

## SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> 혼합입자 슬러리 SiC CMP의 재료제거율 모델링

이현섭<sup>†</sup>

동아대학교 기계공학과 부교수

### Material Removal Rate Modeling of SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> Mixed-Abrasive Slurry CMP for SiC

Hyunseop Lee<sup>†</sup>

Associate Professor, Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A University

(Received April 22, 2023; Revised April 26, 2023; Accepted April 26, 2023)

**Abstract** – Silicon carbide (SiC) is used as a substrate material for power semiconductors; however, SiC chemical mechanical polishing (CMP) requires considerable time owing to its chemical stability and high hardness. Therefore, researchers are attempting to increase the material removal rate (MRR) of SiC CMP using various methods. Mixed-abrasive CMP (MAS CMP) is one method of increasing the material removal efficiency of CMP by mixing two or more particles. The aim of this research is to study the mathematical modeling of the MRR of MAS CMP of SiC with SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> particles. With a total particle concentration of 32 wt, using 80-nm SiO<sub>2</sub> particles and 25-nm TiO<sub>2</sub> particles maximizes the MRR at 8 wt of the TiO<sub>2</sub> particle concentration. In the case of 5 nm TiO<sub>2</sub> particles, the MRR tends to increase with an increase in TiO<sub>2</sub> concentration. In the case of particle size 10-25 nm TiO<sub>2</sub>, as the particle concentration increases, the MRR increases to a certain level and then decreases again. TiO<sub>2</sub> particles of 25 nm or more continuously decreased MRR as the particle concentration increased. In the model proposed in this study, the MRR of MAS CMP of SiC increases linearly with changes in pressure and relative speed, which shows the same result as the Preston's equation. These results can contribute to the future design of MAS; however, the model needs to be verified and improved in future experiments.



© Korean Tribology Society 2023. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License(CC BY, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction of the work in any medium, provided the original authors and source are properly cited.

**Keywords** – Chemical mechanical polishing(CMP), Mixed-abrasive slurry(MAS), Silicon dioxide(SiO<sub>2</sub>), Titanium oxide(TiO<sub>2</sub>), Silicon carbide(SiC)

## 1. 서 론

화학적 반응과 연마 입자에 의한 기계적 재료 제거를 통해 소재의 표면을 가공하는 화학기계적 연마(chemical

mechanical polishing; CMP)는 반도체용 기판 소재의 표면 품질 확보를 위해 필수적으로 적용되고 있는 공정이다[1]. CMP는 기존의 기계적 표면 가공에서 발생하는 표면 변질층을 제거하기 위한 공정이기 때문에 상대적으로 매우 낮은 재료 제거율(material removal rate; MRR)을 가진다. 그러나 최근 실리콘(silicon) 외에 탄화규소(silicon carbide; SiC), 질화갈륨(gallium nitride; GaN) 등 다양한 기판소재가 등장하면서 CMP의 MRR 향상을 위한 연구

<sup>†</sup>Corresponding author: Hyunseop Lee  
Tel: +82-51-200-7648  
E-mail: [hyunseop@dau.ac.kr](mailto:hyunseop@dau.ac.kr)  
<https://orcid.org/0000-0003-4717-3147>

가 많이 이루어지고 있다. 이러한 기판 재료들은 화학적 안정성과 높은 경도로 기계적 재료 제거가 힘들어 CMP를 위해서는 오랜 가공 시간이 요구된다[2].

CMP의 MRR 향상을 위한 연구들은 화학적 재료 제거 작용을 강화하거나 기계적 재료 제거 작용을 강화하는 방법에 관한 연구들로 나뉜다. CMP의 기계적 재료 제거 능력을 향상시키기 위한 방법으로는 높은 압력과 상대속도를 활용하는 방법과 연마 입자의 함량을 높이는 방법, 경도가 높은 입자를 사용하는 방법, 혼합입자(mixed abrasive)를 사용하는 방법[3,4] 등이 있다.

혼합입자 슬러리(mixed-abrasive slurry; MAS) CMP 방식은 강한 기계적 제거 작용을 담당하는 입자와 표면 거칠기를 확보를 위한 입자를 섞어 CMP 가공의 효율을 높일 수 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 입자 혼합비의 결정은 여전히 실험 결과에 의존하고 있다.

본 연구에서는 SiO<sub>2</sub> 입자와 TiO<sub>2</sub> 입자를 이용하는 SiC 기판의 MAS CMP에 관한 수학적 모델링을 통해 두 입자의 함량 변화에 따른 MRR을 예측하고, TiO<sub>2</sub> 입자 크기와 함량이 MRR에 미치는 영향에 대해 조사하고자 한다.

## 2. MAS CMP 모델링

본 연구에서의 MRR 모델은 Zhao와 Chang[5]과 Jiang 등[6]의 모델을 기반으로 한다. 그들의 모델은 슬러리 입자가 연질의 연마 패드에 압입 되어 상대속도에 의해 제거 대상 소재의 표면을 긁고 지나가며 재료를 제거하는 2-Body 마멸을 가정하고 있다.

웨이퍼와 연마 패드의 실 접촉면적(real contact area; RCA)은 Qin 등[7]이 제안한 변형된 Greenwood와 Williamson의 탄성 모델[8]을 활용하였으며 그들이 제안한 식은 아래와 같다.

$$A_r = \left( \frac{1}{0.35} \right) \left( \frac{\beta_p}{\sigma_p} \right)^{0.5} \frac{PA_w}{E_{pw}} \quad (1)$$

여기서  $\beta_p$ ,  $\sigma_p$ ,  $P$ ,  $A_w$ ,  $E_{pw}$ 는 각각 패드 돌기 끝의 평균 반경, 패드 돌기의 표준편차(standard deviation; STD), CMP 시 압력, 웨이퍼의 면적, 패드와 웨이퍼의 복합 탄성계수이다.

MAS 내 연마 입자의 수는 입자의 함량, 입자의 크기, 입자의 밀도, 슬러리의 밀도를 이용하여 Jiang 등[6]이 제안한 수식을 아래와 같은 식으로 변형하였다.

$$N_{1a} = A_r \left( \frac{6C_1\rho_{slurry}}{\pi D_1^3\rho_1} \right)^{2/3} \quad (2)$$

$$N_{2a} = A_r \left( \frac{6C_2\rho_{slurry}}{\pi D_2^3\rho_2} \right)^{2/3} \quad (3)$$

여기서  $N_{1a}$ ,  $N_{2a}$ 는 재료 제거에 참여하는 입자 1과 입자 2의 수이며,  $C_1$ ,  $C_2$ 는 이종 입자 각각의 슬러리 내 함량이며,  $D_1$ ,  $D_2$ 는 입자들의 직경이다.  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ 는 입자 1과 2의 밀도를 뜻한다.  $\rho_{slurry}$ 는 슬러리 전체의 밀도이다.

본 논문에서는 염기성의 슬러리를 기준으로 하였으며, SiO<sub>2</sub>와 TiO<sub>2</sub> 입자는 염기성에서 모두 음의 제타 전위(zeta potential)를 가지기 때문에 입자 간의 응집은 발생하지 않는 것으로 간주하였다.

Fig. 1과 같이 각각의 입자는 웨이퍼와 연마 패드에 압입되며 상대적으로 연질의 연마 패드 쪽으로의 압입이 크게 발생할 것으로 예상된다. 또한, 입자의 크기는 패드 돌기 끝의 평균 반경에 비하여 매우 작기 때문에 웨이퍼로의 입자 압입 깊이와 패드로의 입자 압입 깊이의 합은 입자의 직경과 동일한 것으로 가정한다. 또한, 입자의 압입 깊이는 웨이퍼와의 소성 접촉 힘과 패드와의 탄성 접촉 힘의 균형에 의해 결정된다. 따라서, 연마 입자가 웨이퍼로 압입 되는 깊이는 Zhao와 Chang[5]이 제안한 Eq. 4를 풀어 구한다.

$$\delta_w^3 + \left[ \frac{9}{8} \left( \frac{\pi H_w}{E_{ap}} \right)^2 - 3 \right] D\delta_w^2 + 3D^2\delta_w - D^3 = 0 \quad (4)$$

연마 입자가 웨이퍼에 압입된 단면적(S)는 아래와 같이 표현된다[5].

$$S_1 \approx \delta_{1w} \sqrt{\delta_{1w} D_1} \quad (5)$$

$$S_2 \approx \delta_{2w} \sqrt{\delta_{2w} D_2} \quad (6)$$

여기서  $\delta_{1w}$ ,  $\delta_{2w}$ 는 입자 1과 2가 웨이퍼로 압입되는 깊이이다.

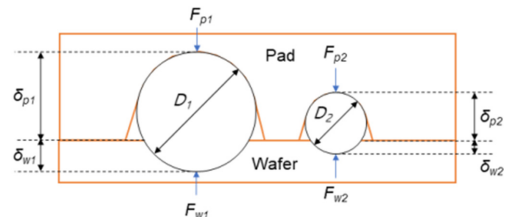


Fig. 1. Schematic diagram of particle indentation to pad and wafer.

**Table 1. Material properties of polishing pad and slurry and process conditions related to MAS CMP model**

Parameters	Value
Elastic modulus of pad	0.8 MPa
Poisson's ratio of pad	0.3
Average radius of pad's asperities	4.55 $\mu\text{m}$
STD of pad's asperities	3.68 $\mu\text{m}$
Area of wafer	0.00785 $\text{m}^2$
Density of slurry	1040 $\text{kg}/\text{m}^3$
Diameter of $\text{SiO}_2$	80 nm
Diameter of $\text{TiO}_2$	5~100 nm
Density of $\text{SiO}_2$	2270 $\text{kg}/\text{m}^3$
Density of $\text{TiO}_2$	4230 $\text{kg}/\text{m}^3$
Total abrasive concentration	32 wt%
Elastic modulus of SiC	137 GPa
Elastic modulus of $\text{SiO}_2$	94 GPa
Elastic modulus of $\text{TiO}_2$	288GPa
Poisson's ratio of $\text{SiO}_2$	0.26
Poisson's ratio of $\text{TiO}_2$	0.29
Hardness of SiC	3800 MPa
Pressure	10~50 kPa
Relative velocity	32.65~130.6 m/min

따라서 MAS CMP의 MRR은 아래와 같이 정리된다.

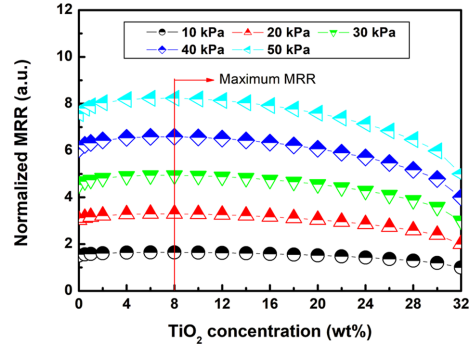
$$\frac{dH}{dt} = K \frac{(N_{1a}S_1 + N_{2a}S_2)}{A_w} V_{re} \quad (7)$$

여기서  $V_{re}$ 는 상대속도이며,  $K$ 는 실험을 통해 결정되는 상수로 슬러리에 의한 화학적 작용 등 수학적 모델이 포함하지 못하는 다양한 CMP 조건들을 포함한다.

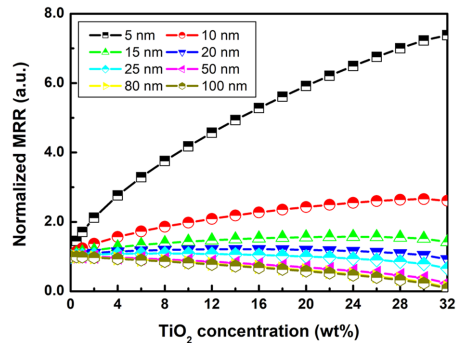
본 연구에서는 가공 대상으로 4인치 SiC 웨이퍼를 선정하였으며 연마 입자로는  $\text{SiO}_2$  입자(80nm)와  $\text{TiO}_2$  입자(5~100 nm)를 고려하였다. 입자의 함량은 두 입자의 무게함량을 기준으로 최대 32 wt%까지 고려하였으며, 가공 압력은 10~50 kPa, 속도는 32.65~130.6 m/min의 조건에서 해석이 이루어졌다. Table 1은 본 연구에서 활용한 웨이퍼, 패드, 연마 입자들에 관한 물성치 및 공정 조건을 보여준다.

### 3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 앞서 제시한 모델을 바탕으로 우선 전체 입자 함량 32 wt%의 슬러리를 기준으로  $\text{TiO}_2$  입자(25 nm)의 함량 변화에 따른 MRR의 변화에 대해 고찰



**Fig. 2. Normalized MRR as a function of  $\text{TiO}_2$  (25 nm) concentration and pressure. (relative velocity: 65.31 m/min)**



**Fig. 3. Normalized MRR as a function of  $\text{TiO}_2$  concentration and particle diameter. (pressure: 40 kPa and relative velocity: 65.31 m/min)**

하였다. Fig. 2는 슬러리 내  $\text{TiO}_2$  함량의 변화와 가공 압력에 따른 MRR의 변화를 보여준다. CMP 조건 중 상대속도는 65.31 m/min으로 고정하였다.

해석에서 고려한  $\text{SiO}_2$  입자(80 nm)는 첨가되는  $\text{TiO}_2$  입자에 비하여 3.2배 큰 직경을 지니고 있어 웨이퍼로의 압입 깊이가 역시  $\text{SiO}_2$ 가  $\text{TiO}_2$ 보다 더 크게 계산된다. 시뮬레이션 결과에 따르면, 25 nm 직경의  $\text{TiO}_2$  입자의 첨가는 8 wt%까지는 MRR을 증가시키지만, 8 wt% 이후부터는 재료 제거에 큰 영향을 미치고 있는  $\text{SiO}_2$  입자 함량의 감소로 인하여 MRR이 낮아지는 경향을 보인다. 이러한 현상은 본 연구에서 고려한 모든 압력 조건에서 동일하게 나타난다. 따라서 80 nm 직경의  $\text{SiO}_2$  입자와 25 nm 직경의  $\text{TiO}_2$  입자가 혼합된 MAS의 경우 8 wt%에서 최대의 재료 제거 효율을 보인다고 할 수 있다.

Fig. 3은  $\text{TiO}_2$  입자의 크기 변화와 입자 함량에 따른 MRR을 보여주고 있다.  $\text{SiO}_2$  입자의 직경은 80 nm로 고정되었다.  $\text{TiO}_2$  입자함량이 32 wt%까지 증가하는 동안

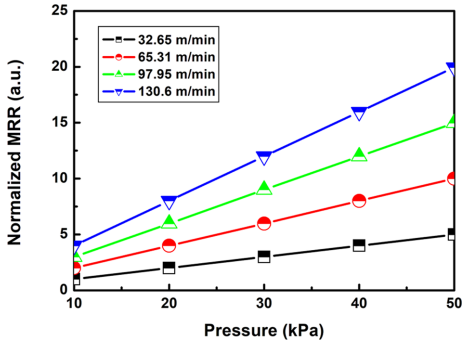


Fig. 4. Normalized MRR as a function of pressure and relative velocity. (24 wt% SiO<sub>2</sub> (80 nm) and 8 wt% TiO<sub>2</sub> (25 nm))

5 nm의 TiO<sub>2</sub> 입자가 첨가되는 경우 MRR은 지속적으로 증가하는 경향을 보인다. 그러나 10 nm 이상의 TiO<sub>2</sub> 입자는 입자 함량이 증가함에 따라 MRR이 증가하였다가 일정 함량 이후부터 감소하는 경향을 보인다. 10 nm 크기의 TiO<sub>2</sub>의 경우 30 wt%, 15 nm는 15 wt%, 20 nm는 14 wt%, 25 nm는 8 wt%에서 최대 MRR을 보이고 TiO<sub>2</sub> 입자 크기 50~100 nm의 경우는 입자함량 증가에 따라 MRR이 지속적으로 감소함을 알 수 있다. 이러한 결과는 80 nm 직경의 SiO<sub>2</sub> 입자를 기초로 하고 TiO<sub>2</sub> 입자가 첨가되는 MAS에서 첨가되는 TiO<sub>2</sub>의 직경이 작을수록 CMP 효율의 향상에 도움이 될 수 있음을 말해 준다.

Fig. 4는 80 nm 직경의 SiO<sub>2</sub> 입자와 25 nm 직경의 TiO<sub>2</sub> 입자가 각각 24 wt%와 8 wt%가 함유된 MAS를 사용한 CMP에서 압력과 상대속도의 변화에 따른 MRR의 예측 결과를 보여준다. 본 연구에서 제안한 MAS CMP의 MRR 모델은 MRR이 압력과 상대속도에 선형적으로 비례하는 특성을 가지며 이는 연마 공정에서 있어 대표적인 실험 모델인 Preston의 식과 유사하다고 할 수 있다. 본 연구에서 제안한 SiO<sub>2</sub> 입자와 TiO<sub>2</sub> 입자의 MAS CMP 모델은 다양한 입자로 구성된 MAS CMP에 적용이 가능할 것으로 보인다.

#### 4. 요약 및 향후 연구 방향

본 연구에서는 SiC의 MAS CMP에 관한 수학적 MRR 모델을 제시하였으며, SiO<sub>2</sub> 입자와 TiO<sub>2</sub> 입자의 함량 변화 및 TiO<sub>2</sub> 입자의 직경 변화에 따른 MRR을 수학적 모델을 이용해 연구하였다.

CMP 슬러리의 총 입자 함량을 32wt%로 고정된 상태

에서 직경 25 nm의 TiO<sub>2</sub> 함량을 변화시킨 경우, 가공 압력과 상관없이 8 wt%에서 가장 높은 MRR을 보인다. TiO<sub>2</sub> 입자의 크기를 5~100 nm로 변화시키면 5 nm TiO<sub>2</sub>의 경우 TiO<sub>2</sub> 입자 함량이 증가함에 따라 MRR이 지속적으로 증가하는 경향을 가지나 10~25 nm TiO<sub>2</sub>의 경우는 MRR이 증가하다가 특정 TiO<sub>2</sub> 함량에서부터 감소하였다. 또한, TiO<sub>2</sub> 직경이 50 nm 이상인 경우는 입자 함량 증가에 따라 오히려 MRR이 감소하였다.

본 연구는 MAS의 제조와 개발에 활용이 가능할 것으로 보이며, 제안된 수학적 모델에 대한 실험적 검증을 통한 비례상수 K의 확인과 혼합입자 간의 다양한 거동을 반영할 수 있는 수학적 모델의 개발이 추가로 필요할 것으로 생각된다.

#### Acknowledgements

본 연구는 한국연구재단 이공분야 기초연구사업(NRF-2021R1F1A1063060)의 지원을 받아 수행한 연구임

#### References

- [1] Lee, H., Kim, H., Jeong, H., "Approaches to Sustainability in Chemical Mechanical Polishing," *Int. J. Precis. Eng. Manufact.-Green Technol.*, Vol.9, No.1, pp.349-367, 2022.
- [2] Lee, H. "Research Trends on Chemical Mechanical Polishing Using Ultraviolet Light," *Tribol. Lubr.*, Vol.38, No.6, pp.247-254, 2022, <https://doi.org/10.9725/kts.2022.38.6.247>
- [3] Lee, H., Park, B., Lee, H., Jeong, S., Seo, H., Joo, S., Jeong, H., Kim, H., "The Effect of Mixed Abrasive Slurry on CMP of 6H-SiC Substrate," *Mater. Sci. Forum*, Vol.569, pp. 133-136, 2008.
- [4] Lee, H.S., Kim, D.I., An, J.H., Lee, H.J., Kim, K.H., Jeong, H., "Hybrid polishing mechanism of single crystal SiC using mixed abrasive slurry (MAS)," *CIRP Ann.-Manuf. Technol.*, Vol.59, pp. 333-336, 2010.
- [5] Zhao, Y., Chang, L., "A micro-contact and wear model for chemical-mechanical polishing of silicon wafers," *Wear*, 252, pp. 220-226, 2002.
- [6] Jiang, J.-Z., Zhao, Y.-W., Wang, Y.-G., Luo, J.-B., "A chemical mechanical polishing model based on the viscous flow of the amorphous layer," *Wear*, Vol.265, pp. 992-998, 2008.
- [7] Qin, K., Moudgil, B., Park, C.-W., "A chemical mechanical polishing model incorporating both the chemical and mechanical effects," *Thin Solid Films*, Vol.446, pp.277-286, 2004.
- [8] Greenwood, J.A. and Williamson, J.B.P., "Contact of Nominally Flat Surfaces," *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol.95, pp. 300-319, 1966.