

다수의 연마입자를 고려한 CMP 공정의 Stick-Slip 고찰

정소영 · 성인하[†]

한남대학교 기계공학과

Stick-slip in Chemical Mechanical Polishing Using Multi-Particle Simulation Models

Soyoung Jung and In-Ha Sung[†]

Dept. of Mechanical Engineering, Hannam University

(Received September 28, 2018; Revised October 26, 2018; Accepted October 27, 2018)

Abstract – In this study, we investigate the behavior of abrasive particles and change of the stick-slip pattern according to chemical mechanical polishing (CMP) process parameters when a large number of abrasive particles are fixed on a pad. The CMP process is simulated using the finite element method. In the simulation, the abrasive grains are composed of those used in the actual CMP process. Considering the cohesion of the abrasive grains with the start of the CMP process, abrasive particles with various sizes are fixed onto the pad at different intervals so that stick-slip could occur. In this analysis, we determine that when the abrasive particle size is relatively large, the stick-slip period does not change as the pressure increases while the moving speed is constant. However, if the size of the abrasive grains is relatively small, the amount of deformation of the grains increases due to the elasticity of the pad. Therefore, the stick-slip pattern may not be observed. As the number of abrasive particles increases, the stick-slip period and displacement decrease. This is consistent with the decrease in the von Mises yield stress value on the surface of the wafer as the number of abrasive grains increases. We determine that when the number of the abrasive grains increases, the polishing rate, and characteristics are improved, and scratches are reduced. Moreover, we establish that the period of stick-slip increases and the change of the stick-slip size was not large when the abrasive particle size was relatively small.

Keywords – chemical-mechanical-polishing(기계화학적 연마), stick-slip(스틱-슬립), surface defect(표면결함)

1. 서 론

반도체 디바이스는 평면으로 가공된 웨이퍼 상에 구 성되는데 최근 반도체 공정 기술이 다층화 및 미세화 추 세로 발전하게 됨에 따라 평탄화 기술의 중요성이 날로 높아지고 있다. 웨이퍼의 평탄화가 이루어지지 않을 경 우 단차가 적층되어 수율에 영향을 미칠 수 있기 때문 이다.

웨이퍼의 표면 평탄화 공정을 위해 가장 많이 사용되 고 있는 기술은 기계화학적 연마가공이라 불리는 CMP (chemical-mechanical polishing) 공정이다. CMP 공정에 서는 웨이퍼가 캐리어에 장착되어 일정한 압력을 받으면 서 회전하게 되며, 이때 웨이퍼와 연마 패드 사이에 연 마 입자가 포함된 연마액(slurry)이 공급되면서 매우 정 밀한 표면 연마가 이루어지게 된다.

CMP 공정변수로는 웨이퍼에 가해지는 압력과 웨이퍼 의 회전 속도, 슬러리의 종류에 따른 화학적인 물성, 연 마 패드의 기계적 특성 및 패턴 등이 있다. 이러한 CMP 공정변수들은 서로 복합적으로 작용하여 연마율, 연마 거칠기, 평탄도 등 연마 특성에 영향을 미치게 된다. 또

[†]Corresponding author: isung@hnu.kr
Tel: +82-42-629-8316, Fax: +82-42-629-8293
<http://orcid.org/0000-0003-4758-3832>

© 2018, Korean Tribology Society

CMP 공정 후 웨이퍼 표면에는 스크래치(scratch)와 같은 표면 결함이 발생하게 되는데 CMP 공정 변수는 이러한 표면 결함에도 영향을 미친다[1, 2]. CMP 공정 변수들에 의해 스크래치와 같은 표면 결함의 주요 발생 요인인 연마 입자 거동에 변화가 생기고, 결국 스크래치의 형태와 크기 등이 달라지기 때문이다. CMP 공정 후 발생하는 스크래치는 stick-slip, 압력이나 속도에 의한 마찰계수나 접촉면적의 변화에 따른 입자의 거동, 슬러리 찌꺼기, CMP 공정 중에 발생하는 패드 조각 등에 의해 발생한다.

이러한 배경으로부터 본 논문에서는 CMP 공정 후 발생하는 스크래치의 주요 발생 요인인 연마 입자의 stick-slip 거동에 대해 유한요소 해석을 통해 고찰해 보고자 한다[3, 4].

2. 연구방법 및 내용

2-1. CMP공정에서의 stick-slip

두 상대면 사이에서 미끄럼 운동이 발생하는 경우 접촉점들이 형성되어 일정 시간동안 고착되었다가 분리되는 과정, 즉 stick-slip이 발생하는 경우가 있다. CMP 공정에서도 마찰력의 변화에 따라 stick-slip이 발생한다. 따라서 본 논문에서는 연마 입자의 거동을 stick-slip 그래프로 나타내어 고찰해 보았다. 또 연마 입자의 갯수, 상대적인 위치가 stick-slip에 어떻게 영향을 미치는지 분석해보고, 웨이퍼 표면에 나타나는 스크래치와의 연관성을 고찰해 보고자 한다[5].

2-2. 연구방법

본 논문에서는 FEM(Finite Element Method)을 이용하여 CMP 공정을 해석하였고, 해석용 소프트웨어로는 유동해석 및 고체-유체 연성해석을 위한 상용 소프트웨어인 ADINA를 사용하였다. 해석에 사용된 웨이퍼의 이동속도, 가공 압력, 재료의 물성치는 실제 현업에서 사용되는 값들을 이용하였다. 본 연구에서는 웨이퍼와 패드가 직접 접촉하는 상태에서 연마가 진행되는 접촉 메커니즘에 의한 연구이다. 해석이 시작되면서 웨이퍼는 일정한 압력을 받으면서 이동하게 된다. 이때 회전운동을 하는 웨이퍼의 이동속도는 선속도(linear velocity)로 계산되었다. 해석을 위한 경계조건으로는 패드의 아랫면의 유한요소들에 모든 방향으로 고정(fix)시키는 조건을 부여하였다. 연마 입자는 실제 CMP 공정에서 사용되는 연마 입자와 CMP 공정이 시작되면서 연마 입자

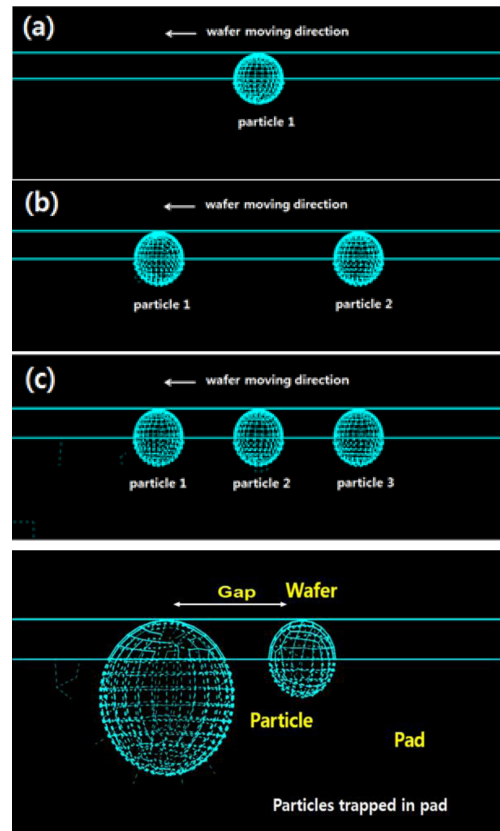


Fig. 1. Finite element models used for FEM.

들이 서로 뭉쳐지는 현상을 고려하여 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 2개 이상의 연마 입자를 구성하였다. 또 stick-slip이 잘 일어날 수 있도록 다양한 크기를 가지는 연마 입자들은 여러 간격(gap)을 가지고 패드 내에 고착되어 있다. 시뮬레이션 중 stick-slip 발생에 의한 연마 입자의 변위량(displacement)은 각 연마 입자가 wafer와 접촉하여 stick된 상태에서 slip이 발생할 때까지 wafer 이동방향으로 이동된 변위량을 의미한다. 연마 입자는 실제 공정에서 사용되는 연마 용액을 고려하여 ceria로 설정하였고, 웨이퍼의 재질은 silica, 연마 패드의 재질은 poly-urethane으로 구성하였다[6]. Table 2는 시뮬레이션에 사용된 재료의 기계적 물성을 정리한 것이다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 연마 입자의 갯수 변화에 따른 영향

실제 공정에서 연마 입자의 함유량에 따른 연마 입자

Table 1. Simulation conditions for FEM

Conditions	Pressure applied to wafer: 1, 3, 5 psi
	Sliding velocity of wafer: 1, 2 m/s
	Particle shape: Sphere
Material	Wafer: SiO ₂
	Particles: Ceria
	Pad: Poly-Urethane
	Elastic-Isotropic materials

Table 2. Mechanical properties of the materials used in the simulation

Material properties	SiO ₂	Ceria	Polyurethane
Young's modulus (GPa)	70	181	0.0023
Poisson's ratio	0.2	0.31	0.49
Yield strength (MPa)	8400	400~430	9.1
Density (g/cm ³)	2.0	7.65	0.75
Specific heat capacity (J/g-K@20°C)	0.70	0.18	-

간의 상호작용을 고찰해 보기 위해 같은 크기의 연마 입자를 가지고 해석을 진행하였다.

Fig. 2는 직경 100 nm의 크기를 가지는 연마 입자의 함유량(갯수)에 따른 영향을 고찰하기 위한 FE 모델에 대한 해석결과를 보여주고 있다. 연마 입자의 갯수를 제외한 다른 해석 조건은 모두 동일하다. (a)의 경우 1개의 연마 입자가 패드 내에 고착되어 있고, (b)의 경우 2개, (c)의 경우 3개의 연마입자가 같은 간격을 가지고 패드내에 고착되어 있는 모델에 대한 해석결과이다. 각 그래프는 입자의 위치별로 시간에 따른 변위량(stick-slip 크기)을 나타낸다.

Fig. 2를 통해 연마 입자의 갯수에 따라 stick-slip 양상이 바뀌는 것을 알 수 있는데, 연마 입자의 갯수가 증가함에 따라 stick-slip주기와 변위량(displacement)가 감소하는 것을 알 수 있다. 연마 입자의 갯수가 증가하면 stick-slip 변위량이 감소하는 것은 웨이퍼 표면에 나타나는 Von-Mises 항복 응력값이 감소하는 결과(Table 3)와 일치하였다. Stick-slip의 변위량은 마찰 편차를 의미하므로, 연마 입자의 갯수가 증가할 경우 웨이퍼와 연마 입자 사이에 발생하는 마찰력이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 입자 갯수가 증가하면 연마에 참여하는 유효 입자수가 증가함으로 접촉 압력이 분산되고 이에 따라 마찰력이 감소하기 때문으로 판단된다. 따라서 이러한 결과를 통해 연마입자-패드, 연마입자간 상호작용에 의해 stick-slip 거동이 달라지는 것을 알 수 있고,

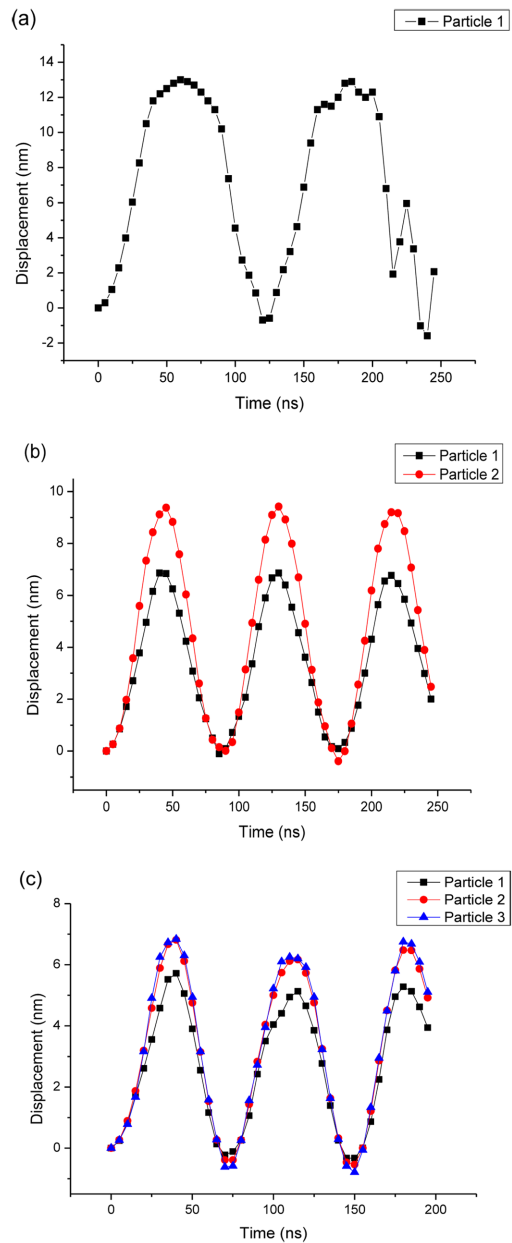


Fig. 2. Effect of number of particles on stick-slip.

또한 연마에 참여하는 입자의 갯수가 stick-slip 양상에 영향을 미치는 주요인자임을 확인하였고, 이러한 결과는 기존의 연구결과와도 잘 부합한다[7]. 이러한 해석결과를 통해 연마 입자의 함유량이 증가하면 연마율과 연마 특성이 좋아짐과 동시에 스크래치가 감소할 가능성이 있는 것을 알 수 있었다.

Table 3. Stress values obtained from FE analysis

No. of Particles	Von-Mises Stress (MPa)	Max. Shear Stress (MPa)
1	83	45
2	38	38
3	26	16

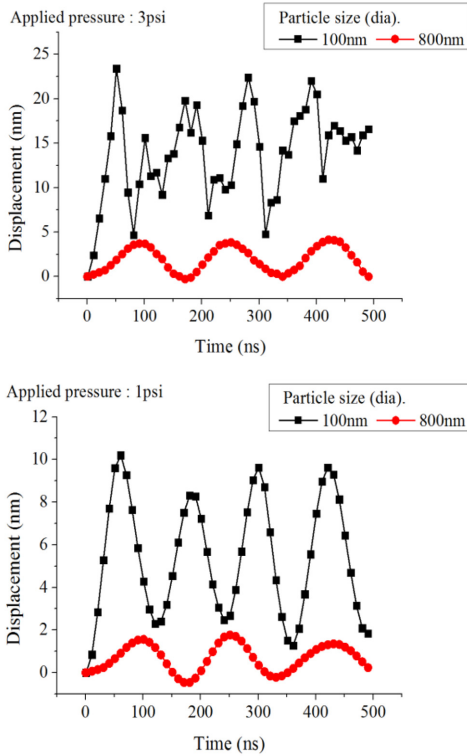


Fig. 3. Effect of applied pressure on stick-slip (1).

3-2. 연마 입자의 크기 변화에 따른 영향

다음으로는 서로 다른 크기를 갖는 2개의 연마 입자가 고착되어 있는 모델에서 웨이퍼에 가해지는 압력이 웨이퍼-입자 계면에서 발생하는 stick-slip 현상에 미치는 영향을 고찰해 보자 하였다. Fig. 1의 모델에서 보듯이 크기가 다르지만 두 입자가 동시에 웨이퍼 표면과 접촉이 가능하도록 입자를 위치시켰다.

Fig. 3과 4는 연마 입자의 간격은 동일한 상태에서 연마 입자의 상대적인 크기에 따른 stick-slip 주기와 변위량을 비교한 결과로서, 패드에 고착된 2개의 크기가 서로 다른 연마 입자의 웨이퍼 이동방향에서의 변위량을 시간에 따라 나타낸 것이다. 즉, 웨이퍼 이동방향에

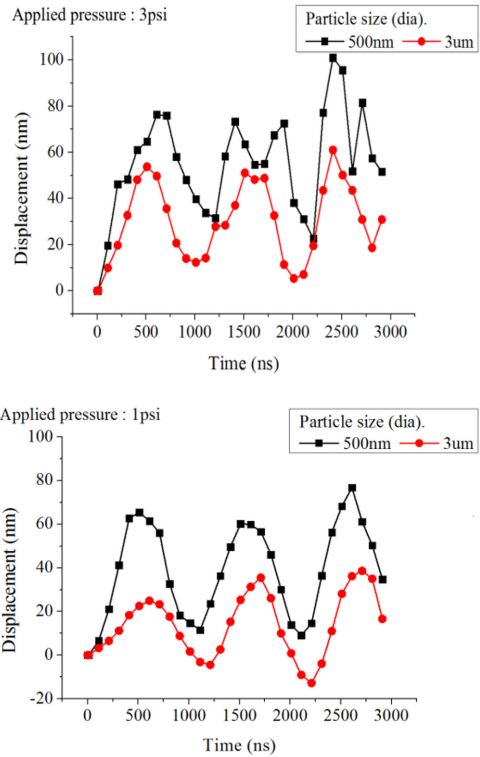


Fig. 4. Effect of applied pressure on stick-slip (2).

서의 연마 입자의 stick-slip현상을 보여주고 있다. 패드에 고착된 연마 입자가 웨이퍼가 정지한 상태에서의 위치를 기점으로 하여 웨이퍼가 일정 속도로 이동하면서 발생하는 stick-slip거동에 따른 입자의 변위량(displacement)을 보여준다. y축에 나타낸 변위는 해석이 시작되면서 웨이퍼가 이동함에 따라 연마 입자가 웨이퍼에 stick되어 웨이퍼의 이동방향으로 끌려간 거리이며, 이 변위량을 stick-slip의 크기라고 할 수 있다.

Fig. 3, 4의 해석 결과 그래프를 통해 연마 입자의 크기에 따라서 웨이퍼의 가공 압력이 미치는 영향이 다른 것을 알 수 있다. 연마 입자의 직경이 800 nm인 경우 가공 압력이 증가하면 stick-slip의 주기는 동일하지만 stick-slip의 변위량, 즉stick-slip의 변위량이 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 연마 입자의 직경이 상대적으로 작은 100 nm인 경우에는 800 nm 입자에 비해 stick-slip주기가 짧고 가공 압력이 증가함에 따라 stick-slip 현상이 명확히 보이지 않음을 볼 수 있다. 기존 연구 결과 역시 CMP 공정에서 가공 압력이 증가하면 stick-slip의 주기는 변하지 않고 stick-slip의 변위량, 즉

마찰 편차만 증가하는 것을 알려져 있다. 이는 본 해석 결과와 동일한 것을 알 수 있다[5, 8].

한편, Fig. 4에서도 웨이퍼의 가공 압력이 증가함에 따라 두 연마 입자의 거동이 달라지는 것을 볼 수 있으나, Fig. 3에 보이는 두 입자가 모두 수백나노미터 범위의 크기를 가진 경우와는 크게 다른 양상을 보인다. 두 입자에서의 변위량이 Fig. 3의 결과와는 달리 훨씬 크게 나타나고 입자 크기에 따라 주기도 별 차이가 나타나지 않음을 보여주고 있다.

Fig. 3과 4에서 나타나는 이러한 현상은, 압력에 따른 패드 내에서의 연마 입자의 거동으로 설명될 수 있다. 연마 입자들의 크기가 클 경우 가공 압력이 증가함에 따라 웨이퍼-연마입자간의 접촉 면적이 크게 증가하면서 stick-slip의 변위량이 증가하는 것으로 예상된다. 그러나 연마 입자들의 크기 자체가 sub-micrometer 수준으로 작을 경우에는 접촉 면적이 작고 거의 패드의 영향을 받지 않게 되어 stick-slip의 주기가 입자의 크기에 따라 많이 달라지게 된다. 이러한 해석 결과를 통해 웨이퍼의 가공 압력이 증가할 경우 연마 입자들의 상대적 크기와 분포에 따라 그 영향이 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 기존의 실험적 결과들과도 잘 일치하며 그러한 결과들의 근거를 잘 설명해준다[5, 8-10].

4. 결 론

실제 CMP공정에서 다량의 연마 입자가 패드 내에 고착되어 있는 상황에 부합한 모델링과 시뮬레이션을 통해, 연마 입자의 갯수, 상대적인 위치가 stick-slip에 어떻게 영향을 미치는지 고찰해 보았다.

본 해석 결과에서는 연마 입자의 크기가 상대적으로 클 경우에 이동 속도가 일정한 상태에서 압력이 증가하게 되면 stick-slip 주기는 변하지 않고 변위량이 증가하는 것을 알 수 있었다. 그러나 연마 입자의 크기가 상대적으로 매우 작을 경우 패드내에서 패드의 탄성에 의한 연마 입자의 변형량이 커지기 때문에 stick-slip 양상이 보이지 않을 수도 있음을 알 수 있다.

연마 입자의 갯수가 증가함에 따라 stick-slip 주기와 변위량(displacement)이 감소하는 것을 알 수 있었다. 연마 입자의 갯수가 증가하면 stick-slip 변위량이 감소하는 것은 웨이퍼 표면에 나타나는 Von-Mises 항복 응력 값이 감소하는 결과와 일치하였다. 연마 입자의 함유량이 증가하면 연마율과 연마 특성이 좋아짐과 동시에 스크래치가 감소할 가능성이 있는 것을 알 수 있었다.

Acknowledgement

이 논문은 2018학년도 한남대학교 학술연구비 조성 지원에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Kim, H. J., "Effect of brush treatment and brush contact sequence on cross contaminated defects during CMP in-situ cleaning," *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 31, No. 6, pp. 239-244, 2015.
- [2] Park, S., Im, S., Lee, H., "Effect of pressure on edge delamination in chemical mechanical polishing of SU-8 film on silicon wafer," *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 33, No. 6, pp. 282-287, 2017.
- [3] Wang, Y. G., Zhang, L. C., Biddut, A., "Chemical effect on the material removal rate in the CMP of silicon wafers," *Wear*, Vol. 270, No. 3-4, pp. 312-316, 2011.
- [4] Kwon, T.-Y., Cho, B.-J., Ramachandran, M., Busnina, A. A., Park, J.-G., "Investigation of source-based scratch formation during oxide chemical mechanical planarization," *Tribol. Lett.*, Vol. 50, No. 2, pp. 169-175, 2013.
- [5] Kim, H.-J., Yang, J. C., Yoon, B. U., Lee, H.-D., Kim, T. S., "Nano-scale stick-slip friction model for the chatter scratch generated by chemical mechanical polishing process," *J. Nanosci. Nanotechnol.*, Vol. 12, No. 7, pp. 5683-5686, 2012.
- [6] Yang, W. Y., Sung, I.-H., "abrasive particle behavior and the change in the material properties of a pad used in chemical mechanical polishing (CMP)," *Journal of the KSME*, pp. 113-114, 2012.
- [7] Wang, Y., Zhao, Y., Li, X., "Modeling the effects of abrasive size, surface oxidizer concentration and binding energy on chemical mechanical polishing at molecular scale," *Tribol. Int.*, Vol. 41, No. 3, pp. 202-210, 2008.
- [8] Park, C. W., Shin, M. W., Jang, H., "Friction-induced stick-slip intensified by corrosion of gray iron brake disc," *Wear*, Vol. 309, pp. 89-95, 2014.
- [9] Cho, W., Ahn, Y. M., Baek, C.-W., Kim, Y.-K., "Effect of mechanical process parameter on chemical mechanical polishing of Al thin films," *Microelectron. Eng.*, Vol. 65, pp. 13-23, 2003.
- [10] Lee, H. S., Park, B. Y., Seo, H. D., Park, K. H., Jeong, H. D., "A study on the characteristics of stick-slip friction in CMP," *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, Vol. 18, No. 4, pp. 313-320, 2005.