

비선형 Prestonian 근사를 통한 CMP 공정 평가 Characterization of CMP Process by non-Prestonian Regression

*#김형지¹, 박범영¹, 김성렬¹, 류호연¹

*#H. J. Kim(hyjakim@kitech.re.kr)¹, B. Y. Park¹, S. R. Kim¹, H. Y. Ryu¹
¹ 한국생산기술연구원

Key words : CMP, Planarization, non-Prestonian, Friction, Tribology

1. 서론

화학기계적연마(Chemical Mechanical Polishing; CMP)는 소자 평탄화 공정 (planarization process)에 필수적인 공정으로 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 연마헤드를 이용하여 웨이퍼를 지지한 상태에서 웨이퍼에 가압과 상대운동을 이용하여 표면을 연마하는 공정이다.

본 논문에서는 신규 공정을 개발하거나 새로운 소모품으로 대체하고자 할 때 빠른 공정평가를 통해 평가방법의 간소화와 보다 정확하게 공정을 규정지음으로써 대량의 소모품 변수에 대한 스크린 테스트에 효율적인 방법을 개발하고자 기초연구를 수행하였다.

따라서 Fig.1 에 그려진 CMP 공정의 트라이볼로지적 특성을 이용하여 본 논문에서는 CMP 특성을 규정하기 위하여 윤활특성을 고려한 비선형 Preston 방정식적인 접근을 수행하고 정해진 소모품 조합에 대하여 속도와 압력의 지수승이 일정수준 이상의 신뢰성을 가지고 수렴근사하는가에 대한 기초적인 실험결과를 보고하고자 한다.

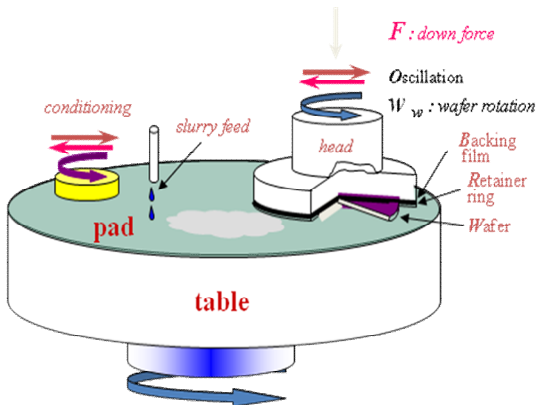


Fig. 1. Schematics of precision polishing equipment

2. 실험적 근사식의 도출

여러 연구자들의 연구결과에서 볼 수 있듯이 연마율은 압력과 속도에 대한 함수이며, 압력과 속도의 지수 승에 비례하는 것으로 보고되고 있다^[1]. 보고되는 지수의 범위는 압력과 속도에 대하여 각각 0.5~1 사이의 값을 가진다. 이러한 결과들로부터 만약 연마율이 압력과 속도에 대한 지수 승으로 나타나는 함수로 표현된다고 가정하면 연마율에 대한 지배방정식은 다음의 형태로 쓸 수 있다.

$$\frac{dH}{dt} = K p^a v^b \quad (1)$$

여기서 dH/dt 는 시간에 따른 박막의 두께 변화, 즉 시간 당 연마량 (RR_s)이며, K 는 비례상수, p 와 v 는 연마압력과 상대 속도이다. 연마량이 압력과 속도에 대한 지수 승으로 표현되는 경우 a 와 b 의 값에 따라 비례상수 K 의 단위계가 변하게 되므로 각각의 변수를 무차원량으로 정의할 필요가 있다.

연마량은 공정 변수에 따라 형성되는 패드와 웨이퍼 계면의 마멸 조건에 의해 영향을 받게 되기 때문에 미끄럼 접촉면의 물성을 이용하여 압력과 속도 및 연마율을 무차원량으로 정의할 수 있다. 미끄럼 접촉면에서의 변수들은

탄성유체윤활에 대한 이론 및 실험식 전개에 사용된 Grubin^[2]과 Hamrock^[3] 등의 차원 변수를 사용하며, 또한 마멸양은 일반적으로 경도에 영향을 받기 때문에 마멸에 대한 차원 변수로서 웨이퍼의 경도를 도입한다. 각 변수는 Table 1 에 정의되어 있다.

The reduced removal rate parameter

$$RR_s = \frac{dH}{ds} = \frac{dH/dt}{ds/dt} = \frac{RR}{v}$$

$$P = \frac{p}{H_w}$$

The load parameter:

$$V = \frac{\eta v}{E' \sigma}$$

The speed parameter:

Table 1 Definition of parameters

Par.	explanation	unit	value
σ	the standard deviation of roughness height distribution	[m]	$25 \cdot 10^{-6}$
H_w	the hardness of the thin film	[Pa]	$7.1 \cdot 10^6$
E'	the effective elastic modulus of the pad and wafer and defined as $2E_p/(1-\nu_p^2)$, where E_p and ν_p is the elastic modulus and Poisson ratio of pad	[Pa]	$12 \cdot 10^9$
η	the viscous property of slurry	[Pa s]	0.0025
p	the applied pressure	[Pa]	-
v	relative sliding distance	[m/s]	-

3. 실험 및 결과고찰

따라서 P 및 V 에서 정의된 무차원량과 식 (1)을 이용하여 무차원화 된 연마량은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{dH}{ds} = k P^{a'} V^{b'} \quad \text{or} \quad \frac{dH}{ds} = k \left(\frac{V^n}{P} \right)^m \quad (2)$$

식 (2)의 두 번째 식은 연마량을 윤활에 대한 특성수의 형태로 나타낸 것으로서 $a' = -m$ 그리고 $b' = mn$ 으로 계산된다. 또한 k 는 비례상수로서 무차원량이다. 식 (2)의 두 번째 식의 양변에 log 를 취하게 되면 이 식은

$$f(x_1, x_2) = C - m x_1 + mn x_2 \quad (3)$$

로 되며, $f(x_1, x_2)$, C, x_1 및 x_2 는 dH/ds, k, P 및 V 에 대한 log 변환 값이다. 따라서 식 (3)은 압력과 속도에 대한 선형 2 차 회귀 (multiple regression)방정식이 되며 실험에서 얻어진 결과 값들에 대한 최소 자승 근사에 의하여 각 상수 값들이 구해진다.

제시된 식의 평가를 위해 8" 열산화막(SiO₂)웨이퍼를 이용하여 IC1400, ILD1300 (패드 및 슬러리)로 다양한 압력과 속도조건에서 연마를 수행하고 마찰력을 동시에 측정하면서 실험을 수행하였다.

최소 자승 근사에 의해 얻어진 표면을 Fig. 2 (a)에 나타내었으며 실험 점들 (그래프 내의 원)과 근사된 표면이 매우 작은 오차를 가지고 일치함을 볼 수 있다. 실험된 결과

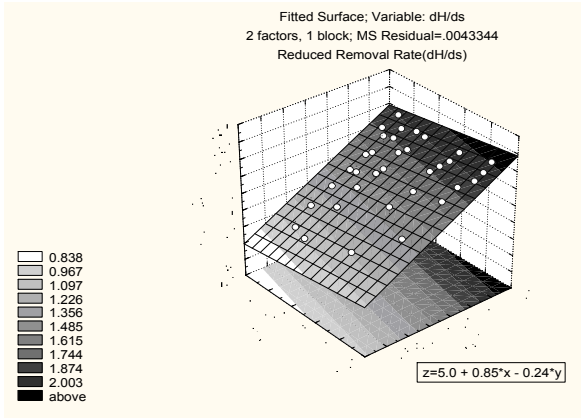


Fig. 2 Desirability surface of reduced RR with P and V

에서 단위 거리 당 연마량은 주어진 무차원량에 대하여 모두 높은 상관관계를 보이며, 압력이 속도에 비하여 보다 높은 상관관계를 보였다. 여기서 최소 자승 근사에 의해 얻어진 값들은 C, m, n 이 각각 $10^{5.04}$, -0.85, 0.28 이 된다. 따라서 연마율에 대한 실험식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{dH}{ds} = 10^{5.04} \left(\frac{V}{P}\right)^{-0.85} \quad (4)$$

식 (4)의 결과를 log-log 좌표에 대하여 선형 근사한 것을 Fig. 3 에 나타내었다. 결과에서 볼 수 있듯이 근사 결과는 상관계수가 -0.97 로 매우 높은 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이 결과 정리하여 일반적인 연마율 방정식 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{dH}{dt} = K p^{0.85} v^{0.76} \quad (5)$$

여기서 K 는 $10^{5.04} (E^{0.24}/H_w^{0.85}) (\sigma/\eta)^{0.23}$ 이 된다. 식 (5)에 서 압력에 대한 지수 0.85 는 Tseng [4] 등의 CMP 연마 지배 방정식의 지수 값 ($5/6 \approx 0.83$)과 거의 유사한 값을 가진다. Tseng 의 연마모델은 Runnel 등이 미끄럼 베어링의 트라이볼로지 근사를 기초로 한 결과식[5] 을 이용하였다. 또한 이러한 결과는 A. Philipossian 등 의 실험적 근사 결과에서도 유사한 결과를 보임을 알 수 있다. 유사한 방식으로 마찰력에 대한 결과식을 얻으면 다음과 같이 된다 (Fig. 4).

$$F = 10^{5.31} \left(\frac{V}{P}\right)^{-0.84} \quad (6)$$

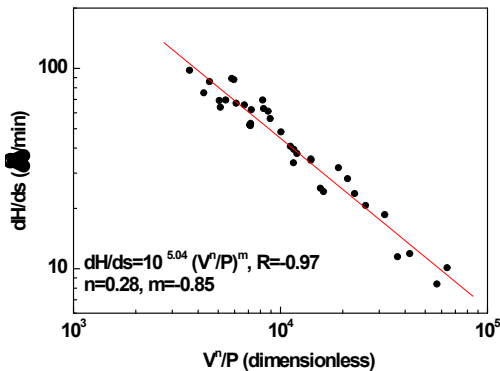


Fig. 3 The result of multiple regression analysis for the removal rate as a function of the dimensionless lubrication parameter (V^0/P)

마찰력에 대한 결과식은 단위 거리 당 연마량과 거의 유사한 지수 값을 가지며, 따라서 연마량과 마찰력의 관계는 식 (4)와 (6)으로부터 근사적으로 다음의 관계로 형성될 수 있음을 알 수 있다.

$$\frac{dH}{ds} \sim F \quad \text{or} \quad \frac{dH}{dt} \sim F v \quad (7)$$

즉, 단위 거리 당 연마량은 마찰력에 비례하며, 혹은 단위 시간 당 연마량은 공급되는 마찰에너지 율에 비례 (식 (7))하는 것을 알 수 있다. 단위 거리 당 연마량과 마찰력의 상관관계에 대한 결과는 Fig.5 에 나타내었다. 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 단위 거리 당 연마량은 마찰력에 대한 선형으로 비례함을 알 수 있다.

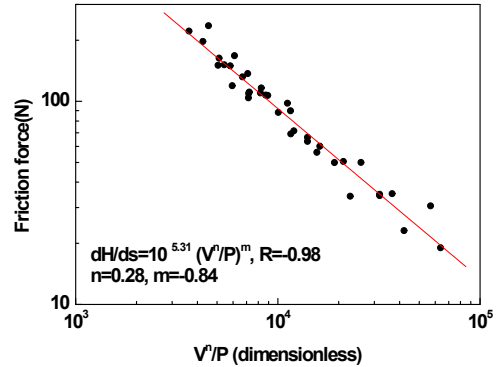


Fig. 4 The result of regression analysis for the friction force as a function of the dimensionless lubrication parameter (V^0/P)

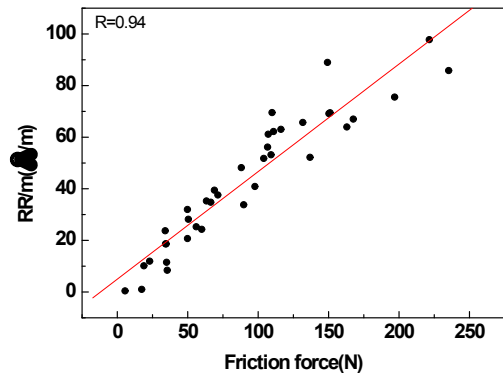


Fig. 5 The result of linear fit between friction and reduced RR

4. 결론

본 논문에서는 특정 소모품 조합에서 연마율과 마찰력 사이의 상관관계를 트라이볼로지적인 접근을 통하여 평가하였으며, 속도와 압력의 지수승에 대한 non-Prestonian 적인 근사를 통하여 특정 소모품 조합을 가진 CMP 공정이 신뢰성 있게 근사 되는지를 평가하였으며, 실험결과는 대부분 $R > 0.94$ 의 높은 신뢰관계를 보여 공정 평가의 효율적인 방법으로 적용될 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Castillo-Mejia D., Beaudoin S., A Locally Relevant Prestonian Model for Wafer Polishing, J. of The Electrochemical Society, Vol. 150(2), pp. G96-G102, 2003
2. Dowson D., Higginson G.R., Elasto-Hydrodynamic Lubrication, International Series in Materials Science and Technology, Vol. 23, Oxford, Pergamon Press, 1977.
3. Hamrock B.J., Fundamentals of Fluid Film Lubrication, McGraw-Hill, p. 141, 1994.
4. Tseng W.T., Wang Y.L., Re-examination of Pressure and Speed Dependences of Removal Rate during Chemical-Mechanical Polishing Process, J. of the Electrochemical Society, Vol. 144(2), pp. L15-L17, 1997.
5. Runnels S.R., Eyman L.M., Tribology Analysis of Chemical-Mechanical Polishing, J. Electrochem. Soc. Vol. 141(6), pp. 1698-1701, 1994.