

## 회전형 CMP 장비의 속도 및 마찰력 분포 해석

김형재#, 정해도\*, 이웅숙\*\*, 신영재\*\*

### Velocity and Friction Force Distribution in Rotary CMP Equipment

Hyoungjae Kim<sup>#</sup>, Haedo Jeong<sup>\*</sup>, Eungsug Lee<sup>\*\*</sup>, Youngjae Shin<sup>\*\*</sup>

#### ABSTRACT

As the design rules in semiconductor manufacturing process become more and more stringent, the higher degree of planarization of device surface is required for a following lithography process. Also, it is great challenge for chemical mechanical polishing to achieve global planarization of 12" wafer or beyond. To meet such requirements, it is essential to understand the CMP equipment and process itself. In this paper, authors suggest the velocity distribution on the wafer, direction of friction force and the uniformity of velocity distribution of conventional rotary CMP equipment in an analytical method for an intuitive understanding of variation of kinematic variables. To this end, a novel dimensionless variable defined as "kinematic number" is derived. Also, it is shown that the kinematic number could consistently express the velocity distribution and other kinematic characteristics of rotary CMP equipment.

**Key Words** : Chemical Mechanical Polishing (CMP; 화학 기계적 연마), Kinematic Analysis (기구학 해석), Velocity distribution (속도 분포), Direction of friction force (마찰력 방향), Uniformity of velocity (속도 균일도), Kinematic number (장치상수)

#### 기호설명

$\omega_w$  = angular velocity of wafer  
 $\omega_p$  = angular velocity of pad  
R = ratio of angular velocity between wafer and pad ( $\omega_w/\omega_p$ )  
P = given point on wafer  
v = relative velocity of wafer  
D = distance between rotation centers of wafer and pad  
L = distance from pad center to the given point P on the wafer  
r = radius of wafer to the given point on wafer

$r_w$  = radius of wafer  
 $\rho$  = relative radius ( $r/r_w$ )  
 $\phi$  = angular position of point P at arbitrary time t ( $\omega_w t$ )  
 $\theta$  = angular position of point on wafer at time t=0  
 $\zeta$  = kinematic number, defined as  $(1-R) r_w/D$   
NU = % nonuniformity  
 $\sigma$  = standard deviation

#### 1. 서론

화학기계적연마 (Chemical Mechanical Polishing; CMP) 공정은 반도체 디바이스의 제조공정에 있어

<sup>†\*</sup> 2002년 7월 24일 접수  
<sup>#</sup> 교신저자, 부산대학교 정밀기계공학과  
Email hjjakim@pusan.ac.kr Tel. (051)-510-3210  
<sup>\*</sup> 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소  
<sup>\*\*</sup> 한국기계연구원

보다 정밀한 로광(Lithography)공정을 진행하기 위해 필요한 필수적인 공정으로 인식되고 있다. 이러한 CMP 기술은 기계적 작용과 화학적 작용의 상승효과에 의하여 재료의 표면을 제거해 나가는 공정으로서 궁극적인 목적은 디바이스의 표면에 결함을 남기지 않고 표면의 요철을 로광광의 초점심도 이내로 평탄화 해 나가는 것이다.

CMP 공정은 연마를 위하여 연마 공구인 패드와 가공물인 웨이퍼 사이에 연마입자가 현탁되어 있는 연마액을 개재시킨 채 압력을 가한 상태에서 서로 상대운동시켜 연마하는 가공기구를 가지고 있다. 이러한 방법에 의하여 웨이퍼 표면의 요철이 선택적으로 제거되면서 평탄화가 이루어진다.

재현성 있는 양호한 연마결과를 얻기 위해서는 일정한 연마속도(MRR ; Material Removal Rate)를 유지하고 웨이퍼 전면에서의 균일한 연마율(WIWNU ; Within Wafer Non-Uniformity)과 각각의 칩 내에서 우수한 평탄도(Planarity)특성을 얻을 수 있어야 한다. 그러나 디자인 룰이 점차 미세해지면서 보다 엄격한 평탄화 조건이 요구되고, 또한 웨이퍼의 대구경화로 인하여 웨이퍼 전면에서의 균일한 연마조건을 얻는 것이 큰 문제점으로 인식되고 있다. 그 중에서 웨이퍼 전면에 대한 연마균일도는 디바이스의 수율에 가장 큰 영향을 미치는 요인중의 하나이다. 이러한 연마균일도에 영향을 미치는 인자는 웨이퍼 전면의 압력분포, 상대속도 분포, 슬러리 유동조건, 온도 분포, 컨디션닝 상태의 변화 및 다른 여러 가지 기계적 및 화학적 인자들이 관련되어 있다.

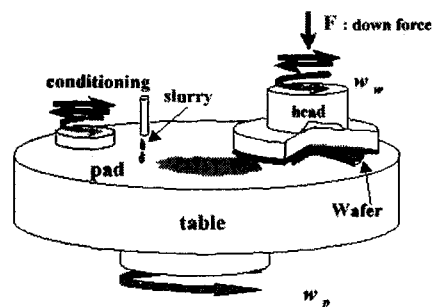
이 중에서 웨이퍼 면에서의 상대속도 분포는 웨이퍼 각 지점에서의 미끄럼 거리를 결정하기 때문에 공간상의 연마율 분포를 결정하는 중요한 인자이다. 또한 연마 후 웨이퍼내 연마율의 분포는 이러한 여러 가지 인자들의 영향이 복잡하게 혼합되어 나타나며, 회전형 CMP 장비의 기구학적인 상대운동 조건에 의해 회전 평균화되어 나타난다. 따라서 웨이퍼와 패드의 상대운동 조건에 대한 연구는 웨이퍼 내 박막의 공간적인 연마현상을 연구하는데 필수적이다.

기구학적인 해석을 통한 상대속도의 해석은 몇몇 연구자들에 연구되어져 왔다. F. W. Preston 은 가공물과 테이블의 각속도가 동일한 경우 가공물 전체의 속도가 균일해짐을 보이고 속도벡터의 분포가 두 회전축을 이은 직선에 수직한 방향이 됩

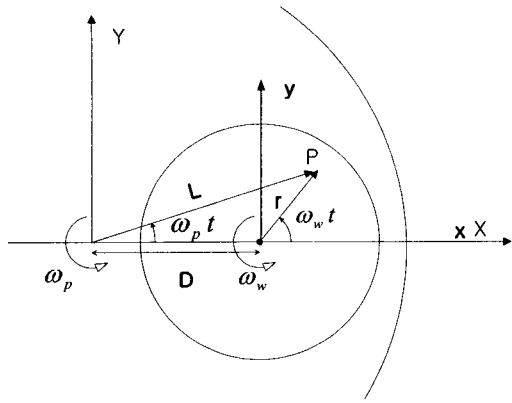
을 보였다<sup>1</sup>. H. Hocheng 등은 CMP의 기구학적인 해석을 통하여 웨이퍼와 패드사이의 각속도비가 연마균일도와 관련 있음을 보였다<sup>2</sup>. 그러나 웨이퍼의 크기가 점점 커지고 디자인 룰이 낮아질수록 기구학적인 요인이 WIWNU에 미치는 영향에 대한 보다 체계적인 연구가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 웨이퍼 스케일의 연마균일도에 영향을 미치는 중요한 인자중의 하나인 기구학적인 조건에 대한 해석을 수행하였다. 이를 통하여 웨이퍼와 패드의 각속도비, 회전 중심간 거리가 웨이퍼 전면에서의 상대적인 연마거리, 상대속도 및 속도벡터의 방향에 미치는 영향을 해석적으로 구하였다. 연마율의 지배방정식은 Preston 방정식을 만족한다고 가정하였으며, 따라서 재료의 제거량은 웨이퍼와 패드간의 상대운동거리에 비례하는 것으로 가정하였다. 이러한 가정은 좁은 속도 범위에서 연마량은 합당한 신뢰성을 가지고 속도에 대한 선형으로 근사 될 수 있기 때문이다.

## 2. 회전형 CMP 장치의 기구학 해석

대부분의 CMP 장비는 Fig. 1(a)와 같이 웨이퍼와 패드를 동일방향으로 회전시키면서 연마를 진행하는 상대운동 기구를 사용하고 있다. 이러한 기구를 사용함으로써 웨이퍼 전면에서 균일한 상대속도조건으로 연마를 진행한다. 일반적으로 회전형 CMP 장비에서 웨이퍼의 각속도( $\omega_w$ )와 패드의 각속도( $\omega_p$ )를 동일하게 함으로써 웨이퍼 전면에서 균일한 상대속도를 얻을 수 있다는 것은 잘 알려진 사실이다<sup>1</sup>. 그러나 일반적인 CMP 공정에서는 최적의 연마균일도를 얻기 위하여 대부분 웨이퍼와 패드의 각속도비를 적절하게 조절하게 된다.



(a) Conventional CMP equipment



(b) Parameters for kinematic analysis

Fig. 1 Schematic diagram of rotary CMP equipment and parameters for kinematic analysis

웨이퍼의 오실레이션 (Oscillation)은 패드면적을 넓게 사용하게 하여 패드의 수명을 높여주나 연마균일도와 연마율에 거의 영향이 없다는 것이 일반적으로 알려진 사실이다<sup>3, 4</sup>. 또한 일반적으로 오실레이션 속도는 연마면의 상대속도에 비하여 매우 낮기 때문에 속도분포에도 작은 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 오실레이션의 영향을 배제하였다.

Fig. 1 에 일반적인 CMP 장치의 그림과 해석을 위한 파라미터들이 나타나 있다. 여기서 D, r, ω<sub>w</sub>, ω<sub>p</sub> 는 각각 회전중심간 거리, 웨이퍼 중심에서 임의지점 (P)까지의 반경, 웨이퍼의 각속도, 패드의 각속도이다. 웨이퍼 내의 상대속도는 주어진 한 점 P 에서 패드의 속도와 웨이퍼의 상대속도의 차이로 결정되며 자세한 내용은 Appendix a 에 기술되어 있다.

$$\vec{v}_{w/p} = \vec{v}_w - \vec{v}_p = -\vec{\omega}_p \times \vec{D} - (\vec{\omega}_p - \vec{\omega}_w) \times \vec{r} \quad (1)$$

따라서 식 (1) 에서와 같이 웨이퍼의 각속도와 패드의 각속도가 동일한 경우 (ω<sub>p</sub>=ω<sub>w</sub>) 에는 웨이퍼 내 속도분포는 ω<sub>p</sub>×D 로서 웨이퍼의 반경위치에 상관없이 모든 위치에서 동일한 속도와 방향을 가지게 됨을 알 수 있다.

다음으로 상대속도의 분포를 평가하기 위하여 식 (1)을 간단한 벡터 연산에 의해 x 축 및 y 축 방향 속도인 v<sub>x</sub> 와 v<sub>y</sub> 로 표현할 수 있다. 그리고

다양한 웨이퍼 크기 (r<sub>w</sub>), 웨이퍼와 패드의 각속도비 (R), 회전 중심 축간의 거리(D) 등의 공정조건에 대한 영향을 평가하기 위하여 무차원수인 반경비 ρ와 웨이퍼크기, 회전중심간 거리 및 각속도비를 대표하는 ζ 를 도입하여 다음과 같이 식을 변경할 수 있다.

$$v_x = r(\omega_p - \omega_w) \sin(\omega_w t) = \omega_p D \rho \zeta \sin \phi \quad (2-a)$$

$$v_y = -r(\omega_p - \omega_w) \cos(\omega_w t) + \omega_p D = -\omega_p D (\rho \zeta \cos \phi + 1) \quad (2-b)$$

여기서 ζ는 앞으로의 해석에서 웨이퍼 내의 속도분포 및 다른 기하학적인 여러 인자들을 일관적으로 평가할 수 있는 중요한 무차원수가 된다. ζ는 웨이퍼의 크기, 회전중심간 거리, 각속도 비를 포함하는 무차원수로서 CMP 장치의 기하학적인 조건을 대표하는 인자이다. 따라서 저자는 ζ를 “장치상수 (kinematic number)”로 정의하고 이후의 해석결과가 ζ에 따라 일관적으로 표현됨을 보일 것이다.

식(2)를 이용하여 웨이퍼 내 상대속도 분포는 다음과 같이 결정된다.

$$v_{w/p} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \omega_p D \sqrt{(\rho \zeta)^2 + 2\rho \zeta \cos \phi + 1} \quad (3)$$

식(3)을 웨이퍼 중심에서의 속도인 ω<sub>p</sub>D 로 무차원화 시키면 다음과 같은 웨이퍼 면에서의 속도비에 대한 무차원수를 얻을 수 있다. 따라서 다양한 조건에 대한 분석을 일관적으로 할 수 있다.

$$v_w(\rho, \phi) = \sqrt{(\rho \zeta)^2 + 2\rho \zeta \cos \phi + 1} \quad \text{or} \quad (4-a)$$

$$v_w(x, y) = \sqrt{(\zeta x + 1)^2 + (\zeta y)^2} \quad (4-b)$$

$$\text{where } \rho^2 = x^2 + y^2, x = \rho \cos \phi$$

식(4-b)는 속도의 분포를 x-y 좌표계로 표시한 결과이다. 여기서, 식 (4)는 적분 등의 연산이 힘들기 때문에 ζ=0 근방에서의 Taylor series 전개에 의해 해석적인 처리가 가능한 형태로 바꿀 수 있다(Appendix b).

$$v_w \cong 1 + \rho \zeta \cos \phi + \frac{\rho^2 \zeta^2}{2} \sin^2 \phi \quad (5)$$

이것은 CMP 장치크기의 제약으로 인하여 회전 중심간 거리가 최소  $D=r_w$  이거나 최대  $D<2r_w$  정도가 되기 때문에  $0.5 \leq r_w/D \leq 1$  의 범위가 된다. 또한 웨이퍼의 각속도는 대략 테이블 각속도의  $\pm 50\%$  이상 변화시키지 않으므로  $-0.5 \leq (1-R) \leq 0.5$  의 범위가 된다. 따라서  $\zeta$ 의 범위는  $|\zeta| \leq 0.5$  의 영역이 되므로 식(4)와 Taylor series 전개한 식 차이의 오차는  $|\zeta|=0.5$  에서  $\pm 2\%$  이내로 매우 작다.

따라서 식(4), (5)을 통하여 다양한 웨이퍼 크기와 각속도비, 회전중심간 거리의 변화가 기구학적 인 인자에 미치는 영향을 평가할 수 있다.

### 3. 웨이퍼 내의 속도분포

웨이퍼와 패드사이에서 작용하는 마찰력의 크기는 박막과 슬러리 및 패드 사이에 작용하는 전단력의 결과이다. 또한 재료의 제거율은 전단력의 크기에 의존한다. 유체가 혼입된 두 면사이의 미끄럼에서 발생하는 마찰력의 크기는 일반적으로 트라이볼로지 연구결과에서 보이는 바와 같이 상대속도의 크기에 크게 의존한다<sup>5,6</sup>.

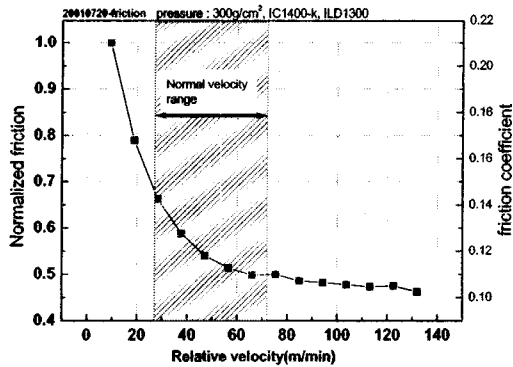


Fig. 2 Friction coefficient variation with velocity

이러한 결과는 CMP 에서도 동일하게 적용된다. Fig. 2 와 3 은 공기동력계(Kistler 9257B)를 이용하여 마찰력을 측정하고 속도에 따른 단위 거리 당 연마량을 나타낸 것이다. 실험은 Rodel 사의 패드 IC1400-k, 슬러리 ILD1300 을 이용하여 Lapmster 사의 LGP-512 CMP 장치로 연마한 결과이다. 가공압력은  $300\text{g/cm}^2$  로 8 인치 열산화막을 1 분간 가공하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 일반적인 속도범위에서 마찰력은 속도의 크기에 반비례한다.

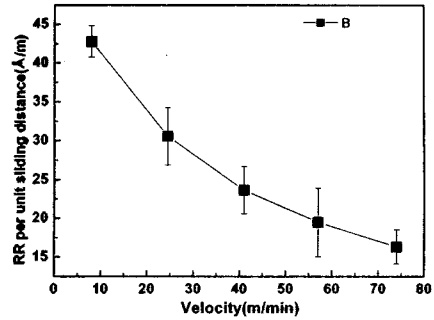
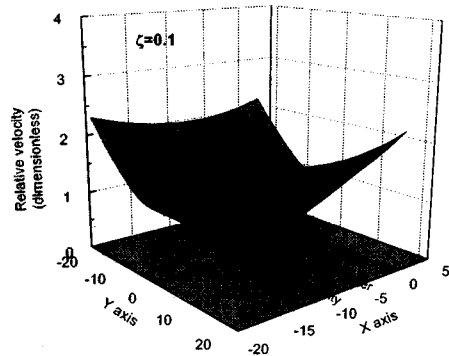


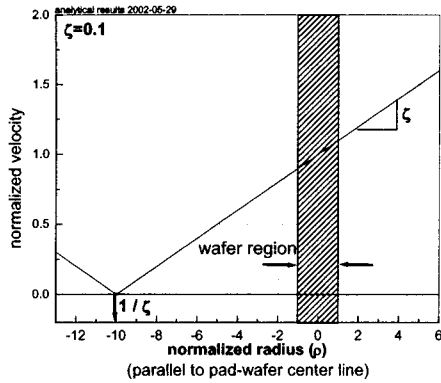
Fig. 3 Removed thickness per unit sliding distance according to relative velocity

또한 일반적인 상대속도의 범위에서 속도가 증가할수록 단위 시간당 연마량은 증가하나 속도에 따라 마찰력이 감소하기 때문에 단위 미끄럼 길이 당 연마율은 속도가 커질수록 작아짐을 Fig. 3 으로부터 알 수 있다. 위의 결과로부터, 한 지점에서의 연마율은 그 지점에서의 마찰력의 영향으로 인하여 상대속도에 의해 결정됨을 알 수 있다. 따라서 웨이퍼 내에서 발생하는 속도의 분포는 웨이퍼 면상에서의 연마상태가 공간적으로 어떻게 지배되는가를 이해하는데 중요한 정보를 준다.

웨이퍼 면상의 속도 분포는 식 4(b)로부터 x-y 공간 좌표상에 나타낼 수 있으며  $\zeta=0.1$  일 때의 결과를 Fig. 4 (a)에 나타내었다. Fig. 4(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 회전형 CMP 장치에서 속도의 분포형태는 원추면 (conical surface)상에 한 부분이 된다. 따라서 웨이퍼와 패드의 각속도가 동일하지 않은 경우, 웨이퍼 내 속도분포는 경사진 형태를 가지게 된다.



(a) Velocity distribution



(b) Cross section view of velocity surface

Fig. 4 Velocity distribution on the wafer surface (a) and its cross section view (b)

식 4(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 속도곡면의 중심점의 위치는 (원추형 속도표면의 중심) “ $\zeta^{-1}$ ” 이 되며, 곡면의 기울기는  $\zeta$ 가 됨을 Fig. 4(b)를 통해 알 수 있다. 즉 속도곡면의 기하학적인 형태가  $\zeta$ 값에 의해 결정 됨을 알 수 있다. 즉, 웨이퍼와 테이블의 각속도비 R 이 1 에서 멀어질수록 (웨이퍼와 패드의 각속도 차이를 크게 하는 경우), 또는 웨이퍼 반경 대 회전중심간 거리 ( $r_w/D$ )가 커질수록(웨이퍼가 대구경화 되거나, 회전 중심간 거리가 짧은 경우) 웨이퍼 내 속도편차가 심해진다는 것을 알 수 있다.

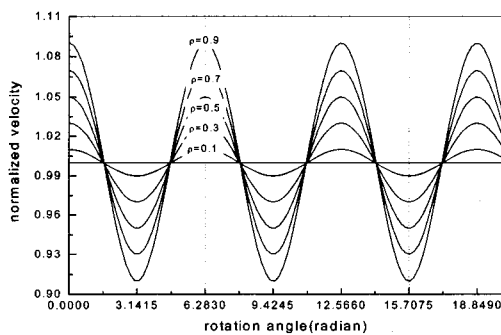


Fig. 5 Periodical velocity variation with respect to radius of wafer  $\zeta=0.1$

그리고 이러한 속도편차로 인하여 웨이퍼 중심을 제외한 부분에서는 속도의 크기가 주기적으로 변하게 된다는 것을 알 수 있다(Fig. 5). 따라서 비록 동일한 연마조건에서 연마하더라도 대구경

웨이퍼로 갈수록 웨이퍼 내 속도편차가 심해져 연마균일도가 나빠질 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 웨이퍼 면상의 속도방향 분포

일반적으로 유체의 유동은 유체와 접촉하고 있는 표면과 유체 사이의 경계지점에서의 접촉조건(경계지점에서의 상대속도=0)에 의해 표면이 움직이는 방향으로 유체의 유동이 영향을 받는다. 즉, 상대속도의 방향 혹은 마찰력의 방향에 영향을 받아 이동방향이 결정된다. 따라서 웨이퍼와 패드가 상대운동하는 조건에서 마찰력의 방향은 슬러리의 유동형태를 결정하는 중요한 요소가 된다. 특히 최소 슬러리막의 두께(minimum film thickness)가 커지며, 패드 돌기(asperity)와의 직접접촉이 작아지는 조건(low pressure, high velocity; i. e. high Stribeck number<sup>5</sup>)에서는 이러한 영향이 더욱 더 커질 것이다. 이러한 웨이퍼 면상에 형성되는 마찰력의 방향은 상대속도 방향을 결정함으로써 구해질 수 있으며 웨이퍼 면상의 임의 지점에서의 속도의 방향은 식 (2-a) 및 (2-b)를 이용하여 구할 수 있다. 간단한 계산에 의해(Appendix c.) 웨이퍼 면상의 상대속도의 순간중심이 지나가는 점이 웨이퍼 위의 위치에 상관없이 “ $\zeta^{-1}$ ”이 됨을 알 수 있다. 즉, Fig. 4 에 그려져 있는 속도표면의 중심과 정확히 일치한다. 따라서 장치상수  $\zeta$ 는 속도표면의 형상과 속도의 방향을 일관적으로 결정한다는 것을 알 수 있다.

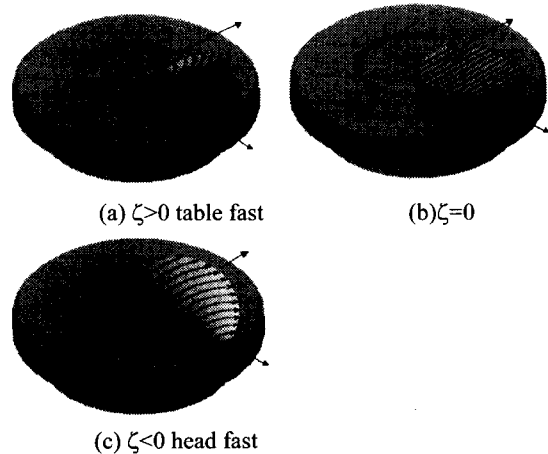


Fig. 6 Velocity distributoin and direction of friction force according to  $\zeta$

여기서  $\zeta$  값이 양인 경우 즉, 테이블의 각속도가 웨이퍼보다 빠른 경우(table fast)에는 Fig. 6(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 패드 바깥쪽의 속도가 높으며, 속도의 방향, 즉 마찰력의 방향은 회전방향과 동일한 방향으로 형성됨을 알 수 있다. 그러나  $\zeta$  값이 음인 경우(Fig. 6(c)) 즉, 웨이퍼의 각속도가 테이블보다 빠른 경우(head fast)에는 마찰력의 방향은 회전 방향과 반대방향으로 형성됨을 알 수 있다. 이러한 두 경우 모두 각속도비 R 값이 1에서 멀어지거나(테이블과 웨이퍼의 각속도 차이가 많이 날수록) 회전중심간 거리 D가 짧아질수록 속도 벡터의 중심이 웨이퍼 중심에 가까워 지므로 ( $-\zeta^{-1} > 0$ ) 이퍼 내에서 상대속도 방향의 변화가 심해지며 동시에 상대속도의 편차도 심해진다는 것을 알 수 있다.

그러나 웨이퍼와 테이블의 각속도가 동일한 경우(Fig. 6(b))에는 속도는 모든 웨이퍼면에서 동일하며, 마찰력의 방향은 모두 동일한 방향, 즉 웨이퍼 중심과 패드 중심을 연결한 직선에 수직한 방향, 즉 (+y) 방향으로 작용함을 알 수 있다. 따라서 마찰력의 측정 시 (+y) 방향의 힘을 측정하는 것이 적절하며, 각속도 비가 같지 않은 경우에도 (+y) 이외의 힘 성분은 서로 상쇄되어 회전 모멘트 성분으로 변하기 때문에 마찰력의 측정 방향에는 영향을 미치지 않는다. 이때 발생한 회전 모멘트는 웨이퍼를 더 빠르게 회전시키려 하거나( $R < 1$ ), 또는 반대로 회전을 저지시키려는( $R > 1$ ) 힘으로 작용하게 된다.

이상의 결과에서 알 수 있듯이 패드의 회전에서 발생하는 원심력과 각속도 비에 따른 마찰력의 방향의 영향으로 인하여 슬러리의 공급상태가 달라질 것으로 예상된다. 즉, 마찰력의 분포형태는 슬러리를 웨이퍼의 내부로 끌어들이는 방향으로 작용하거나(Fig. 6(c)) 혹은 바깥으로 밀어내는 방향의(Fig. 6(a)) 전단력으로 작용하여 슬러리 분포에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

그러나 모든 경우에 있어서 패드 중심에 가까운 부근의 웨이퍼 면에서 슬러리의 공급량이 줄어들 것이라는 것을 예상할 수 있다. 특히  $\zeta > 0$  인 경우에는 마찰력의 방향이 원심력의 방향과 일치하므로 더 많은 슬러리가 웨이퍼 바깥으로 흘러 나갈 수 있음을 알 수 있다. 따라서 적절한 공급 위치를 선정하는 것이 균일한 슬러리 공급에 중요한 역할을 함을 예상할 수 있다.

### 5. 속도분포의 균일도

일반적인 CMP 장치에서 공정최적화를 위해 CMP 장치의 여러 가지 기구학적인 인자(테이블 각속도, 헤드 각속도, 편심 거리)들을 조절하는 경우, 이들의 변화에 따른 상대속도의 크기와 속도의 균일도를 평가하는 것은 연마율의 예측이나 연마균일도를 예측하는데 중요하다. Fig. 4(b)와 일반적인 연마균일도의 정의( $3\sigma$  uniformity)를 이용하면 공정조건에 따른 속도의 균일도를 장치상수  $\zeta$ 에 따라 일반적으로 표현 할 수 있다. Fig. 4(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 속도의 최대값과 최소값은 각각  $1+\zeta$  및  $1-\zeta$ 임을 알 수 있다. 따라서  $3\sigma$  속도 균일도는 아래와 같이 표현된다.

$$NU_{vel}(3\sigma) = \frac{v_{max} - v_{min}}{(v_{max} + v_{min})/2} \times 100\% = 200|\zeta|\%, \quad (6)$$

where  $v_{max} = 1 + \zeta, v_{min} = 1 - \zeta$

또한 속도평균( $v_{avg}$ )과 속도의 표준편차( $\sigma_v$ )를 이용한 속도 균일도는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$NU_{vel}(1\sigma) = \frac{\sigma_v}{v_{avg}} \times 100\% = \frac{100\sqrt{21}|\zeta|}{8 + \zeta^2} (\%) \quad (7)$$

여기서 속도의 평균값과 속도의 표준편차 값은 식 (5)의 적분을 통하여 얻을 수 있으며 Appendix d에 그 계산과정을 나타내었다.

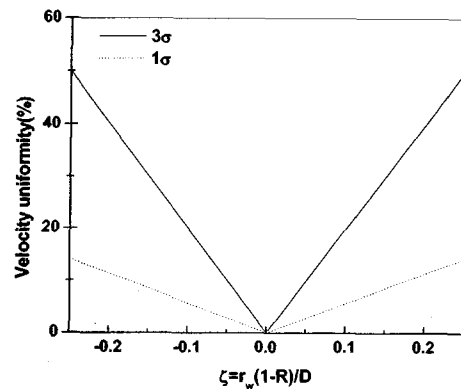


Fig. 7 Velocity uniformity with kinematic number

Fig. 7 에 식 (6), (7)에 대한 결과를 도시하였으며 그림에서 볼 수 있는 바와 같이  $|\zeta| < 0.025$  ( $|\zeta| < 0.087$  for  $1\sigma$ ) 범위 내에서 웨이퍼 내 속도 균일도는 5%이하를 만족한다. 그러나 웨이퍼 내 속도 분포의 균일도와 연마균일도간의 상관관계는 미약할 것으로 생각된다. 왜냐하면 실제 연마량은 Preston 방정식에서 예측하는 바와 같이 전체 연마 시간에 대한 상대 미끄럼 거리(속도의 시간 적분값)에 의존하므로 순간적인 속도분포의 균일도는 전술한 바와 같이 웨이퍼 내 마찰력의 분포와 슬러리 분포에 더 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다. 이에 대한 연구는 아직 진행 중에 있다.

$$v_{avg} = 1 + \frac{\zeta^2}{8} \quad (8)$$

Appendix d 에 나타낸 것과 같이 평균속도( $v_{avg}$ )의 값은 식 (8)과 같으며 실제 상대속도의 값은 평균속도에  $\omega_p D$  값을 곱한 값이 된다. 식 (8)에서 알 수 있는 것은 패드의 각속도( $\omega_p$ )와 편심 거리(D)를 변화시키는 경우 평균속도는 이들 값에 비례한다는 것을 알 수 있다. 반면, 웨이퍼의 각속도( $\omega_w$ )를 변화시키는 경우에는 전체적인 상대속도의 크기에 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 왜냐하면, 웨이퍼의 각속도는  $\zeta$ 값에 내재되어 있으며 그 영향이  $\zeta^2/8$  로 되어 매우 작아지기 때문이다. 이러한 현상은 웨이퍼 전면의 연마율은  $\omega_p D$  값에 지배적으로 영향을 받으며, 웨이퍼의 각속도를 변화시키는 경우에 연마율은 크게 영향을 받지 않음을 말해준다. 이러한 현상은 여러 실험결과와 일치한다<sup>3, 7, 8</sup>.

## 6. 결론

회전형 CMP 장치에 대한 기구학적인 해석을 수행하고 속도분포의 형상과 마찰력의 분포형태, 속도의 균일도 등에 대한 결과를 보였다. 이 논문에서 저자는 웨이퍼와 패드의 회전축간 거리(D), 웨이퍼의 크기( $r_w$ ), 웨이퍼와 패드의 각속도비(R)을 포함하는 무차원량인  $\zeta$  를 유도하고 이 값을 “장치 상수”로 정의하였다. 또한 웨이퍼 내의 속도분포, 마찰력 분포의 형태, 속도분포의 균일도 등이 모두 “장치 상수”에 의해 일관적으로 표현 됨을 보였다. 따라서 “장치 상수”값의 크기, 부호에 따라 속도 및 마찰력 분포의 형태, 속도균일도 등에

대한 것을 직관적으로 이해할 수 있음을 알 수 있다. 또한 상대속도의 크기는 패드의 각속도와 편심 거리에 비례하나, 웨이퍼의 각속도만을 변화시키는 것은 전체적인 상대속도에 미약한 영향을 미치기 때문에 연마율에 큰 영향을 미치지 않는다.

이상과 같은 해석결과는 웨이퍼의 크기가 커지고 평탄화 요구조건이 점점 엄격해 질수록 CMP 공정에 대한 이해를 돕는데 도움이 될 것이다.

## 후 기

This research has been partially executed by the National Research Laboratory(NRL) project, sponsored by the Ministry of Science and Technology.

## 참고문헌

1. Preston, F. W., “The Theory and Design of Plate Glass Polishing Machines,” J. of Soc. of Glass Technology, Vol. 11, No. 44, pp. 227-228, 1927.
2. Hocheng, H., Tsai, H. Y., Tsai, M. S., “Effects of Kinematic Variables on Nonuniformity in Chemical Mechanical Planarization,” J. of Machine Tools & Manufacture, Vol. 40, pp. 1651-1669, 2000.
3. Lin, C. F., Tseng, W. T. and Feng, M. S., “Process Optimization and Integration for Silicon Oxide Intermetal Dielectric Planarized by Chemical Mechanical Polish,” J. of Electrochem. Soc., Vol. 146, No. 5, pp. 1984-1990, 1999.
4. Hansen, D. A. and Moloney, G., “The Effect of Carrier Oscillation on Within Wafer Non-Uniformity of CMP Removal Rate,” 6<sup>th</sup> CMP-MIC, p. 331, 2001.
5. Stachowiak G.W., Batchelor A.W., Engineering Tribology, Tribology series24, Elsevier, NY, p. 219, 1993.
6. Kim, H. J., Kwon, D. H., Jeong, H. D., “Tribological Aspects in Chemical Mechanical Polishing,” 7<sup>th</sup> CMP-MIC, pp. 201-208, 2002.
7. Modak, A., Monteith, P. and Parekh, N., “Components of Within-Wafer Non-Uniformity in a Dielectric CMP Process,” 2<sup>nd</sup> CMP-MIC, pp. 169-172, 1997.
8. Pangrle, S. K., Salugsugan, I., Dangca, A., et. al. “Polishing Performance of The Rodel EX2000 Pad,” 1<sup>st</sup> CMP-MIC, pp. 47-54, 1996.

## Appendix

### a. Deriving velocity equation

$$\begin{aligned}
 \vec{v}_{w/p} &= \vec{v}_w - \vec{v}_p \\
 &= \vec{\omega}_w \times \vec{r} - \vec{\omega}_p \times \vec{L} \\
 &= \vec{\omega}_w \times \vec{r} - \vec{\omega}_p \times (\vec{D} + \vec{r}) \\
 &= -\vec{\omega}_p \times \vec{D} - (\vec{\omega}_p - \vec{\omega}_w) \times \vec{r} \\
 &= -\omega_p \hat{k} \times D \hat{i} - (\omega_p - \omega_w) \hat{k} \times r \{ \cos(\omega_w t) \hat{i} + \sin(\omega_w t) \hat{j} \} \\
 &= r(\omega_p - \omega_w) \sin(\omega_w t) \hat{i} - \{ r(\omega_p - \omega_w) \cos(\omega_w t) + \omega_p D \} \hat{j}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \therefore v_x &= r(\omega_p - \omega_w) \sin(\omega_w t) \\
 &= \omega_p D \frac{r}{r_w} \left\{ \frac{r_w}{D} \left( 1 - \frac{\omega_w}{\omega_p} \right) \right\} \sin(\omega_w t) \\
 &= \omega_p D \rho \zeta \sin \phi \\
 v_y &= -r(\omega_p - \omega_w) \cos(\omega_w t) + \omega_p D \\
 &= -\omega_p D \left[ \frac{r}{r_w} \left\{ \frac{r_w}{D} \left( 1 - \frac{\omega_w}{\omega_p} \right) \right\} \cos(\omega_w t) + 1 \right] \\
 &= -\omega_p D (\rho \zeta \cos \phi + 1)
 \end{aligned}$$

$$\text{where } \rho = \frac{r}{r_w}, \quad \zeta = \frac{r_w}{D} \left( 1 - R \right), \quad R = \frac{\omega_w}{\omega_p}, \quad \phi = \omega_w t$$

therefore

$$v_{w/p} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \omega_p D \sqrt{(\rho \zeta)^2 + 2\rho \zeta \cos \phi + 1}$$

then, the normalized velocity equation divided by velocity at the wafer center,  $\omega_p D$ , is

$$\begin{aligned}
 v_w(\rho, \phi) &= \sqrt{(\rho \zeta)^2 + 2\rho \zeta \cos \phi + 1} \\
 \text{or } v_w(x, y) &= \sqrt{(\zeta x + 1)^2 + (\zeta y)^2} \\
 \text{where } \rho^2 &= x^2 + y^2, \quad x = \rho \cos \phi
 \end{aligned}$$

### b. Taylor series expansion of velocity equation

$$v_w(\zeta) = v_w(0) + v_w'(0)\zeta + \frac{v_w''(0)}{2}\zeta^2 + H.O.T$$

$$v_w(0) = 1$$

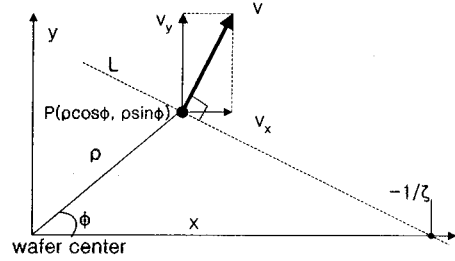
$$v_w'(0) = \rho \cos \phi$$

$$v_w''(0) = \rho^2 \sin^2 \phi$$

$$\begin{aligned}
 \therefore v_w &= 1 + \rho \zeta \cos \phi + \frac{\rho^2 \zeta^2}{2} \sin^2 \phi + H.O.T \\
 &\cong 1 + \rho \zeta \cos \phi + \frac{\rho^2 \zeta^2}{2} \sin^2 \phi
 \end{aligned}$$

### c. Direction of velocity or friction force

The instantaneous center of vector is located on the arbitrary point of line L that is perpendicular to the direction of velocity vector.



the line L is determined as

$$y - \rho \sin \phi = \frac{\rho \zeta \sin \phi}{\rho \zeta \cos \phi + 1} (x - \rho \cos \phi)$$

As perceived by the equation above, regardless of position on the wafer, all of the instantaneous centers of velocity vector intersect with x-axis at the value “ $-\zeta^{-1}$ ”, which is the same position of center of velocity surface.

### d. Average velocity and velocity deviation

$$\begin{aligned}
 v_{avg} &= \frac{1}{\pi \rho^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\rho} v_w(\rho, \phi) \rho d\rho d\phi \\
 &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \left( 1 + \rho \zeta \cos \phi + \frac{\rho^2 \zeta^2}{2} \sin^2 \phi \right) \rho d\rho d\phi \\
 &= 1 + \frac{\zeta^2}{8}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma^2 &= \frac{1}{\pi \rho^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\rho} (v_w - v_{avg})^2 \rho d\rho d\phi \\
 &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \left( \rho \zeta \cos \phi + \frac{\rho^2 \zeta^2}{2} \sin^2 \phi - \frac{\zeta^2}{8} \right)^2 \rho d\rho d\phi \\
 &= \frac{21\zeta^2}{64} \\
 \therefore \sigma &= \frac{|\zeta| \sqrt{21}}{8}
 \end{aligned}$$