

집중변수방법을 이용한 화학-기계적 연마공정의 TCM 연성모델 The Chemical-Mechanical Coupled modeling on Material Removal Mechanism of Chemical-Mechanical Polishing

*오승희¹, #석종원²

* Seunghee Oh¹, # Jongwon Seok (seokj@cau.ac.kr)²

¹ 중앙대학교 기계공학부 대학원, ² 중앙대학교 기계공학부

Key words : Chemical Mechanical Polishing, Thermal-Chemical-Mechanical Modeling, Contact Mechanics, Arrhenius Equation

1. 서론

일반적인 CMP 장비에서 상부의 웨이퍼는 일정한 압력을 받으며 회전운동을 하고, 표면에 돌기(Asperity)를 가지고 있는 다공성의 유연한 폴리머 패드가 부착된 하부의 정반(Platen) 역시 회전운동을 한다. 동시에 상부와 하부의 간극에는 나노 크기의 연마입자(Abrasives)를 포함하는 슬러리가 일정량으로 공급되며 이 과정에서 연마 입자는 패드 속으로 고착된 상태로 웨이퍼에 접촉하여 기계적 연마작용을 유발하고, 슬러리의 화학제는 웨이퍼의 표면에서 화학반응을 야기한다. 물질제거 메커니즘에서 이들은 개별적으로 발생되지 않고 서로 연성되어 나타난다. 이러한 연성효과에 의한 물질제거와 달리 이전의 많은 연구는 기저부와 슬러리의 화학적 반응에 의한 물질제거 메커니즘과 연마입자에 의한 기저부의 물질제거 메커니즘으로 서로 분리시켜 다른 한쪽의 영향은 무시 또는 축소시켜 모델링 되었다.

CMP 공정의 기계적인 물질제거는 주로 프레스톤 방정식을 따르는 결과를 보이나, 실제 공정에서 물질제거는 고압과 고속의 영역에서 비선형적으로 증가하는 경향을 보인다.¹ 이는 공정에 영향을 미치는 여러 변수 중 큰 영향을 미치는 인자로 간주되는 온도의 변화에 따른 화학적 효과의 변화로 설명될 수 있다.

본 연구에서는 웨이퍼와 돌기 및 연마 입자 사이의 탄소성 접촉에 의한 물질제거를 고려하고, 웨이퍼와 연마입자 및 패드의 접촉에 의하여 발생하는 마찰열에 의한 열시스템을 모델링하였다. 또한, 마찰열에 의한 온도변화에 의존하는 반응속도는 아레니우스 식(Arrhenius Equation)을 통하여 집중변수방법(Lumped Parameter Method)으로 모델링 함으로써 화학적 기계적 연성효과를 고려한 새로운 TCM(Thermal-Chemical Mechanical) 통합모델을 제시한다.

2. 기계적 연마 및 마찰 모델

접촉역학을 기초로 기계적 연마에 의한 물질제거율을 고려하였다. Zhao 등²은 웨이퍼와 연마입자, 연마입자와 패드 사이의 접촉을 각각 소성과 탄성 접촉으로 가정하고, 이들 사이의 힘의 분포에 의한 평형방정식을 통하여 웨이퍼에 대한 연마입자의 새김깊이(Indentation Depth)를 계산하였다. 웨이퍼와 연마입자의 소성접촉은 물질제거를 야기하며, 이때의 새김깊이가 전체 물질제거율을 조절한다. 웨이퍼와 연마입자 사이의 소성접촉과 연마입자와 패드의 탄성접촉은 각 요소들의 물성치와 기하학적 경계조건에 의하여 아래와 같은 힘의 평형조건을 만족시킨다.

$$\delta_w^3 + \left(\frac{9\pi^2}{8} \frac{H_w^2}{E_{asp-w}^2} - 3 \right) D_p \delta_w^2 + 3D_p^2 \delta_w - D_p^3 = 0 \quad (1)$$

여기서 δ_w 는 새김 깊이, H_w 는 웨이퍼의 경도, E_{asp-w} 는 돌기와 웨이퍼의 유효 영률이며, D_p 는 연마입자의 직경을 각각 나타낸다.

다공성의 유연한 패드가 가지는 돌기의 길이분포는 매우 랜덤하여 가우스분포(Gaussian Distribution)를 가정할 수

있다. 또한 실제 접촉면적 A_c 은 각 돌기에서의 접촉면적의 합으로 나타내고, Hertz의 접촉모델과 Greenwood-Williamson 방법을 이용하여 나타낸 접촉력 W_c 은 다음과 같다.

$$A_c = \eta \cdot A_w \cdot \pi \cdot R_{asp} \int_d^\infty (z-d) \cdot \phi(z) dz \quad (2)$$

$$W_c = \frac{4}{3} \eta A_w E_{asp-w} \sqrt{R_{asp}} \int_d^\infty (z-d)^{\frac{3}{2}} \phi(z) dz \quad (3)$$

여기서, η 는 패드 돌기의 밀도, A_w 은 웨이퍼의 면적, R_{asp} 는 돌기 선단의 반지름을 각각 나타내며 ϕ 는 가우스 분포의 확률밀도 함수를 나타낸다.

슬러리는 다량의 연마입자를 포함하며 그 중 유효입자로 정의되는 일부의 입자만이 물질제거 메커니즘에 참여하며, 이를 정의하기 위한 많은 연구가 진행되었다. Zhao² 등은 슬러리에 부유하는 일정한 선밀도를 가진 입자를 가정하고 이를 접촉면적에 적용하여 입자 수 N_a 를 계산하였다.

$$N_a = A_c \left(\frac{6\chi}{\pi D_p^3} \right)^{2/3} \quad (4)$$

χ 는 슬러리 내 연마입자의 부피밀도를 의미한다.

물질제거 메커니즘에 참여하는 유효 입자 수와 접촉에 의한 기하학적 형상을 통하여 웨이퍼와 연마입자의 접촉면적 및 연마입자와 패드의 접촉면적을 구할 수 있다.

기계적 연마작용으로 인한 물질제거는 앞서 구한 새김 깊이에 의해 발생하는 웨이퍼 표면으로의 단면적과 웨이퍼와 패드의 상대속도를 통하여 결정되며, 기계적 효과에 의한 단위시간당 물질제거율은 다음과 같이 표현된다.

$$MRR_{mech} \cong \frac{N_a \sqrt{D_p} \delta_w^{3/2} v_{rel}}{A_w} \quad (5)$$

v_{rel} 은 웨이퍼의 패드에 대한 상대속도를 의미한다.

웨이퍼와 연마입자 및 패드의 접촉은 마찰에 의한 기계적 에너지를 발생시키며, 이 마찰열은 다음 절에 제시되는 열전달 모델의 주 열원이 된다.

접촉에 의한 마찰열은 웨이퍼와 연마입자, 웨이퍼와 패드의 두 가지 접촉에 대하여 독립적인 고려가 요구된다. 발생하는 마찰력은 Amonton의 마찰식³에 의하여 다음과 같이 총 기계적 일률 W_{mech} 을 표현할 수 있으며, 발생한 마찰열은 각 접촉면적에 대하여 고르게 분포됨을 가정하였다.

$$W_{mech} = (\mu_p W_p + \mu_{asp} W_{asp}) \cdot v_{rel} \quad (6)$$

웨이퍼와 입자와 패드의 마찰계수 각각 μ_p , μ_{asp} 이며 W_p 와 W_{asp} 는 각각 웨이퍼와 연마입자 및 웨이퍼와 돌기사이의 소성 및 탄성 접촉력을 의미한다.

3. 웨이퍼-슬러리-패드 열전달 모델

CMP 공정에서 기계적 마찰에 의한 마찰열의 발생은 공정은 온도를 상승시키고, 이는 화학적 활성도를 높이는 등의

물질제거율에 큰 영향을 미치는 인자로 작용한다. Whit 등⁴의 집중요소모델(Lumped Element Model)에 의한 열전달 모델을 제시하였으며, 석종원⁵은 정확한 온도분포를 예측하기 위해 물리적 파라미터를 도입하고 차원해석을 통해 열전달 모델을 제시하였다. 이를 기초로 집중인자 모델(Lumped Parameter Model)을 도입하여 웨이퍼와 패드 및 슬러리 사이의 열전달을 고려하였다.

웨이퍼는 헤드로부터 충분히 단열되며 웨이퍼에 균등한 열의 분포를 가정하여, 슬러리와와의 대류를 주열전달로 고려하여 1차원의 미분방정식으로 표현할 수 있다.

$$\rho_w c_p^{(w)} \dot{T}_w = \frac{f_0^{(w)}}{V_w} - \frac{h_f}{b_w} (T_w - T_f) \quad (7)$$

$\rho_w, c_p^{(w)}, V_w, b_w$ 는 각각 웨이퍼의 밀도, 정압비열, 부피 및 두께를 나타내며 h_f 는 슬러리의 대류열전달 계수를, $f_0^{(w)}$ 는 마찰에 의하여 발생한 기계적인 에너지가 변환된 열원을 나타낸다. 또한 T_w, T_f 는 각각 웨이퍼와 슬러리의 온도를 의미한다.

패드의 경우, 슬러리의 유동 및 대기와의 접촉에 의한 대류열전달에 의한 온도장의 변화를 나타낼 수 있다.

$$\rho_p c_p^{(p)} \dot{T}_p = \frac{f_0^{(p)}}{V_p} - \frac{h_f}{b_p} (T_p - T_f) - \frac{h_a}{b_p} (T_p - T_a) \quad (8)$$

여기서, T_p 는 패드의 온도장, $f_0^{(p)}$ 는 패드에 열원항이며, $\rho_p, c_p^{(p)}$ 는 각각 패드의 밀도와 정압비열을 표시한다. 또한 V_p, b_p 는 각각 패드의 부피와 두께를 나타내며, h_f 와 h_a 는 각각 슬러리 및 대기로의 대류열전달 계수를, T_a 는 슬러리의 온도를 나타낸다.

슬러리는 패드와 웨이퍼 사이에 유동을 가지며, 이 유동을 통하여 열이송-대류의 특성을 가진다. 웨이퍼에 고정된 검사체적 내에 충분히 발달된 층류유동은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\rho}_f c_p^{(f)} (T_f - T_{f0}) + 2h_f T_f \cong h_f (T_w + T_p) \quad (9)$$

여기서 $\dot{\rho}_f$ 는 단위 부피당 슬러리 유체의 질량유량이며 $c_p^{(f)}$ 는 슬러리 유체의 정압비열, T_{f0} 는 슬러리의 입구단에서의 온도를 의미하며 b_f 는 슬러리 유막의 두께를 의미한다.

상호 연성되어 있는 각 구성요소의 열전달식의 수치적 계산을 통하여 CMP 공정에서의 온도변화를 모델링 가능하며 이는 슬러리와 기저부와의 화학반응의 변화를 지배하는 인자로 취급하였다.

4. 집중계수방법을 이용한 화학반응 모델

Submanian 등⁶은 슬러리와 기저부의 화학반응을 2차원 모델로 제안하고 웨이퍼와 패드 사이의 공간에서의 반응을 연속교반액상반응기(Continuous Stirred Tank Reactor: CSTR)로 가정하여 질량수송을 계산하였다. 본 연구는 앞서 계산된 웨이퍼의 온도에 따른 반응속도를 계산하고 이 속도에 의하여 결정되는 화학적 물질제거율을 구하였다. 모델의 단순화를 위하여 웨이퍼와 패드의 상대속도는 웨이퍼 중심까지의 거리를 기준으로 한 평균거리를 이용하여 상대속도를 표현하였다. 반응이 일어나는 시간은 패드 상의 임의의 고정 점이 ω 의 각속도를 가지는 웨이퍼를 통과하는 시간으로 나타낼 수 있다.

$$\tau_{sw} = \frac{2\pi}{\omega} \quad (10)$$

셀과 슬릿의 집합으로 단순화 한 패드의 기하학적 평균 두께를 β 로 정하고 이 두께 내의 슬러리 화학성분의 농도 변화와 웨이퍼 표면과 셀과 슬릿에 유입되는 슬러리의 반응속도식은 다음과 같다.

$$C = C_0 e^{-\beta kt} \quad (11)$$

$$F_A = kv_{rel} C, \quad k = k_0 \cdot e^{-\frac{Q}{RT}} \quad (12)$$

여기서 C_0 는 초기농도, k 는 아레니우스 방정식으로 표현가능한 반응속도상수이며 R 은 기체상수, T 는 온도, Q 는 활성화에너지를 의미하고 t 는 반응시간을 나타낸다.

웨이퍼 내에 균등한 화학반응이 일어남을 가정한 화학적 효과에 의한 물질제거율은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$MRR_{chem} = C_f \cdot \int_{d_0-r_0}^{d_0+r_0} \int_0^{\tau_w} \frac{F_A}{A_w} dt d(d_1) \quad (13)$$

d_0 는 패드의 중심에서 웨이퍼 중심까지의 거리, r_0 웨이퍼의 반경이고, C_f 는 환산계수이다.

총 물질제거율은 기계적 물질제거율과 화학적 물질제거율의 합으로 나타낼 수 있으며, 기계적 물질제거 효과에 연성되어 나타나는 화학적 물질제거율은 White 등⁴이 언급한 바와 같이 기계적 물질제거보다 큰 값을 가진다.

5. 결론

CMP 공정 모델링에서 기계적 접촉에 의한 연마를 고려하고, 마찰열을 발생하여 CMP 공정 내 온도변화를 야기하는 마찰에 의한 기계적 에너지를 고려하였다. 뿐만 아니라 온도변화에 기인하는 화학적 반응속도의 변화를 반응공학을 통하여 함께 모델링함으로써 연성된 화학적 기계적 효과를 설명하는 TCM(Thermal Chemical Mechanical)통합 모델을 제시한다. 이로써 기존의 모델이 가지는 비프레스토니안 영역에서의 한계를 극복하고자 하였다. 현재의 연구가 지니고 있는 한계점인 집중인자방법은 차원을 증가시켜 이를 극복한 연구를 진행할 예정이다.

후기

이 논문 또는 저서는 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-041-D00099).

참고문헌

1. W. T. Tseng, Y. L. Wang, "Re-examination of pressure and speed dependences of removal rate during chemical-mechanical polishing processes", ECS letters, 144, 2, L15-L17, 1997
2. Y. Zhao, L. Chang, "A micro-contact and wear model for chemical-mechanical polishing of silicon wafers", Wear, 252, 220-226, 2002
3. Yu. M. Mamontova, A. S. Akhmatov, "Departures from Amonton's law of friction", Russian Physics Journal, 17, 1553-1556, 1974
4. D. White, J. Melvin, D. Boning, "Characterization and modeling of dynamic thermal behavior in CMP", ECS, 150, 4, G271-G278, 2003
5. 석종원, "화학기계적 연마 프로세스의 동적 열전달 모델링 연구", 대한기계학회논문집 A, 28, 5, 617-623, 2004
6. R. S. Subramanian, L. Zhang, S. V. Babu, "Transport Phenomena in chemical mechanical polishing", ECS, 146, 11, 4263-4272, 1999