

# 패드 그루브의 밀도변화가 연마특성에 미치는 영향

박기현\*, 정재우\*, 이현섭\*, 서헌덕\*, 정석훈\*, 이상직\*, 정해도#

## The Effect of Pad Groove Density on CMP Characteristics

Kihyun Park\*, Jaewoo Jung\*, Hyunseop Lee\*, Heondeok Seo\*, Seokhun Jeong\*, Sangjik Lee, Haedo Jeong#

### ABSTRACT

Polishing pads play an important role in chemical mechanical polishing(CMP) which has recently been recognized at the most effective method to achieve global planarization. In this paper, we have investigated CMP characteristics as a change of groove density of polishing pads. The parameter( $K_n$ ) is proposed to estimate groove density of pad. The  $K_n$  is defined as groove area divided by pitch area. As the groove density value increased, removal rate increased to some point and then gradually saturated in case of increasing the groove density excessively. In addition Within wafer non-uniformity(WIWNU) worse as groove density increased excessively, although WIWNU improved as groove density increased. Also the uniformity of temperature of pad surface decreased as the groove density increased. It was because that the cooling effect increased as groove density increased. In other words, increasing the groove density which means the apparent contact area of pad has influence on amount of discharge of slurry during polishing process.

**Key Words** : Chemical mechanical polishing (화학 기계적 연마), Pad (패드), Groove (그루브), Apparent contact area (겉보기 접촉면적), Removal rate (연마율), Cooling effect (냉각효과)

### 1. 서론

반도체 소자가 고성능 및 고집적화가 됨에 따라 배선의 다층화와 선폭의 미세화가 요구되고 있다. 다층배선이 필요하기 때문에 소자의 표면구조가 복잡하게 되고 표면요철의 정도가 심해지게 된다. 서브마이크론(sub-micron) 이하의 반도체 소자를 제작하기 위해서 평탄화 공정이 필요하다. 따라서 평탄화 공정들 중에서 CMP에 의한 평탄화 공정이 점점

더 중요해지고 있다.<sup>1</sup>

CMP공정이란 연마패드와 웨이퍼 사이에 슬러리(Slurry:연마입자+연마액)를 공급하여, 압력을 가한 상태에서 서로 상대 운동을 시켜 연마하는 가공 기술이다. 이 연마공정은 연마입자와 패드의 접촉에 의한 기계적인 작용과 연마액의 화학성분에 의한 화학적인 작용이 복합되어 웨이퍼 표면의 요철이 선택적으로 제거되면서 평탄화가 이루어진다.<sup>2</sup>

연마 패드는 화학 기계적 연마공정의 특성에 영

\* 접수일: 2005년 1월 5일; 게재승인일: 2005년 6월 29일

\* 부산대학교 정밀기계공학과

# 교신저자: 부산대학교 기계공학부

E-mail hdjeong@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-2463

향을 미치는 중요한 인자중의 하나이며, 이러한 패드 인자로는 그루브, 경도, 포어, 탄성계수 등 다양하다. 이러한 인자들 중에서 패드 그루브의 밀도 변화는 패드와 웨이퍼가 접촉하는 연마지점에 공급되는 슬러리의 공급량의 변화를 발생시킬 것이다 또한 그루브 밀도의 변화는 패드 표면온도와 웨이퍼와 패드의 윤활상태에도 영향을 미쳐, 궁극적으로 연마특성의 변화를 초래할 것으로 생각된다.

따라서 본 연구에서는 패드 그루브의 밀도가 연마율과 연마불균일도에 미치는 영향을 연구하고자 한다.

## 2. 패드 그루브의 특성

### 2.1 그루브의 분류

연마패드의 분류는 크게 평면형상과 단면형상으로 나눌 수 있다. 패드의 평면형상은 Fig. 1에서와 같이 패드를 위에서 본 형상을 말하는 것으로, 그루브 패턴(Groove pattern)이라고 할 수 있다. 패드의 평면형상에는 동심원타입(concentric type), 직교타입(Grid type), 방사형타입(Radial type), 나선형타입(Spiral type) 등 매우 다양한 형상들이 있다. 패드의 단면형상은 패드를 단면으로 잘랐을 때 보이는 형상을 말하는 것으로, 세부적으로 그루브 프로파일과 그루브 치수로 분류할 수 있다. 패드의 단면형상 중에서 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 그루브 프로파일은 각각의 그루브 형상으로, 직각형상, 아치형상, 쐐기형상 등으로 나눌 수 있다. Fig. 3은 직각형상에 따른 치수개념도이며, 그루브 치수는 그루브 폭(w)과 깊이(d), 그리고 피치(p)로 나눌 수 있다.<sup>3</sup>

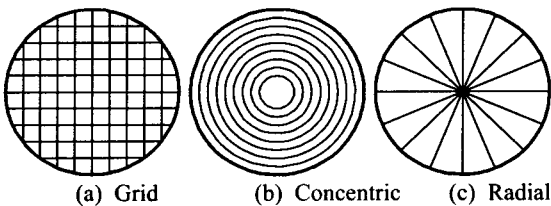


Fig. 1 Plane view of pad(Groove pattern); (a) grid type, (b) concentric type, (c) radial type

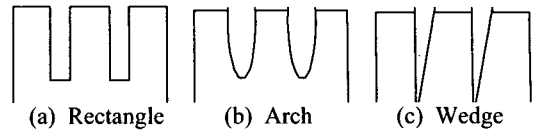


Fig. 2 Cross section view of pad (Groove profile); (a) rectangle type, (b) arch type, (c) wedge type

이러한 여러 그루브 인자들 중에서 본 연구에서는 그루브 실험인자로서 평면형상 중에서 직교타입을 선정하였고, 단면형상 중에서 직각형상을 선택하였다. 또한 치수는 폭과 깊이를 고정하고 피치를 실험변수로 선정하였다. 즉, 그루브 피치의 치수 변화만으로 패드표면의 그루브 밀도를 변화시켰다.

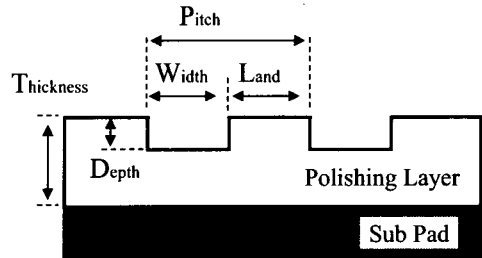


Fig. 3 Cross section view of pad (Groove dimensions) width(w), depth(d), pitch(p)

### 2.2 그루브의 역할

연마패드는 거시적인 관점에서는 압력 전사체의 역할로서 가공대상물의 압착에 의해 가공압력을 지지해주며,<sup>4,5</sup> 미시적인 관점에서는 연마입자를 가공대상물에 대하여 수직으로 가압하고 수평방향으로 구름 또는 미끄럼을 일으키도록 하여 활발한 연마작용이 일어날 수 있도록 한다.<sup>6</sup> 이러한 그루브는 패드의 표면에 걸쳐 연마되는 웨이퍼의 하이드로플레잉(Hydroplaning)을 방지하고, 슬러리가 패드 표면에 걸쳐 균일하게 분포되게 하며, 웨이퍼와 패드의 연마지점에 슬러리를 공급하는 역할을 한다. 그리고 패드 표면으로부터 연마 후의 잔류물질을 제거하는 채널(Channel)의 역할을 하여 박막의 결함을 방지하기도 하며, 슬러리의 유동에 영향을 미쳐 연마공정 중 웨이퍼와 패드표면의 마찰과 화학반응에 의한 열에너지를 배출하는 역할을 한다. 또한 그루브는 연마패드의 전체적이고, 국소적인 강성을 조절하는 역할을 하여, 웨이퍼 전면에 걸친

연마균일성 및 패턴 웨이퍼의 단차를 균일하게 제거하여 평탄화된 표면을 얻을 수 있도록 패드의 특성을 조절한다.<sup>7</sup>

### 3. 연마실험

#### 3.1 패드 설계

패드 그루브의 밀도 변화에 따른 연마특성의 변화를 알아보기 위하여 그루브 설계를 하였고, 패드의 평면형상은 직교타입을 선정하였다. 그 이유는 직교타입은 인접한 그루브가 서로 연결되어 있기 때문에, 슬러리가 패드의 중심에서부터 가장자리로 원활한 이동을 할 수 있다. 이에 따라 직교타입은 그루브밀도 변화에 따른 슬러리의 공급에 관한 영향이 뚜렷할 것으로 판단되었기 때문이다.

그루브 설계에 있어서 밀도인자( $K_n$ )는 식 (1)에 제시한 것처럼 그루브 폭( $w$ )과 패드 그루브 피치( $p_n$ )의 비로 정의하고, Fig. 4에 제시한 것처럼 단위면적의 크기를 가지는 영역에서 설계하였다.

$$K_n = \frac{\text{GrooveArea}}{\text{PitchArea}} = \frac{w \cdot d}{p_n \cdot d} = \frac{w}{p_n} \quad (1)$$

$p_n$ 은 웨이퍼와 패드가 접촉하는 패드의 단위면적에서,  $n$ 개의 그루브가 존재할 때의 피치의 길이를 말하는 것으로 식 (2)에 제시하였고,  $d$ 는 그루브 깊이이다. 임의의  $n$ 개의 그루브가 존재하는 영역에서 그루브의 면적(Groove area;  $A_{n,g}$ )은 식 (3)의 값을 가지게 된다.

$$p_n = \left(\frac{1}{2}\right)^{n-1} p_1 \quad (2)$$

$$A_{n,g} = 2^{2(n-1)} w(2p_n - w) \quad (3)$$

위의 식에서  $w$ 는 그루브의 폭이고, 패드의 단위면적에 대한 그루브가 차지하는 그루브밀도( $D_{n,p}$ )는 식 (4)와 같이 정의할 수 있다.

$$D_{n,p} = \frac{\text{GrooveArea}}{\text{PadArea}} = \frac{2^{2(n-1)} w(2p_n - w)}{(p_1)^2} = \{2^{(n-1)} K_1\}^2 \left(\frac{2}{K_n} - 1\right) \quad (4)$$

$n$ : number

$P_n$ :  $n$ 번째 피치치수

$K_1$ : 초기 밀도인자

$K_n$ : 그루브 밀도인자

위의 설계를 바탕으로 그루브 폭( $w$ )과 깊이( $d$ )는 2mm, 0.6mm로 고정하고 피치만 조절하여 그루브밀도를 변화시켰으며, 밀도인자( $K_n$ )와 그루브밀도( $D_{n,p}$ )를 Table 1에 제시하였다.

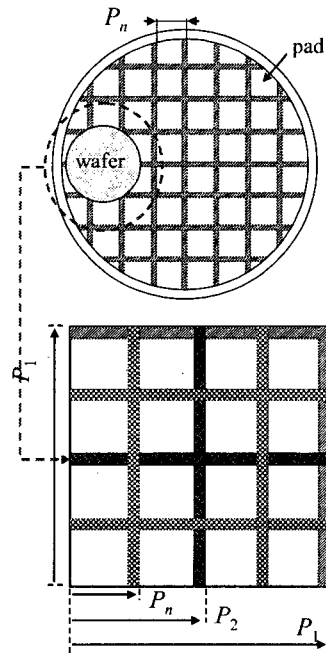


Fig. 4 Groove density of pad ( $K_n = w / p_n$ )

Table 1 Pad groove density and apparent contact area of pad

$n$	$p_n(\text{mm})$	$K_n$	$D_{n,p}(\%)$
1	100.00	0.02	3.5
2	50.00	0.04	7.5
3	25.00	0.08	15.1
4	12.50	0.16	29.3
5	6.25	0.32	35.1

#### 3.2 실험장치 및 조건

CMP 공정에서 패드의 그루브 밀도가 연마특성

에 미치는 영향을 알아보기 위하여 그루브 설계를 기초로 하여 연마실험을 수행하였다. 연마에 사용된 장비는 G&P Technology 사의 POLI-400 CMP 장비를 사용하였다. 그리고 Roudolp 사의 AutoEL III를 이용하여 연마 전과 후의 산화막의 잔류박막 두께를 측정하였다. 또한 패드는 롬앤하스(Rohm and Haas)사의 IC1400 패드 표면위에 그루브 설계에 따라 그루브를 가공하였다. 슬러리는 롬앤하스사의 ILD1300을 사용했고, 초기온도는 25°C이다. 연마실험은 모두 동일한 연마 장치로 수행하였고, 자세한 실험조건은 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Experimental conditions.

Variables	Conditions
Polisher	POLI-400
Film thickness measure	Rudolph Auto EL-III
Pad	IC1400 (variable)
Slurry and Flow rate	ILD 1300, 150ml/min
Polishing pressure	300g/cm <sup>2</sup>
Velocity	Head 65rpm/Table 65rpm

실험에 사용된 웨이퍼는 4" 열산화막 웨이퍼 (Thermal oxide wafer)이고, 연마율을 웨이퍼의 반경 방향으로 5mm EE(Edge exclusion)을 적용하여 연마 전후의 박막의 두께를 19지점에서 측정하였다. 또한 그루브 밀도에 따른 슬러리 공급유량의 변화를 알기 위하여 Fig. 5와 같은 패드 표면온도 측정장치를 설계하였다.

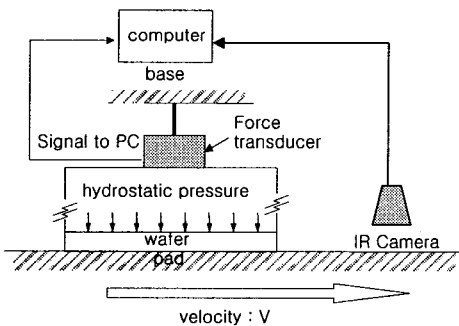


Fig. 5 Experimental setup for measuring the polishing temperature

본 실험에 사용된 연마장비와 패드의 안정화를 위하여 Break-in 과정을 수행하였다. 실험과 동일한 압력과 속도의 조건으로 패드를 30분 동안 세정 (Conditioning)을 수행한 후, 패드표면의 잔류물을 나일론 브러시를 사용하여 세정하였다. 그리고 더미웨이퍼(Dummy wafer)를 실제공정과 동일한 압력과 속도의 조건으로 패드 표면 안정화를 위한 연마를 실시하였다.

### 3.3 연마율과 연마불균일도 측정방법

연마율은 식(5)에 표시한 바와 같이 제거된 박막의 두께편차를 연마시간으로 나눈 값을 의미한다. 즉, Fig. 6에 나타난 바와 같이 연마 전과 후의 박막 두께를 측정하고, 이때의 제거되어진 박막 두께의 편차를 연마시간으로 나누어 연마율을 산출하는 것이다.<sup>8</sup>  $F(r, \theta)$ 는 연마전의 박막의 두께이고,  $G(r, \theta)$ 는 연마후의 박막의 두께를 의미하고,  $t$ 는 연마시간,  $H$ 는 연마 전과 후의 박막 두께의 편차를 말하는 것이다. 식(6)과 (7)에 표시한 바와 같이 박막의 두께를 측정법에 따라  $N$ 지점의 연마율을 각각 구하고, 이 값의 평균값을 산출하여 웨이퍼 전체면적에 대한 평균연마율을 측정하는 것이다. 따라서 본 논문에서는 언급하는 연마율은 평균연마율( $RR_{avg}$ )을 말하는 것이다.

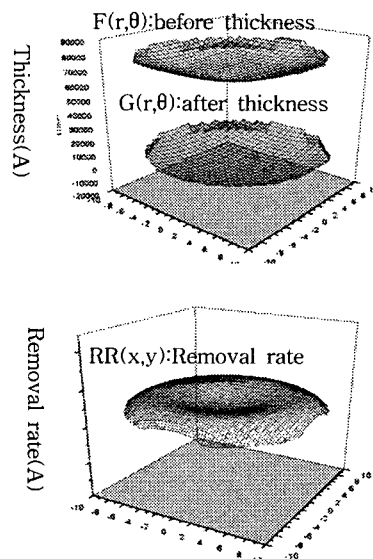


Fig. 6 Thickness and removal rate across the wafer

$$RR(r, \theta) = \frac{F(r, \theta) - G(r, \theta)}{t} = \frac{dH}{dt} \quad (5)$$

$$RR_{avg} = \frac{1}{A} \int_A RR(r, \theta) dA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N RR_i \quad (6)$$

그러나 박막은 웨이퍼의 전체 면적에서 동일한 연마율로 제거되어야 하지만, 실제 공정에서는 연마 불균일 현상이 발생한다.<sup>9</sup> 따라서 CMP 공정에서 수율과 관련된 박막의 균일성은 매우 중요하며, 박막의 균일성을 연마 불균일도로 평가하는 것이다. 본 연구에서 연마 불균일도는 ASTM 규정에 따른 표준편차 균일도(Standard deviation uniformity)를 사용한 1시그마( $\sigma$ ) 값을 말하고, 식(8)과 식(9)에 제시하였다.

$$\sigma_{RR} = \left[ \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (RR_i - RR_{avg})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$WWNU(\%, 1\sigma) = \frac{\sigma_{RR}}{RR_{avg}} \times 100(\%) \quad (8)$$

#### 4. 실험 결과

##### 4.1 그루브밀도와 연마율

그루브밀도에 따른 연마율의 결과를 Fig. 7에 제시하였다. 그루브밀도가 증가함에 따라 연마율은 그루브밀도가 7.5%일 때 1000 Å/min에서 15.1%일 때 1550 Å/min으로 초기에 증가하지만, 15.1%에서 35.1%로 증가함에 따라, 1550 Å/min에서 1380 Å/min로 감소하는 현상을 관찰할 수 있었다. 그루브밀도가 증가함에 따라 초기에 연마율이 증가하고, 그 이후 연마율이 감소하는 현상은 연마지점에 공급되는 슬러리의 유량이 변화했기 때문으로 생각된다.

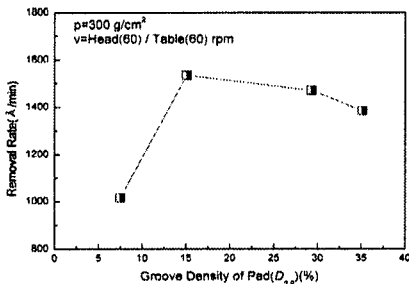


Fig. 7 Removal rate according to groove density of pad

슬러리의 유량은 연마율을 결정하는 중요한 인자로서 연마 지점에서 박막과 충분한 반응이 이루어지고, 연마 입자의 공급이 원활해야 한다. 공정 조건의 변화 없이 슬러리의 유량만을 변화시켰을 때, Fig. 8에서 볼 수 있는 바와 같이 슬러리의 공급량이 감소하면 연마율이 급격하게 감소하게 된다.<sup>2</sup> 그루브밀도가 증가하여 연마지점에서의 슬러리 공급이 감소한다면 연마율이 감소할 것으로 판단되며, 이것은 Fig. 7의 결과와 일치한다고 볼 수 있다.

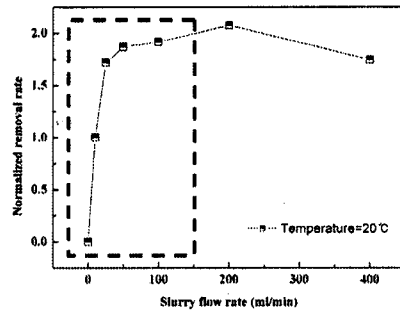


Fig. 8 Normalized removal rate variation with flow rate of slurry

이 현상을 설명하기 위해 패드 표면의 온도를 측정하였고, 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 패드 표면의 온도는 패드 강성보다는 슬러리에 의해 지배적인 영향을 받을 것으로 생각된다. 패드 표면의 온도가 선형으로 감소하지는 않지만, 그루브밀도가 증가함에 따라 패드의 표면온도가 감소하고 더불어 온도의 불균일도도 감소하는 현상을 발견할 수 있다. 이것은 초기에 동일한 유량의 슬러리가 공급되었지만, 연마 시 그루브를 통해 이동하는 슬러리의 유량이 상대적으로 증가함에 따라 슬러리에 의한 냉각효과(cooling effect)가 증가하여 패드의 표면온도가 감소한 것으로 생각된다. 이 결과로부터 패드 표면의 그루브를 변화시키면 슬러리의 유동변화가 발생하여 슬러리 유량이 변한다는 사실을 확인할 수 있다. 이러한 패드 표면온도 측정결과를 바탕으로 그루브밀도가 낮은 경우는, 패드의 겉보기 접촉 면적과 패드 표면에 존재하는 그루브 개수가 작아지기 때문에 웨이퍼의 중심의 연마지점에 공급되는 슬러리 유량이 감소한 것으로 생각할 수 있다. 이에 따라 웨이퍼와 패드 사이의 연마지점에 공급되는 슬러리 유량이 감소하면 연마에 참여하는 입자

가 감소하고, 화학 액의 양이 감소하여 화학적 반응이 활발하게 일어나지 못하기 때문에 연마율이 감소하는 것으로 생각된다. 그루브밀도가 높은 경우는, 패드 표면에 존재하는 그루브 개수가 증가하기 때문에 그루브를 통하여 공급되는 슬러리 유량은 증가하지만 실제 연마에 참여하지 못하고 그루브를 통하여 배출되는 슬러리의 유량도 증가할 것으로 보인다. 이에 따라 연마율은 거의 일정하거나 오히려 감소하는 현상이 나타난 것으로 생각된다. 따라서 패드의 그루브밀도 변화에 따른 연마율의 변화는 전체 공급되는 슬러리에서 실제 연마에 참여하는 슬러리 양과 실제 연마에 참여하지 못하고 배출되는 양에 의해 결정된다는 결과를 얻을 수 있었다.

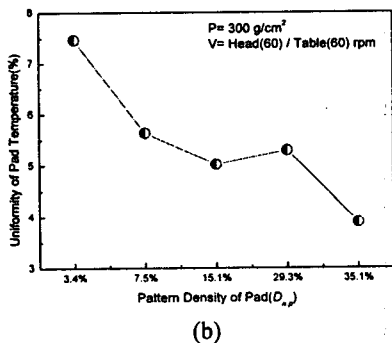
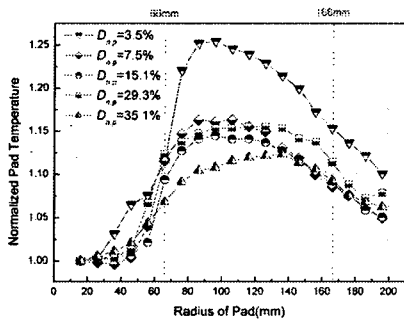


Fig. 9 Pad temperature distribution(a) and its uniformity(b) as increase of groove density

#### 4.2 그루브밀도와 연마불균일도

그루브 밀도가 증가함에 따라 웨이퍼와 패드가 접촉하는 지점에 공급되는 슬러리의 유량이 증가하고, 이에 따라 패드 표면의 온도와 온도의 불균일

한 현상이 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 온도 결과로부터 연마불균일도가 감소할 것으로 생각된다. 그루브밀도에 따른 연마불균일도와 연마형상의 결과를 Fig. 10과 Fig. 11에 제시하였다.

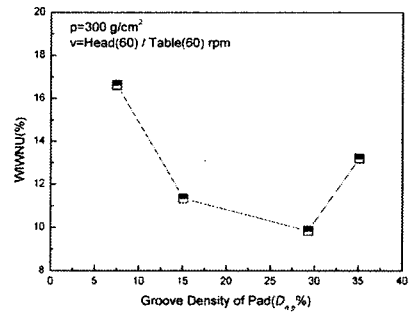


Fig. 10 Within wafer non-uniformity according to groove density of pad

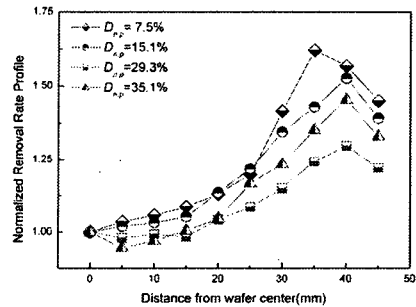


Fig. 11 Normalized removal rate profile as groove density of pad

그루브밀도가 증가함에 따라 연마불균일도는 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 패드 표면 온도로부터 예측한 결과와 일치하는 것을 알 수 있다. 패드의 그루브밀도가 증가함에 따라 연마지점에 공급되는 슬러리의 유량이 증가하고, 이에 따라 패드 표면의 온도의 불균일한 편차가 감소함에 따라 연마불균일도가 감소한 것으로 생각된다. 그러나 그루브밀도가 대략 30% 이상으로 과도하게 증가하는 경우에는 오히려 연마불균일도가 증가하는 현상을 확인 할 수 있다. 이러한 현상은 패드 표면의 불균일한 온도편차가 감소하였지만, 연마율의 결과와 같이 그루브 밀도가 과도하게 증가하는 경우에는 연마지점에 공급되는 슬러리의 유량이 증가

하더라도 연마에 참여하지 못하고 배출되는 슬러리의 유량도 증가하기 때문에 연마불균일도가 증가한 것으로 보여진다.

이러한 연마지점에 공급되는 슬러리 유량은 그루브 깊이에 의해서도 영향을 받을 것으로 사료되며, Fig. 12에서 그루브 깊이가 깊어짐에 따라 연마율은 감소하고, 연마불균일도는 악화되는 것을 알 수 있다. 그루브의 깊어짐에 따라 웨이퍼와 패드가 접촉하는 연마지점으로의 슬러리 이동을 방해하여 나타난 결과라고 생각되어진다. 이러한 결과는 그루브 밀도의 과도한 증가 시 연마지점에 슬러리 공급에 문제가 발생한 결과를 뒷받침해주는 결과라고 사료된다.

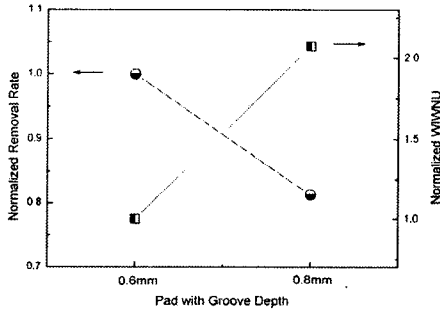


Fig. 12 Normalized removal rate and wiwnu as groove depth in case of constant groove density

패드 그루브밀도에 따른 연마불균일도의 결과를 요약하면 다음과 같다. 그루브밀도가 증가하면 패드 표면의 불균일한 온도편차가 감소하여 연마불균일도는 감소하는 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 그루브밀도가 과도하게 증가하면 슬러리의 배출을 증가시켜 오히려 연마불균일도에 악영향을 미친다는 것을 확인 할 수 있었다.

### 5. 결론

본 논문에서는 패드에 존재하는 그루브의 밀도 변화가 연마율과 연마불균일도에 미치는 영향을 연구하였다.

그루브밀도가 증가함에 따라 연마공정 중에 웨이퍼와 패드가 접촉하는 연마지점에서의 패드 표면의 온도와 온도의 불균일현상은 감소하는 것을

확인 할 수 있었다.

그리고 그루브 밀도가 증가함에 따라 연마지점에 공급되는 슬러리의 유량이 증가하여 연마율은 증가하는 것을 알 수 있었다. 그러나 그루브 밀도가 과도하게 증가하는 경우에는 슬러리의 공급유량이 증가하지만, 슬러리의 배출을 증가시켜 오히려 연마율을 감소시키는 결과를 얻을 수 있었다.

또한 그루브밀도가 증가할수록 패드표면의 온도 편차가 균일해지고, 이에 따라 연마불균일도는 향상된다는 것을 알 수 있었다. 그러나 연마율의 결과와 같이 과도한 그루브밀도 증가시 연마불균일도는 오히려 악화되는 결과를 얻을 수 있었다.

### 참고문헌

- Steigerwald, M. Joseph., "Chemical Mechanical Planarization of Microelectronic Materials," John Wiley&Sons, Inc., pp. 1-12, 1997.
- Kim, H. J., "A Study on the Interfacial Characteristics and its Effect on Material Removal in CMP," Ph. D Thesis, PNU, 2003.
- Rodel holdings, Inc., "Grooved Polishing Pads for Chemical Mechanical Planarization," PCT/US01/16870, World Intellectual Property Organization, 2001.
- Wang, D., "Von Mises Stress in Chemical Mechanical Polishing Process," J. of the Electrochemical Society, Vol.144, pp. 1121-1127, 1997.
- 小川正裕, "CMP機におけるウェハ上面磨分布の計算," 精密工學會 春季大會論文集, pp. 135, 1999.
- Liu, C. W., "Modeling of the Wear Mechanism during Chemical-Mechanical Polishing," J. of the Electrochemical Society, Vol.143, No.2, pp. 716-721. 1996.
- Oliver, M. R., "Chemical-Mechanical Planarization of Semiconductor Materials," Physics and Astronomy, pp. 29, 167, 2003.
- Boning, Duane., "Model for Pattern Dependencies: Capturing Effects in Oxide, STI, and Copper CMP," Semicon/West Technical Symposium: CMP Technology for ULSI Manufacturing, 2001.