유체윤활을 고려한 화학기계적 연마 공정에서의 연마대상과 패드 사이의 유동장 해석

김기현*(서울대 대학원 기계항공공학부), 오수익(서울대 기계항공공학부), 전병희(인덕대학)

Hydrodynamic Lubrication Model for Chemical Mechanical Planarization

K. H. Kim(School of Mechanical and Aerospace Eng., SNU), S. I. Oh(School of Mechanical and Aerospace Eng.. SNU), B. H. Jeon(Induk Institute of Technology)

ABSTRACT

The chemical mechanical planarization (CMP) process is a method of planarizing semiconductor wafers with a high degree of success. However, fundamental mechanisms of the process are not fully understood. Several theoretical analyses have been introduced, which are focused on kinematics, von Mises stress distributions and hydrodynamic lubrication aspects. This paper is concerned with hydrodynamic lubrication theory as the chemical mechanical planarization model; the three-dimensional Reynolds equation is applied to predict slurry film thickness and pressure distributions between the pad and the wafer. This paper classifies geometry of wafer into 3 types and focuses on the differences between them.

Key Words : Chemical mechanical planarization (화학적 기계연마), Hydrodynamic lubrication (유체윤활), FDM (수치해석)

1. 서론

반도체 공정 중의 하나인 화학적 기계연마 공정 (CMP: Chemical Mechanical Planarization/ polishing)은 반도체 웨이퍼의 광역 평탄화를 가능하게 하는 핵심 공정기술이다. 이 공정기술은 1990 년대 중반에 ㈜IBM 에 의해 개발된 이후 지속적으로 성장하여 왔으나, 그 역사가 다른 장비에 비해 비교적 짧고 공정 진행 시 무수히 많은 공정 변수가 사용되기 때문에 그 기본적인 메커니즘이 완벽하게 이해되지 않고 있으며, 때문에 많은 개선의 여지를 남기고 있다. 그럼에도 불구하고 장비가 수~수십 억 원 정도의 고가이기 때문에, 반도체 관련 회사 및 극히 일부의 연구소를 제외하고는 CMP 장비를 통한 실험적 방법으로 장비 성능의 향상을 꾀하기 매우 힘든 것이 현실이다. 이에 학계에서는 여러 가지 이론적 모델을 이용하여 CMP 공정 시 웨이퍼와 패드 사이의 유동장의 속도와 압력분포를 예측함으로써 [1-3], CMP 공정 결과로 얻어지는 오차의 원인을 밝혀내는 등의 공헌을 해 나가고 있다. 이론적 방법을 이용한 시뮬레이션의 결과는 실제 실험에서 얻어지는 결과만큼 정확하지는 않으나, 장비 setup 의 최적화를 위한 압력, 속도, 슬러리의 점도 등에 대한 정성적인 경향을 제시해주기 때문에 그 결과는 매우 중요하다. 이러한 모델들은 크게 세 가지에 초점을 맞추고 있는데, kinematics 와 von Mises 응력 분포 및 유체윤활 (hydrodynamic lubrication[4-8])이 그것이다. 이 중에서 유체 윤활을 이용한 모델은 CMP 공정을 해석할 수 있는 좋은 이론적 방법으로 생각된다. 이에 본 논문에서는 유체 윤활 이론을 FDM 모델로 선정하고, 원통좌표계에서의 3 차원 Reynolds 방정식[8]을 통하여 CMP 공정 시 3 가지 형태의 웨이퍼의 기하학적 형상에 따른 웨이퍼와 패드 사이의 유동장을 해석하였다.

2. 삼차원 윤활 모델

Fig 1. 은 해석 모델을 위한 웨이퍼와 패드의 개략도이다. 본 논문에서는 유체윤활 해석 위해 몇 가지 가정을 하였다.: 웨이퍼와 패드는 강체이고 매끈한 면을 갖는다.: 경계에서 속도의 미끄러짐이 없다.: slurry 는 Newtonian 유체이다.: 점도는 일정하

다.; 유막 두께 방향으로의 압력 변화는 없다.; 유체의 체적력과 관성력은 무시한다. 등. 이러한 가정을 이용하여 원통좌표계에서의 Navier-Stokes 방정식을 단순화 하여 식 (1)을 얻는다.

$$-\frac{1}{r}\frac{\partial P}{\partial \theta}+\mu\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}=0,-\frac{\partial P}{\partial r}+\mu\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}=0 \quad (1)$$

식 (1)에 식 (2)의 경계조건을 대입하여 적분하면, 반경방향과 원주방향의 속도성분을 얻게 된다.

$$u=(r+d\cos\theta)\omega_p, w=d\sin\theta\omega_p(z=0)$$
$$u=r\omega_w, w=0(z=h) \quad (2)$$

구해진 속도성분을 원통좌표계에서 단순화 된 연속방정식인 식 (3)에 대입하여 정리하면,

$$\frac{\partial rw}{\partial r}+\frac{\partial u}{\partial \theta}=0 \quad (3)$$

식 (4)의 삼차원 원통좌표계에서의 일반화된 Reynolds 방정식을 얻게 된다.

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(rh^3\frac{\partial P}{\partial r}\right)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(h^3\frac{\partial P}{\partial \theta}\right)$$
$$=6\mu rd\sin\theta\cdot\omega_p\frac{\partial h}{\partial r}+6\mu\left\{(r+d\cos\theta)\omega_p-r\omega_w\right\}\frac{\partial h}{\partial \theta} \quad (4)$$

식 (4)를 지배방정식으로 웨이퍼에 작용하는 압력분포를 수치해석의 방법으로 구하였다. 이 때, 수치 해석상의 오차는 식 (5)의 값에 비례하므로, 수치해석상의 오차를 줄이면서 적당한 해석시간을 갖게 하기 위해 격자는 원주 방향으로 50 등분, 반지름 방향으로 15 등분하였다.

$$\frac{\Delta\theta}{2}-\sin\frac{\Delta\theta}{2} \quad (5)$$

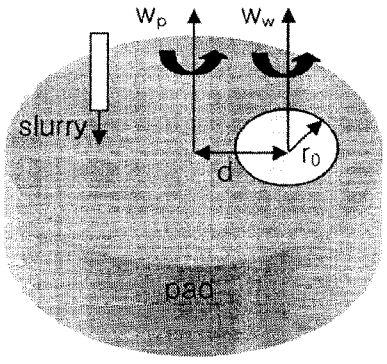

Fig. 1 Schematic representation of model

웨이퍼의 기하학적 형상은 Fig. 2 에 보였다. 대부분의 논문에서 type2 의 형상을 채택하고 dome 의 높이를 5~10um 정도로 정하고 있으나, 실제 CMP 공정 시 웨이퍼의 기하학적 형상이 type2 와 같이 된다는 검증된 결과는 없다. type3 은 retainer ring 을 고려한 형상이다. 최근 CMP 장비의 carrier 부분은 retainer ring 과 웨이퍼와의 높이 차를 없애는 방향으로 수정되고 있는데, type3 은 이를 염두 해 둔 모델이다.

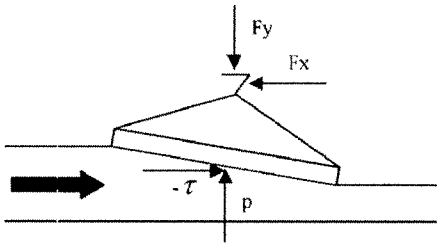

Fig. 2(a) Schematic diagram of type2 model

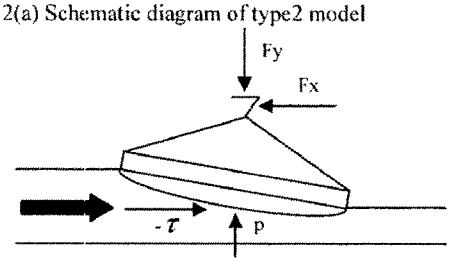

Fig. 2(b) Schematic diagram of type1 model

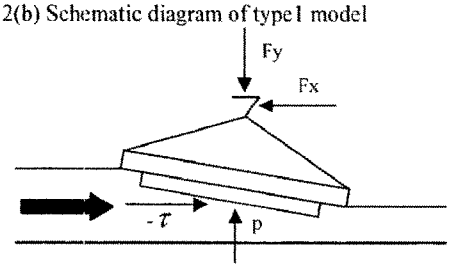

Fig. 2(c) Schematic diagram of type3 model

웨이퍼와 패드 사이의 유막 두께는 유동의 정상상태에서, 힘과 모멘텀의 평형 관계로부터 계산된다. 본 논문에서는 유체의 shear stress 에 의한 모멘텀을 추가로 고려하였으며, 이로부터 type2 모델에서의 압력분포를 얻을 수 있었다.

3. 삼차원 윤활 모델 해석 결과

해석을 위한 기본적인 변수들은 식 (6)과 같다.

$$\omega_w=\omega_p=60rpm, \mu=0.004Pa\,s$$
$$d_w=100mm, d=150mm \quad (6)$$

식 (6)의 변수를 토대로 Reynolds 방정식을 풀면, 웨이퍼 전면에 대한 압력분포와 유막 두께를 구하게 된다. Fig. 3 은 Fig. 2 의 세 가지 type 에 따른 압력분포 해석 결과이다. 정상상태에서 type1 과 type2

의 경우는 웨이퍼의 유동장에 대한 기울어진 각도(angle of attack)의 값이 0 에 가까웠고, 이 때 압력분포가 웨이퍼의 중심을 축으로 거의 대칭인 형상을 보이고 있다. 반면, type3 의 경우는 angle of attack 이 비교적 큰 값을 가지며, 압력분포 역시 한쪽으로 치우쳐져 있는 것을 볼 수 있다. type1 과 type2 를 비교해 볼 때 볼록한 판의 경우는 평판의 경우보다 압력의 분포가 중심에 더 집중된다.

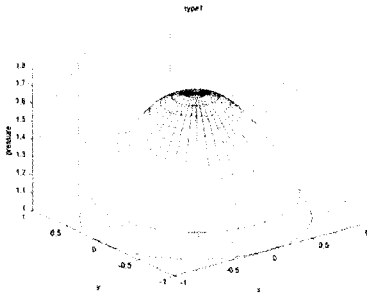

Fig. 3(a) Pressure distribution of type1 model

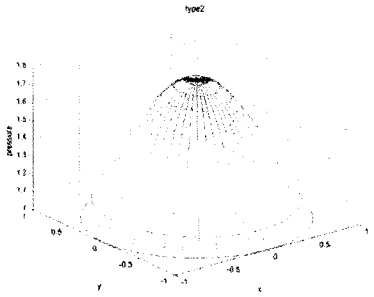

Fig. 3(b) Pressure distribution of type2 model

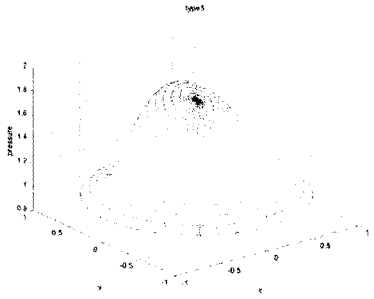

Fig. 3(c) Pressure distribution of type3 model

Fig. 4 는 부하압력, 패드와 웨이퍼가 같은 속도로 회전할 경우의 상대속도, 점도 그리고 type2/type3 에서 웨이퍼의 볼록한 정도/리테이너 링과 웨이퍼 사이의 높이차(dome height)에 따라 구해진 웨이퍼 중심의 높이를 계산한 결과이다. Fig. 4 로부터 압력/점도가 높아짐에 따라, 상대속도가 감소함에 따라 윤활 두께가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 모든 경우에 있어서 type2 가 가장 큰 유막 두께를, type1 이 가장 낮은 유막 두께를 보이고, type 1 의 해석 결과는 다른 경우와는 상대적으로 큰 차이를 보이고 있다.

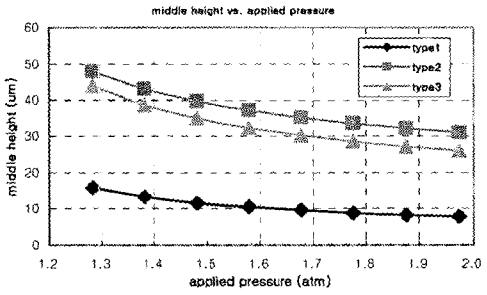

Fig. 4(a) Middle height vs. applied pressure

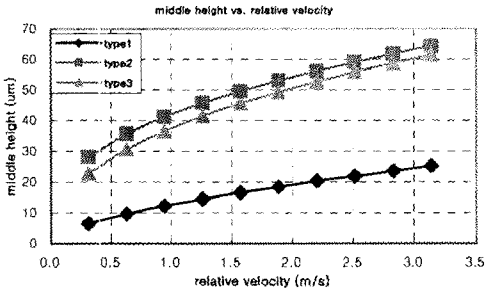

Fig. 4(b) Middle height vs. relative velocity

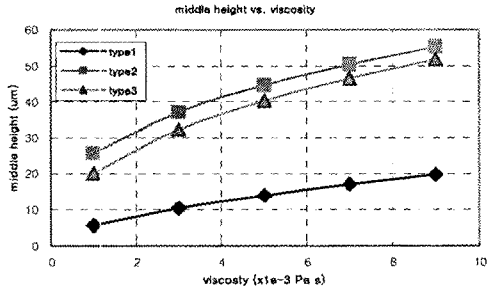

Fig. 4(c) Middle height vs. viscosity

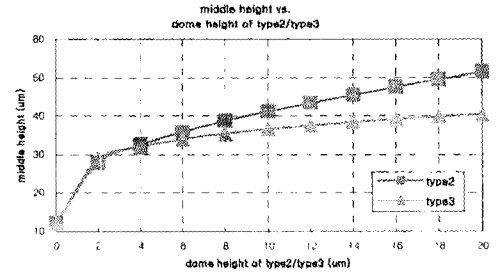

Fig. 4(d) Middle height vs. dome height of type2/type3

4. 결론

본 논문에서는 CMP 의 웨이퍼와 패드 사이의 유동을 완전 유체 윤활로 가정하고, 원통좌표계에서의 3 차원 Reynolds 방정식을 이용하여 부하압력, 상대속도, 점도, dome height 에 따른 웨이퍼 전면의 압력분포를 구하고, 웨이퍼 중심에서의 유막 두께를 구하였다. 모멘텀 평형을 구하기 위해 슬러리에 의한 압력분포뿐만 아니라 슬러리에 의한 shear stress 도 고려하였다. 또한 기하학적 형상으로 기존에 적용되어왔던 type1, type2 모델 이외에 리테이너 링을 고려한 type3 의 모델을 비교 분석 대상에 포함 하였다.

해석 결과로부터 예측할 수 있는 각 모델의 장점과 단점은 다음과 같다. Type1 의 경우 웨이퍼 중심에 축대칭인 비교적 고른 압력분포를 얻을 수 있는 반면, 계산된 유막 두께가 패드 미세구멍의 직경인 20~30um 보다 작기 때문에 필연적으로 접촉이 이루어 지게 되어 이 경우 완전 유체 윤활이론을 적용할 수 없다. Type2 의 경우 적합한 유막 두께를 얻을 수 있으나, 압력 분포가 웨이퍼 중심에 몰려 있기 때문에 웨이퍼 전면에 걸친 연마속도의 차이가 크게 나게 된다. Type3 의 경우 적합한 유막 두께를 얻고 비교적 고른 압력분포를 얻게 되나, 웨이퍼의 끝 단 부분에서 큰 압력차이가 연마속도의 편차를 크게 한다.

Fig. 5 는 IBM㈜의 실험 결과로 웨이퍼 반경방향에 따른 연마속도의 분포이다. 앞서 구한 해석 결과들 중에 Fig. 5 의 실험 결과를 가능하게 하는 모델은 type3 뿐이다. 따라서 완전 유체 윤활을 이용한 해석의 경우 리테이너 링의 영향을 고려하지 않아선 안될 것이다.

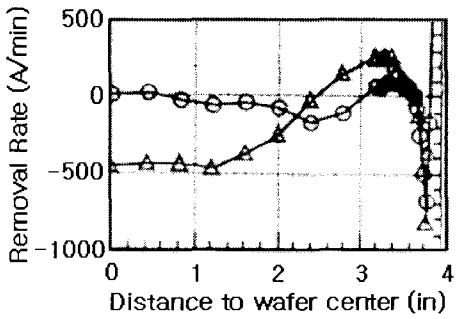

Fig. 5 RR vs. distance (experimental result)

후 기

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

참고문헌

1. Runnels, Scott R. and Eyman, L. Michael, "Tribology Analysis of Chemical-Mechanical Polishing," Electrochem. Soc., Vol. 141, No. 6, pp 1698 - 1701, 1994.
2. Runnels, Scott R., "Two-Demensional Wafer-Scale Chemical Mechanical Planarization Medels Based on Lubrication Theory And Mass Transport," Electrochem. Soc., Vol. 141, No. 7, pp 1900 - 1904, 1994.
3. Sricanth Sundararajan, Thakurta, Dipto G., Schwendeman, Donald W., Murarka, Shyam P., and Gill, William N., "Two-Demensional Wafer-Scale Chemical Mechanical Planarization Medels Based on Lubrication Theory And Mass Transport," J. Electrochem. Soc., Vol. 146, No. 2, pp 761 - 766, 1999.
4. Thakurta, Dipto G., Borst, Christopher L., Schwendeman, Donald W., Gutmann, Ronald J., and Gill, William N., "Pad Porosity , Compressibility and Slurry Delivery Effects in Chemical-mechanical Planarization: Modeling and Experiments," Thin Solid Films, Vol. 366, pp 181 - 190, 2000.
5. Park, Sang Shin, Cho, Chul Ho, and Ahn, Yoo Min, "Hydrodynamic Analysis of Chemical Mechanical Polishing Process," Tribology International, Vol. 33, pp 723 - 730, 2000.
6. Thakurta, Dipto G., Borst, Christopher L., Schwendeman, Donald W., Gutmann, Ronald J., and Gill, William N., "Three-Dimensional Chemical Mechanical Planarization Slurry Flow Model Based on Lubrication Theory," J. Electrochem. Soc., Vol. 148, No. 4, pp G207 – G214, 2001.
7. Thakurta, Dipto G., Schwendeman, Donald W., Sricanth Sundararajan, Gutmann, Ronald J., Sadasinvan Shankar, Lei Jiang, and Gill, William N., " Three-Dimensional Wafer-Scale Copper Chemical-Mechanical Planarization Model," Thin Solid Films, 2002(article in press).
8. Cho, Chul Ho, Park, Sang Shin, and Ahn, Yoo Min , "Three-Dimensional Wafer Scale Hydrodynamic Modeling for Chemical Mechanical Polishing," Thin Solid Films, Vol. 389, pp 254 - 260, 2001.