

〈 논문 〉

Oxide CMP 과정에 대한 수치 유동 해석

권달중* · 이도형† · 김인환*

(2004년 7월 31일 접수, 2005년 2월 15일 심사완료)

Numerical Study on Polishing Behavior During Oxide CMP

Daljung Kwon, Dohyung Lee and Inhwan Kim

Key Words : CMP(기계적 화학적 연마), Slurry(슬러리), Groove(그루브), Pad(패드), CFD(전산유체역학)

Abstract

In this paper, slurry fluid motion, abrasive particle motion, and roles of groove patterns on the pads are numerically investigated in the 2D and 3D geometries. The simulation results are analyzed in terms of experimental removal rate and WIWNU (Within Wafer Non-Uniformity) for ILD (Inter Level Dielectric) CMP process. Numerical investigations reveal that the grooves in the pad behave as uniform distributor of abrasive particles and enhance the removal rate by increasing shear stress. Higher removal rate and desirable uniformity are numerically and experimentally observed at the pad with grooves. Numerical analysis is very well matched with experimental results and helpful for understanding polishing mechanism and local physics.

기호설명

M.R.R : 웨이퍼(wafer)가 연마된 정도 (Å/min)

WIWNU : 비평탄화율

1. 서론

초고속집적소자를 제조하는 반도체 산업에서 트랜지스터들의 집적도가 높아짐에 따라 점점 더 미세한 폭을 가진 배선들을 기판상에 형성하여야 한다. 또한 고속으로 복잡한 명령을 수행하는 회로를 구성하기 위해 금속 배선들을 다층화 시켜야 하는데, 배선 단차의 평탄화를 위해 CMP가 광범위하게 사용되고 있다.⁽¹⁾

CMP는 웨이퍼(wafer)와 웨이퍼 전면을 회전하는 패드(pad) 사이에 액상 슬러리(slurry)를 투입하여 웨이퍼의 표면을 연마하는 기술이다. 이때 특정

부위의 제거 속도를 조절하여 평탄화가 진행된다.

CMP 공정은 평면상을 회전 또는 편심 운동(eccentric motion)하는 연마 테이블 표면에 연마 패드를 부착하고 이 위에 연마제가 포함된 슬러리를 공급하면서 웨이퍼 앞면을 마찰시켜 평탄화시키는 공정이다. CMP의 정의는 화학적으로 반응한 표면을 슬러리와 패드의 기계적 운동을 통해 웨이퍼를 연마하는 공정이다.⁽²⁾

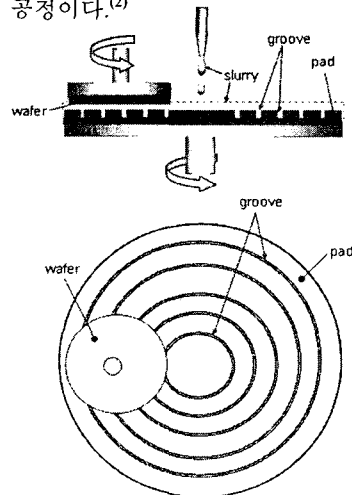


Fig. 1 Schematic view of CMP tool

* 한양대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계정보공학부

E-mail : dohyung@hanyang.ac.kr

TEL : (031)400-5289 FAX : (031)406-5550

따라서, 연마 패드와 슬러리 내 연마 입자의 거동에 대한 이해는 매우 중요하다. 상용화된 모든 연마 패드들은 저마다 다양한 재질과 그루브(groove) 패턴, 미세한 기공이 있다. 특히, 그루브들은 미세한 기공과 함께 슬러리를 웨이퍼 면 내로 이송하는 기능과 반응물을 제거하는 기능을 담당한다. 슬러리의 거동과 패드 내 그루브는 CMP 공정에 있어서 매우 중요한 역할을 하는데, 현재까지는 패드와 관련된 이러한 연구결과가 많지 않은 편이다. Fig. 1은 그루브가 있는 패드에서의 CMP 과정을 나타낸다.

컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 복잡한 유동이나 화학반응, 에너지의 이동과 같은 현상을 해석하고 이해하기 위해 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics) 널리 사용되었다.⁽³⁾ 이러한 수치적인 기법은 CMP 공정에서 패드에서 일어나는 유체의 거동을 이해하고 해석하는데 매우 유용하다.⁽⁴⁾ 이 논문에서 ILD CMP 에서 슬러리의 유동현상과 연마하는 역할을 하는 입자의 거동, 그루브의 역할 등에 대하여 수치적으로 연구하였으며, 이 결과를 실험량인 연마율(M.R.R)과 웨이퍼의 비평탄화율(WIWN) 등과 비교하였다.

2. 수치해석 및 실험방법

2.1 수치해석 과정

슬러리의 거동과 연마하는 역할을 하는 입자의 거동, 패드내 그루브의 역할 등을 시뮬레이션 하기 위한 모든 수치해석은 FVM(Finite Volume Method)으로 수행되었다. 복잡한 슬러리의 유동을 해석하기 위해 CMP 공정의 웨이퍼와 패드 사이를 대상 모델로 하여 2 차원과 3 차원으로 격자를 구성하여 비압축성 Navier-Stokes 방정식으로 시뮬레이션을 수행하였다. 매우 거친 패드 표면과 미세 기공 때문에 발생하는 난류를 모사하기 위해, 표준형 $k - \epsilon$ 모델을 사용하였는데 난류강도는 10%로 계산하였다.⁽⁵⁾ 유동을 풀기 위하여 upwind 방법으로 수치해석하였고, SIMPLE 계열 알고리즘을 기반으로 속도와 압력에 대한 계산을 수행하여 해를 갱신하였다.⁽⁶⁾

실제의 실험장치를 대상으로 하여 격자를 구성하였는데, 총격자수는 2 차원에서 그루브가 있는 경우와 없는 경우를 구분하여 각각 12,000 개와 14,400 개의 격자를 만들었고, 3 차원에서는 각각 100,000 개와 373,296 개로 구성하였다. 연마 패드의 회전체에 대한 웨이퍼가 회전하는 상대속도를⁽⁷⁾ 유체의 속도로 가정하였다. 입구에서 0.6 m/s 로 속도 경계조건을 주었다. 유체의 속도가 회전체(carrier)에 의한 패드의 회전속도에 의한 것이므로

2 차원에서 이를 모사하기 위해 유체의 속도를 구하는 것과 같은 방법으로 0.6m/s 로 패드의 벽면경계조건을 정하였고, 3 차원에서는 실제 회전하는 효과를 모사하기 위해 패드의 벽면경계조건을 실험장치와 맞추어 패드 회전체를 중심으로 각속도 3.14 rad/s (30 rpm)으로 하였다. 웨이퍼 면의 경우에는 2 차원에서는 벽면 경계조건을 주어 속도가 없다고 하였고, 3 차원에서는 실제의 실험장치 모델에 맞추어 웨이퍼 회전체를 중심으로 각속도 3.14 rad/s (30 rpm)로 계산하였다.

슬러리의 점도와 밀도는 0.22 kg/m³sec 와 1069 kg/m³ 로 하였는데, 이는 본 수치해석과 함께 수행한 실험장치에 사용되는 슬러리의 물성치임은 물론이다. 슬러리 안에 포함되어 있는 이산화규소 입자(silicon, SiO₂)의 밀도는 1.7 g/cm³ 이고 크기는 135 nm 로 수치해석에서도 그대로 적용하였다.

2.2 실험과정

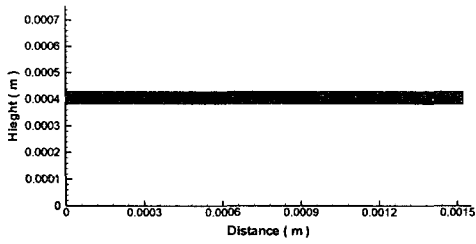
이 논문에 언급된 모든 실험은 PM5 (Logitech) CMP 장치로 수행되었다. 이 장치의 웨이퍼 회전체와 패드 회전체의 속도는 30 rpm, 웨이퍼가 부착되는 회전체의 압력은 6.5 psi 로 일정하게 하였다. 패드 위로 유입되는 슬러리의 유량은 110 ml/min 인데, 슬러리의 속도는 유입되는 유량에 보다는 회전하는 패드의 회전속도에 의하여 원심력에 의하여 결정된다.

CMP 공정 시간과 패드 컨디셔닝(pad conditioning) 시간은 각각 2 분과 1 분으로 하였다. 규소입자가 용해되어 있는 알카리성 슬러리(HS-1200, Hanhwa oxide slurry, Korea)와 플라즈마 화학 증착법(PECVD; Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)으로 박막처리된 테오스(TEOS; Tetra Ethyl Ortho Silicate) 웨이퍼(2×2cm²)를 사용하였고, 패드에 그루브가 있는 모델과 없는 모델 두 가지 경우로 나누어 실험을 진행하였다. Rodel 사의 IC1400(K-그루브)와 그루브 없는 패드가 실험대상이다. CMP 가공 후에, 광학장치(Nanometrics, AFT Model 200)를 이용하여 웨이퍼의 연마율과 비평탄화율을 측정하였다.

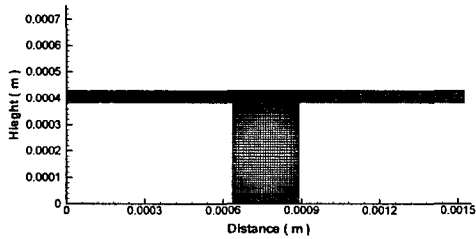
2.3 수치적 연구

2.3.1 2 차원 수치해석

웨이퍼와 패드 사이에서 일어나는 슬러리와 입자의 거동을 이해하기 위해 Fig. 2 와 같이 2 차원 격자를 구성하였다. 패드내 그루브의 역할을 이해하기 위해 그루브가 있는 경우와 없는 경우로



(a)



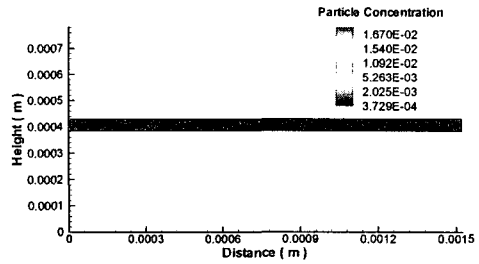
(b)

Fig. 2 Computational 2D geometry and grids between wafer and pad (a) without groove and (b) with groove

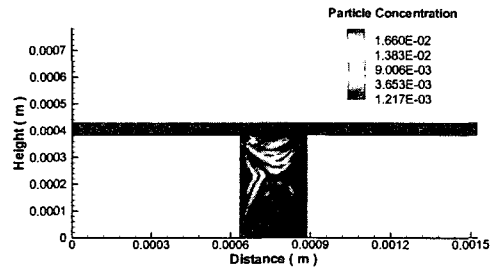
구분하여 수치해석을 수행하였다. IC1400 의 K-그루브의 폭과 높이는 각각 254 μm 과 381 μm 이다. 패드와 웨이퍼 사이의 슬러리 필름의 두께는 50 μm 으로 가정하였는데, 이는 기존의 실험적 관측과 계산할 수 있는 격자수의 한계에 기인한다.⁽⁴⁾

Fig. 3(a)와 (b)는 정상상태에서의 분포된 연마 입자(규소입자)의 집중도를 보여준다. Fig. 3(b)에서 입자가 그루브에 집중된 것을 발견할 수 있는데, 특히 그루브의 윗부분에 일정량 집중되어 있는 것을 알 수 있다. 반면에 그루브가 없는 패드 Fig. 3(a)에서는 별다른 변화가 없고 유선을 따라 평행하게 입자가 분포하고 집중된 곳은 없다. 그루브 상단에 집중되는 입자는 위쪽에 위치한 웨이퍼를 연마하는 역할을 하게 된다.

Fig. 4(a)와 (b)는 유선(streamline)을 나타내는데, 패드와 웨이퍼 사이의 액상 슬러리의 거동을 알 수 있다. 슬러리가 입구에서 이동하다가 그루브를 지나가게 되면서 단면적이 넓어지고, 그루브 하단에 상단의 흐름과는 분리되는 와동(vortex)이 생기고 이는 보다 작은 크기의 다른 와동을 유발하게 된다. 그루브 내에 와동이 발생하여 유체가 그루브내에 좀더 정체되고 Fig. 3(b)와 같이 입자가 그루브 상단에서 연마하는 역할을 하게 된다. 이

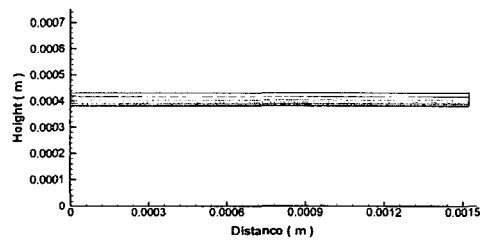


(a)

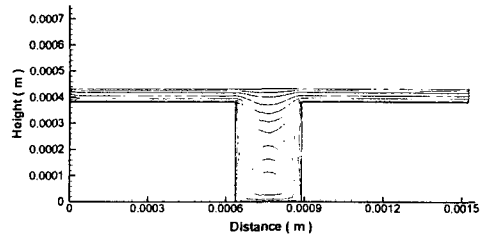


(b)

Fig. 3 Concentrations of distributed abrasive particles in the pad (a) without groove and (b) with groove



(a)



(b)

Fig. 4 Streamlines in the pad (a) without groove and (b) with groove

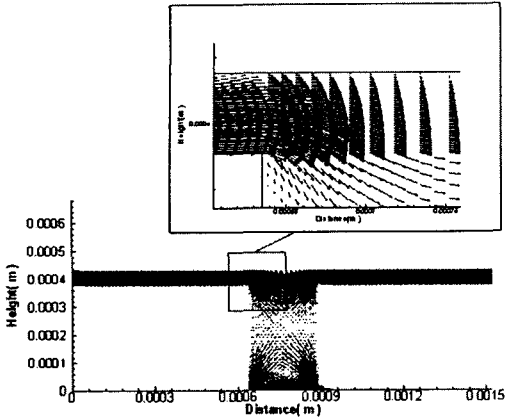


Fig. 5 Velocity vector distribution in the pad with groove

것은 그루브가 존재함으로써 연마율이 높아질 수 있다는 것을 의미한다.

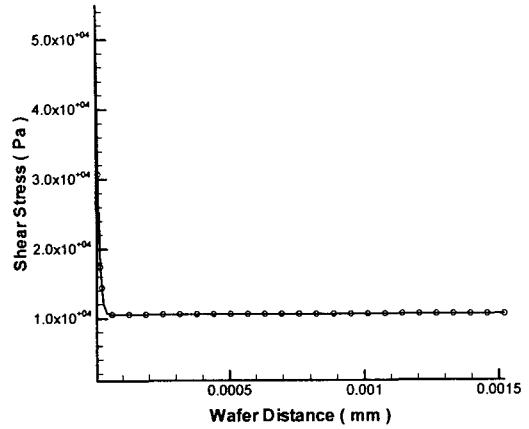
Fig. 5 는 Groove 가 있는 패드의 속도벡터 분포로 그루브 내에 크게 회전하는 와류가 있고 그 주위에 이차적인 와류가 발생함을 알 수가 있다. 그루브가 시작되는 부분이 끝나는 부분에서 속도 구배가 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 그루브 주위에서 전단응력이 높아진다는 것을 예측하게 한다.

웨이퍼 표면에 작용하는 전단응력(shear stress)이 연마율을 결정하는 가장 중요한 역할을 할 것이다. 웨이퍼에 가해지는 전단응력의 분포가 Fig. 6 에 나와 있다. 그루브가 없는 패드를 사용한 웨이퍼의 전단응력은 입구 부근을 제외하고는 일정한 반면, 그루브가 있는 경우의 웨이퍼는 그루브 근처에서 전단응력 값이 변화함을 알 수 있다. 그루브가 있는 패드를 사용할 경우에 그렇지 않은 경우보다 전단응력이 높은 부분이 그루브 부근에서 국부적으로 발생하게 된다. 전단응력 차이가 750 Pa 정도인데, 이는 마이크로 영역에서 웨이퍼를 연마하는 작용을 하리라고 예측할 수 있다. 이 결과로 그루브가 높은 연마율과 낮은 비평탄화율을 갖게 하는 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

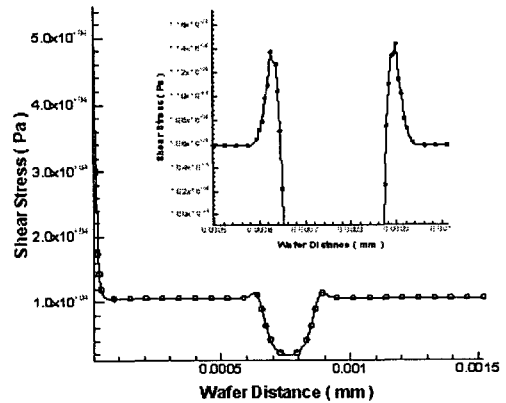
2.3.2 3차원 수치해석

그루브가 있는 경우와 없는 경우의 3 차원 형상에 대하여 Fig. 7(a)와 (b)에서 각각 볼 수 있는데, 이 격자를 이용하여 3 차원 수치해석을 수행하였다.

슬러리 필름의 두께는 2 차원과 동일하게 50μm 로 가정하였다. 이 형상으로 수치해석 하여 3 차원으로 계산한 전단응력의 분포를 Fig. 8 을 통하여 확인할 수 있다. 그루브가 없는 경우는 입구를



(a)



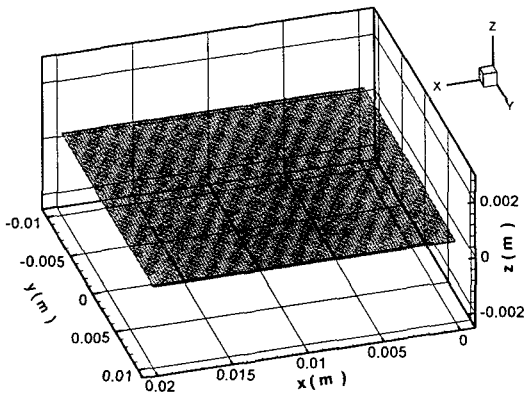
(b)

Fig. 6 Distribution of shear stress on the wafer surface on the pad (a) without groove (b) with groove

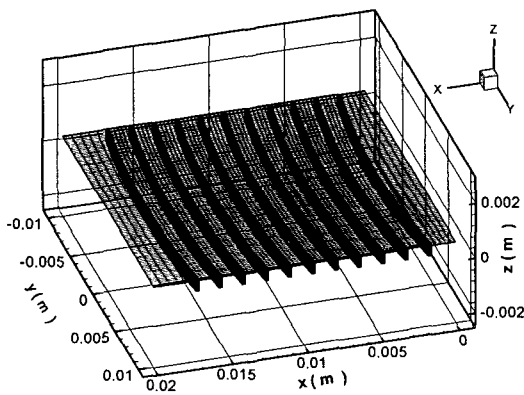
제외하고는 값이 거의 동일한 반면, 그루브가 있는 경우는 그루브의 위치에 따라 유사한 패턴으로 전단응력의 변화가 보인다. 그루브 주변에 국부적으로 높은 응력을 확인할 수 있고 그루브 영역에서 응력이 떨어지는 것은 슬러리가 흐르는 면적이 넓어지고 그루브 내에서 일시적으로 순환하면서 속도가 감소하기 때문이다.

2.4 실험적 연구

그루브가 있는 패드과 없는 패드에 대하여 웨이퍼의 거리에 따라 측정된 연마율(Å/min)을 Fig. 10 에 표시하였다. 그루브가 없는 패드의 경우에는 거의 연마되지 않았음을 알 수 있다. 반면에, K-그



(a)

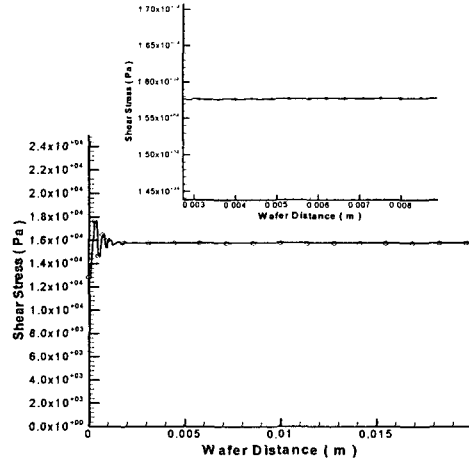


(b)

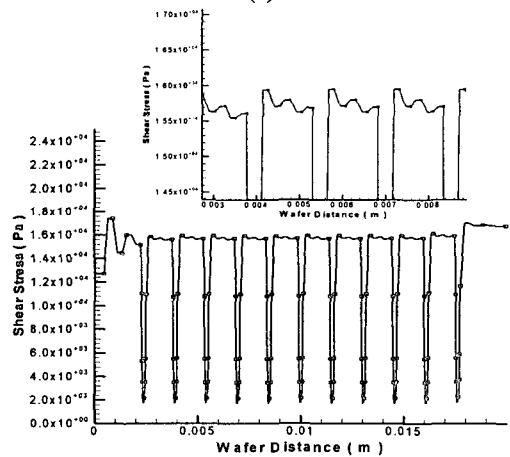
Fig. 7 Computational 3D geometry and grids between the wafer and pad (a) without groove and (b) with groove

루브가 있는 IC1400 패드의 경우에는 2,440 Å/min의 연마율이 측정되었다. 이는 수치해석에서 예측한 대로 그루브 패턴이 연마율을 높이는 데 중요한 역할을 한다는 것을 의미한다.

그루브가 있는 패드의 경우가 높은 연마율과 낮은 비평탄화율을 보여준다(Fig. 9). 그루브가 있는 패드를 사용할 경우에, 연마율은 57Å/min에서 2,440 Å/min로 증가하고 비평탄화율은 32%에서 5.4%로 매우 낮아졌다. 이는 수치해석에서 예측하였듯이 CMP 공정에서 그루브가 존재하는 경우가 그루브 내에 연마 입자가 집중되고 웨이퍼의 압력구배가 작아지며 그루브 주위의 응력이 높아지기 때문이다.



(a)



(b)

Fig. 8 Distribution of shear stress on the wafer surface on the pad (a) without groove and (b) with groove at 3D geometry

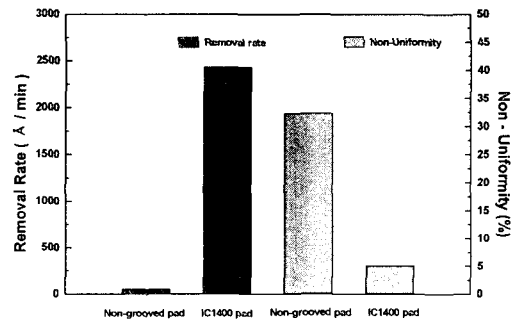


Fig. 9 Removal rate and non-uniformity of the TEOS wafer when pads with and without grooves are used

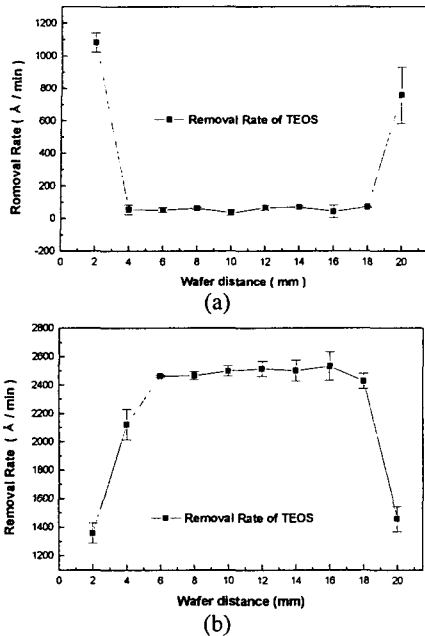


Fig. 10 Removal rate of the TEOS wafer for the pad (a) without groove and (b) with grooves

3. 결론

본 논문에서 슬러리와 연마 입자의 거동, 그루브의 역할 등에 대하여 2차원, 3차원적으로 수치유동 해석을 수행하였다. 수치해석 결과를 실제 ILD CMP 실험 데이터인 웨이퍼의 연마율(M.R.R), 비평탄화율(WIWNУ) 등과 비교하였다.

수치해석을 통하여 그루브의 상단에 연마 입자가 집중되는 것을 알 수 있었고, 그루브가 없는 패드에서 CMP 공정을 할 경우에 압력구배가 커서 비평탄화율이 높아지게 됨을 확인할 수 있었다. 또, 패드내 그루브 영역의 웨이퍼에서의 전단응력 값이 국부적으로 높게 나와서 연마율이 높을 것으로 예측 되었다.

실험적으로 연마율과 비평탄화율의 데이터를 구하였는데, 이 결과는 수치적으로 예측한 결과와

매우 일치한다. 그루브가 있는 패드의 경우에 수치해석에서 그루브 영역 주변에서 전단응력이 750 Pa 정도 더 높게 나왔는데, 실제 실험에서도 그루브가 없는 경우보다 2,383 Å/min 정도 더 높은 연마율을 확인할 수 있었다. 비평탄화율의 경우에도 그루브가 있는 경우가 5.4%로 그루브가 없는 32%보다 매우 낮은데, 앞서 언급한 대로 그루브가 있는 경우의 압력구배가 상대적으로 낮기 때문이다.

그루브가 있는 패드는 연마율이 좋고 비평탄화율이 낮아 칩 영역에 걸친 광역 평탄화 기술(CMP)에 매우 유용하다. 반면, 그루브가 존재하지 않을 경우에 연마가 거의 일어나지 않고 비평탄화율도 매우 높다. 수치유동해석은 국부적인 영역의 물리현상(local physics)을 분석하여 CMP의 매커니즘을 이해하는데 매우 유용한 도구로 활용되었으며 실험 결과와도 잘 부합되었다.

참고문헌

- (1) Patrick, W. J., Guthrie, W. L. and Schiabile, P. M. J., 1991, "Application of Chemical Mechanical Polishing to the Fabrication of VLSI Circuit Interconnections," *J. Electrochemical Soc.*, Vol. 138, p. 1778.
- (2) Steigerwald, J. M., Murarka, S. P. and Gutmann, R. J., 1997, "Chemical Mechanical Planarization of Microelectric Matrials," *Wiley-Interscience*, New York.
- (3) Versteeg, H. K. and Malalasekera, W., 1995, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics," *Longman*.
- (4) Jeng, W., Yeuan, J. J. and Lin, S. H., 2001, "Numerical Investigation of the Effect of Pad Groove in Chemical Mechanical Planarization Process," *Proc. of the Seventh International Chemical Mechanical Polishing (CMP) for ULSI Multilevel Interconnection*, pp. 59~66.
- (5) Launder, B. E., 1974, "Application of the Energy Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow Near a Spinning Disc," *Lett. Heat and Mass Transfer*, pp. 131~138.
- (6) Suhas, V. Patankar, 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," *Hemisphere pub. corp.*, pp. 126~134.
- (7) Boning, D. S. and Ouma, O., 2000, "Semiconductors and Semimetals," *Academic press*, Vol. 63, pp. 92~95.