입자연마가공에서의 압력 속도 및 유체점도의 영향에 대한 고찰

양우열 · 양지철* · 성인하†

한남대학교 기계공학과

*삼성전자 반도체사업부

A Study of the Effects of Pressure Velocity and Fluid Viscosity in Abrasive Machining Process

Woo Yul Yang, Ji Chul Yang*, and In-Ha Sung†

Dept. of Mechanical Engineering, Hannam University

*Thin Film/CMP Technology Group, Memory Division, Samsung Electronics

(Received November 24, 2010; Revised January 15, 2011; Accepted January 18, 2011)

Abstract – Interest in advanced machining process such as AJM(abrasive jet machining) and CMP(chemical-mechanical polishing) using micro/nano-sized abrasives has been on the increasing demand due to wide use of super alloys, composites, semiconductor and ceramics, which are difficult to or cannot be processed by traditional machining methods. In this paper, the effects of pressure, wafer moving velocity and fluid viscosity were investigated by 2-dimensional finite element analysis method considering slurry fluid flow. From the investigation, it could be found that the simulation results quite corresponded well to the Preston's equation that describes pressure/velocity dependency on material removal. The result also revealed that the stress and corresponding material removal induced by the collision of particle may decrease under relatively high wafer moving speed due to the slurry flow resistance. In addition, the increase in slurry fluid viscosity causes the reduction of material removal rate. It should be noted that the viscosity effect can vary with the shape of abrasive particle.

Keywords – abrasive machining (연마가공), finite element analysis (FEA, 유한요소해석), preston's equation (프레스턴 방정식)

1. 서 론

마이크로 블래스트 세정(micro-blast cleaning) 공정, 폴리싱(polishing), 연마제트가공(abrasive jet machining) 등 마이크로/나노 입자를 이용한 공정들에서는 슬러리(slurry) 유체와 함께 연마입자가 고속으로 분사되어 공작물의 가공표면에 충격을 가하거나 또는 연마입자와 공작물이 연마패드와 직접적인 접촉을 이루면서 기계적 연마 및 화학적 작용이 복합적으로 발생하여 재료가 제거된다.

연마 메커니즘의 규명을 위해 실험에 기반한 연구를 비롯하여 해석적 연구 및 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 많은 연구들이 그동안 수행되어 왔다[1-4].

대표적인 예로써 Sheldon과 Finnie에 의해 수행된 실험에서는 표면으로의 충돌에너지가 작거나 충돌각이 작은 경우 연마율이 분당 수 나노미터로 감소하거나 취성 재료의 경우에도 수 나노미터의 표면거칠기를 보이는 연성모드의 연마표면을 나타낸다는 결과를 보여주었다[5,6]. 또한, 해석적 또는 시뮬레이션을 이용한 연구에서는 가공 후 표면의 형상이 작은 충돌각 및 속도에서 일정하게 나타나지 않고 불규칙하게 나타날 것임을 보여주고

†주저자 · 책임저자 : isung@hnu.kr

있는데 이는 가공후 표면의 형상이 연마입자의 형상, 공작물의 표면품질 등에 더 크게 영향을 받기 때문이라고 설명하고 있다[7,8].

이와같이 다양한 연구가 수행되어 왔음에도 불구하고 연마입자와 공작물표면간 접촉현상의 복잡성과 다양한 공정변수의 복합적인 영향 등으로 인하여 구체적인 연마 메커니즘은 그 중요성에도 불구하고 아직까지도 명확하게 밝혀져 있지 않다. 특히, 반도체 산업에서 웨이퍼 평탄화를 위한 기계-화학적 연마공정(chemical mechanical polishing, CMP)은 가공공정후 표면에 여러 형태의 미세결함이 발생하게 되는데, 더욱 미세한 선폴에 의한 고정밀, 고기능의 전자장비에 대한 요구가 증대되면서 이러한 결함은 device의 수율 및 신뢰성에 점점 더 큰 영향을 미치고 있다. 그러나, 이러한 가공후 표면에 발생하는 미세결함의 발생 원인 및 메커니즘도 명확히 규명되어 있지 않아 현업에서도 이의 발생억제를 위한 효율적이고 근본적인 해결방안을 수립하지 못하고 있는 상황이다.

본 연구팀의 선행연구에서는 미세연마입자와 다양한 웨이퍼 재료 표면간의 접촉강성(contact stiffness)에 따른 마찰력변화와 이를 통한 재료제거율(material removal rate)의 상관관계를 원자현미경을 이용하여 실험적으로 파악하였고, 또한 유한요소모델(finite element model)을 이용한 구형, 육각형, 사각형, 사다리꼴 등 다양한 입자형상에 의한 충돌접촉 시뮬레이션 해석을 통하여 작은 충돌에너지에 의해서는 슬러리(slurry) 유체유동 저항의 영향으로 인해 표면파손 또는 재료제거가 불가능함을 확인하였다[9,10]. 이러한 선행연구에 이어 본 연구에서는 슬러리 유동내에서 연마입자에 의한 가공공정중에 연마압력, 웨이퍼 이동속도 및 유체점도의 변화가 가공표면에 미치는 영향을 고찰해 보고자 하였다. 일반적으로 프레스턴 방정식(Preston's equation)[11]으로 알려져 있는 압력 및 속도에 의존하는 CMP공정의 재료제거율에 대하여 그 각각의 영향성을 확인해보고자 하였다. 이를 위하여 입자, 웨이퍼, 패드 및 접촉계면에서의 슬러리 유동을 고려한 미세유동 채널내에서의 유한요소모델을 구성하고, 앞서 언급한 공정변수에 따른 입자-웨이퍼 접촉을 통한 응력 및 변형을 살펴보았다.

2. 실험 조건 및 방법

유한요소 해석을 위해 일반적인 CMP공정을 고려하여 연마입자, 웨이퍼 재료표면, 패드, 슬러리 유체로 2

Table 1. FE simulation conditions and material properties of abrasive particle

Particle	• Shape : 4 shapes (Trapezoid, Square, Sphere, Hexagon)
	• Diameter : 100 nm
Fluid	• Viscosity : 0.0015, 0.0045, 0.075 Pa·sec (at 20°C)
	• Density : 1.5 g/cm ³
Simulation Conditions	• Pressure : 0.04, 0.4, 4 MPa
	• Wafer moving speed : 60, 120, 300 m/s
	• Initial speed of particle : 100 m/s
	• Temperature : 20°C

Table 2. Mechanical properties of the particle and wafer surface used in the simulation

Material		Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Density (g/cm ³)
Particle	SiO ₂	70	0.2	2.0
	CeO ₂	181	0.311	7.65
Wafer surface	Al	70	0.35	2.7

차원 모델을 구성하였고 ADINA-FSI (fluid-structure interaction)를 이용하여 해석을 수행하였다[12,13]. 연마입자는 100 nm 정도 크기의 ceria (CeO₂)로 구성하고, 형상은 공정에 사용되는 입자의 형상이 실제 거의 구형이 아님을 반영하기 위하여 구형, 사각형, 임의의 사다리꼴, 육각형 등으로 모델링 하였다. 입자가 충돌하는 웨이퍼 표면의 재질은 알루미늄으로 구성하였으며, 입자 및 표면재료는 elastic-isotropic material로 구성하였다. 또한, 임의의 표면형상 및 거칠기를 가지는 패드와 이에 의한 유체유동의 영향을 고려하기 위하여 본 연구에서는 미세요철표면(micro-grooved surface)으로 모델링하였다. 해석을 위한 경계조건으로서, 입자와 wafer표면, 그에 맞닿은 슬러리 유체의 유한요소들을 FSI 경계조건을 부여하였다.

Table 1 및 2에 해석 조건 및 해석에 사용된 재료물성치를 요약, 제시하였다. 압력, 속도, 유체점도는 실제 현업에서 사용되는 공정조건을 참고하여 설정하였고, 재료물성치는 역시 현업에서 사용되는 재료물성 및 기존의 연구결과와 참고문헌으로부터 수집되었다[14,15].

실제 CMP공정에서와 같이 일정한 압력하에서 웨이퍼표면이 일정속도로 회전하고 이에 따라 슬러리 유동이 유발되는 조건하에서 입자가 초기속도를 가지고 웨

이퍼 표면에 45°각도로 충돌하도록 하여 해석을 수행하였다. 초기속도는 연마입자를 이용한 연마제트가공에서 입자분출 속도가 수백~수천 m/s의 범위임을 고려하여 최저속도에서의 표면파손의 영향을 파악하기 위하여 100 m/s로 선정하였다.

슬러리 유체는 일반적으로 많이 사용되는 KOH계 fumed silica 기반 염기성용액의 물성을 이용하였다. 또한, 슬러리 유체는 외부압력하에서의 매우 좁은 미세 채널 내에서의 유동이며 실제 유체에서 매우 작지만 밀도변화가 존재함을 감안하여 극소 압축성 유동 (slightly compressible flow) 으로 모델링하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 연마압력 및 웨이퍼 이동속도의 영향

Fig. 1은 각각 연마압력 및 웨이퍼 이동속도의 변화에 대하여 연마입자의 충돌에 의해 웨이퍼표면에 발생하는 최대응력을 보여주는 snapshot이다. 슬러리 유동의 속도 및 방향분포는 화살표로 나타내었다. 한편, Fig. 2에는 연마압력 및 웨이퍼 이동속도에 따른 웨이퍼 표면에 발생하는 최대응력변화를 그래프로 제시하였다.

앞서 언급한대로, 일반적으로 CMP공정에서 재료제거율은 작용압력과 상대속도에 비례한다는 프레스턴 방정식(Preston's equation)으로 기술한다. 본 해석 및 실험 결과들은 프리스턴 방정식을 충실하게 만족하는 것으로 확인된다. 작용압력이 증가함에 따라 표면에 발생하는 응력도 비례하여 커지며 소성변형이 크게 발생하게 된다. 또한, 모든 경우에 알루미늄의 항복강도 (30~120 MPa)를 크게 초과하는 응력이 발생하고 표면에 큰 변형 및 결함이 발생할 것을 보여주고 있다.

또한, 시뮬레이션 결과 동일한 압력에서 ceria 입자의 경우와 달리 silica입자는 웨이퍼 표면에의 충돌 자체가 이루어지지 않거나 현저히 충돌 속도가 감소하여 거의 표면파손이 일어나지 않음을 보였는데, 이는 silica입자가 상대적으로 밀도가 낮아 슬러리 유동유체의 저항으로 응력이 상대적으로 작게 나타나는 것으로 사료된다. 이는 실험에 의해서도 입증되는데, 재료제거율을 측정하여 얻은 Fig. 3에 보이듯이 silica 입자가 ceria 입자에 비해 동일한 조건에서 더 작은 재료제거율을 보였다.

한편, 웨이퍼 이동속도의 경우 본 시뮬레이션 결과에서는 120 rpm의 결과에서 contact stress가 가장 큰

(a) 0.04 MPa pressure, 60 rpm velocity

(b) 4 MPa, 60 rpm velocity

(c) 0.04 MPa pressure, 300 rpm velocity

Fig. 1. Snapshots of the FE simulation results with respect to pressure and velocity under the contact between CeO₂ particle and Al surface.

값을 나타내고 그 이후에는 대체적으로 다시 감소하여 작은 값을 갖는 결과를 보였다. 이러한 결과는 속도가

(a)

(b)

Fig. 2. Maximum normal and shear stresses on the wafer surface according to the changes in (a) pressure and (b) velocity (ceria particle with hexagonal shape, Al wafer surface).

Fig. 3. Experimental results of the material removal rate with respect to pressure.

크게 증가하면 슬러리 유체의 유동속도의 변화유발 및 웨이퍼 표면에서의 경계층 수막현상에 의해 입자의 충돌시 웨이퍼로 전달되는 힘과 접촉면적이 감소함에 따라 응력 및 재료제거율이 더 이상 증가하지 않고 다소 감소하는 것으로 해석된다. 이러한 결과를 토대로, 향후 압력과 속도 2개의 인자의 scale 비교를 통해 micro-channel내에서 발생하는 재료제거율에 대하여 압력과 속도중 어느 인자가 더 정량적으로 중요한 영향을 미치는지에 대하여 추가적인 고찰이 필요할 것으로 사료된다.

3-2. 유체점도의 영향

운환상태에서 입자와 표면이 점접촉할 경우 높은 압력이 형성되어서 유체의 점도가 매우 크게 상승하고 표면에서 상당한 탄성변형이 발생하게 된다. 그러므로,

(a)

(b)

Fig. 4. Snapshots of the FE simulation results under the contact between CeO_2 trapezoidal particle and Al surface with respect to the slurry viscosity of ; (a) 0.0015 Psec, and (b) 0.0045 Psec.

Table 3. Maximum normal and shear stresses on the wafer surface with respect to the slurry fluid viscosity

Particle Shape	Viscosity (Pasec)	Contact Stress (GPa)	Max.Shear Stress (GPa)
Hexagon	0.0015	0.49	0.26
	0.0045 *	-	-
	0.075 *	-	-
Trapezoid	0.0015	2.26	1.26
	0.0045	1.22	0.69
	0.075 *	-	-

*No contact occurred.

CMP 가공효율 측면을 고려하면 적절한 슬러리 유체 점도의 선정은 중요한 요소가 된다. 일반적으로 ceria CMP에서 점도는 폴리머 첨가제(additive) 량의 증감으로 조절이 가능한데, 이 첨가제의 증가는 재료제거율의 감소 효과를 일으킨다. 이러한 배경으로부터, 슬러리 유체점도의 변화에 따른 발생응력 및 재료제거율에 미치는 영향을 유한요소해석을 통하여 살펴보았다.

Fig. 4와 Table 3은 입자형상이 육각형 및 사다리꼴인 경우 슬러리 유체의 점도변화에 따라 얻은 유한요소해석결과의 일부 snapshot과 해석결과의 요약이다. 육각형 입자의 경우, CMP공정에서 일반적으로 사용되는 0.0015 Pasec의 점도에서는 알루미늄 웨이퍼 표면에 충돌접촉이 이루어지나 3배 이상 점도를 증가시킨 경우에는 표면에 충돌이 이루어지지 않았다. 유체점도의 증가는 표면에 대한 입자의 충돌속도를 감소시킴으로서, 표면에 유발되는 응력이 작아짐에 따라 재료제거율이 감소되는 것으로 해석된다.

반면, 날카로운 모서리로 충돌하도록 설정한 사다리꼴 형상의 입자의 경우에는 점도를 3배 증가시킨 경우에도 표면에 입자가 충돌하여 표면파손이 발생하였다. 이러한 결과로부터, 유체점도의 영향은 공정에 사용되는 입자의 형상에 따라 크게 달라질 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 연마입자에 의한 가공시 입자-표면간 충돌접촉에 대해 연마압력, 웨이퍼 이동속도, 유체점도 등의 연마조건을 슬러리를 고려한 2차원 유한요소모델을 통하여 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 연마압력 및 웨이퍼 이동속도에 대한 충돌접촉 시뮬레이션은 CMP공정의 재료제거율에 관한 프레스턴 방정식에 잘 따름을 확인할 수 있었다. 슬러리 유동하에서 웨이퍼 이동속도의 영향은 어느 정도의 속도 이상으로 크게 증가하면 슬러리 유체의 유동속도의 변화유발 및 웨이퍼 표면에서의 경계층 수막현상에 의해 입자의 충돌시 웨이퍼로 전달되는 힘과 접촉면적이 감소함에 따라 응력 및 재료제거율이 더 이상 증가하지 않고 다소 감소하는 것으로 나타났다.

2) 슬러리 유체점도에 대한 해석결과를 통하여, 유체 점도의 증가는 표면에 대한 입자의 충돌속도를 감소시킴으로서, 표면에 유발되는 응력 감소에 따른 재료제거율 감소를 가져오는 것으로 파악되었다. 또한, 유체 점도의 영향은 연마입자의 형상에 따라 크게 달라질 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0009578).

참고문헌

1. Lin, Y.-Y., Chen, D.-Y., and Ma, C., "Simulations of a Stress and Contact Model in a Chemical Mechanical Polishing Process," *Thin Solid Films*, Vol. 517, No. 21, pp. 6027-6033, 2009.
2. Saka, N., Eusner, T., and Chun, J. H., "Nano-Scale Scratching in Chemical-Mechanical Polishing," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 57, No. 1, pp. 341-344, 2008.
3. Bielawski, M. and Beres, W., "Fe Modelling of Surface Stresses in Erosion-Resistant Coatings under Single Particle Impact," *Wear*, Vol. 262, No. 1-2, pp. 167-175, 2007.
4. Wensink, H. and Elwenspoek, M. C., "A Closer Look at the Ductile-Brittle Transition in Solid Particle Erosion," *Wear*, Vol. 253, No. 9-10, pp. 1035-1043, 2002.
5. Sheldon, G. and Finnie, I., "On the Ductile Behavior of Nominally Brittle Materials During Erosive Cutting," *J. Eng. Ind.*, Vol. 88, No. 4, pp. 387-392, 1966.
6. Sheldon, G. and Finnie, I., "The Mechanism of Material Removal in the Erosive Cutting of Brittle Materials," *J. Eng. Ind.*, Vol. 88, No. 4, pp. 393-400, 1966.
7. Junkar, M., Jurisevic, B., and Fajdiga, M. *et al.*,

- “Finite Element Analysis of Single-Particle Impact in Abrasive Water Jet Machining,” *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, No. 7, pp. 1095-1112, 2006.
8. Ahmadi-Brooghani, S., Hassanzadeh, H., and Kahhal, P., “Modeling of Single-Particle Impact in Abrasive Water Jet Machining,” *International Journal of Mechanical Systems Science and Engineering*, Vol. 1, No. 4, pp. 231-236, 2008.
 9. 김동균, 성인하, “입자연마가공에서의 입자 형상의 영향에 대한 고찰,” *한국운활학회지*, 제26권, 제4호, pp. 219-223, 2010.
 10. Sung, I.-H., “On the Relationship between Material Removal and Interfacial Properties at Particulate Abrasive Machining Process,” *Journal of the KSTLE*, Vol. 25, No. 6, pp. 404-408, 2009.
 11. Oliver, M. R., “Chemical Mechanical Polishing,” *Semiconductor International*, Vol. 26, No. 6, p. 130, 2003.
 12. Bathe, K., Zhang, H., and Ji, S., “Finite Element Analysis of Fluid Flows Fully Coupled with Structural Interactions,” *Computers and Structures*, Vol. 72, No. 1, pp. 1-16, 1999.
 13. De, S., Hong, J., and Bathe, K., “On the Method of Finite Spheres in Applications: Towards the Use with Adina and in a Surgical Simulator,” *Computational Mechanics*, Vol. 31, No. 1, pp. 27-37, 2003.
 14. Li, Y., *Microelectronic Applications of Chemical Mechanical Planarization*, Wiley-Interscience, 2007.
 15. Feng, J., Wang, D., and Liu, H. *et al.*, “Finite Element Simulation of Thermal Stress During Diffusion Bonding of Al_2O_3 Ceramic to Aluminium,” *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 8, No. 2, pp. 138-142, 2003.