

CMP 패드 컨디셔닝에서 딥러닝을 활용한 컨디셔너 스윙에 따른 패드 마모 프로파일에 관한 연구

박병훈¹ · 황해성¹ · 이현섭^{2*}

¹동아대학교 대학원 기계공학과 박사과정생

²동아대학교 기계공학과 부교수

Study on the Pad Wear Profile Based on the Conditioner Swing Using Deep Learning for CMP Pad Conditioning

Byeonghun Park¹, Haeseong Hwang¹ and Hyunseop Lee^{2*}

¹Ph.D. Student, Graduate School, Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A University

²Associate Professor, Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A University

(Received April 16, 2024; Revised April 30, 2024; Accepted April 30, 2024)

Abstract: Chemical mechanical planarization (CMP) is an essential process for ensuring high integration when manufacturing semiconductor devices. CMP mainly requires the use of polyurethane-based polishing pads as an ultra-precise process to achieve mechanical material removal and the required chemical reactions. A diamond disk performs pad conditioning to remove processing residues on the pad surface and maintain sufficient surface roughness during CMP. However, the diamond grits attached to the disk cause uneven wear of the pad, leading to the poor uniformity of material removal during CMP. This study investigates the pad wear rate profile according to the swing motion of the conditioner during swing-arm-type CMP conditioning using deep learning. During conditioning, the motion of the swing arm is independently controlled in eight zones of the same pad radius. The experiment includes six swing-motion conditions to obtain actual data on the pad wear rate profile, and deep learning learns the pad wear rate profile obtained in the experiment. The absolute average error rate between the experimental values and learning results is 0.01%. This finding confirms that the experimental results can be well represented by learning. Pad wear rate profile prediction using the learning results reveals good agreement between the predicted and experimental values.



© Korean Tribology Society 2024. 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 planarization(화학기계적 평탄화), Pad conditioning(패드 컨디셔닝), Pad wear profile(패드 마모 프로파일), Deep learning(딥러닝)

1. 서 론

화학기계적 평탄화(Cheical mechanical planarization;

CMP)는 반도체 소자 제조 시 고집적화를 위해 박막을 평탄화(Planarization)하는데 활용되는 기술로 소자의 선평이 미세화됨에 따라 필수적으로 적용되고 있다[1]. CMP는 입자를 이용한 연마 공정에 화학적 반응을 활용하는 하이브리드(Hybrid) 가공으로 폴리우레탄(Polyurethane) 계열의 연마 패드(Polishing pad)를 활용하고 있다[2,3]. CMP 연마 패드의 표면에는 슬러리(Slurry) 이송을 위한 미세 포

*Corresponding author: Hyunseop Lee
Tel: +82-51-200-7648
E-mail: hyunseop@dau.ac.kr
<https://orcid.org/0000-0003-4717-3147>

Table 1. Conditioning test conditions

Test No.	Pad's edge ← % of conditioner's duration → Pad's center							
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8
1	17.4	16.0	14.6	13.2	11.8	10.4	9.0	7.6
2	7.6	9.0	10.4	11.8	13.2	14.6	16.0	17.4
3	18.0	14.0	10.0	8.0	8.0	10.0	14.0	18.0
4	8.0	10.0	14.0	18.0	18.0	14.0	10.0	8.0
5	17.0	17.0	17.0	17.0	8.0	8.0	8.0	8.0
6	8.0	8.0	8.0	8.0	17.0	17.0	17.0	17.0
7 (Prediction)	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5

어(Pore)가 존재한다. CMP 중 가공 부산물과 입자는 패드 표면의 기공에 잔류하여 눈막힘(Glazing)을 유발하고 웨이퍼 가압에 의해 패드 표면의 표면거칠기(Surface roughness)가 줄어드는 현상을 보인다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 CMP 중 컨디셔닝(Conditioning)이라고 하는 공정을 동시에 수행한다[4].

CMP 패드 컨디셔닝은 다이아몬드 입자가 부착된 디스크를 이용하여 패드의 표면을 긁어 눈막힘을 해소하고 패드의 표면거칠기를 유지시키는 공정이다. 그러나 다이아몬드 입자에 의한 패드의 마모로 인하여 연마 패드의 불균일 마모가 수반된다[5]. 따라서 패드 마모율(Pad wear rate; PCR) 프로파일에 관한 연구가 필수적으로 요구된다.

Lee 등[6]은 스윙암(Swing-arm) 형태의 컨디셔닝에서 컨디셔너 스윙 프로파일에 따른 패드 마모율 프로파일을 실험적으로 측정하였으며 기구학적 마모 해석을 통해 패드 마모율 프로파일을 예측할 수 있음을 보여주었다. Park 등[7]은 다구찌(Taguchi)법을 이용하여 패드 마모 균일성을 위한 CMP 컨디셔닝 시스템의 설계 변수에 관한 연구를 수행하였으며 축간거리와 컨디셔너 커버리지(Coverage)의 비를 주요 변수로 제안하였다. Park 등[8]은 기구학적 해석 결과를 바탕으로 인공신경망을 활용하여 컨디셔닝 밀도의 불균일도를 학습하고 결과를 예측하였다. 그러나, 실제 실험을 통한 패드 마모 프로파일을 학습하지 않았으며 실제 실험 결과와의 비교가 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 Lee 등의 연구에서 활용한 컨디셔너 스윙 프로파일 조건을 이용하여 패드 마모 실험을 수행하고 얻어진 패드 마모율 프로파일을 신경망을 통해 학습하였다.

2. 연구방법 및 내용

CMP 컨디셔닝 실험을 위하여 G&P Technology의

200 mm 웨이퍼 전용 CMP 장치인 POLI-500(정반 직경 500 mm)을 이용하였으며, 실험 장치에는 패드 컨디셔닝 전·후의 패드 두께를 측정할 수 있도록 접촉식 변위 센서를 활용한 패드 프로파일러(Pad profiler)가 장착되어 있다.

실험에서 컨디셔너의 하중은 120 N, 컨디셔너 및 정반의 회전속도는 각각 64 rpm, 93 rpm이었으며 컨디셔닝 시간은 10 min이었다. 컨디셔닝 실험 시 초순수(Ultrapur water; UPW)의 공급량은 200 ml/min이다. 연마 패드는 경질의 폴리우레탄 패드를 사용하였다. 컨디셔닝 시 스윙 암의 운동은 패드 반경 동일 길이의 8개 영역(Zone)에서 독립적으로 제어 가능하며, 본 연구에서는 Table 1 과 같은 조건을 선정하였다. 컨디셔닝 전·후 패드 프로파일러를 이용하여 패드의 두께를 측정하였다. 패드 마모율 프로파일은 컨디셔닝 전·후 패드 두께 변화에 의해 계산되며, 측정 위치는 연마 패드의 반경 방향이었다. 실험적으로 측정된 패드 마모율 프로파일 데이터(1645 ea/test)는 센서의 이동 과정과 표면의 미세 형상 등에 의해 잡음(Noise)을 수반하고 있어 동일 조건에 대한 5회 반복 실험 데이터의 평균값에 대한 Adjacent averaging (50 points)을 적용하고 5포인트 간격으로 데이터를 추출하여 6개 실험 조건(각 조건당 412 ea의 데이터)을 딥러닝(Deep learning)을 통해 학습하였다.

학습 시 입력 뉴런의 수는 패드 전 영역에서의 패드 마모율 프로파일을 고려하여 15개(패드 직경방향 Zone의 수), 중간 층 수는 1개, 중간 뉴런 및 출력 뉴런의 수는 412개, 패턴 개수는 7개로 선정하였으며 목표 오차는 0.0005로 설정하였고 학습의 횟수는 10,000회였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 컨디셔너의 스윙 조건에 따른 패드 마모율의 프로파일을 측정하기 위하여 조건 당 6회의 실험을 수행하였으며, 이 중 첫 번째 컨디셔닝의 경우 연마

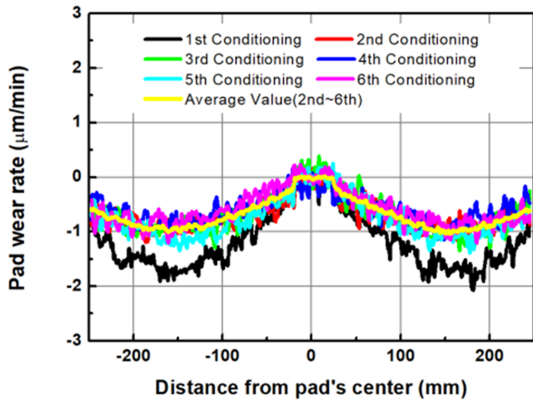


Fig. 1. Pad wear rate profile of Test No. 1.

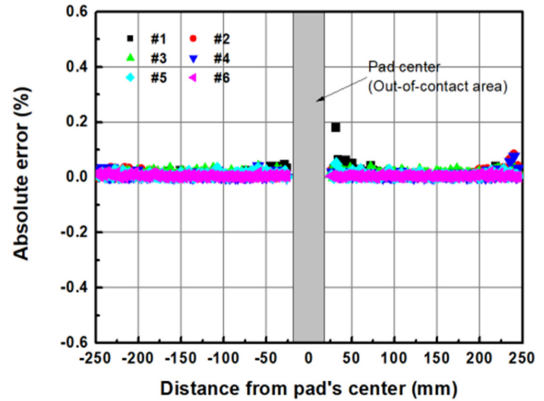


Fig. 3. Absolute errors between experimental results and study results.

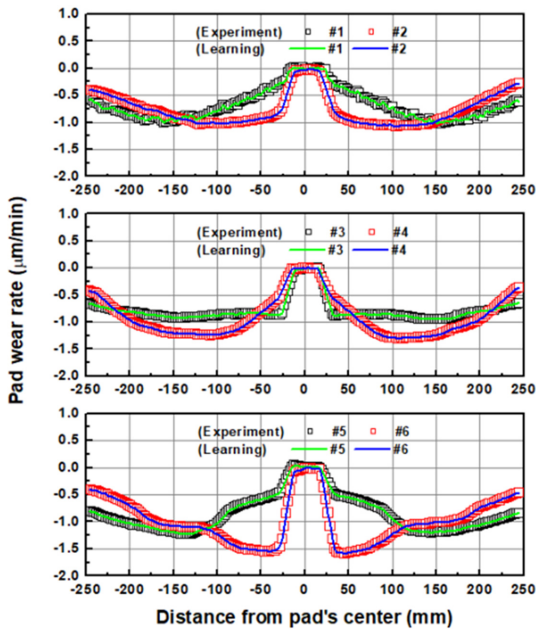


Fig. 2. Experimental results and learning results by deep learning of Test No. 1-6.

패드가 초순수를 충분히 흡수하지 못한 상태로 높은 패드 마모율을 보이는 특성이 있으며, 실제 CMP 공정에서도 가공 전 컨디셔닝과 더미 웨이퍼 CMP를 반복적으로 수행하는 브레이크인(Break-in)이 수행되기 때문에 본 연구에서는 2번째 실험부터 6번째 실험까지 총 5회 실험에서의 평균값을 활용하였다. Fig. 1은 Test 1에 관한 패드 마모율 프로파일과 Test 2~6에 대한 평균값을 보여주고 있다. 실험 결과 Test 2~6의 경우 전반적으로 일정한 패드 마모율 프로파일을 보임을 확인할 수 있다.

Fig. 2는 실험을 통해 얻어진 7개 컨디셔너 스윙 조건

에 따른 패드 마모율 프로파일과 딥러닝을 통해 학습된 결과를 보여주고 있다. 학습의 결과는 실험 결과를 잘 추종하는 것으로 보이며, 학습 결과와 실험값의 오차율은 Fig. 3에 나타내었다. 학습 시에는 실험 데이터의 전 영역을 학습하였으나, 오차 계산에 있어서는 패드 컨디셔닝 시 컨디셔너와 접촉하지 않는 패드 중심부는 고려하지 않았다.

Test No. 1과 같이 Z1이 큰 경우(패드 가장자리에서 컨디셔너 스윙 속도가 느린 경우) 패드 가장자리의 마모율은 증가하는 경향을 보이고, Z8이 큰 경우(패드 중심 인근 컨디셔너 스윙 속도가 느린 경우) Test No. 2와 같이 중심부 인근의 패드 마모율이 증가한다. 컨디셔너가 머무르는 시간의 프로파일이 “V”형인 경우(Test No. 3) 컨디셔너가 패드 중심과 가장자리의 중간 영역을 빠르게 지나기 때문에 상대적으로 균일한 패드 마모율 프로파일이 획득되나, “^”형인 경우(Test No. 4) 패드 중심과 가장자리의 중간 영역이 빠르게 마모되는 것을 확인할 수 있다. Test No. 5와 No. 6은 각각 컨디셔너가 영역에 머무르는 시간의 프로파일이 “?”와 “?”인 경우(스윙 속도의 경우 각각 “?”, “?”형)로 패드 중심 패드 중심 인근의 접촉영역에서 가장자리까지의 프로파일이 기울어지는 경향을 보인다.

Fig. 3에서 도시한 실험값과 학습값의 오차율은 패드 중심부 인근에서 다소 증가하지만 이는 실험값과 학습값이 거의 0에 근접하고 있어 작은 오차값에도 상대적으로 큰 오차율을 보이는 것으로 생각된다. 본 연구에서의 절대 평균 오차율은 0.01%로 딥러닝을 통해 실험 결과를 매우 잘 학습한 것으로 판단된다.

학습 결과를 바탕으로 Table 1의 Test No. 7(Prediction)과 같이 전 영역에서 동일한 컨디셔너 스윙 운동을 하는

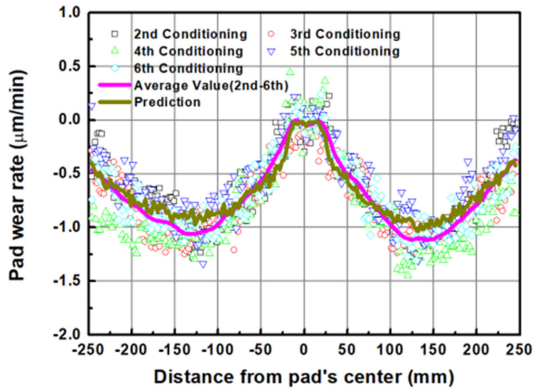


Fig. 4. Prediction and experimental results of pad wear rate profile (Test No. 7).

경우에 대한 예측을 실시하였다 (Fig. 4). 일반적으로 컨디셔너 스윙 운동 시 컨디셔너가 머무르는 시간이 동일한 경우(스윙 속도가 일정한 경우) 패드 마모율 프로파일은 “W”의 형상을 보인다. 이러한 경향은 컨디셔너의 선속도와 접촉영역의 차이에 의한 현상으로 알려져 있다.

예측 결과 일반적으로 알려진 “W” 형상의 패드 마모율 프로파일이 예측되었으나 실험 결과의 평균값을 기준으로 비교하는 경우, 패드 중심 인근 영역과 패드 중심에서 가장자리의 가운데 영역($\pm 100 \sim \pm 200$ mm 영역)에서 패드 마모율의 차이가 발견된다. 실험의 평균값을 기준으로 한 절대 평균 오차율은 12.9%였다. 그러나 CMP 컨디셔닝 실험에서의 반복 오차를 고려하는 경우 딥러닝에 의해 예측된 결과는 5회 수행된 실험 결과 내에 존재하고 예측 전에 진행한 학습이 5회 실험의 평균값들을 기준으로 이루어졌음을 고려해 보았을 때 본 연구에서의 예측 결과는 실험 결과를 잘 추종하고 있는 것으로 판단된다. 그러나 보다 정확한 예측을 위해서는 다양한 컨디셔너 스윙 운동 조건을 포함한 학습이 필요할 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 딥러닝을 이용하여 CMP 컨디셔너의 스윙 운동 조건에 따른 패드 마모율 프로파일에 관한 연구를 수행하였다. 딥러닝 학습을 위하여 6개 스윙 운동 조건(Test No. 1~6)에 관한 실험을 수행하였으며, 각각 5회 반복 실험 후 평균값을 학습하였다. 학습 결과를 바탕으로 패드 전 영역에서 동일한 속도의 스윙 운동을 하는 조건(Test No. 7)에 관한 패드 마모율 프로파일을 예측하였다.

학습 결과 컨디셔너가 접촉하지 않는 패드 중심 인근

영역을 제외하고 절대 평균 오차율 0.01%로 실험 결과에 대한 학습이 잘 이루어져 있음을 확인하였다. 예측 연구에서는 전반적으로 Test No. 7에 관한 평균 패드 마모율 프로파일의 형상은 잘 추종하는 것으로 보이나, 평균 오차율이 12.9%였다. 그러나 예측된 결과가 5회 반복 실험의 오차 범위 내에 존재하여 예측 결과의 유효성을 확인할 수 있었다. 향후 보다 정확한 예측을 위하여 다양한 컨디셔닝 조건에 관한 실험과 학습이 필요할 것으로 보인다.

Acknowledgements

본 논문은 부산광역시 및 (재)부산테크노파크의 BB21plus 사업으로 지원된 연구임

References

- [1] Lee, H., Kim, H., Jeong, H., “Approaches to Sustainability in Chemical Mechanical Polishing (CMP): A Review”, *Int. J. Precis. Eng. Manufact.-Green Technology*, 2022, <https://doi.org/10.1007/s40684-021-00406-8>.
- [2] Lee, H., Lee, D., Jeong, H., “Mechanical aspects of the chemical mechanical polishing process: A review”, *Int. J. Precis. Eng. Manufact.*, 2016, <https://doi.org/10.1007/s12541-016-0066-0>.
- [3] Lee, D., Lee, H., Jeong, H., “Slurry components in metal chemical mechanical planarization (CMP) process: A Review,” *Int. J. Precis. Eng. Manufact.*, 2016, <https://doi.org/10.1007/s12541-016-0201-y>.
- [4] Borucki, L. J., Witeliski, T., Plwase, C., Kramer, P. R., Schwedeman, D. A., “Theory of pad conditioning for chemical-mechanical polishing,” *J. Eng. Math.*, 2004, <https://doi.org/10.1023/B:ENGL.0000042116.09084.00>
- [5] Zhou, Y. Y., Davis, E. C., “Variation of polish pad shape during pad dressing,” *Mater. Sci. Eng.*, 1999, [https://doi.org/10.1016/S0921-5107\(99\)00423-7](https://doi.org/10.1016/S0921-5107(99)00423-7).
- [6] Lee, H., Lee, S., “Investigation of pad wear in CMP with swing-arm conditioning and uniformity of material removal,” *Precis. Eng.*, 2017, <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.01.015>
- [7] Park, B., Park, B., Jeon, U., Lee, H., “Design Variables of Chemical-Mechanical Polishing Conditioning System to Improve Pad Wear Uniformity, *Tribol. Lubr.*, 2022, <https://doi.org/10.9725/kts.2022.38.1.1>.
- [8] Park, B., Lee, H., “Nonuniformity of Conditioning Density According to CMP Conditioning System Design Variables Using Artificial Neural Network,” *Tribol. Lubr.*, 2022, <https://doi.org/10.9725/kts.2022.38.4.152>.