

# CFD 를 이용한 CMP 의 Groove Sizing 최적화

장 지 환<sup>†</sup> · 이 도 형<sup>\*</sup>

## Optimization of Groove Sizing in CMP using CFD

Jihwan Jang<sup>†</sup>, Dohyung Lee<sup>\*</sup>

**Key Words :** CMP(기계적 화학적 연마), slurry(슬러리), groove(그루브), wafer(웨이퍼), CFD(전산유체역학)

### Abstract

In this paper, slurry fluid motion, abrasive particle motion, and effects of groove sizing on the pads are numerically investigated in the 2D geometry. Groove depth is optimized in order to maximize the abrasive effect. The simulation results are analyzed in terms of shear stress on pad, groove and wafer, streamline and velocity vector. The change of groove depth entails vortex pattern change, and consequently affects material removal rate. Numerical analysis is very helpful for disclosing polishing mechanism and local physics.

### 기호설명

M.R.R 웨이퍼(wafer)가 연마된 정도 ( $\text{\AA}/\text{min}$ )  
(Material Removal Rate)

### 1. 서 론

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 한다. 이를 위해 CMP가 개발되었다<sup>(1)</sup>. CMP의 목적은 웨이퍼의 광역 평탄화이다. 이는 다층 배선구조로 가기 위한 필수 조건이다. 다층배선으로 가는데, 각 층의 평탄도가 나쁘게 되면 다층배선으로 감에 배선간의 접촉에 악 영향을 주게 된다. 또한 점점 좁아지고 있는 회로 선평의 미세화로 감에 따라 기존의 방법으로는 평탄화를 하기 어려

워짐에 따라 IBM에서부터 이 기술이 개발되어 쓰이고 있다.

CMP는 웨이퍼(wafer)와 웨이퍼 헤드부를 회전하는 패드(Pad) 사이에 액상 슬러리(slurry)와 연마 입자를 투입하여 웨이퍼의 표면을 연마하는 기술이다. 이때 특정 부위의 제거 속도를 조절하여 평탄화가 진행된다. CMP공정은 평면상을 회전 또는 편심 운동(eccentric motion)하는 연마 테이블 표면에 연마 패드를 부착하고 이 위에 연마제가 포함된 슬러리를 공급하면서 웨이퍼 헤드부를 마찰시켜 평탄화시키는 공정이다. CMP (Chemical Mechanical Planarization)는 화학적 기계적 평탄화라는 말 그대로 슬러리의 화학적 작용과 패드와 웨이퍼 헤드부사이의 슬러리 내 연마 입자의 유체역학적 거동과 기계적 마찰력으로 웨이퍼 표면의 평탄화 작업을 하는 공정이다<sup>(2)</sup>.

따라서, 유체 역학적으로 웨이퍼와 연마 패드 사이의 슬러리와 연마 입자의 거동에 대한 연구는 무척 중요하다. 현재 상용화된 모든 연마 패드들은 저마다 다양한 재질과 그루브의 패턴들이 있다. 특히 그루브는 슬러리를 웨이퍼 면 내로 이송하는 기능과 반응물을 제거하는 기능 그리고 웨이퍼의 연마율을 높이는 기능을 한다. 그러므로 패드와 웨이퍼 사이의 슬러리 거동과 패드내의 그루브의 상호 관계는 공정에 있어서 매우 중요한 역할을

<sup>†</sup> 한양대학교 대학원 기계공학과

<sup>\*</sup> 책임저자, 한양대학교 기계정보공학부

E-mail : dohyung@hanyang.ac.kr

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

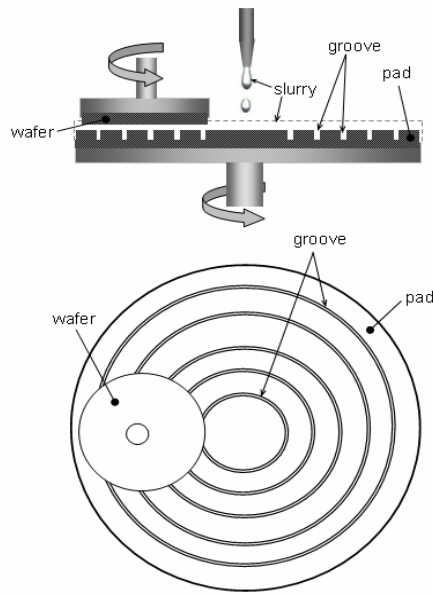


Fig. 1 Schematic view of CMP tool

하게 된다. 하지만 현재까지는 패드내 그루브와 슬러리의 거동에 관한 연구 결과는 많지 않은 편이다. 본 연구에서는 패드내 그루브와 웨이퍼 사이를 이동하는 슬러리의 유동 형상과 연마하는 역할을 하는 입자의 거동을 수치적으로 연구하여 최적화된 그루브의 폭과 깊이의 크기를 얻는 것이 목적이다. Fig. 1은 그루브가 있는 패드에서의 CMP 과정을 나타낸다.

## 2. 연구 배경

CMP의 유체역학적인 접근은 Runnels와 Eyman의 Wafer 표면에 유체의 유동으로 가해지는 응력에 대한 마찰분석이 그 시초라 볼 수 있다<sup>(3)</sup>. 이 연구에서는 결과의 예측이 정량적으로 정확하지는 못하였다. 그러나 매개 변수에 의한 시뮬레이션 연구에 기초했다는 점이 중요하다. 그 후 Sundararajan의 다수의 연구가에 의해 다른 유체역학 모델이 연구 되었다<sup>(4)</sup>. 하지만 패드내 그루브와 슬러리의 거동, 그리고 연마 입자의 거동에 대해 고려한 연구 결과는 많지 않았다. 최근에 Wes Jeng과 C.C Liang에 의해 실제 입자를 포함한 유동에 대한 연구가 되어졌고 패드와 패드 내 그루브의 형상 변화에 대한 고려를 하였으며 입자의 궤적에 대한 논문을 발표 하였다<sup>(5)</sup>. 그 다음해에 Wes Jeng과 Jian J. Yuan에 의해 같은 주제의 연구에 패드내 그루브만의 효과를 발표하였다<sup>(6)</sup>. 이로써 입자의 거동과 패드와 패드내 그루브의 영향에 대한 정보들을 얻을 수 있었다. 그러나 이 연구는 유체역학적인 접근에 명확한 규명이 부족하였다.

본 연구는 이전 연구에서 그루브의 크기는 웨이퍼 표면에 중요한 영향을 줄 수 있는 인자임이 분명함에도 다루지 않았던 패드내의 그루브 크기에 따른 웨이퍼의 마모도에 대한 영향을 연구하였고 더 나가 최적화된 그루브의 크기를 결정하였다. 그리고 이전 연구에서 보다 정확하게 유체역학적으로 시뮬레이션을 수행하였다.

## 3. 수치 해석

### 3.1 패드와 그루브 형상 설계 및 조건

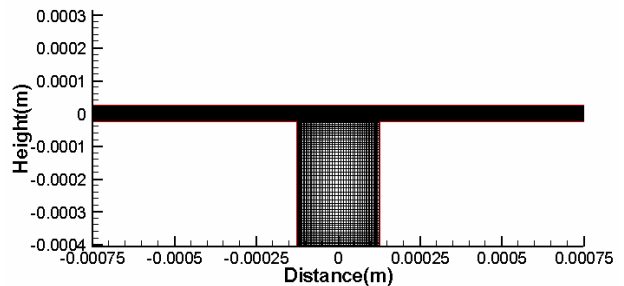


Fig. 2 Computational 2D geometry and grids between wafer and pad with groove (254  $\mu\text{m}$   $\times$  381 $\mu\text{m}$ )

복잡한 슬러리의 유동을 해석하기 위해 CMP공정의 웨이퍼와 패드 사이를 대상 모델로 하여 Fig. 2와 같이 2차원으로 격자를 구성하였다. 총 격자 수는 패드와 웨이퍼 사이의 격자를 75000개, 그루브의 격자를 2500개로 하여 총 격자 수는 77500개를 만들었다. 웨이퍼와 패드 사이의 폭과 높이는 각각 1500  $\mu\text{m}$ 과 50  $\mu\text{m}$ 이고 그루브의 폭과 높이는 각각 254  $\mu\text{m}$ 과 381  $\mu\text{m}$ 이다. Rodel사의 IC1400(K-그루브)가 시뮬레이션의 기본 모델이다.

본 연구에는 그루브의 깊이에 대한 영향이 가장 중요한 요소이므로 그루브의 깊이를 변화시켜 수치 해석을 수행하였다. 실제 상용화된 그루브 깊이인 381  $\mu\text{m}$  외에 350  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$ , 250  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$ , 25 $\mu\text{m}$ , 0 $\mu\text{m}$ 로 총 10가지 깊이의 그루브를 시뮬레이션을 하였다. 그루브의 폭은 254 $\mu\text{m}$ 로 고정하였다. 이에 따른 각각의 패드와 그루브의 형상은 Fig 3에 나타나 있다.

연마 패드의 회전에 대한 웨이퍼가 회전하는 상대속도는<sup>(7)</sup> 유체의 속도로 가정하였다. 입구에서 0.6 m/s로 속도 경계조건을 주었다. 유체의 속도가 회전체(carrier)에 의한 패드의 회전속도에 의한 것이므로 2차원에서 이를 모사하기 위해 유체의 속도를 구하는 것과 같은 방법으로 0.6 m/s로 패드

의 벽면 경계조건을 정하였다. 레이놀즈 수 (Reynolds number)는 34 로 매우 작음으로 층류 유동으로 수치 해석하였다.

슬러리의 점도와 밀도는 0.001 kg/m•sec 와 1069 kg/m<sup>3</sup>로 하였고 이산화규소 입자(silicon, SiO<sub>2</sub>)의 밀도는 1700 kg/m<sup>3</sup>이고 크기는 135 nm 로 수치 해석에 적용하였다. 본 물성치는 Jeng 과 Liang 의 모델에 사용된 값을 사용하였다<sup>(8)</sup>.

3.2 수치해석 기법

슬러리의 거동과 연마하는 역할을 하는 입자의 거동, 패드내 그루브의 역할 등을 시뮬레이션 하기 위한 모든 수치해석은 FVM(finite volume method)으로 수행되었고 본 연구에 사용된 유체, 즉 슬러리 유동에 관한 해는 연속성과 비압축성 Navier-Stokes Equation 을 사용하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \vec{V}) \quad (1)$$

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (2)$$

여기서  $\mu$  와  $\rho$  는 유체의 점성계수와 밀도이고  $p$  는 압력이고  $\vec{V}$  는 속도벡터이다. 유동을 풀기 위하여 UPWIND 방법으로 수치해석 하였고, SIMPLE 계열 알고리즘을 기반으로 속도와 압력에 대한 계산을 수행하여 해를 갱신하였다<sup>(7)</sup>.

입자에 대해서는 Lagrange 모델인 DPM(Discrete Phase Model)을 적용하였다. DPM 의 계산은 일정 계산 횟수(iteration)동안에 주 유동에 대해 N-S 를 계산한 후, 입자에 대해 한 번 계산하는 과정을 반복하는 방법을 사용하였다. 입자에 의한 주 유동에 미치는 열, 질량, 운동량의 변화를 계산하면서, 주 유체의 계산에 대해서 update 를 한다. 이 변화간의 상관 관계는 입자의 궤적을 계산하는데 중요한 역할을 한다.

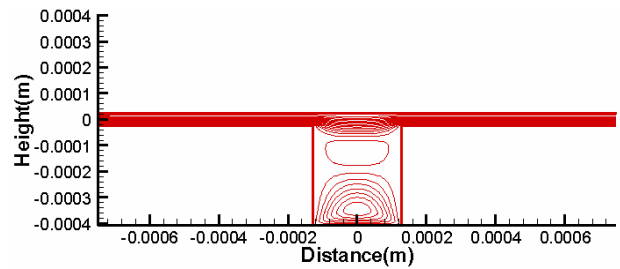
본 연구에서는 에너지 방정식은 계산을 하지 않았고, 질량과 운동량에 대해서 계산을 하였다. 식 (3)은 입자에 대한 힘의 평형식이다.

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + g_x(\rho_p - \rho) / \rho_p + F_x \quad (3)$$

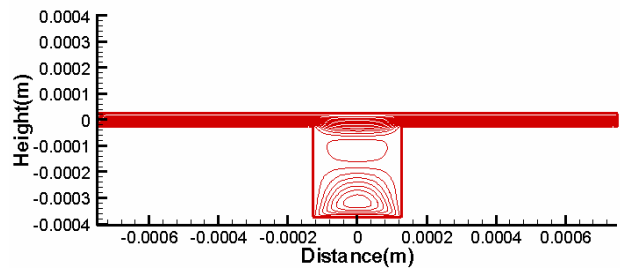
$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{24\rho_p D_p^2} \quad (4)$$

여기서,  $u$  는 유체의 속도,  $u_p$  는 입자의 속도,  $\mu$  는 유체의 분자 점성,  $\rho$  는 유체 밀도,  $\rho_p$  는 입자밀도,  $D_p$  는 입자 지름이다.  $F_D$  는 단위입자에 대한 항력계수이고,  $F_x$  는 추가적인 힘들을 나타내는 항이다. 여기서는 전단에 의해 생기는 양력(lift force)인 saffman 양력을 나타낸다. 중력에 대한 힘 역시 고려하였다.

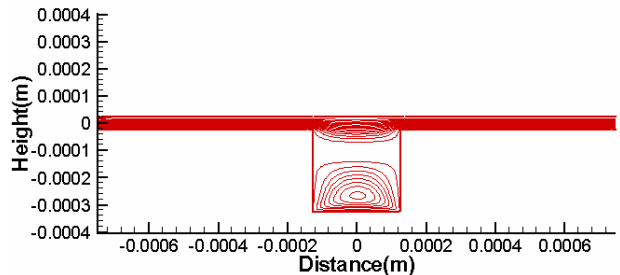
4. 수치 해석 결과



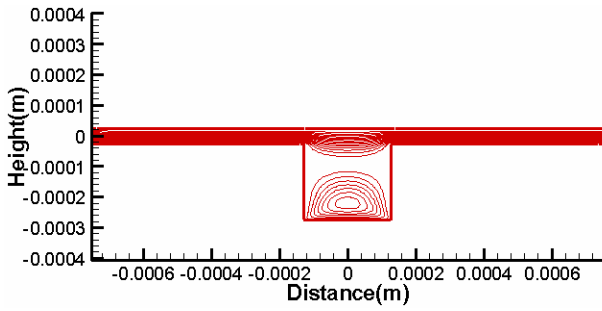
(a) groove size (254 μm × 381μm)



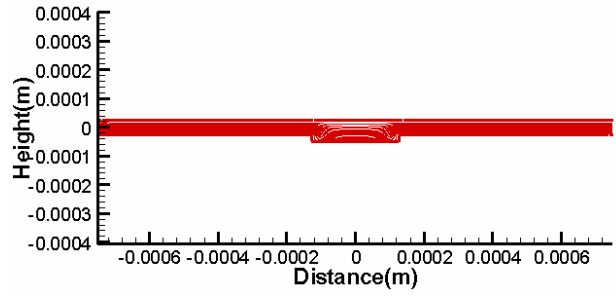
(b) groove size (254 μm × 350μm)



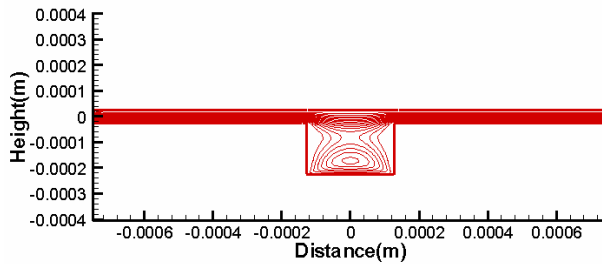
(c) groove size (254 μm × 300μm)



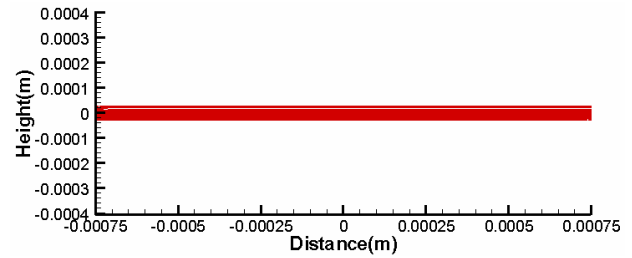
(d) groove size (254  $\mu\text{m}$   $\times$  250 $\mu\text{m}$ )



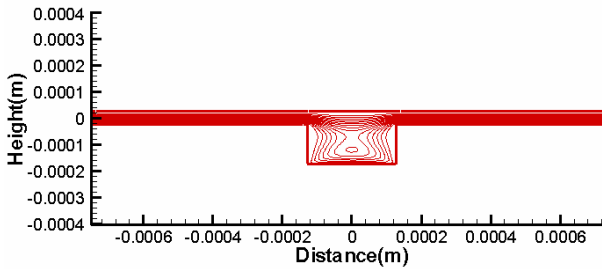
(i) groove size (254  $\mu\text{m}$   $\times$  25 $\mu\text{m}$ )



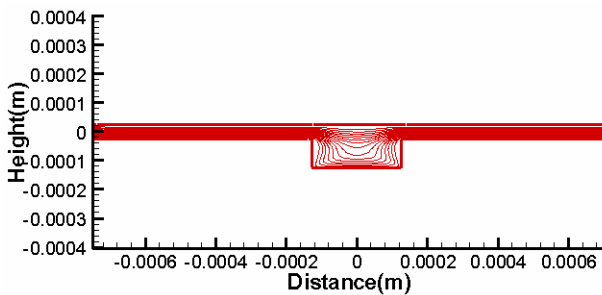
(e) groove size (254  $\mu\text{m}$   $\times$  200 $\mu\text{m}$ )



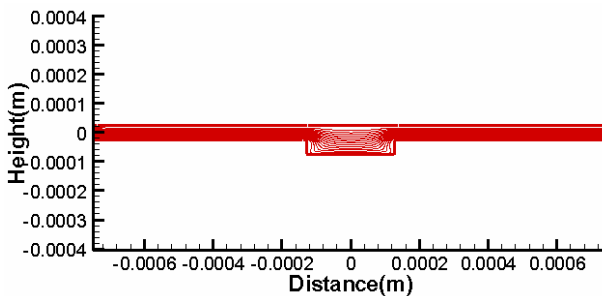
(j) groove size (254  $\mu\text{m}$   $\times$  0 $\mu\text{m}$ )



(f) groove size (254  $\mu\text{m}$   $\times$  150 $\mu\text{m}$ )



(g) groove size (254  $\mu\text{m}$   $\times$  100 $\mu\text{m}$ )



(h) groove size (254  $\mu\text{m}$   $\times$  50 $\mu\text{m}$ )

**Fig. 3** Streamlines in pad and groove

Fig. 3 은 그루브의 깊이에 따른 그루브 형상과 유선(streamline)을 나타내고 있다. 유선을 통하여 패드와 웨이퍼 사이의 역상 슬러리의 거동을 알 수 있다. 슬러리가 입구에서부터 이동을 하다가 단면적이 넓어지는 그루브 사이를 지나가게 되면서 그루브 하단에 상단의 흐름과 분리되는 와동(vortex)이 생기고 이는 보다 작은 크기의 와동을 발생하게 된다. 그루브 내에 와동이 발생하면서 유체와 연마입자가 그루브 내에 좀 더 정체되어 연마율을 높이는 역할을 한다. 이것은 그루브가 존재함으로써 연마율이 높아 질 수 있다는 것을 의미한다.

각각의 경우 유선을 살펴 보면 그루브 사이즈 (254  $\mu\text{m}$   $\times$  381 $\mu\text{m}$ )인 경우에 세 지점에서 와동이 발생되고 그루브 깊이가 조금씩 줄어들면서 그루브 깊이가 300  $\mu\text{m}$  인 경우에 와동의 발생이 두 지점으로 줄어들게 되고 그루브 깊이 150 $\mu\text{m}$  부터는 두 지점의 와동이 하나로 겹쳐짐을 볼 수 있다. 웨이퍼가 연마되는 정도를 고려했을 때 와동이 합쳐지면서 웨이퍼 표면 가까이 있는 와동의 크기는 더욱 커짐을 알 수 있다. 그러므로 그루브 깊이가 점차 줄어들면서 웨이퍼 표면에 작용하는 전단응력의 크기는 커지게 되고 이는 웨이퍼의 연마율(M.R.R)을 높이게 한다.

따라서 그루브 사이즈(254  $\mu\text{m}$   $\times$  50 $\mu\text{m}$ )인 경우에 가장 높은 전단응력을 가지게 된다. 그루브 사이즈(254  $\mu\text{m}$   $\times$  25 $\mu\text{m}$ )인 경우에는 그루브 깊이가

매우 작아서 유체의 흐름이 와동의 흐름을 보이지 않아 웨이퍼의 전단응력이 떨어지게 된다. 그루브 사이즈(254  $\mu\text{m} \times 0\mu\text{m}$ )는 와동이 전혀 일어나지 않는 경우로 일정한 크기의 가장 낮은 전단응력을 나타낸다.

Fig. 4 는 패드와 그루브 표면에 가해지는 전단응력의 분포이다. 패드와 그루브 표면의 전단응력은 웨이퍼 표면의 전단응력에 크게 영향을 미치므로 설계에 있어서 중요한 요소가 된다. 그래프를 살펴보면 그루브가 없는 경우에는 전단응력의 분포가 일정함을 보였고 그루브가 있는 경우에는 그루브의 입구, 출구 지점에서 전단응력이 높아짐을 보였다.

그루브의 깊이가 381 $\mu\text{m}$  인 경우에서부터 깊이가 줄어들면서 전단응력의 크기가 점차 커짐을 알 수 있었고 그루브 깊이가 50 $\mu\text{m}$  인 경우에 전단응

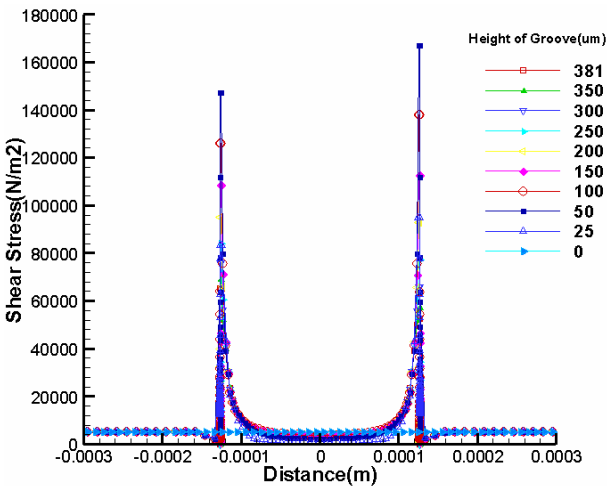


Fig. 4 Shear Stress on Pad and Groove of each case

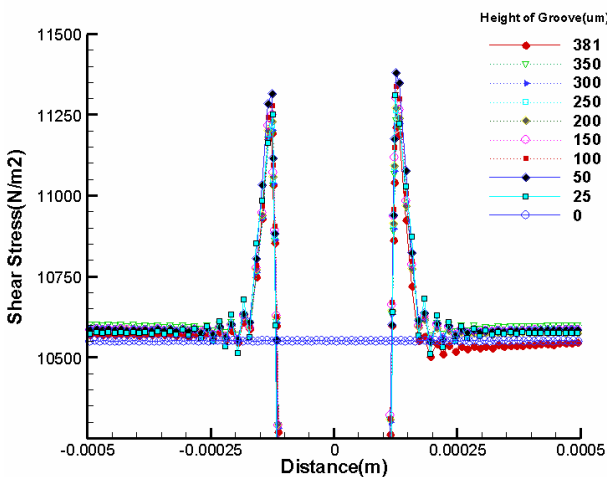


Fig. 5 Shear Stress on Wafer of each case

력이 가장 큰 값을 가짐을 보였다. 그리고 깊이가 그루브 깊이 25 $\mu\text{m}$  인 경우에는 전단응력의 크기가 작아짐을 보였다.

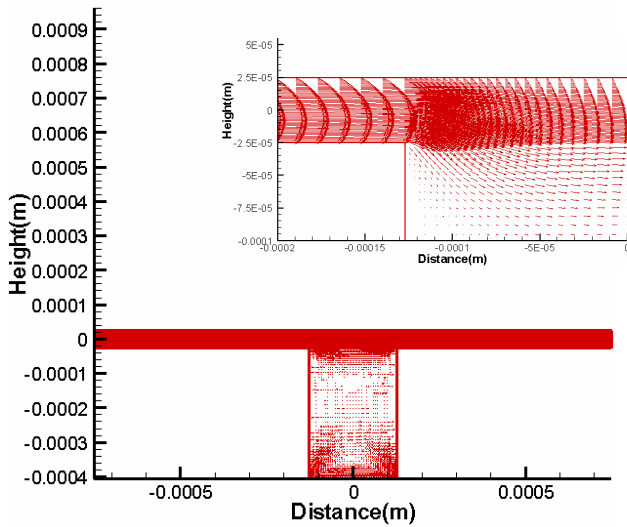
웨이퍼 표면에 작용하는 전단응력은 연마율을 결정하는 가장 중요한 역할을 하게 된다. Fig. 4 는 웨이퍼 표면에 작용하는 전단응력의 분포를 나타낸다. 패드와 그루브 표면의 전단응력의 분포와 같은 경향성을 보이고 있다. 그루브 깊이가 줄어들어 따라 전단응력이 커짐을 보이고 50 $\mu\text{m}$  의 그루브 깊이인 경우 가장 큰 전단응력의 값을 보였다. 그리고 웨이퍼 표면의 결과 역시 25 $\mu\text{m}$  인 경우에는 전단응력의 크기가 작아짐을 보였다.

기존의 상용화된 패드의 그루브 깊이인 381 $\mu\text{m}$  와 가장 높은 전단응력을 나타내는 그루브 깊이인 50 $\mu\text{m}$  인 경우를 비교해 보았을 때 전단응력 차가 200 pa 인데 이는 마이크로 영역임을 고려하였을 때 웨이퍼의 연마 작용에 크게 영향을 줄 것이라고 사료된다.

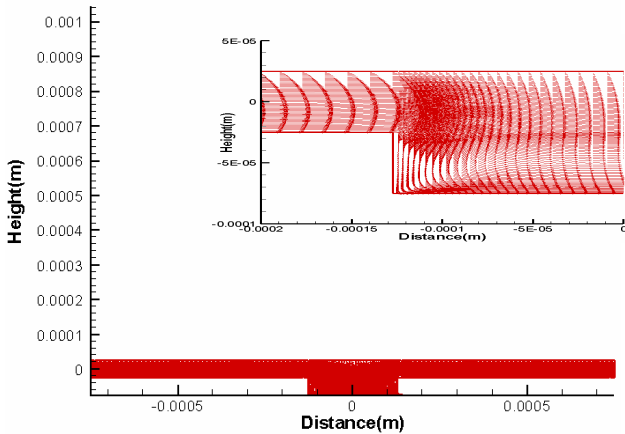
Fig 6 은 기존의 대상 모델인 K-그루브(254  $\mu\text{m} \times 381\mu\text{m}$ )와 웨이퍼의 전단응력이 가장 높게 나타난 그루브(254  $\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ )의 속도 벡터의 분포를 나타내고 있다. 그루브가 시작되는 부분과 끝나는 부분에서 속도 구배가 크다는 것을 알 수 있다. 이는 그루브가 있는 패드의 경우가 그루브가 없는 패드에 비해 그루브 주위에서 전단응력이 높게 나타나고 있음을 보인다.

두 경우의 속도 벡터를 비교 분석 해볼 때 Fig. 3 의 유선의 분포에서 나타났듯이 깊이 381 $\mu\text{m}$  인 경우 웨이퍼 표면 부근에 와류가 있고 웨이퍼 표면에 영향을 미치지 않을 만큼 떨어진 그루브 하단부에 이차적인 와류가 분포 함을 볼 수 있다. 그에 반면 그루브 깊이 50 $\mu\text{m}$  인 경우는 그루브 깊이가 작아서 웨이퍼 표면에 발생하는 와류와 그루브 하단부에 분포하는 이차적 와류가 겹쳐게 됨을 보인다. 이는 웨이퍼의 전단응력을 높게 한다. 따라서 381 $\mu\text{m}$  깊이의 그루브보다 50 $\mu\text{m}$  깊이의 그루브가 전단응력이 높다는 것을 예측하게 한다.

위의 결과들 즉, 그루브 내의 유선, 패드와 그루브 표면의 전단응력, 웨이퍼 표면의 전단응력, 그리고 그루브 깊이 381 $\mu\text{m}$  와 50 $\mu\text{m}$  의 속도 벡터의 분포를 종합 분석해 보았을 때 그루브 깊이는 그루브 폭 254 $\mu\text{m}$  의 1/5 의 길이인 그루브 사이즈 (254  $\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ )인 경우에 웨이퍼의 연마율을 가장 높일 것으로 사료된다.



(a)



(b)

**Fig. 6** Velocity vector distribution in the pad (a) with groove (254 μm × 381μm) and (b) with groove (254 μm × 50μm)

### 5. 결론

본 연구는 그루브 깊이에 따른 슬러리와 연마 입자의 거동 그리고 웨이퍼의 연마율(M.R.R)에 대해 수치적 연구를 하였다. 총 10 가지 경우의 그루브 깊이를 가진 그루브 형상에 대한 슬러리 유동의 수치해석을 수행하여 최적의 그루브 사이즈를 얻을 수 있었다.

수치해석을 통하여 그루브 깊이는 슬러리의 거동과 웨이퍼의 연마율(M.R.R)을 높이는데 크게 영향을 미치는 중요한 인자임을 알 수 있었다. 각 경우 그루브 내 유선의 분포와 속도 벡터의 분포를 보았을 때 유체의 와동이 유지되는 한 그루브의 깊이는 짧아질수록 전단응력은 점차 커짐을 보였다. 웨이퍼 표면의 와동과 그루브 하단부의 이

차적인 와동이 가장 크게 겹쳐질 때 웨이퍼의 전단응력이 가장 높은 것을 알 수 있었고 그루브내에 유체의 와동이 사라지면서 전단응력의 크기가 줄어들음을 볼 수 있었다. 따라서 와동은 웨이퍼의 연마율에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

CMP 공정이 마이크로 영역임을 고려하였을 때 본 연구의 결과로 최적화된 그루브 사이즈 (254 μm × 50μm)는 기존의 그루브에 비해 웨이퍼의 연마율을 향상시킬 것으로 사료된다.

본 연구에서 사용된 수치 유동 해석은 국부적인 영역의 물리 현상(local physics)을 분석하여 CMP의 메커니즘을 이해하는데 매우 유용한 도구로 활용되었다.

### 후기

본 연구는 한양대학교 교내 연구비에 의해 진행되었으며 이에 감사합니다.

### 참고문헌

- (1) W. J. Patrick, W. L. Guthrie, and P. M. Schiabe, J., 1991, *Electrochem. Soc.*, 138, p.1778.
- (2) J. M. Steigerwald, S. P. Murarka and R. J. Gutmann, 1997, *Chemical Mechanical Planarization of Microelectric Matrials*, Wiley-Interscience, New York.
- (3) Runnels, S.R. and Eyman, L.M., 1994, *Journal of Electrochemical Society*, Vol. 141, pp. 1698~1701..
- (4) Sundararajan, S., Thakurta, D. G., Schwendenman, D. W., Murarka, S. p., and Gill W. n., 1999, *Journal of Electrochemical Society*, Vol. 146, pp. 761~766.
- (5) W. Jeng, C.C.Liang and J. J. Yeuan, 2001, *Proc. Of the 6th International Chemical Mechanical Polishing (CMP) for ULSI Multilevel Interconnection*, pp49-55
- (6) W. Jeng, J. J. Yeuan and S. H. Lin, 2002, *Proc. Of the 7th International Chemical Mechanical Polishing (CMP) for ULSI Multilevel Interconnection*, pp.59-66
- (7) D. S. Boning and O. Ouma, 2000, *Semiconductors and Semimetals*, Vol. 63., pp.92-95
- (8) Suhas V. Patankar, 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, p.126-134