

화학기계적 연마 가공에서의 윤활 특성 해석

박상신*, 조철호**, 안유민***

* 영남대학교 기계공학부

** 한양대학교 정밀기계공학과 대학원

*** 한양대학교 기계공학과

Abstract

Chemical-Mechanical Polishing (CMP) refers to a material removal process done by rubbing a work piece against a polishing pad under load in the presence of chemically active, abrasive containing slurry. CMP process is a combination of chemical dissolution and mechanical action. The mechanical action of CMP involves tribology. The liquid slurry is trapped between the wafer(work piece) and pad(tooling) forming a lubricating film. For the first step to understand material removal rate of the CMP process, the lubricational analyses were done with commercial 100mm diameter silicon wafers to get nominal clearance of the slurry film, roll and pitch angle at the steady state. For this purpose, we calculate slurry pressure, resultant forces and moments at the steady state in the range of typical industrial polishing conditions.

Key words—chemical mechanical polishing, slurry pressure, nominal clearance, roll and pitch angle

1. 서론

21세기로 접어들수록 급속한 성장세를 보이고 있는 전자 산업의 발달과 더불어 반도체 산업도 빠른 성장을 지속하고 있다. 이미 256M DRAM의 상용화를 눈앞에 두고 있고, 다가올 21세기에는 IGDram으로 기술 진보가 이루어질 전망이다. 이에 따른 반도체의 집적화에 대한 활발한 연구가 전 세계적으로 이루어지고 있다.

반도체의 집적화를 위해서는 대(大)직경의 웨이퍼 위에 미소 선폭의 정밀도를 가진 다층 배선구조 (multi-level layer)가 요구되어진다. 화학기계적연마가공은 각 배선층의 평탄화를 위한 가장 적절한 방법으로서 사용되고 있다.

일반적인 CMP 시스템의 구조는 Fig. 1과 같다. 즉, 웨이퍼를 고정시키는 기구부와 패드를 올려놓는 테이블, 슬러리 공급장치 등으로 크게 나누어 볼 수 있다.

CMP 가공의 기본 원리는 가공물인 웨이퍼를 일정한 힘으로 탄성 패드에 누르면서 서로 상대 운동을 시키며, 연마 가공액을 그 사이에 주입한다. 연마 가공액은 웨이퍼와 친화력이 좋은 부식액과 초 미립 연마 입자와의 혼합액으로써, 부식액에 의한 화학적 작용과 연마 입자에 의한 기계적 제거 작용이 상호 복합적으로 발생되어 웨이퍼 표면의 평탄화 가공이 이루어진다.

CMP 가공의 최종적인 목표는 웨이퍼 표면의 균일화(Uniformity)와 평탄화(Planarization)에 있다. 이를 위해서는 가공시의 웨이퍼에서 일어나는 가공 현상을 이해하며, 이를 토대로 적절한 가공 변수의 선택이 요구되어진다. 이 CMP 공정은 몇 가지의 입력 변수들과 그에 따른 출력 변수들로 나타내어지는데 입력 변수로는 웨이퍼와 패드의 회전수(Platen Speed), 가공력(Down Force), 연마 가공액(Slurry)등을 들 수 있고, 출력 변수로는 소재제거율 (Material removal rate), 웨이퍼의 표면거칠기, 평판도를 들 수 있다.

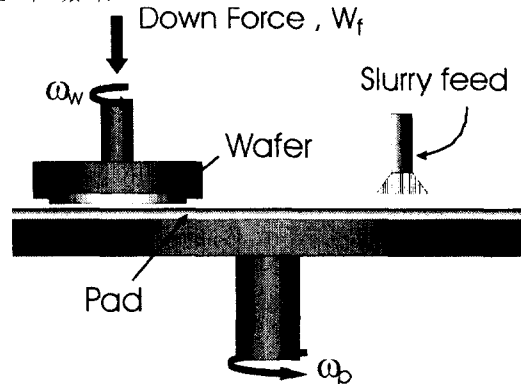


Fig. 1 Schematic diagram of CMP Process

이와 같은 CMP 공정에 있어서 소재제거율을 예측하기 위한 방법론으로 Bhushan[1]은 웨이퍼와 패드가 직접 접촉한다는 가정 하에 접촉 응력을 계산하여 제거율을 예측하였으며, Srinivasa[2]는 패드와 웨이퍼의 접촉압력 및 상대속도의 곱이 소재제거율을 지배한다는 가정하에 압력 및 전단력에 의한 Von-Mises 관별식을 이용하여 소재제거율을 계산하였다. 또한 Runnels[3]는 마이크로미터 단위의 선풍의 유체유동을 해석하고 압력 및 전단유동에 의한 마찰력이 소재에 응력을 발생시키고 그 응력에 의한 소재제거율을 예측한 바 있으나, 미소영역만을 살펴봄으로써 웨이퍼 전면에는 잘 적용되지 않았다.

유체 유회에 의한 압력 및 상대속도 개념을 적용한 예로는 Runnel[4]와 Nakamura[5]등이 적용하였으나, Runnel[4]은 원주방향의 유동을 정확히 계산하지 못하였고 웨이퍼가 구면을 이룬다는 가정하에 유동을 해석하고, 한 방향의 피복각도만 고려하였고, Nakamura[5]는 원주 좌표계가 아닌 직교 좌표계로 유회 해석을 함으로써 원형 웨이퍼에는 잘 맞지 않을 것으로 보인다. 또한 국내에서는 정[6]이 층간절연막의 광역평탄화를 위한 탄성해석 및 실험을 하여 CMP가 반도체 가공에 효과적임을 보인바 있으며, 이[7]등이 CMP 장치의 설계 및 제작에 관하여 보고한바 있다.

본 연구에서는 웨이퍼와 패드는 원판이라고 가정하고, 그 사이에 현탁액으로 인한 완전 유체 유회가 이루어진다는 가정하에 웨이퍼의 CMP 공정에 관한 유회 특성을 해석하였다. 웨이퍼에 걸리는 압력분포를 계산하기 웨이퍼와 패드의 상대속도를 고려한 레이놀즈 방정식을 유도하였고, 유도된 레이놀즈 방정식은 유회 틈새내의 질량 유동의 연속성을 이용하여 압력분포를 계산하는 직접 수치 해법 (Direct Numerical Method)[8]을 사용하였다. 계산된 압력을 이용하여 웨이퍼의 하중지치용량 및 피복점에 대한 모멘트를 계산하였고, 웨이퍼를 둘러주는 하중 및 모멘트와 평형을 이루는 기준 틈새, 볼 및 피치각을 다차원 뉴튼-랩슨[9]법을 이용하여 구하여, 실제 가공에서 일어날 수 있는 현상에 대한 이해를 구하고자 한다.

2. 이론적 해석

패드(pad)와 웨이퍼(wafer)사이의 유회에 의한 압력 분포를 구하기 위해서 Navier-Stoke's 방정식으로부터 압축성 유체에 관한 레이놀즈 방정식을 유도한다.[10] 우선 기본 좌표계는 원통 좌표계로 하고 Fig.2에서 보듯이 웨이퍼를 기준으로 하고 웨이퍼에 대한 패드의 상대속도를 구한다.

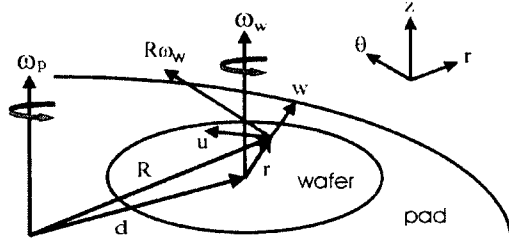


Fig. 2 Schematic diagram of CMP System

웨이퍼 위의 임의의 점을 c라 두면 u와 w는 그 점에서의 웨이퍼의 반경방향(r) 및 원주방향(θ)의 속도이고 d는 패드와 웨이퍼간의 축간거리, ω_w와 ω_p는 각각 웨이퍼와 패드의 회전속도를 나타낸다.

Fig. 3으로부터 각 변수들간의 관계를 고찰할 수 있다. 우선 삼각함수 관계식으로부터 두 가지의 식이 나오고 이를 이용해 패드의 속도를 웨이퍼에서의 상대속도로 변환하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u &= (r + d \cos \theta) \cdot \omega_p \\ w &= d \sin \theta \cdot \omega_p \end{aligned} \quad (1)$$

위 식은 z=0일 때의 경계조건으로 작용한다

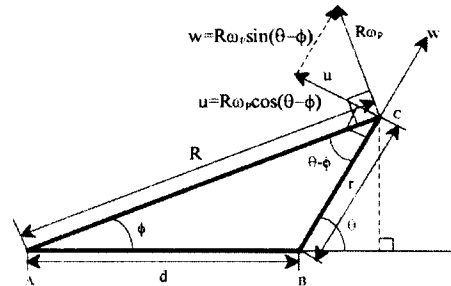


Fig. 3 Coordinates for the analysis of relative velocity

극좌표계에서의 Navier-Stoke's 방정식에 위의 경계조건을 대입한 후, 속도 분포를 구하고 압축성 유체에 대한 연속 방정식에 대입하여 다음과 같은 극좌표계에서의 무차원화된 레이놀즈 방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r} \left(\bar{r} \bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\bar{h}^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial \theta} \right) \\ = \Lambda D \bar{r} \sin \theta \frac{\partial \bar{h}}{\partial r} + \Lambda \{ (\bar{r} + D \cos \theta) - \bar{r} \xi \} \frac{\partial \bar{h}}{\partial \theta} \end{aligned} \quad (2)$$

여기에 사용된 무차원 변수들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{r} = \frac{r}{r_o}, \bar{h} = \frac{h}{h_o}, \bar{p} = \frac{p}{p_a}, \Lambda = \frac{6\mu\omega_p}{p_a} \left(\frac{r_o}{h_o} \right)^2, \\ D = \left(\frac{d}{r_o} \right), \xi = \left(\frac{\omega_w}{\omega_p} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

식(2)을 극좌표계에서의 벡터식으로 표시한 다음 Gauss divergence theorem을 적용하고, 박[8]의 방법과 같이 이산화 하였다. 다만 박[8]의 논문에서는 내경과 외경이 있는 베어링에 대하여 이산화를 하였지만 여기서는 내경이 0이기 때문에 웨이퍼의 중심점에서의 질량유량은 Fig. 4에서 보듯이 검사 체적(control volume)으로 잡은 부분이 기존의 것과 다르게 원의 형태를 띠게 되므로, 원주방향의 질량유량은 서로 상쇄된다는 가정하에 반경방향으로의 질량유량만을 고려하여, 중심점을 기준으로 검사 체적내의 반경방향으로의 질량 유량의 합은 0이 된다는 가정하에 차분화를 하였다.

그 결과 식(4)과 같고 모든 절점들에 대한 선형 대수 방정식에 대해서 반복계산을 수행하여 연마 가공액에 걸리는 압력 분포를 계산할 수 있다.

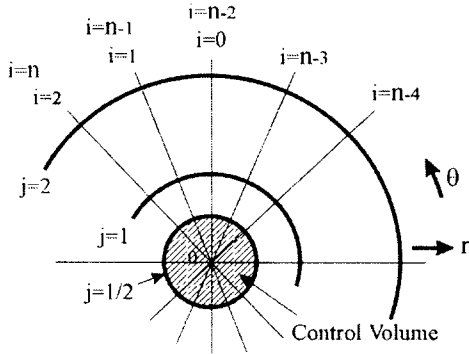


Fig. 4 Control volume of 0-node

$$\bar{p}_{0,0} = \left(\left(\sum_{i=0}^{n-1} \bar{h}_{i,1/2}^3 \cdot \bar{p}_{i,1} \right) - \Delta r \cdot AD \sum_{i=0}^{n-1} \sin \theta_i \cdot \bar{h}_{i,1/2} \right) / \sum_{i=0}^{n-1} \bar{h}_{i,1/2}^3 \quad (4)$$

패드와 웨이퍼 사이의 상대운동으로 인해 슬러리에 걸리는 압력으로 인한 썸기 효과(Wedge effect)로 웨이퍼는 미소각의 기울기를 갖게 된다. 즉, Fig. 5에서 보듯이 피벗팅 축 Z_{piv} 를 중심으로 롤링각(α)와 피치각(β) 방향으로의 회전이 가능하고 이때, 피벗팅축에 대한 α 와 β 방향으로의 회전 모멘트가 0이 되도록 스스로 자세각을 형성하여 평형을 이룬다.

합력 W 와 자세각은 윤활 틈새 함수에 따라 변하며 실제 패드와 웨이퍼간의 상대 회전 운동이 있을 시는 웨이퍼에 작용하는 하중이 입력 힘의 합력 W_i 와 평형을 이루도록 기준 윤활 틈새 h_{piv} 값이 스스로 결정되는 것이다. 여기서 말하는 기준 윤활 틈새는 웨이퍼 피벗점에서의 윤활 틈새를 말한다. 웨이퍼에 일정한 하중이 작용되고 패드와 웨이퍼 각각의 회전 속도가 일정하면, 웨이퍼는 기준 윤활 틈새 함수와 자

세각 ' α '와 ' β '를 갖고 힘과 모멘트가 평형을 이루며 시간에 따라 변하지 않는 정상상태에 있게 된다.

Fig. 5 (a), (b), (c)로부터 무차원화된 윤활 틈새 함수 \bar{h} 는 다음과 같이 정의된다.

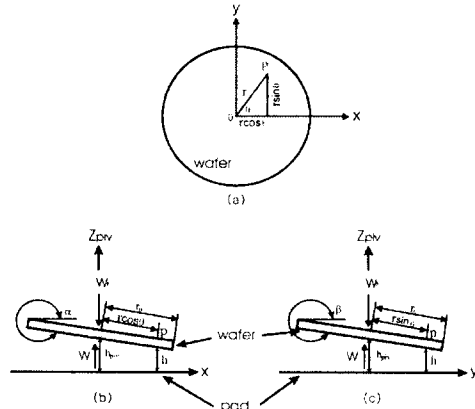


Fig. 5 Nominal Clearance of Fluid Film

$$\bar{h} = 1 - \frac{r_o}{h_{piv}} \bar{r} \sin \alpha \cdot \cos \theta - \frac{r_o}{h_{piv}} \bar{r} \sin \beta \cdot \cos \theta \quad (6)$$

웨이퍼의 정상상태를 판별할 수 있는 기준이 되는 값들은 연마 가공액에 걸리는 압력에 의한 하중 지지력(W), 과 웨이퍼의 x 방향 모멘트(M_x) 및 y 방향 모멘트(M_y)로, 하중 지지력이 주어진 예하중과 동일하며 웨이퍼와 지지대(flexure)사이의 피벗팅점에서 롤링각(α) 및 피치각(β) 두 방향의 모멘트가 '0'이 되는 점이 정상상태이며 이때 웨이퍼의 거동은 기준 윤활 틈새(h_{piv})와 두 방향의 자세각인 롤링각(α) 및 피치각(β)으로 표현할 수 있다. 그러므로 h_{piv} , α , β 세 값을 입력 변수로 하는 세 개의 함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F(h_{piv}, \alpha, \beta) &= W_f - W \\ M_y(h_{piv}, \alpha, \beta) &= M_{yf} - M_y \\ M_x(h_{piv}, \alpha, \beta) &= M_{xf} - M_x \end{aligned} \quad (7)$$

입력 변수를 적절히 조절한 후 위 세 개의 목적함수의 조건이 모두 만족되는 정상상태를 찾아야 된다. 목적함수는 비선형 함수로써 입력 변수들이 심하게 결속되어 있으므로 정상상태를 찾기 위해 다차원 Newton-Raphson[9] 방법을 사용한다. 입력 변수를 $\mathbf{x} = (h_{piv}, \alpha, \beta)^T$ 라 놓고 이에 따른 목적함수를 $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = [F(\mathbf{x}), M_x(\mathbf{x}), M_y(\mathbf{x})]^T$ 라 놓으면 고려해야 할 비선형 방정식은 다음과 같다.

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = 0 \quad (8)$$

여기서 f 는 독립변수 h_{piv} , α , β 에 대해 연속적이며 각각의 편미분을 갖는다고 가정한다. 이 때 f 의 성분 h_{piv} , α , β 에 대한 Jacobian 행렬을 J 로 표시하면,

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial h} & \frac{\partial F}{\partial \alpha} & \frac{\partial F}{\partial \beta} \\ \frac{\partial M_y}{\partial h} & \frac{\partial M_y}{\partial \alpha} & \frac{\partial M_y}{\partial \beta} \\ \frac{\partial M_x}{\partial h} & \frac{\partial M_x}{\partial \alpha} & \frac{\partial M_x}{\partial \beta} \end{bmatrix} \quad (9)$$

이에 따라 앞서 언급한 세 개의 입력변수와 세 개의 목적함수를 적용시켜 다음과 같은 다차원 뉴턴 랩슨 공식에 적용한다.

$$\kappa^{(n)} = \kappa^{(n-1)} - J^{-1}(\kappa^{(n-1)})F(\kappa^{(n-1)}) \quad (10)$$

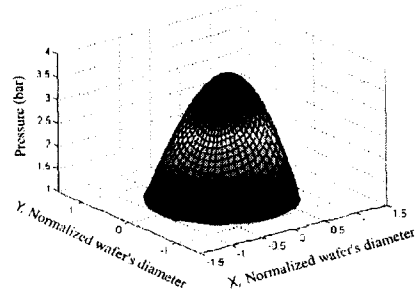
위 식에 의해 정상상태에서의 기준 윤활틈새 (h_{piv}), 롤링각 (α), 피치각 (β)를 구하여 웨이퍼가 가공될 때의 상태를 가늠할 수 있다.

3. 해석 결과 및 고찰

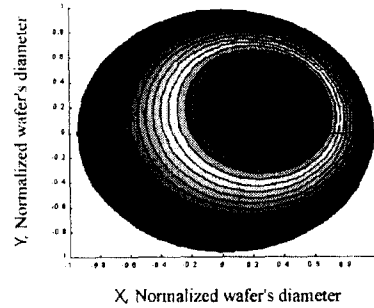
웨이퍼의 직경은 100mm, 패드의 직경을 300mm이며, 각각의 지지대와의 거리는 150mm 이고 초기 조건들을 여러 가지로 바꿔가며 패드와 웨이퍼 사이의 연마 가공액(slurry)에 걸리는 압력 분포와 웨이퍼의 정상상태를 가늠해 볼 수 있는 기준 윤활 틈새 함수(h_{piv}) 롤링각 (α), 피치각(β)를 구해보았다. 웨이퍼와 패드는 표면 조도가 서로 같고 그 형상 정도는 압력 분포에 큰 영향을 미치지 않는다고 가정하고 해석을 하였다. 위에서 차별화한 지배방정식은 수치적으로 반복 계산(iteration)에 의해 구해졌으며 그 오차 정도는 0.01% 정도이다. 차별화한 지배방정식의 해를 구하기 위해 웨이퍼를 등 간격으로 원주방향으로는 20개, 반경방향으로는 40개의 격자를 나누었다.

Fig. 6 은 Table 1 과 같은 초기 조건을 준 뒤 압력을 계산한 결과로써, Fig. 6 (b)에서 보듯이 썩기 효과로 인한 웨이퍼에서의 압력 분포가 차등적으로 이루어짐을 알 수 있다. 웨이퍼의 원점을 기준으로 압력이 가장 큰 곳이 오른쪽으로 약간 치우쳐진 곳임을 알 수 있고 이 방향으로 최소 윤활 틈새(h_{min})가 생긴다는 걸 알 수 있다. 식 (6)로부터 h_{min} 을 계산 할 수가 있다. 계산한 최소 윤활 틈새가 연마 입자의 크기 보다 크게 된다면 웨이퍼의 전면에 걸쳐 고른 가공로 평탄화 가공이 잘 되리라 생각된다. 이를 이유로 실제 가공시에는 연마 가공액에 들어있는 연마입자의 크기를 고려해서 적절한 가공 변수를 찾도록 하는 것이 중요하다.

Fig. 7 은 Table 1 의 조건하에서 정상상태를 찾지 않고 기준 윤활 틈새, 롤링각, 피치각중 2 가지는 고정하고 나머지 하나의 값을 변화시켜 가면서 하중지이용량 및 두방향의 모멘트를 계산한 결과이다.



(a)



(b)

Fig. 6 Pressure distribution of slurry
(a) 3-D view (b) contour

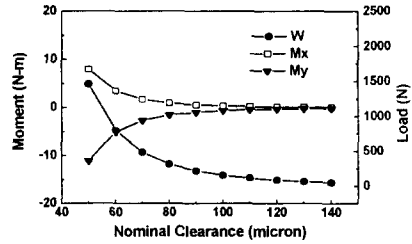
Table. 1 Conditions for Analysis

Initial Condition		
Platen Speed	ω_w	50 rpm
	ω_o	100 rpm
Nominal Clearance	h_{piv}	50 μ m
Roll and pitch angle	α	0.02°
	β	0.018°
External Force	W_f	900 N
External Moment	M_{xf}	3.5 N·m
	M_{yf}	-0.5 N·m
Viscosity	μ	0.0214 kg·m/s

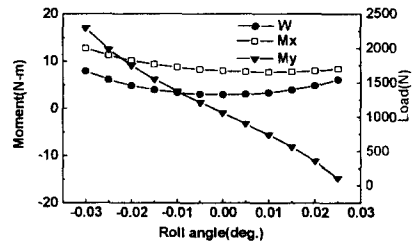
Fig.7 (a)는 윤활 틈새 함수의 변화에 따른 하중지이용량(W)과 두 방향 모멘트의 변화인데, 틈새가 커질 수록 하중 지지력이 급격히 저하되는 현상을 볼 수 있고 틈새가 100 μ m 이상이 되면 거의 하중 지지력이 없어지고 모멘트도 0에 가까워지는 현상이 되므로 적절한 윤활

틈새를 유지시켜 주는 게 바람직하다는 걸 보여준다. Fig. 7 (b),(c)는 자세각의 변화에 따른 해석 결과로서 각각에서 알 수 있듯이 롤링각의 변화는 x축 모멘트보다는 y축 모멘트에 많은 영향을 미치지만, 압력의 대칭모양만 변하므로 하중지지용량에는 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 또한 피치각의 경우 Fig.7 (c)에서 보듯이 피치각이 음일 경우에는 주된 유체 흐름의 반대방향으로 틈새가 좁아지는 현상을 말하는 것으로 썩기효과가 없기 때문에 압력의 발생이 거의 없어 하중지지용량 및 모멘트가 거의 0에 가까워지고, 피치각이 양의 값을 갖게 됨에 따라 썩기 효과가 생겨 압력이 발생하고 하중지지용량 및 모멘트가 급격히 증가함을 알 수 있다.

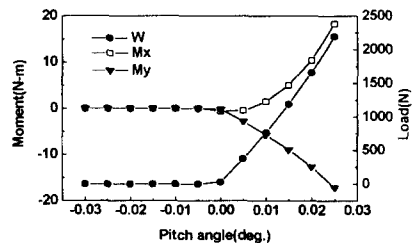
Fig. 8은 Table 1의 초기조건하에서, 외부 하중과 두 개의 외부 모멘트중에서 각각 두 개는 고정시키고 하나의 변수만 바뀌가며 정상상태에서의 기준 윤활 틈새와 자세각을 계산해본 결과이다. Fig. 8 (a)에서 볼 때, 외부하중이 커짐에 따라 기준 윤활 틈새는 줄어들며 피치각도 작아짐을 볼 수 있으나 롤링각은 거의 변화가 없음을 볼 수 있다. 이는 Fig. 7 (b)에서 알 수 있듯이, 롤링각은 서로압력의 대칭성에만 영향을 미치고 있기 때문이다. 또한 하중이 커질수록 기준 윤활 틈새가 적어지므로 적절한 가공 압력이 주어지는 것이 바람직하다는 결론을 얻을 수 있다. Fig.8 (b),(c)에서 보면 x축 방향의 모멘트가 y축 방향의 모멘트보다는 윤활 틈새에 더 많은 영향을 미치며, 자세각은 피치각이 롤링각보다는 영향을 더 많이 받는다는 사실을 알 수 있다. 그 이유는 x축 방향의 외부 모멘트는 결국 유체유동방향으로의 썩기효과를 결정 짓는 요소이기 때문이라 보여진다. Fig. 9는 외부하중을 300N, 500N, 700N의 세가지 경우에 대해서, 패드나 웨이퍼중 하나를 고정시킨 후 나머지 하나의 속도를 변화시켜가며 정상상태에서의 기준틈새를 구해본 것이다. 하중이 커짐에 따라 기준 틈새가 줄어드는 현상은 명확하지만 (a)와 (b)를 비교해보면 패드의 속도변화가 웨이퍼의 속도변화보다는 기준틈새를 결정짓는데 더 많은 영향을 미친다는 사실을 알 수 있다. 이는 패드의 속도가 주된 윤활면의 유체유동을 일으키는 요소라는 것을 의미한다. 따라서 가공시의 소재제거율은 웨이퍼의 속도보다는 패드의 속도에 더 많은 영향을 받는다고 보여진다.



(a)

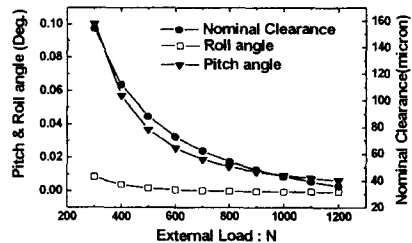


(b)

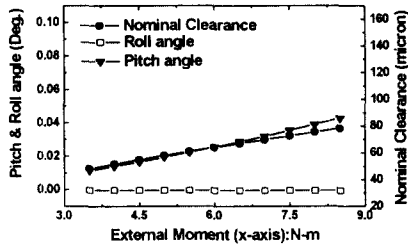


(c)

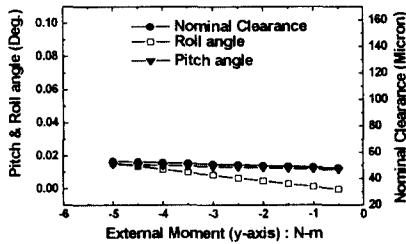
Fig. 7 The influence of Nominal clearance, Rolling & Pitch angle on Load and Moment



(a)

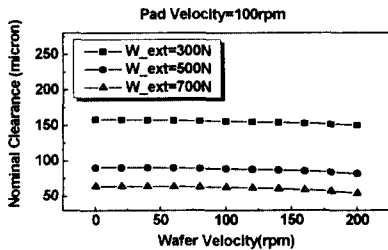


(b)

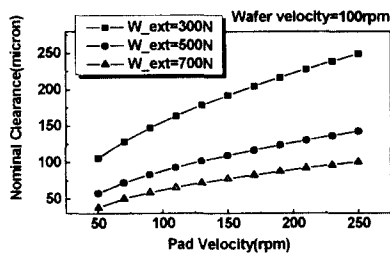


(c)

Fig. 8 The influence of External Load & Moment on Nominal clearance, Roll & Pitch angle



(a)



(b)

Fig. 9 Influence of Relative Velocity on Nominal Clearance with External Load

4. 결론

화학-기계적 연마의 운할 특성을 해석해 보았고 이를 통해 아래와 같은 결론을 얻었다.

- (1) 연마 가공액이 적절한 하중 지지력을 갖기 위한 썸기 효과를 얻기 위해서는 적절한 자세각과 운할 틈새를 가지고 있어야 하고 이런 정상상태를 유지시키기 위해선 가공 압력과 외부 모멘트를 적절히 유지시켜줘야 한다.
- (2) 연마 가공액에 첨가된 연마 입자의 직경보다는 최소 운할 틈새가 크도록 가공 변수들을 적절히 선택하면 평탄화 가공에 효과가 있을 것이다.
- (3) CMP 기구부의 설계시 웨이퍼의 지지대는 연마 가공액에 걸리는 압력에 의한 모멘트에 적절히 대응할 수 있도록 설계하는 것이 바람직하다.

참고 문헌

- [1] M. Bhushan, R. Rouse and J.E. Lukens, "Chemical-Mechanical Polishing in Semidirect Contact Mode", J. Electrochem. Soc., Vol.142, No.11, November, 1995.
- [2] C. Srinivasa-Murthy, D.Wang, S.P. Beaudoin, T.Bibby, K.Holland and T.S. Cale, "Stress Distribution in Chemical Mechanical Polishing", ELSEVIER, Thin Solid Films 308-309, 1997.
- [3] Scott R. Runnels, "Feature-Scale Fluid-Based Erosion Modeling for Chemical -Mechanical Polishing", J. Electrochem. Soc., Vol.141, No.7, July, 1994.
- [4] S.R. Runnel, L.M.Eyman, "Tribology analysis of Chemical Mechanical Polishing", J.Electrochem. Soc., Vol. 141, No. 6, 1994, pp 1698-1701
- [5] T.Nakamura, K.Akamatsu, N.Arakawa, "A Bowl feed and Double Sides Polishing for Silicon Wafer for VLSI", Bull Japan Soc. of Prec. Eng. Vol.19, No. 2(June 1985)
- [6] 정해도, '화학기계적 폴리싱(CMP)에 의한 층간 절연막의 광역 평탄화에 관한 연구', 한국정밀공학회지, 제13권, 제11호, 1996.
- [7] 이용숙, 강재훈, 신영재, 황경현, 이후상, 안대균, "CMP 장치의 설계 및 제작", 한국정밀공학회, '98년도 춘계학술대회논문집, pp951-954, 1998.
- [8] 박상신, "외부 가압 트러스트 베어링의 부하 특성에 관한 연구", 서울대학교 석사학위 논문, 1991.
- [9] Morris, J. L., *Computational Methods in Elementary Numerical Analysis*, John Wiley & Sons, 1983., pp261-323.
- [10] Pinkus, Sternlicht, *Theory of Hydrodynamic Lubrication*, McGraw Hill