

# Particle Image Velocimetry 기법을 이용한 CMP 공정의 Slurry 유동 분석

신상희<sup>#</sup>, 김문기\*, 윤영빈\*\*, 고영호\*\*\*, 흥창기\*\*\*

## Velocity Measurements of Slurry Flows in CMP Process by Particle Image Velocimetry

Sanghee Shin<sup>#</sup>, Munki Kim\*, Youngbin Yoon\*\*, Youngho Koh\*\*\* and Changgi Hong\*\*\*

### ABSTRACT

Chemical Mechanical Polishing(CMP) in semiconductor production is characterized its output property by Removal Rate(RR) and Non-Uniformity(NU). Some previous works show that RR is determined by production of pressure and velocity and NU is also largely affected by velocity of flowfield during CMP. This study is about the direct measurement of velocity of slurry during CMP and whole flowfield upon the non-groove pad by Particle Image Velocimetry(PIV). Typical PIV system is modified adequately for inspecting CMP and slurry flowfield is measured by changing both pad rpm and carrier rpm. We performed measurement with giving some variation in the kinds of pad. The results show that the flowfield is majorly determined not by Carrier but by Pad in the case of non-groove pad.

**Key Words :** Chemical Mechanical Polishing (화학적 기계적 연마장치), Particle Image Velocimetry (입자 이미지 측정기법), Flowfield of Slurry (슬러리 유동장), Non-Uniformity of velocity (속도의 불균일성), Velocity of slurry flow (슬러리 유동의 속도)

### 1. 서론

Chemical Mechanical Polishing (CMP)은 반도체 적층공정 중에 발생하는 웨이퍼 상의 요철을 제거하고, 동시에 사진공정에서 요구하는 엄밀한 초점심도를 만족시키는 초정밀 광역평탄화 공정이다. 일반적인 CMP 공정은 웨이퍼 표면이 수 psi의 압력으로 다공성 패드에 의해 눌려져 상대운동을 하고,

이와 동시에 이 둘 사이에 각각의 웨이퍼에 적합한 화학액과 수십 nm ~ 수백 nm 크기의 연마제가 포함되어 있는 슬러리를 공급하여 연마를 진행한다. 분산제, 혼탁제, 소포제, 완충제, 산화제, 반응억제제 등의 여러 요소를 포함하는 화학액은 웨이퍼의 표면을 화학적으로 약화시키거나 화학 결합을 끊는 역할을 한다. 반면에 연마제들은 슬러리의 유동과 함께 움직이거나, 패드 표면의 작은 구

# 접수일: 2005년 11월 29일; 계재승인일: 2006년 4월 14일

\* 교신저자: 서울대학교 기계항공공학부

E-mail [sanghee.shin@gmail.com](mailto:sanghee.shin@gmail.com) Tel. (02) 880-7396

\*\* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

\*\*\* 서울대학교 기계항공공학부

\*\*\*\* 주) 삼성전자 메모리사업부

멍 (open pore) 안에 들어가서 패드를 따라 회전하면서 웨이퍼의 표면을 기계적으로 연마한다.<sup>1,2</sup>

CMP는 현재 ULSI circuits의 평탄화 작업에 적합한 청밀도를 보이고 있으나, 지속적으로 증가하는 회로 집적도와 웨이퍼의 크기 및 낮은 기계적 강도를 갖고 있는 저유전물질 (low-k material) 등의 새로운 재료의 출현 등으로 미루어 볼 때, 앞으로 보다 높은 청밀도가 필요할 것으로 판단된다. 그러나, CMP의 공정변수 – 웨이퍼와 패드의 상대속도, 웨이퍼에 가하는 적용압력, 슬러리 유입량, 연마제 크기, 슬러리 pH, 웨이퍼의 크기, 패드 종류 등 – 가 너무나 많고 서로 간섭하기 때문에, CMP 결과를 명확하게 예측하는 것은 매우 난해할 뿐만 아니라 CMP의 기본적인 연마원리를 확립하는 것 또한 한 힘든 일이다.<sup>3</sup> 이러한 이유로, CMP 공정의 개선은 대부분 반복적인 실험에 의존하고 있으나, 이는 상당한 시간과 자본 및 노력을 요구하는 작업이기 때문에, CMP에 대한 근본적인 이해를 통한 적절한 모델의 확립이 절실하다.

기존 CMP 모델은 크게 두 가지 접근방법으로 연구가 진행 되어왔는데, 하나는 웨이퍼와 패드 사이에 수십  $\mu\text{m}$ 의 슬러리 막이 존재한다는 것을 기본 가정으로 하여 fluid dynamics를 이용한 접근법이고,<sup>4,6</sup> 다른 하나는 웨이퍼와 패드가 직접 접촉한 상태에서 연마제에 의해 연마가 진행된다는 기본 가정하에 contact mechanics를 이용한 접근법이다.<sup>7-10</sup> 그러나 실제 CMP 공정 중에 패드와 웨이퍼 사이를 정확히 관찰할 수 있는 방법이 없기 때문에, 상반된 각각의 이론 중에 어느 것이 더 적절한가를 판단하는 것은 매우 어렵다.

이에, 본 논문에서는 CMP 공정에 대한 보다 근본적인 이해를 위해, 패드와 웨이퍼 사이의 유동장을 PIV 기법을 이용하여 측정하였다. CMP 유동장 가시화에 관한 기존연구들은 형광액의 농도 등을 이용한 정성적인 방법인데 반하여,<sup>11,12</sup> PIV(Particle Image Velocimetry)를 이용한 방법은 유동장 내의 입자를 직접 측정하는 것이므로 보다 정확하게 유동장 정보를 얻을 수 있는 장점이 있다. 본 연구는 CMP 유동장의 직접적인 측정을 시도한 데에 큰 의미가 있으며, 본 연구의 첫 단계로써 groove가 없는 패드에 대한 유동장을 측정하였다. 패드의 회전속도와 웨이퍼의 회전 속도를 변수로 하여 유동장을 관찰하였고, 그 결과 groove가 없는 패드의 경우 본 연구의 공정조건에서 패드와

웨이퍼 사이에 유동장이 존재할 것으로 판단되었다. 이에 유동장을 예측하는 간단한 모델과 함께 결과의 타당성을 검증하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

기존의 PIV 시스템은 레이저에서 나오는 bulk beam을 sheet-forming optics를 통해 얇은 sheet beam을 만들어 유동장에 조사하여 유동의 2차원 평면의 속도장을 측정하는 방식이다.<sup>13</sup> 하지만 본 실험에서는 패드와 웨이퍼 사이의 두께가 매우 얕아서 이러한 sheet beam을 유막에 통과시키기 어려울 뿐만 아니라, Fig. 1에서 보듯이 기존의 CMP장비의 내부 공간은 매우 협소하여 여러 광학장치들을 설치하기가 어렵기 때문에 bulk beam을 이용하여 기존의 PIV 시스템과 다른 PIV 기법을 적용하였다.

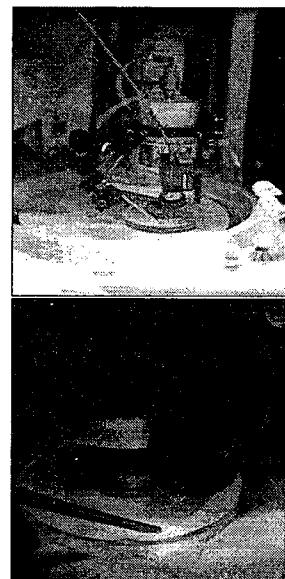


Fig. 1 Pictures of CMP machine equipped with CCD camera and bulk laser beam illuminated from guided arm

Fig. 2에서 보듯이 레이저에서 나오는 bulk beam은 guide arm을 통해 원하는 측정영역으로 위치를 조정할 수 있다. Guide arm의 끝에 위치한 endoscope에는 오목 렌즈가 있어서 빛을 퍼지게 하는 역할을 하여, 빛이 원하는 조사영역에 넓고

일정하게 도달하게 된다. 레이저 beam은 패드와 웨이퍼가 만나는 2차 평면을 조사하게 된다. 웨이퍼는 빛의 투과를 위해 아크릴으로 제작하였다.

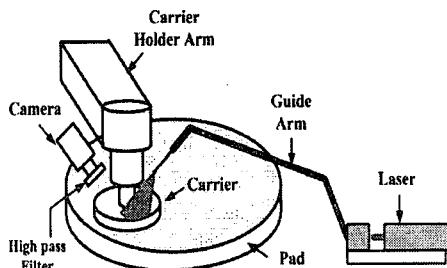


Fig. 2 Schematics of PIV set-up for CMP

조사된 레이저 beam은 조사영역에 수직이기 때문에 반사된 강한 빛이 다시 카메라로 들어가게 된다. 이러한 반사된 빛을 막기 위해서 기존의 PIV 용 입자가 아닌 형광 입자를 슬러리에 주입하여 형광 입자에 의해 발생되는 형광 신호만의 이미지를 CCD 카메라로 얻는다.

PIV 기법은 유체 자체의 속도가 아니라 추적 입자의 속도를 측정하는 방식이기 때문에 추적 입자는 유체의 흐름을 정확히 따라갈 수 있도록 충분히 작아야 하면서도 높은 신호 대 잡음비(SNR, Signal to Noise)를 얻기 위해 크기가 충분히 커야 하는 서로 상충되는 조건을 동시에 만족해야 한다. 일반적으로 입자의 빛 산란 특성은 입자와 유체의 굴절률(refractive index)의 비, 입자의 크기, 입자 모양의 함수로 표현되는 반면, 입자 추적 특성은 입자의 밀도와 크기만의 함수로 표현된다고 알려져 있다.<sup>13</sup>

본 연구에서 채택한 실험 시스템은 앞에서 언급한 바와 같이 기존의 PIV 시스템과 차이가 있다. 일반적으로 액체 유동에 PIV 기법을 적용하는 경우는 매질 굴절률 차이가 있기 때문에 기체 실험에 비해 훨씬 큰 입자를 사용해야 한다. 하지만, 본 연구에서 슬러리 유동의 흐름을 살펴보려는 목표를 두고 있었기 때문에 추적 입자를 선정함에 있어 슬러리 내 연마 입자 크기에 상응하는  $1 \mu\text{m}$  이하의 입자를 선택하려고 하였으나, 초기 실험을 통해  $1 \mu\text{m}$  이하 입자는 현재 PIV 시스템으로 측정 가능하지 않음을 확인하였다. 측정 가능한 크기의 형광입자를 선택하여 본 실험에서 적용한 형광입자의 직경은  $7 \mu\text{m}$ 이다. 형광입자의 크기가  $1 \mu\text{m}$ 이

하인 경우는 마이크로 PIV 기법을 사용해야 하지만, 렌즈의 확대 비율이 매우 커야 하기 때문에 측정영역이 작아져서 전체적인 유동장을 파악하기에는 부적절하였다. 이 형광입자는 532nm의 펄스 레이저에 의해 여기되어, 532nm의 산란 신호와 612nm의 형광 신호를 발산하게 된다. 앞서 언급한 바와 같이, pad에 의한 532nm 파장의 반사광, 즉 산란 신호를 제거하기 위해 카메라 앞에 600nm 이상의 신호만 통과하는 high pass filter를 사용, 그 이하의 신호들을 제거하였다. 뿐만 아니라 CMP내부로 들어가는 모든 빛을 차단하여 정확도를 높이기 위해 암실상태를 유지하였다

## 2.2 실험 방법

이 실험에는 기존의 PIV장치와 달리 bulk beam을 사용하였으므로, 조사영역이 작다. 결국 CMP 장치의 웨이퍼 전체를 한번에 조사할 수가 없기 때문에 조사영역을 약  $30^\circ$  각으로 나눠서 측정하게 되었다. 또한, 실험장치의 협소함으로 인해 CCD 카메라를 조사영역에 수직인 아닌 기울여 설치하여서 생기는 초점 흐려짐을 줄이고자, 초점을 한 조사영역당 두 군데로 맞춰서 측정하였다. 각 실험영역에서 50번을 반복 측정하여 평균을 내었으며, 측정 후 각 영역은 회전 이동 및 평행 이동으로 합쳤으며, 각도 방향으로 보간법을 실시하였다.

실험은 웨이퍼와 패드의 회전속도를 변화시키면서 시행하였으며, 두 회전속도의 상대적인 비 또한 고려하였다. 마찰을 위해 웨이퍼에 2psi의 압력을 가압한 후 실험을 수행하였으며, 패드는 groove가 없는 Cabot Epad200이 사용되었다. 보다 자세한 실험 조건은 Table 1과 Table 2에 표시되어 있다.

Table 1 Experimental conditions of wafer and pad velocities

E-pad 200, Cabot	Wafer Velocity [rpm]	Pad Velocity [rpm]
Case 1 (N1)	33	84
Case 2 (N2)	57	84
Case 3 (N3)	93	84
Case 4 (N4)	57	145

Table 2 Specifications of PIV system

Equipment	Specifications
Double-Pulsed Nd:YAG Laser	532 nm at 10Hz 50 mJ/pulse
Laser Endoscope	Tube length of 200mm with diameter of 8mm Divergence angle of ca.30 deg.
Fluorescence Particles	Polystyrene (1.05 g/cm <sup>3</sup> ,refractive index of 1.59@589nm) Excitation/Fluorescence wavelength: 540/612nm
Laser Guiding Arm	15mm aperture
Imager Compact Double Frame CCD Camera	Dual-Frame-Technique for cross correlation Time separation of minimum 15 $\mu$ s $\pm$ 5 $\mu$ s 12bit @ 20Hz: 12.5 frames/s Resolution: 1280 $\times$ 1024 pixels: Chip format size: 8.6 $\times$ 6.9 mm <sup>2</sup> Spectral range: 290~900nm Electronic shutter minimum: 10 $\mu$ s
Lens	f 17mm, NA 0.95
Filter	600 nm high pass filter
Computer & Software	Davis 6.2, OS: Window 2000

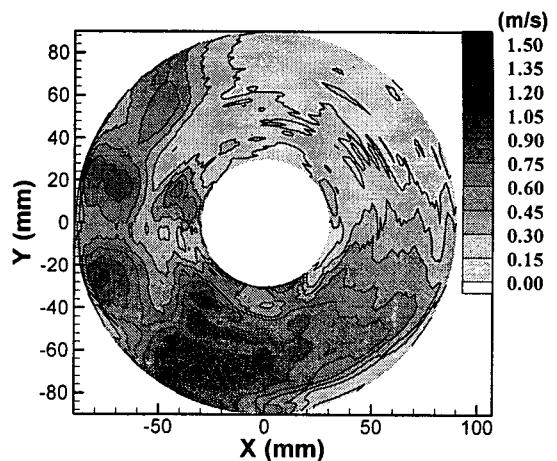
### 3. 실험 결과

패드와 웨이퍼의 회전속도에 따른 속도장의 변화를 알아보았다. 전체 웨이퍼 크기에서 유동장의 속도가 어떻게 분포하는지에 대해서 조사하였고, 유선 분석을 통해 그 경향을 분석하였다.

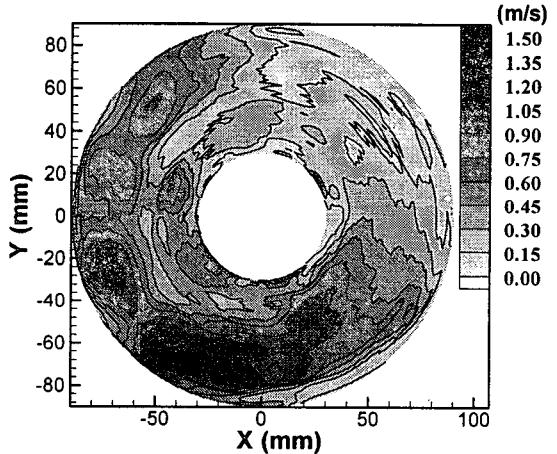
#### 3.1 유동장의 속도 분포

실험 조건에 따른 유동장의 속력 분포가 Fig. 3에 도시되어 있다. 보이는 바와 같이 회전속도의 변화에 따라 부분적으로 속력이 변화하는 부분이 존재하나 전체적으로는 크게 두드러지는 변화는 없어 보인다.

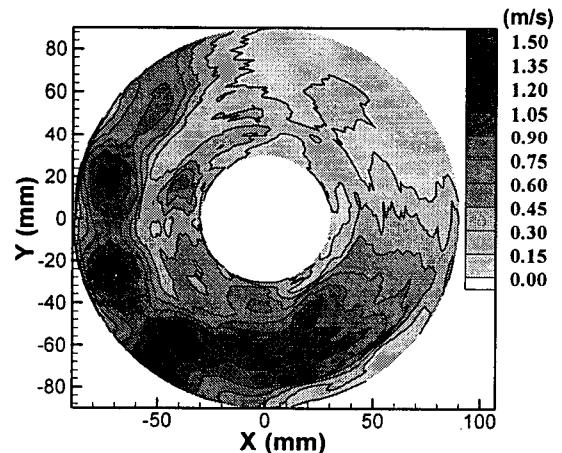
공통적으로 3사분면 영역( $x<0, y<0$ )이 빠른 것으로 드러난다. 이는 패드 회전의 중심이 1사분면 영역의 바깥쪽에 존재하고 있어서 패드에서 멀리 있는 3사분면 영역의 패드 속도가 빠르기 때문에 유동의 속도도 패드 속도에 비례하여 빠르게 나타나



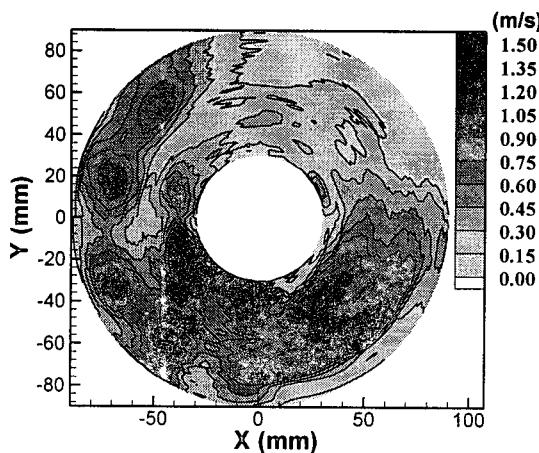
(a) N1: Carrier 33rpm/Pad 84rpm



(b) N2: Carrier 57rpm/Pad 84rpm



(c) N3: Carrier 93rpm/Pad 84rpm



(d) N4: Carrier 57rpm/Pad 145rpm

Fig. 3 Flow velocity distribution at various carrier and pad rpm in non-groove pad

는 것으로 보인다. 이는 유동장의 속력에는 패드가 주로 영향을 주며 웨이퍼의 영향은 제한적이라는 추측을 하게 한다.

한편, N2 및 N4의 경우엔 속력이 빠른 부분(상대적으로 어두운 부분)이 다른 경우에 보다 넓은 것으로 보이는데, 이는 Table 3의 평균속력 비교에서 더욱 잘 나타난다. 우선 N4의 경우를 N2의 경우와 비교해 볼 경우, 패드 회전속도의 증가에 따라 평균 속력이 증가함을 볼 수 있다.

이는 앞에서 언급한 대로 유동장의 속도에는 패드 회전속도가 더 큰 기여를 한다는 추측을 뒷받침해주는 것이라 할 수 있다. 반면 N2의 평균 속도가 N1과 N3의 경우와 비교할 때 더 빠른 이유는 웨이퍼의 회전속도가 단순히 빠른 것이 유동장의 속도를 빠르게 하는 것이 아니라, 패드 회전 속도와의 속도비가 특정한 조건에서 가장 빠르게 될 것이라는 추측을 가능하게 한다. 이는 Fig. 4의 그림에서 더 뚜렷이 확인된다.

Table 3 Mean speed of flow in Non-groove pad

Cases	Ratio of carrier to pad velocity	Mean Speed (m/s)
N1	0.39	0.468
N2	0.68	0.501
N3	1.11	0.466
N4	0.39	0.539

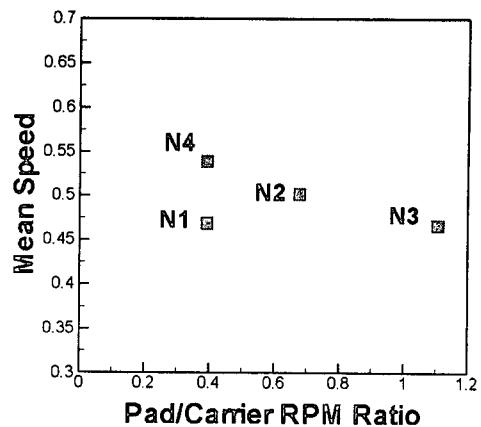
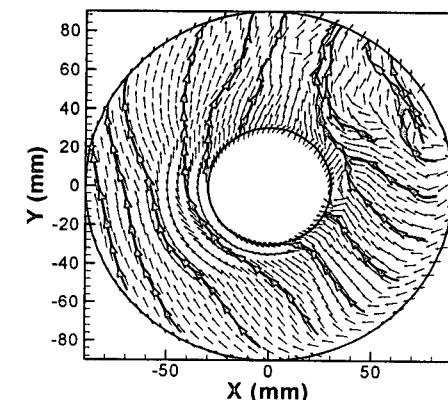
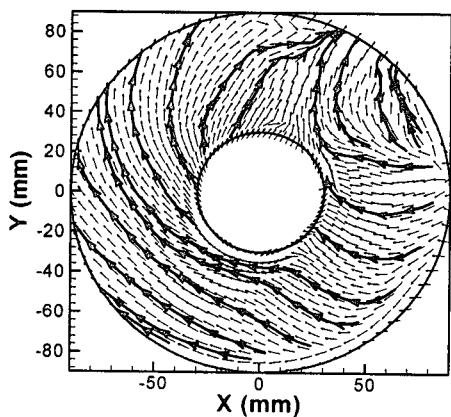


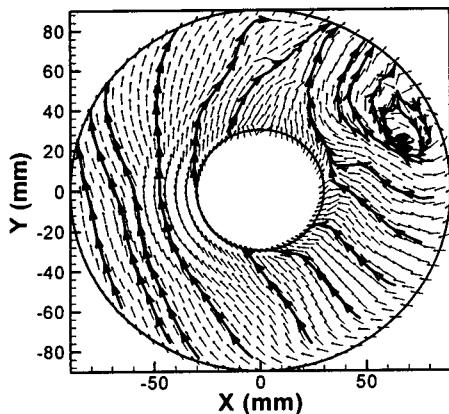
Fig. 4 Relation between carrier/pad RPM ratio and mean velocity in non-groove pad



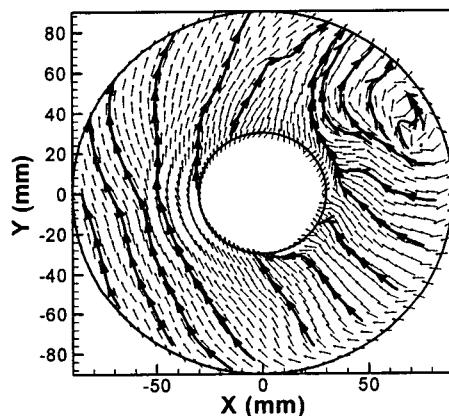
(a) N1: Carrier 33rpm/Pad 84rpm



(b) N2: Carrier 57rpm/Pad 84rpm



(c) N3: Carrier 93rpm/Pad 84rpm



(d) N4: Carrier 57rpm/Pad 145rpm

Fig. 5 Streamlines of flow of various carrier/pad rpm in non-groove pad

### 3.2 유동장의 유선 분석

3.1절의 속도장 분포를 바탕으로 하여, 유동장의 유선을 구하였다. 앞의 Fig. 5에서 보듯이 유동장은 전체적으로 패드의 회전방향을 따라서 움직이고 있다.

한편, 모든 실험조건에서 공통적으로 1사분면의 흐름이 불균일하게 나타난다. 이런 현상이 나타나는 이유는 우선 CMP arm이 1사분면 방향으로 뻗어 있어 1사분면 부분을 측정할 때 카메라를 많이 기울여 측정할 수 밖에 없어서 유효 측정면(Depth of Field)에 들어오는 부분이 작아지게 되어, 상대적으로 균일하지 못한 데이터를 얻었기 때문이다.

하지만, N3의 경우와 나머지의 경우를 비교해보

면 단순히 측정 시 발생하는 불균일성이 아닌 실제 발생하는 현상임을 알 수 있다. N3의 경우 1사분면 영역에 환류(Backflow)가 나타남을 볼 수 있는데, 이는 다른 조건에서는 나타나지 않는 것을 알 수 있다.

이는 다음과 같은 몇 가지 가정과 이론적 전개로 설명할 수 있다. 우선 패드와 웨이퍼 사이에 연속적인 유체 필름이 존재한다고 가정을 하자. 이때, 필름 내부의 유동을 충류라고 가정할 경우, 이 충류의 양쪽 경계는 웨이퍼의 선속도와 패드의 선속도가 된다. 이 경우, 단순히 유동의 속도를 웨이퍼와 패드의 선속도의 산술평균으로 볼 수 있다. 그러면 유동의 속도는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>14</sup>

$$\vec{v}_{flow} = \frac{(\vec{v}_{pad} + \vec{v}_{wafer})}{2} \quad (1)$$

다음으로 계산의 편의를 위해, 웨이퍼의 중심과 패드의 중심을 잇는 직선을 y축으로 하는 local 좌표를 설정한 후, 웨이퍼 면의 어떤 한 점  $\vec{p}$ 의 좌표를  $\vec{p} = (p_x, p_y)$  라 정의하고, 웨이퍼의 각 속도를  $w$ 라고 하면 패드의 각 속도를 다음과 같이 정의할 수 있다. ( $\alpha$ 는 비례상수)

$$w_{wafer} = w \quad (2a)$$

$$w_{pad} = \alpha w \quad (2b)$$

패드의 중심으로부터 웨이퍼의 중심까지의 거리를  $d$ 라고 한 후, 식(1)과 (2)를 이용하면 다음과 같은 패드와 웨이퍼의 선속도를 알 수 있게 된다

$$\vec{v}_{wafer} = -wp_y \hat{x} + wp_x \hat{y} \quad (3)$$

$$\vec{v}_{pad} = -\alpha w(p_y - d) \hat{x} + \alpha w p_x \hat{y} \quad (4)$$

앞에서 정한 점  $\vec{p}$ 에서 유동장의 속도가  $\vec{v}_{flow}$ 라고 할 경우  $\vec{p}$ 의 이동 경로는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{v}_{flow} \quad (4a)$$

$$\frac{dp_x}{dt} = -p_x w \frac{1+\alpha}{2} - wd \frac{\alpha}{2} \quad (4b)$$

$$\frac{dp_y}{dt} = p_x w \frac{1+\alpha}{2} \quad (4c)$$

위의 세 식을 풀면 다음과 같은 결과를 구할 수 있다.

$$p_x = A \cos\left(\frac{1+\alpha}{2}wt + \psi\right) \quad (5a)$$

$$p_y = A \sin\left(\frac{1+\alpha}{2}wt + \psi\right) - \frac{\alpha}{1+\alpha}d \quad (5b)$$

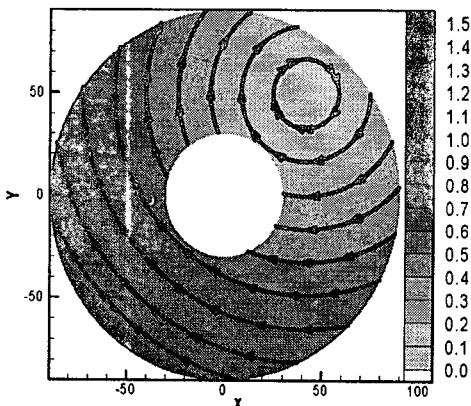
여기서,

$$A = \sqrt{p_x(0)^2 + (p_y(0) + \frac{\alpha}{1+\alpha}d)^2} \quad (6a)$$

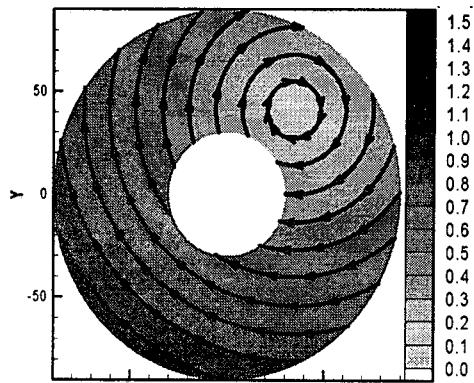
$$\psi = \tan^{-1}\left(\frac{p_y(0) + \frac{\alpha}{1+\alpha}d}{p_x(0)}\right) \quad (6b)$$

이고,  $p_x(0)$ ,  $p_y(0)$ 는  $\vec{p}$  점의 초기 위치이다.

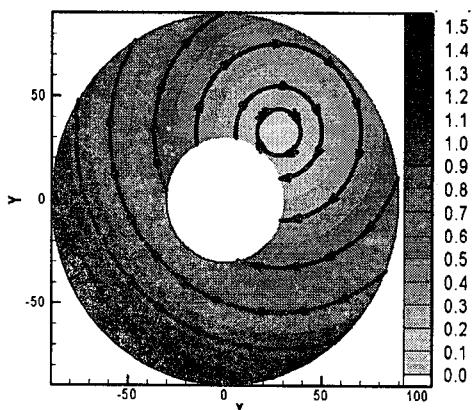
위의 결과에 따르면  $\vec{p}$ 의 이동 경로는 결국 원을 그리게 되고, 그 중심은 패드와 웨이퍼의 중심을 이은 직선 상에서 웨이퍼의 중심으로부터  $\{\alpha/(1+\alpha)\}d$  만큼 떨어진 지점에 존재하게 된다.<sup>15</sup>



(a) N1: Carrier 33rpm/Pad 84rpm



(b) N2: Carrier 57rpm/Pad 84rpm



(c) N3: Carrier 93rpm/Pad 84rpm

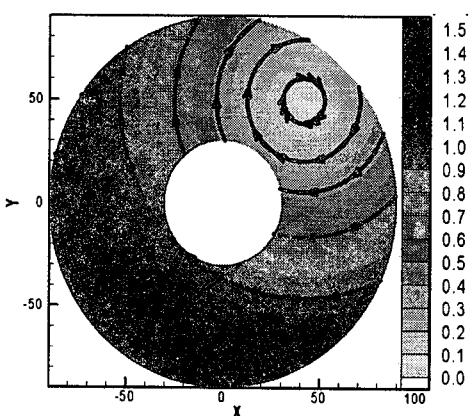


Fig. 6 Tracking lines of  $\vec{p}$  by assuming  $\vec{v}_{flow} = (\vec{v}_{pad} + \vec{v}_{wafer})/2$

위의 가정에 따르면 우리가 측정한 모든 경우에 대해서 환류가 나타나게 된다. 하지만 위의 가정과 달리 패드와 웨이퍼가 유동에 주는 영향이 균등하지 않고, 패드가 더 큰 영향을 주고 상대적으로 웨이퍼의 영향이 작다면 환류의 중심은 이론적으로 구한 것보다 더 패드의 중심에 가깝게 위치할 수 있다. 따라서 가장 웨이퍼의 중심에 가깝게 위치할 수 있는 조건인 N3에서는 환류의 중심이 웨이퍼 안쪽에 위치하여 측정이 가능했으나, 다른 경우에는 웨이퍼 바깥에 위치하여 환류가 나타나지 않는 것으로 이해할 수 있으며 이는 결국 패드와 웨이퍼의 상호작용이 유동장의 형성에 영향을 미친다는 것을 증명하는 것이라 할 수 있다.

또한 이는 패드와 웨이퍼의 회전속도가 어떤 특정한 비에서 전체 유동장의 속력이 가장 빠르다는 현상을 이해하는 실마리로 제공한다. 기본적으로 유동장의 속도는 패드와 웨이퍼의 선속도에 각각 가중치를 가지고 비례하게 되는데, 어느 특정한 비에서는 흐름을 저해하는 환류 등이 나타나지 않아, 전체적으로 흐름이 빨라지는 결과가 나타난다고 볼 수 있기 때문이다.

#### 4. 결론

CMP 공정 중의 슬러리 유동에 대한 구체적인 측정 결과가 부족한 상황에서 기존의 PIV기법을 다소 변형시켜 패드와 슬러리 사이의 유동장을 측정하였다. 패드와 웨이퍼의 회전속도를 변수로 선택하여 그 속도를 변화시켜가면서 측정한 결과, 유동장의 속도는 패드 회전속도에 주로 영향을 받는 것으로 나타났다. 웨이퍼 회전속도도 유동에 영향을 미치나, 제한적임을 알 수 있었다.

또한 패드와 웨이퍼의 상호작용으로 유동장 내에 환류가 생김을 관측할 수 있었고, 약간의 가정을 통해 그 현상을 해석해 보았다. 이 결과는 groove가 없는 패드에서는 슬러리 유체 필름이 연속적으로 존재하는 것으로 가정할 때 쉽게 해석될 수 있었고, 이는 실제 유동장의 존재 유무가 불분명한 현 상황에서 groove가 없는 패드의 경우엔 패드와 웨이퍼 사이에 유체 필름이 존재하여 그 사이에서 윤활 및 연마작용을 한다는 주장에 좀 더 적합한 결과가 될 수 있다. 다만 확실히 결론을 짓기에는 이 실험의 자료 만으로는 불충분하며, 추후에 현재 반도체 양산라인에서 주로 사용중인 groove 패드와의 비교 및 분석을 수행하여 보다 정

량적인 정보를 얻고자 한다.

#### 후기

본 논문은 삼성전자 주식회사의 후원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

#### 참고문헌

- Doi, T., Kasai, T. and Nakagawa, T., "半導體平坦化 CMP 技術," 株式會社 工業調查會, 1998.
- Oliver, M. R., "Chemical-Mechanical Planarization of Semiconductor Materials," Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 2004.
- Zantye, P. B., Kumar, A. and Sikder, A. K., "Mater. Sci. Eng. R.," Reports, Vol. 45, pp. 89-220, 2004.
- Runnels, S. R. and Eyman, L. M., "Tribology Analysis of Chemical-Mechanical Polishing," J. Electrochem. Soc., Vol. 141, pp. 1698-1701, 1994.
- Park, S. S., Cho, C. H. and Ahn, Y., "Hydrodynamic Analysis of Chemical Mechanical Polishing Process," Tribology International, Vol. 33, pp. 723-730, 2000.
- Thakurta, D. G., Schwendeman, D. W., Gutmann, R. J., Shankar, S., Jiang, L. and Gill, W. N., "Three-Dimensional Wafer-Scale Copper Chemical-Mechanical Planarization Model," Thin Solid Films, Vol. 414, No. 1, pp. 78-90, 2002.
- Larsen-Bass, J. and Liang, H., "Probable role of abrasion in chemo-mechanical polishing of tungsten," Wear, Vol. 233-235, pp. 647-654, 1999.
- Ahmadi, G. and Xia, X., "A model for mechanical wear and abrasive particle adhesion during the CMP process," J. Electrochem. Soc., Vol. 148, pp. G99-G109, 2001.
- Zhao, Y. and Chang, L., "A micro-contact and wear model for CMP of silicon wafers," Wear, Vol. 252, pp 220-226, 2002.
- Qin, K., Moudgil, B. and Park, C. W., "A Chemical Mechanical polishing model incorporating both the chemical and mechanical effects," Thin Solid Films, Vol. 446, No. 2, pp. 277-286, 2004.
- Coppeta, J., Rogers, C., Philipossian, A. and Kaufman, F., "A technique for measuring slurry-flow

- dynamics during chemical-mechanical polishing,”  
Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 447, pp. 95-100,  
1997.
12. Hocheng, H. and Cheng, C. Y., “Visualized  
characterization of slurry film between wafer and pad  
during chemical mechanical planarization,” IEEE  
transactions on semiconductor manufacturing, Vol. 15,  
No. 1, pp. 45-50, 2002.
13. Raffel, M., Willert, C. E. and Kompenhans, J.,  
“Particle Image Velocimetry: A Practical Guide,”  
Springer, 1997.
14. Tseng, W. T., Chin, J. H. and Kang, L. C., “A  
Comparative Study on the Roles of Velocity in the  
Material Removal Rate during Chemical Mechanical  
Polishing,” J. Electrochem. Soc., Vol. 146, pp. 1952-  
1959, 1999.
15. Park, D. W., “A Control Method of Removal Rate  
Profiles,” Samsung technical reports, Samsung  
Electronics.