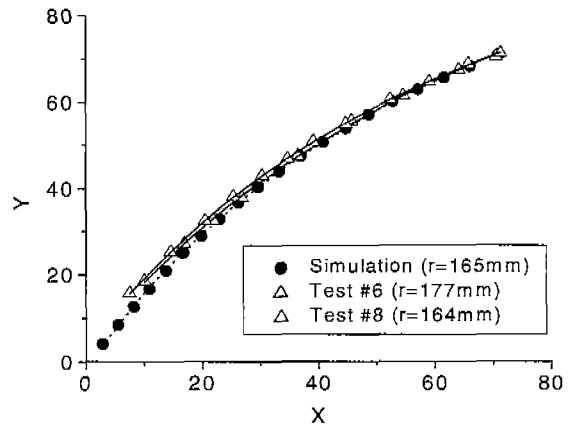


Fig. 11 Real and calculated wheel pattern for test # 6, 8

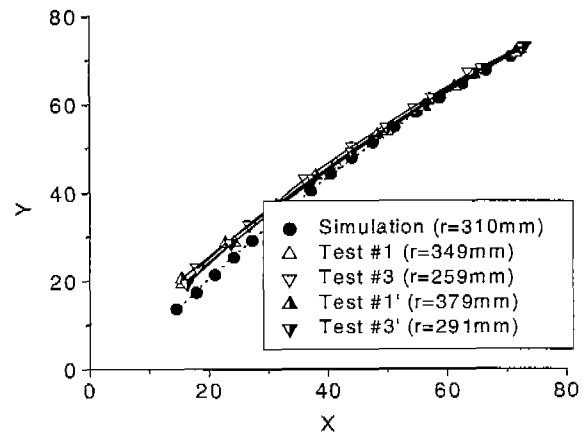


Fig. 12 Real and calculated wheel pattern for test # 1, 3

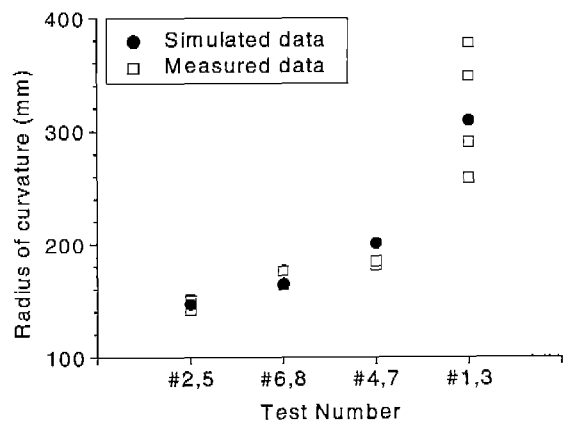


Fig. 13 The summary of results

## 참고문헌

1. G.R. Fisher, *Semiconductor International*, Vol. 9, pp. 97-102, 1998.
2. R.K. Goodall, *Semiconductor Silicon/1998*, The Electrochemical Society, Proceeding Vol. 98-1, pp. 1303-1324, 1998.
3. T. Abe, *Precision Engineering*, Vol 13 (4), 251-255, 1991.
4. R. Vandamme, Y. Xin, and Z.J. Pei, "Method of processing semiconductor wafers," US Patent 6114245, 2000.
5. K. Subramanian and V.R. Shanbhag, *Handbook of industrial diamond and diamond films*, pp. 1023-1041, 1998.
6. Z.J. Pei, and A. Strasbaugh, "Fine grinding of silicon," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 41, pp. 659-672, 2001.
7. H.S. Oh, J.R. Kim, T.H. Kim, J.J. Yu, H.L. Lee, J.H. Lee, and D. Rice, "The characterization of process induced damage of silicon wafering process – mechanical damage," *Defects in Silicon III*, The Electrochemical Society, Proceeding Vol. 99-1, pp. 100-108, 1999.
8. H.S. Oh, S.E. Park, S.M. Jeong, S.S. Kim and H.L. Lee, "Process induced mechanical damage and fine grinding process parameters," pp. 287-294, ISAAT 2001.
9. K. Kugimiya, "Characterization of microdeformation and crystal defects in silicon wafer surfaces," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 130, pp. 2123-2125, 1983.
10. S. Hahn, K. Kugimiya, K. Vojtechovsky, M. Sifalda, M. Yamashita, P.R. Blaustein and K. Takahashi, "Characterization of mirror-polished Si wafers and advanced Si substrate structures using magic mirror method," *Semicon. Sci. Technol.* Vol. 7, pp. A80-A85, 1992.
11. K. Kugimiya, "Makyoh topography : comparison with X-ray topography," *Semicon. Sci. Technol.* Vol. 7, pp. A91-A94, 1992.
12. S. Tokura, N. Fujino, M. Ninomiya and K. Masuda, "Characterization of mirror-polished wafers by Makyoh Method," *J. of Crystal Growth*, Vol. 103, pp. 437-442, 1990.