

# 상대속도를 고려한 CMP 공정에서의 연마제거율 모델

김기현\* · 오수익\*\* · 전병희\*\*\*

(2004년 2월 10일 접수)

## MRR model for the CMP Process Considering Relative Velocity

K. H. Kim, S. I. Oh and B. H. Jeon

### Abstract

Chemical Mechanical Polishing(CMP) process becomes one of the most important semiconductor processes. But the basic mechanism of CMP still does not established. Slurry fluid dynamics that there is a slurry film between a wafer and a pad and contact mechanics that a wafer and a pad contact directly are the two main studies for CMP. This paper based on the latter one, especially on the abrasion wear model. Material Removal Rate(MRR) is calculated using the trajectory length of every point on a wafer during the process time. Both the rotational velocity of a wafer and a pad and the wafer oscillation velocity which has omitted in other studies are considered. For the purpose of the verification of our simulation, we used the experimental results of S.H.Li et al. The simulation results show that the tendency of the calculated MRR using the relative velocity is very similar to the experimental results and that the oscillation effect on MRR at a real CMP condition is lower than 1.5%, which is higher than the relative velocity effect of wafer, and that the velocity factor, not the velocity itself, should be taken into consideration in the CMP wear model.

**Key Words** : Chemical Mechanical Polishing, Wear Model, Oscillation Effect, Material Removal Rate

### 1. 서론

화학적 기계연마 공정(CMP)은 반도체 웨이퍼를 수 천 Å/min의 MRR로 2µm이내의 TTV(Total Thickness Variable) 조건을 만족시키는 초정밀 광역 평탄화 기술이다.<sup>(1)</sup> 일반적인 CMP 방법은 서로 다른 회전 중심을 갖고 동일한 방향으로 회전하는 웨이퍼와 다공성 패드 사이에 연마액인 슬러리를 넣어 연마하는 것이다. CMP 공정기술은 1990년대 중반에 개발되었으나, 아직까지 연마 메커니즘이 완벽하게 밝혀지지 않았다. 따라서 장비를 최적화하기 위해 실험에 의존적일 수밖에 없으나,

이러한 방법은 막대한 자금과 노력뿐만 아니라 상당한 시간을 필요로 하기 때문에, 앞으로 가속될 연마대상 재료의 변화 및 다양화 속도에 발맞출 수 없다.<sup>(2)</sup> 이러한 배경에 의해 이론적인 접근에 바탕을 둔 공정 시뮬레이션이 절실히 필요하게 되었고, 실제 이와 관련한 많은 연구들이 있었다. 연구 방향은 크게 두 가지로 나뉘는데, 하나는 웨이퍼와 패드 사이에 슬러리 막이 존재한다는 fluid dynamics<sup>(3-5)</sup>에 의한 연구이고 다른 하나는 웨이퍼와 패드가 직접 접촉한 상태에서 연마가 진행된다는 contact mechanics에 의한 연구이다.

본 논문은 contact mechanics에 바탕을 두었으며,

\* 서울대학교 기계항공공학부 미세성형연구소

\*\* 서울대학교 기계항공공학부

\*\*\* 인덕대학

슬러리 입자에 의한 abrasion wear<sup>(6-10)</sup>만에 의해 연마가 진행된다고 가정하였다. 대부분의 기존 abrasion wear model 에서 웨이퍼 위의 모든 위치의 패드에 대한 상대속도가 동일하다는 가정하에 MRR 을 예측하였는데, 이는 실제 CMP공정 조건과 상이하다. 동일한 상대속도 조건은 웨이퍼와 패드의 각속도가 같고 웨이퍼의 진동(oscillation) 운동이 없는 경우에만 해당되나, 실제 CMP 공정에서는 각각의 각속도가 다르고 진동운동이 존재한다. 따라서 상대속도는 웨이퍼의 위치에 따라 그리고 공정의 진행 시간에 따라 변한다. Kyungyoon Noh et al.<sup>(11)</sup> 등의 논문에 상대속도의 차이에 대한 언급이 있으나, 진동 효과를 고려하지 않았으며 또한 웨이퍼 전체에 대한 MRR과의 관계를 짓지 못하였다. 이외에도 상대속도에 대한 연구가 있었으나, Non-uniformity와 관계를 지으려 했을 뿐이고 웨이퍼 전체의 MRR과의 관계를 도출하지 못하였다.

본 논문에서는 CMP 공정 동안 웨이퍼 각 위치에서의 패드에 대한 상대 궤적의 길이를 구하고 이를 이용하여 웨이퍼의 전체 면적에 대한 MRR 을 예측하였다. 웨이퍼와 패드의 각속도뿐만 아니라 진동의 영향도 고려하였다. 그리고 실험적인 뒷받침을 위하여 S.H.Li et al.<sup>(12)</sup>의 실험 결과와 비교하였는데, 예측한 MRR의 경향이 실험에서와 상당히 유사한 것을 확인하였다. 또한 기존의 마모 모델에서 웨이퍼와 패드 사이의 상대속도를 동일한 값으로 보고 단순히 이 값을 곱하여 MRR을 구하였으나, 시뮬레이션 결과 상대속도에 종속되는 MRR 인자가 있음을 확인하였다.

## 2. 이론

### 2.1 궤적의 길이

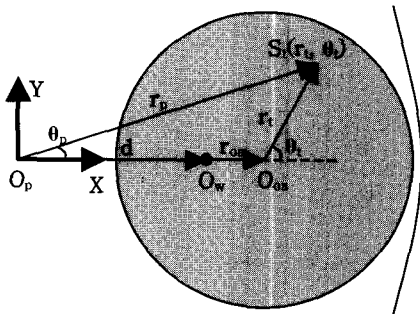


Fig. 1 Schematic diagram of the coordinate system

패드 중심에 대한 웨이퍼 위의 한 점의 상대 위치는 Fig. 1을 참조하여 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$\overline{O_p S_t} = \overline{O_p O_w} + \overline{O_w O_{os}} + \overline{O_{os} S_t} \quad (1)$$

상대속도는 웨이퍼의 원주 방향에 대해 독립적이고 한 주기에서의 값이 동일하므로 반경방향에 대해서만 고려하면 식 (2)와 같다. 진동의 중심  $O_{os}$  에 대한 시간  $t$  에서의 상대좌표는  $S_t(r, \theta_t)$ 이고 CMP process time 은  $t_p$ 로 표기하였다.

$$v_x(r, t) = (d + r_{os} \sin \omega_{os} t) \omega_p \sin \theta_p - r_t (\omega_w - \omega_p) \sin \theta_t + r_{os} \omega_{os} \cos \omega_{os} t \cos \theta_p \quad (2)$$

$$v_y(r, t) = -(d + r_{os} \sin \omega_{os} t) \omega_p \cos \theta_p + r_t (\omega_w - \omega_p) \cos \theta_t + r_{os} \omega_{os} \cos \omega_{os} t \sin \theta_p$$

$$\left( \begin{array}{l} \theta_p = -\omega_p t, \theta_t = (\omega_w - \omega_p) t \\ 0 \leq t \leq t_p, 0 \leq r \leq r_{wafer} \end{array} \right)$$

### 2.2 재료연마율의 계산

MRR을 계산하기 위해서 두 가지 기본적인 가정을 하였다. 첫째, CMP 공정 중에 웨이퍼 전면에 항상 동일한 압력이 작용한다. 둘째, 웨이퍼 상의 한 점에서 연마되는 길이는 그 부분이 CMP 공정 동안 패드 위를 지나는 이동 거리에 비례하며, 다른 변수에 독립적이다. 이러한 가정에 따르면, 웨이퍼 위의 한 점  $(r, 0)$ 에서의 MRR 은 식 (3)과 같다. 여기서  $K$ 는 비례상수,  $l(r)$ 은 웨이퍼 위의 한 점이 공정시간 동안 패드 위를 지나는 궤적의 길이,  $dA$ 는 슬러리 입자가 웨이퍼를 긁기 시작할 때 생기는 스크래치의 겉보기 면적이다.

$$MRR(r) = K \times l(r) \times dA \quad (3)$$

웨이퍼의 지름은 200~300mm 이고 슬러리 입자는 수 십~수 백 nm 이므로, 웨이퍼의 MRR 은 식 (4)와 같이 식 (3)을 웨이퍼의 면적으로 면적분하여 얻어진 값으로 생각할 수 있다.

$$MRR = \int_{A_{wafer}} Kl(r) dA \quad (4)$$

$$= 2\pi K \int_0^{r_{wafer}} \int_0^{t_p} r_w \sqrt{v_x^2 + v_y^2} dt dr$$

### 3. 결과

#### 3.1 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에서는 웨이퍼의 반경 방향,  $\omega_w/\omega_p$ ,  $\omega_{os}/\omega_p$ , 그리고 웨이퍼와 패드의 중심간의 거리에 따른 MRR 분포를 계산하였다.

##### 3.1.1 웨이퍼의 반경 방향에 따른 MRR의 변화

Fig. 2는 웨이퍼 반경 방향에 대한 MRR 분포를 보인 것으로,  $r=0$ 에서의 MRR에 대한 상대적인 값을 나타낸 것이다. 점선은 진동이 없는 경우이고, 실선은 진동을 있는 경우이다. Fig. 2는 CMP 공정 시간 동안 케직의 길이의 상대 분포 또는 평균속도의 상대분포와 동일한 그래프이다.  $|(\omega_p - \omega_w)/\omega_p|$  값이 같은 경우 동일한 곡선을 보인다. 즉,  $\omega_w > \omega_p$  일 때와 같은 MRR을 갖는 경우가  $\omega_w < \omega_p$  일 때에도 항상 존재한다는 것을 의미한다.  $\omega_w/\omega_p=1.5$ 일 때 웨이퍼 중심과 웨이퍼 가장자리 부분의 MRR의 차이는 약 3% 정도 이고, 실 공정 조건과 유사한  $\omega_w \approx \omega_p$ 인 조건에서는 1% 미만이다. 진동에 의한 MRR의 영향은  $\omega_{os} > \omega_p$ 인 경우 MRR값이 감소하고,  $\omega_{os} < \omega_p$ 인 경우 증가한다.

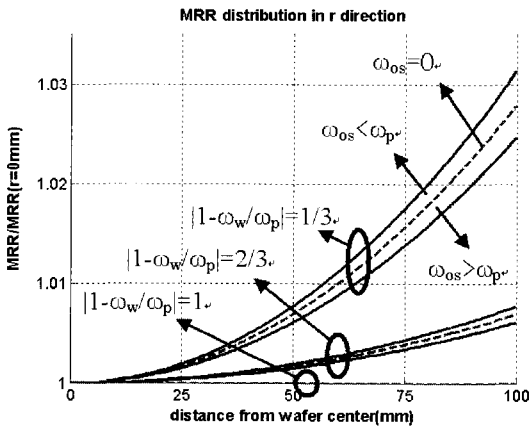


Fig. 2 MRR distribution in radius direction

##### 3.1.2 $\omega_w/\omega_p$ 와 $\omega_{os}/\omega_p$ 에 따른 MRR의 변화

Fig. 3은  $\omega_p$ 를 고정시키고  $\omega_w$ 를 변화해갈 때  $\omega_w/\omega_p$  값에 따른 MRR의 분포를 보인 그래프이고,  $\omega_w/\omega_p=1$ 에서의 MRR에 대한 비 값을 나타내었다.

비교를 위하여 진동이 없는 경우를 굵은 점선으로 나타내었다.  $\omega_w/\omega_p=1$ 인 경우에 최소의 MRR을 갖고 이를 축으로 대칭형상이다. Fig. 2에서와 마찬가지로  $\omega_{os}/\omega_p > 1$ 인 경우에 MRR의 비 값이 작아지고,  $\omega_{os}/\omega_p < 1$ 인 경우에 MRR의 비 값이 커진다.

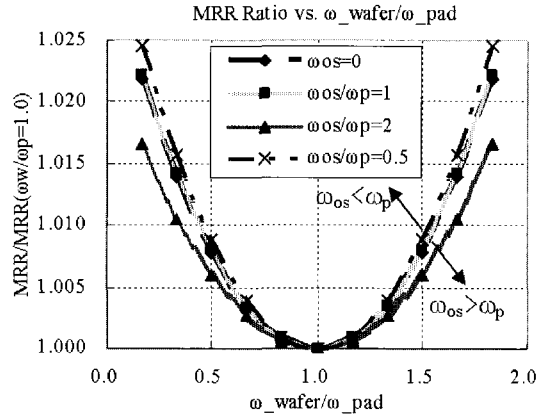


Fig. 3 MRR distribution according to wafer velocity ratio

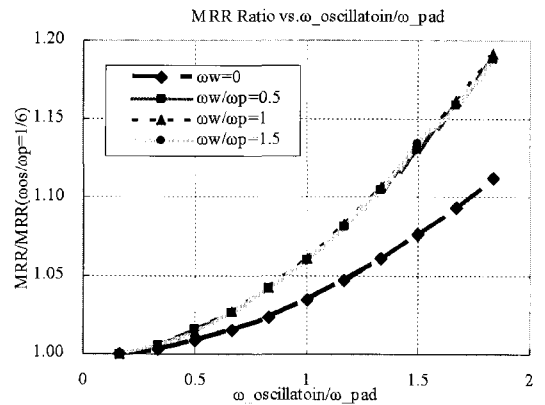


Fig. 4 MRR distribution according to oscillation velocity ratio

Fig. 4는  $\omega_p=60\text{rpm}$ ,  $d=200\text{mm}$ 인 경우에  $\omega_{os}$ 을 10~110rpm으로 변화하면서 MRR의 경향을 보인 그래프이다. y 축은  $\omega_{os}=10\text{rpm}$  일 때의 MRR에 대한 비 값을 의미한다. 비교를 위하여 웨이퍼가 회전하지 않는 경우를 굵은 색 점선으로 나타내었다.  $\omega_w/\omega_p$  값이 1 근처인 실제 공정 조건에서는  $\omega_w/\omega_p$  값에 무관하게 그래프의 양상이 동일한 것을 볼 수 있다. 참고로  $\omega_w/\omega_p$ 의 값이 1/60정도일 때  $\omega_w=0$ 인 그래프에 접근하는 것을 확인하였다.

진동 각속도가 증가할수록 MRR이 점차적으로 증가하는데,  $\omega_{os}/\omega_p$  값이 1과 2인 경우 각각 약6% 와 20% 이상 MRR이 증가한다.

### 3.1.3 웨이퍼와 패드 중심간의 거리에 따른 MRR의 변화

Fig. 5는 웨이퍼와 패드의 회전 중심 간의 거리,  $d$ 에 따른 MRR의 변화를 그래프로 보인 것이다. 비교를 위하여  $d=100\text{mm}$ 인 경우의 MRR로 각각의 MRR을 나누었고,  $\omega_{os}=0$ 인 경우의 그래프를 가는 점선으로 나타내었다.  $\omega_{os}/\omega_p$ 의 값이 0.5에서 1.5로 커질 때 MRR이 작아진다.  $d$ 값이 100mm에서 200mm로 100% 증가했을 경우, 진동이 없는 조건에서는 MRR이 약 100% 증가하지만,  $\omega_{os}/\omega_p$  값이 0.5, 1.5인 경우에는 약 70%, 약 50% 정도만 증가한다.

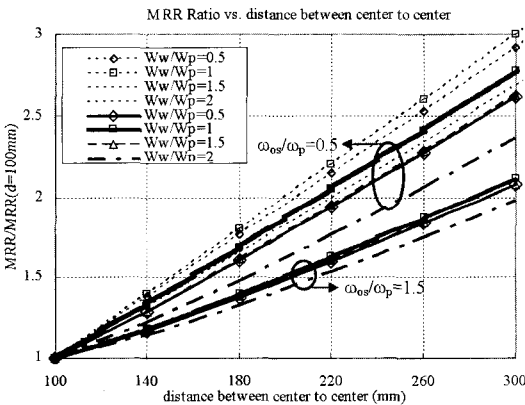


Fig. 5 MRR distribution according to distance between wafer center and pad center

### 3.2 실험값과의 비교

시뮬레이션의 결과를 검증하기 위하여 Chemical Mechanical Polishing in Silicon Processing<sup>(1)</sup>에 소개된 S.H.Li et al.<sup>(12)</sup>의 실험 결과와 비교하였다. 실험은 IC1400 패드와 IC1000-SubaIV 패드에서 5psi, 7psi, 9psi의 압력 조건으로 행해졌고, 각 경우에서의 웨이퍼와 패드의 각속도 조건이 (25rpm, 36rpm), (39rpm, 36rpm), (25rpm, 20rpm), (39rpm, 20rpm)일 때의 MRR 값을 측정하였다. Fig. 6은 실험 결과와 본 논문에서 계산된 MRR을 비교한 그래프로, 웨이퍼와 패드의 각속도 비 값에 대한 MRR의 비 값을 나타낸 것이다. MRR의 비 값은 웨이퍼와 패드의 각속도 비가 1.25인 경우의 MRR에 대한 상

대 값을 의미한다.

9psi IC1000-SubaIV에서의 처음 데이터가 나머지 경우와 크게 다른 것을 확인 할 수 있는데, 이는 패드나 슬러리의 교체 또는 웨이퍼의 상태 등의 변수로부터 오는 실험 상의 오차라고 판단된다. 실험 데이터 값이 충분히 많지 않으나, 동일한 패드에서 압력이 높을수록 절대적인 MRR은 커지지만 상대적인 MRR의 경향은 큰 영향을 받지 않음을 볼 수 있다. 이는 슬러리 입자 하나 당 abrasion wear 하는 능력은 동일하고 압력이 높을수록 마모에 참여하는 입자의 개수가 늘어난다는 contact mechanics wear model을 뒷받침하는 결과이기도 하다.

실험에서 진동 여부와 웨이퍼와 패드의 중심간의 거리에 대한 언급이 없었기 때문에  $\omega_{os}=0$ ,  $d=200\text{mm}$ 로 하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과는 패드의 속도가 동일한 경우 실험 결과와 상당히 유사하다. 그러나 패드의 각속도가 20rpm에서 36rpm으로 80% 증가한 경우에는 약 13% 정도 시뮬레이션 값이 크게 나왔다.

기존의 CMP 마모 모델에서는 MRR이 웨이퍼와 패드의 상대속도에 단순히 비례할 뿐이고 속도에 종속된 다른 인자는 없다. 만일 마모 모델이 맞다면 Fig. 6에서 실험값에 의한 그래프가 시뮬레이션으로부터 얻은 그래프와 동일해야 할 뿐만 아니라 pad가 바뀐 실험에 대해서도 동일한 그래프를 나타내야 한다. 따라서 Fig. 6에 보인 결과는 패드의 각속도 또는 웨이퍼와 패드의 상대속도에 종속되는 MRR 인자가 있다는 것을 의미한다.

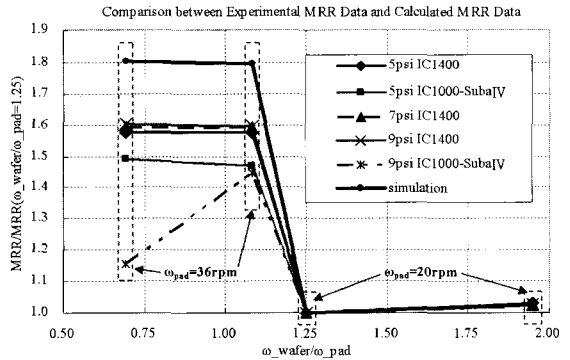


Fig. 6 Comparison between experimental MRR data of S.H.Li et al.<sup>12</sup> and calculated MRR data

#### 4. 결론

CMP 공정 중 웨이퍼 위의 모든 위치에서의 패드에 대한 상대속도를 고려하여 웨이퍼의 전체면적에 대한 MRR을 예측하였다. 기존의 연구에서 간과하였던 웨이퍼와 패드의 변화하는 상대속도 조건과 웨이퍼의 진동 운동에 의해서 얻어지는 MRR의 변화를 고려하였다. 진동에 의한 MRR의 변화는  $\omega_{os}/\omega_p=1$ 을 기준으로 증감이 달리 나타났다.  $\omega_w/\omega_p \approx 1$ 인 경우,  $\omega_{os}/\omega_p$ 이  $\omega_{os}=0$ 인 경우로부터 그 값이 증가할수록 MRR은 진동이 없는 경우와 비교하여 그 차이가 점점 커지지만, 그 값은 수 %에 그친다. 예로  $\omega_{os}/\omega_p \approx 0.5$ 인 경우에서의 MRR의 차이는 1.5% 미만이다. 시뮬레이션 결과에 의하면 MRR의 변화에 영향을 미치는 인자들의 순서는  $d > \omega_{os}/\omega_p > \omega_w/\omega_p$  이다.

S.H.Li et al.<sup>(12)</sup>의 실험결과와 비교하였는데, 시뮬레이션 결과의 전체적인 양상이 실험 결과와 상당히 유사했다. 좀 더 자세히는 패드의 속도가 동일한 경우 실험 결과와 거의 동일한 값의 변화를 보였고, 패드의 속도가 80% 증가한 경우 시뮬레이션에 의한 값이 약 13% 크게 예측 되었다. 마모 모델에 의하면 실험 결과가 시뮬레이션 결과와 동일해야하는데, 그렇지 못하다는 것은 상대속도에 종속적인 인자가 존재한다는 것을 의미한다.

본 논문은 CMP공정에서 oscillation의 효과를 포함하여 MRR을 예측하였고, 마모모델에서 MRR을 예측할 경우 단순히 일정한 상대속도를 곱하는 기존의 방법에는 한계가 있음을 확인하였다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중 한국기계연구원이 주관하고 있는 고기능 초미세 광열유체 마이크로부품 기술 개발 사업의 세부과제로서 수행 중이며 이에 관계자 여러분들께 감사의 말씀을 올립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Shin hwa li et al., 2000, "Chemical Mechanical Polishing in Silicon Processing", Academic Press, Vol. 63.
- (2) T. Doi, T. Kasai et al, 1998, "半導體平坦化 CMP 技術," 株式會社 工業調查會".
- (3) Runnels, Scott R. et al, 1994, "Tribology Analysis of Chemical-Mechanical Polishing", J. Electrochem. Soc., Vol. 141, pp. 1698~1701.
- (4) S. S. Park et al, 2000, "Hydrodynamic Analysis of Chemical Mechanical Polishing Process", Tribology International, Vol. 33, pp. 723~730.
- (5) Thakurta, Dipto G. et al, 2002, "Three-Dimensional Wafer-Scale Copper Chemical-Mechanical Planarization Model," Thin Solid Films, (article in press).
- (6) J. Larsen-Bass et al, 1999, "Probable role of abrasion in chemo-mechanical polishing of tungsten", Wear, Vol. 233-235, pp. 647~654.
- (7) Jiangeng Luo et al, 2001, "Material Removal Mechanism in chemical Mechanical Polishing: Theory and Modeling", IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing, Vol. 14, pp. 112~132.
- (8) Goodarz Ahmadi et al, 2001, "A model for mechanical wear and abrasive particle adhesion during the CMP process", J. Electrochem. Soc, Vol. 148, pp. G99~G109.
- (9) Yongwu Zhao et al, 2002, "A micro-contact and wear model for CMP of silicon wafers", Wear, Vol. 252, pp. 220~226.
- (10) Kuide Qin et al, 2003, "A Chemical Mechanical polishing model incorporating both the chemical and mechanical effects", Thin Solid Films, article in press.
- (11) Kyungyoon Noh et al, 2003, "A Mechanical Model for Erosion in Copper Chemical-Mechanical Polishing", CMP-MIC, p. 445.
- (12) S. H. Li, J. Ling et al, 1996, Proceedings of Advanced Metallization and interconnect Systems for USLI Applications, p. 567.