

CVD 컨디셔너 절삭날에 의한 CMP 패드 재료 제거 메커니즘

Material Removal Mechanism of CMP Pad by CVD Conditioner Cutting Edges

신지호¹, 정종민¹, 신영일¹, 정해도^{1, #}Jiho Shin¹, Jongmin Jeong¹, Yeongil Shin¹, and Haedo Jeong^{1, #}¹ 부산대학교 대학원 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Pusan National University)# Corresponding Author / E-mail: hajeong@pusan.ac.kr, TEL: +82-51-510-3210

ORCID: 0000-0003-1838-659X

KEYWORDS: CMP (화학적 기계적 평탄화), Pad conditioning (패드 컨디셔닝), Pad profile (패드 프로파일), Pad cut rate (패드 절삭률), CVD disk (CVD 디스크), Cutting mode (절삭모드)

Pad conditioning restores degraded pad surfaces after wafer polishing in chemical mechanical planarization (CMP) using diamond-embedded conditioner discs. However, conditioning also causes pad cutting, thickness reduction, and profile deformation. While previous studies mainly focused on reducing pad cut rate (PCR) and improving profile uniformity, the fundamental cutting mechanism between conditioner cutting edges and the pad remains unclear. This study investigates the cutting mechanism using CVD conditioner discs with different cutting edge densities under varying conditioning loads to control contact area and load distribution. PCR and pad profile analyses revealed that cutting behavior is primarily governed by the load applied to individual cutting edges. Higher localized loads increased the contribution of cutting to overall material removal. In the pad edge region, where the conditioner partially overhangs the pad, altered contact geometry caused a transition in cutting mode. In this region, the number of active cutting edges had a greater influence than the load per edge. These findings clarify the cutting interactions between CVD conditioner edges and pad surfaces during conditioning and provide a physical foundation for optimizing conditioning parameters to improve pad management in CMP processes.

Manuscript received: March 4, 2026 / Revised: April 9, 2026 / Accepted: April 15, 2026
This paper was presented at KSPE Autumn Conference in 2025

1. 서론

반도체 소자의 고집적화가 진행되면서 각 층마다 평탄도를 확보하기 위한 CMP (Chemical Mechanical Planarization) 공정의 중요성이 매우 커졌다[1]. CMP는 화학 반응을 유도하는 슬러리와 기계적 작용을 제공하는 연마 패드를 사용하며, 연마 패드가 부착된 플레이트를 회전시키고 웨이퍼를 고정하는 캐리어에 압력을 가함으로써 상대 운동과 마찰을 발생시켜 웨이퍼 표면을 평탄하게 만드는 기술이다[2,3]. 이때 연마 패드는 웨이퍼와 캐리어의 마찰로 인해 표면의 미세돌기가 제거되거나 무더지게 되고 지속적으로 공급되는 슬러리로 인해 표면이 클레이징 되는 등 패드의 열화가 발생한다. 열화 된 패드는 웨이퍼

표면과 기계적 작용이 원활하게 이루어지지 않으므로 웨이퍼의 안정적인 재료 제거율을 유지하기 어렵다[4]. 따라서 다이아몬드 팁을 가진 컨디셔너 디스크를 이용하여 패드 표면을 재생시키는 패드 컨디셔닝 과정이 필수적으로 요구된다[5]. 연마 패드를 컨디셔닝 하면 패드의 재료 제거가 발생하여 표면이 재생되는 동시에 패드 두께가 감소한다. 이로 인해 패드 프로파일이 변형되며, 패드 수명 감소를 일으킨다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Lee. H와 Lee. S는 패드를 여러 개의 구역으로 나누고 컨디셔너의 점유 시간을 조정하여 균일한 패드 프로파일을 도출하였으며, 패드 프로파일 형상과 웨이퍼 재료 제거율 간의 상관관계를 분석하였다[6]. 또한, Son. J와 Lee. H는 컨디셔너 디스크를 외부/내부 링 구조로 설계하여 패드와의 접촉 면적을

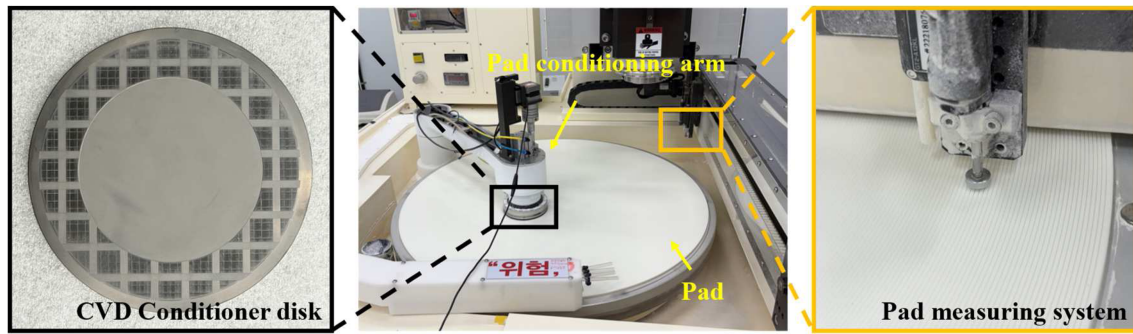


Fig. 1 CMP machine (POLI-762) with a pad measurement system and a CVD disk

제어함으로써 패드 프로파일을 평탄하게 유지하고 패드 수명을 연장시킬 수 있는 방안을 제시하였다[7]. 이와 같이 선행연구들은 패드 프로파일의 평탄화 방안에 주로 초점을 두어 의미 있는 성과를 도출하였다. 그러나 패드 컨디셔닝 과정에서 컨디셔너와 패드 사이에 발생하는 일차적 절삭 메커니즘에 대해서는 여전히 해소되지 않은 측면이 있다. Lee et al.은 균일한 다이아몬드 팁과 불균일한 다이아몬드 팁을 가진 컨디셔너를 각각 사용하여, 팁 형상이 패드 표면 형상 제어에 미치는 영향을 패드의 점탄성 특성에 기인하여 설명하였다[8]. 그러나 서로 다른 팁 형상을 갖는 디스크를 사용함으로써 접촉 면적 변화에 따른 디스크의 하중 분산 및 그에 따른 패드 절삭 거동을 고려하기 어렵고, 컨디셔너의 스윙 반경을 패드 내부로 제한하였다는 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 패드 컨디셔닝에서 컨디셔너의 다이아몬드 팁과 패드 사이의 절삭 메커니즘을 분석하고자 한다. 이를 위해 서로 다른 3가지 CVD (Chemical Vapor Deposition) 다이아몬드 디스크를 사용하여 다이아몬드 팁과 패드 사이의 접촉 면적 및 컨디셔닝 하중을 조절하였고, 그에 따른 패드 절삭 모드를 조사하였다. 또한, 패드 프로파일을 확인하여 컨디셔너가 패드 반경을 이탈할 때 발생하는 접촉면을 구분하여 절삭 모드 전환에 대해 분석하였다.

2. 실험

2.1 실험 장비

본 연구에서는 G&P Technology 사의 POLI-762 장비를 사용하여 CMP 패드 컨디셔닝 실험을 수행하였다. 컨디셔너 디스크는 Fig. 1에 제시된 이화 다이아몬드사 제작 CVD 다이아몬드 디스크를 사용하였다. CVD 디스크의 절삭날은 Fig. 2와 같이 사각뿔대의 형상으로 구조화되어 있으며, 크기와 높이가 동일하고, 규칙적인 패턴과 균일한 분포를 가진다. 연마 패드는 KPX 사의 다공성 폴리우레탄 패드를 사용하였다.

모든 실험은 총 6시간 동안 패드 컨디셔닝을 수행하였으며, 패드 프로파일은 Fig. 1에 제시된 G&P Technology 사의 PMS (Pad Measuring System) 장비를 이용하여 컨디셔닝 30분마다

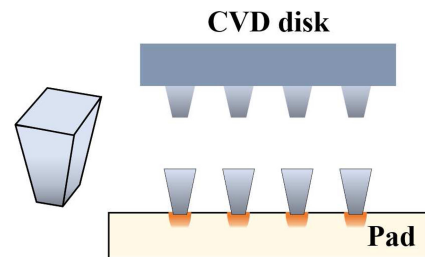


Fig. 2 Geometrical structure of the CVD disk cutting edges

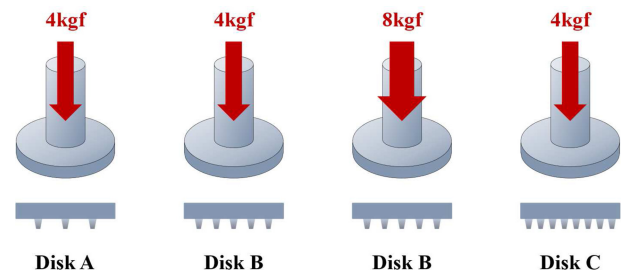


Fig. 3 Four experimental conditions schematically illustrated according to cutting edges number and conditioning downforce

측정하였다. PMS 장비는 접촉식 방식으로 1 μm 분해능을 가지며, 패드의 고정된 지름 방향 좌표를 따라 Linear Gauge로 패드 높이를 측정하여 패드 프로파일을 산출한다. 또한, 패드 컨디셔닝 전후의 프로파일 높이 차이를 이용하여 PCR (Pad Cut Rate)을 산출하였다. PCR은 1시간 단위로 계산하였으며, 6시간 동안의 평균값으로 정리하였다.

2.2 실험 설계

패드 컨디셔닝에서 CVD 다이아몬드 디스크의 절삭날(Cutting Edge)과 패드 사이의 절삭 메커니즘을 분석하기 위해 총 4개의 실험을 설계하였으며 Fig. 3에 도식화하여 나타냈다.

본 실험에서는 절삭날의 개수만을 변수로 갖는 Disk A, Disk B, Disk C 3가지 CVD 디스크를 사용하였다. Disk A는 3가지 디스크 중 절삭날의 개수가 가장 적으며 기준 디스크로 사용되었다. Disk B는 Disk A 대비 절삭날 개수가 1.8배 많고, Disk C는 Disk A 대비 3.2배로 가장 많다. 즉, 구조화된 절삭날 1개의

Table 1 Conditioning experiment recipe

Sweep cycle [cyc/min]		9
Number of zone [N]		12
Velocity [rpm]	Platen	87
	Conditioner	103
Swing radius [mm]	Start	370
	Return	50

접촉 면적은 동일하므로 각 디스크의 절삭날 개수에 따라 전체 접촉 면적이 달라진다. 먼저, 컨디셔닝 하중을 4 kgf로 고정된 상태에서 3가지 디스크를 사용하여 실험을 수행하였다. 이는 동일한 하중 조건에서 디스크별 접촉 면적 차이에 따른 하중 분산의 차이로 인해 절삭날 1개당 전달되는 하중이 달라진다. 이를 통해 CVD 절삭날의 접촉 면적과 개별 절삭날에 작용하는 집중 하중이 패드 절삭 모드에 미치는 영향을 종합적으로 분석할 수 있다. 다음으로 Disk B에 대해 컨디셔닝 하중을 8kgf로 설정하여 추가 실험을 수행하였다. 이는 절삭날의 접촉 면적 차이의 영향을 분리하여 확인할 수 있으며, 동일한 접촉 면적 조건에서 CVD 절삭날의 집중 하중 크기에 따른 절삭 거동을 분석할 수 있다. 상세 조건은 Table 1에 제시하였으며, 각 실험에서 컨디셔너 디스크의 스윙 반경은 모두 동일하다.

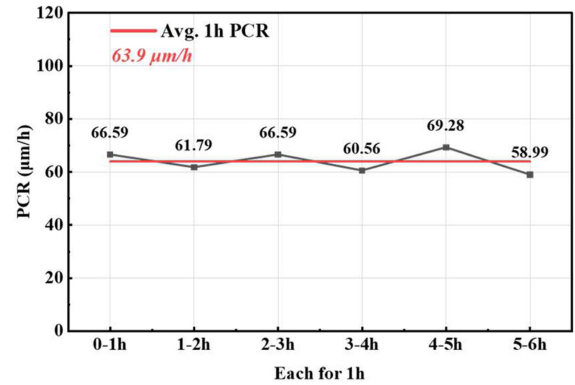
3. 실험 결과

3.1 절삭모드에 따른 Pad Cut Rate

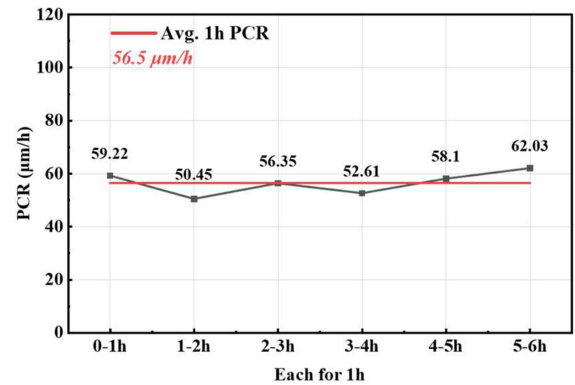
컨디셔닝 하중을 4 kgf로 설정했을 때 Disk A, Disk B, Disk C의 PCR 결과를 Figs. 4 (a), 4(b), 4(d)에 나타냈다. 각 디스크의 평균 PCR은 각각 63.9, 56.5, 18.0 $\mu\text{m/h}$ 로 계산되었다.

CMP 패드 컨디셔닝은 컨디셔너 다이아몬드 팁과 패드의 접촉으로 인해 발생하는 Two-body Abrasive Wear로 해석할 수 있다[9]. Two-body Abrasive Wear에서 절삭 모드는 Fig. 5와 같이 Rubbing, Plowing, Cutting 3가지로 구분된다. 절삭 모드는 날의 절삭 깊이에 지배적인 영향을 받으며, 절삭 깊이가 충분하지 않을 경우 날이 지나간 자리에 탄성 변형만 발생하는 Rubbing 또는 소성 변형과 탄성 변형이 함께 나타나는 Plowing이 발생한다. 반면, 날의 절삭 깊이가 충분히 깊어지면 재료 제거가 동반되며, 소성 변형과 탄성 변형이 함께 나타나는 cutting이 발생한다[10]. 따라서, 절삭날의 절삭 깊이가 깊을수록 절삭 모드 중 Cutting의 비중이 증가하고 PCR이 커진다.

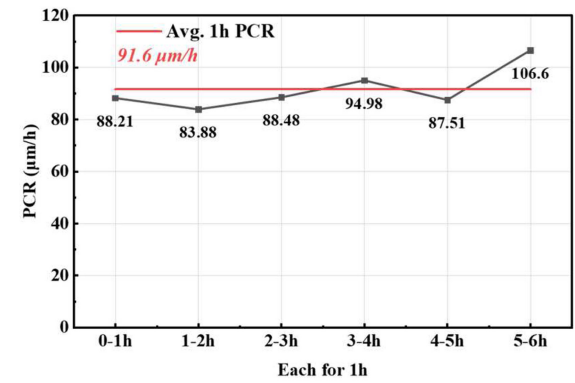
Disk A는 CVD 절삭날과 패드의 전체 접촉 면적이 작아 절삭날 1개당 작용되는 집중 하중이 크므로 동일한 컨디셔닝 조건에서 가장 높은 PCR이 나타난 것으로 해석할 수 있다. 반대로 Disk C는 CVD 절삭날과 패드의 접촉 면적이 가장 넓어 하중이 분산되므로 절삭날 1개당 작용되는 집중 하중이 작아 가장 낮은 PCR이 나타난 것으로 판단된다.



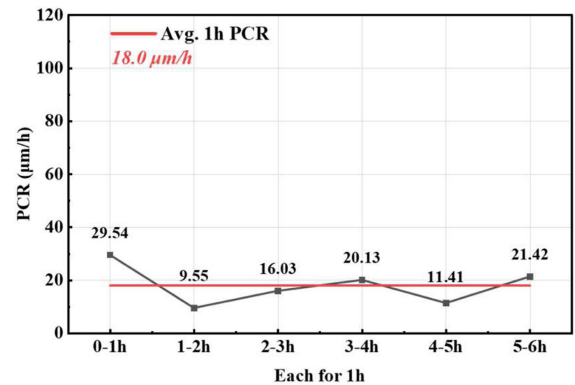
(a) Disk A, 4 kgf



(b) Disk B, 4 kgf



(c) Disk B, 8 kgf



(d) Disk C, 4 kgf

Fig. 4 Average hourly pad cut rates over 6 hours of conditioning under four conditions

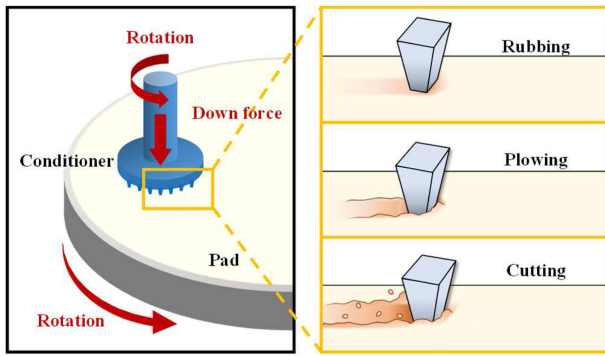


Fig. 5 Three cutting modes are observed according to the cutting depth of the cutting edges, with increasing contribution in the order of rubbing < plowing < cutting as the depth increases

한편 Fig. 4(c)는 Disk B에 대해 컨디셔닝 하중을 8 kgf로 증가시킨 결과이며, 평균 PCR은 $91.6 \mu\text{m/h}$ 로 계산되었다. 이는 Fig. 4(b)와 비교하였을 때 절삭날과 패드의 접촉 면적은 동일하고 컨디셔닝 하중만 2배로 증가한 조건이다. 이때, PCR은 $56.5 \mu\text{m/h}$ 대비 62.1% 증가하였다. 즉, 접촉 면적이 동일한 상태에서 절삭날의 집중 하중이 증가하면 Cutting의 비중이 커지고 PCR이 증가하는 것을 알 수 있다.

3.2 패드 절삭 거동 및 프로파일 분석

CVD 절삭날 개수와 집중 하중이 패드 절삭 거동에 미치는 영향을 파악하기 위해 3.1장에서 언급한 각 실험의 패드 프로파일 결과를 Fig. 6에 나타냈다. 디스크별 패드 프로파일을 비교하여, 패드 가장자리 영역과 중심부에서 나타나는 높이 감소 양상을 바탕으로 CVD 절삭날과 패드 간 절삭 거동을 분석하였다.

컨디셔너 디스크가 패드의 가장자리 영역을 이탈하면 CVD 절삭날과 패드의 접촉면이 전환되며, 이 과정에서 절삭날 개수 및 접촉 면적 차이로 인해 구별된 절삭 거동이 나타난다. 이에 따라 컨디셔너의 패드 가장자리 이탈 시점을 기준으로 Fig. 6을 (A)와 (B) 영역으로 구분하여 분석하였다.

3.2.1 패드 가장자리를 이탈한 컨디셔너 CVD 절삭날의 절삭 거동

컨디셔너 디스크가 패드를 이탈하는 (A) 영역에서는 CVD 절삭날과 패드 사이의 접촉면이 전환되며, 본 연구에서는 이를 Fig. 7과 같이 Side Edge와 End Edge로 구분하였다. Side Edge는 CVD 절삭날이 패드 가장자리를 벗어난 뒤 다시 진입하는 과정에서 절삭날의 측면이 패드와 접촉하는 경우를 의미한다. 이때는 절삭날에 작용하는 집중 하중보다 측면 절삭에 참여하는 절삭날 개수의 영향이 상대적으로 크게 작용한다[11]. 반면 End edge는 CVD 절삭날이 패드와 정면으로 접촉하는 경우로, Fig. 5에서 제시한 바와 같이 절삭날에 작용하는 집중 하중이 Rubbing, Plowing, Cutting의 비중을 결정하는 주요 변수로 작용한다.

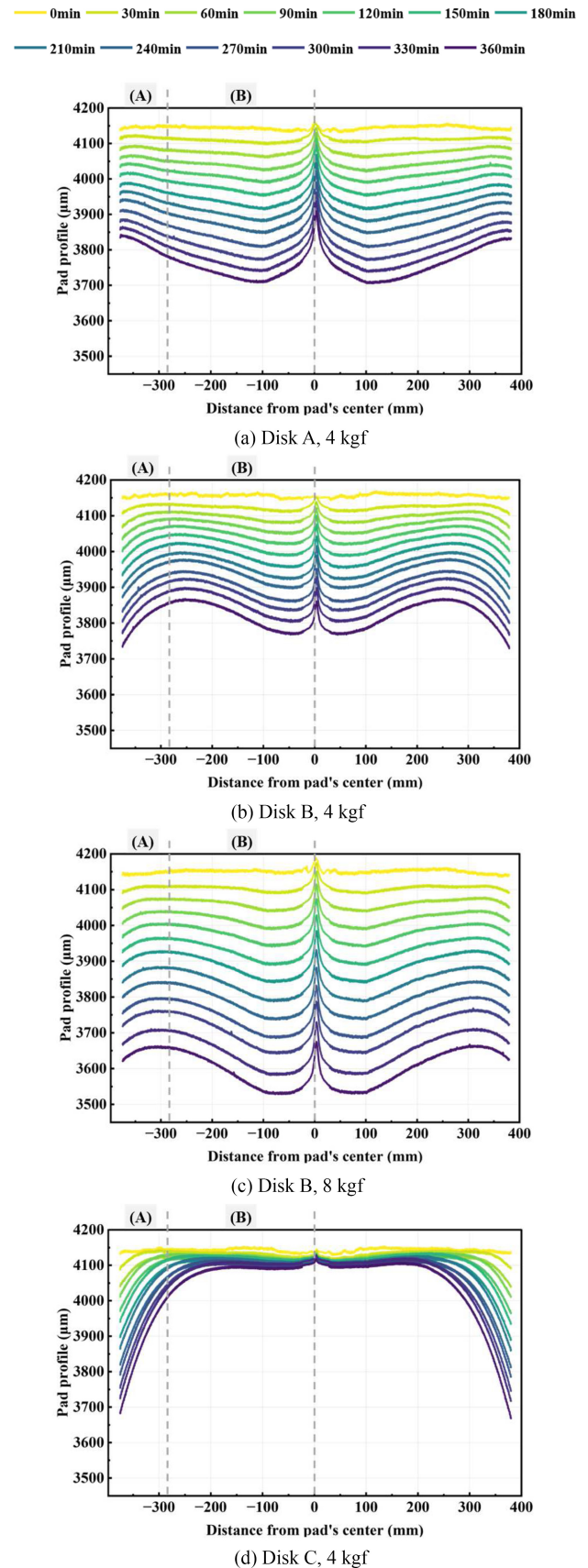


Fig. 6 Pad profiles measured at 30-minute intervals during 6 hours of conditioning under four conditions

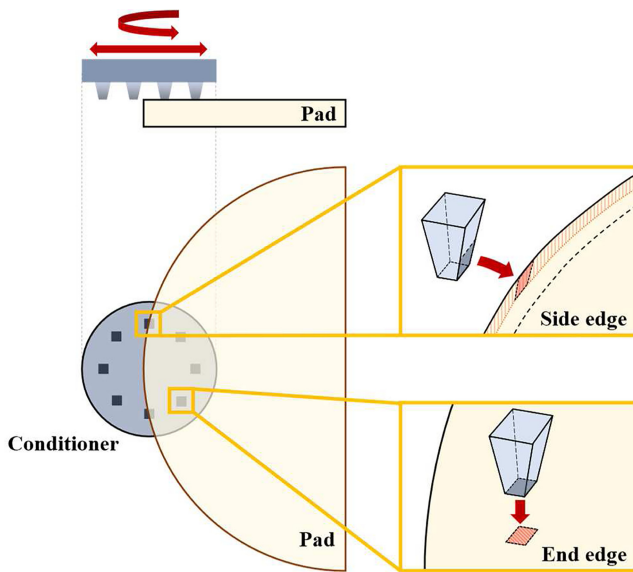


Fig. 7 Definition of side edge and end edge based on the cutting edges-pad contact interface when the conditioner path partially overhangs the pad edge: lateral contact defines the side edge, and frontal contact defines the end edge

3.2.2 절삭 모드가 패드 프로파일에 미치는 영향

Fig. 6(a)는 Disk A를 사용한 패드 프로파일 결과이며, (A) 영역보다 (B) 영역에서 높이 감소가 더 크게 나타난다. 이는 패드와 정면으로 접촉하는 (B) 영역에서 절삭날에 작용하는 하중이 크기 때문에 Cutting의 비중이 증가하는 반면, (A) 영역의 Side Edge에서는 측면 절삭에 참여하는 절삭날의 수가 상대적으로 적기 때문에 해석할 수 있다.

반대로 Fig. 6(d)는 Disk C를 사용한 결과로, (B) 영역보다 (A) 영역에서 높이 감소가 더 크게 나타난다. 이는 (B) 영역에서 절삭날에 작용하는 하중이 충분하지 않아 세 가지 절삭 모드 중 Cutting의 비중이 낮아지는 반면, (A) 영역의 Side Edge에서는 측면 절삭에 참여하는 절삭날의 수가 많기 때문에 판단할 수 있다.

Figs. 6(b)와 6(c)는 동일한 Disk B를 사용하되 컨디셔닝 하중만 달린 결과이다. 절삭날에 작용하는 집중 하중의 차이에 따라 PCR은 상이하게 나타났으나, 접촉 면적이 동일하므로 (A) 및 (B) 영역에서의 패드 프로파일 높이 감소 양상은 전반적으로 유사한 경향을 보였다. 이는 동일한 접촉 면적 조건에서 절삭날의 집중 하중 변화만으로 패드 프로파일 형상 변화가 크게 나타나지 않음을 시사한다.

다시 말해 Disk A와 Disk C처럼 CVD 절삭날 개수가 다른 디스크를 적용하면 접촉 면적 차이로 인해 절삭날의 집중 하중이 달라지고, (A) 영역에서는 측면 절삭에 참여하는 절삭날의 개수가 절삭 거동을 지배하게 된다. 따라서 절삭날 개수 차이에 따른 접촉 조건 변화가 패드 프로파일 형성에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

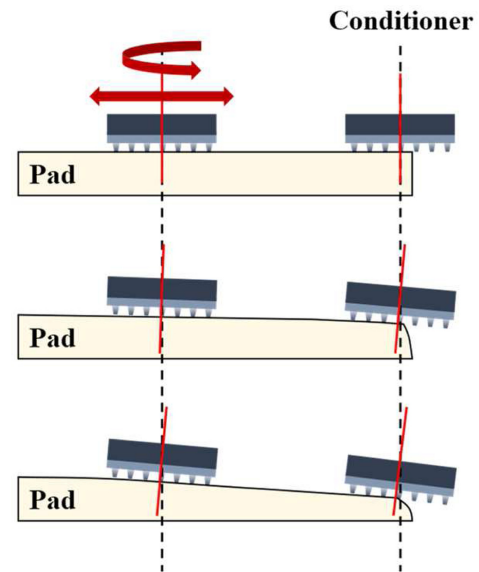


Fig. 8 Conditioning that follows the inclined pad surface, leading to progressive slope steepening

3.2.3 컨디셔닝 누적 효과에 따른 패드 프로파일

컨디셔닝 시간이 누적될수록 패드 프로파일의 경사면 기울기가 점차 가팔라지는 경향을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 8과 같이 컨디셔너가 패드 전체 면적의 표면 거칠기를 재생하는 과정에서, 패드의 기존 경사면을 따라 추종하는 짐벌(Gimbal) 현상의 영향으로 판단된다[12].

Disk A의 경우, 컨디셔닝 시간이 증가함에 따라 Cutting이 상대적으로 많이 발생한 (B) 영역에서 패드 프로파일의 경사면 기울기가 더욱 가팔라지는 경향이 나타난다. 반면 Disk C에서는 Side Edge에 의한 측면 절삭이 누적되면서, (A) 영역의 경사면 기울기가 더 크게 증가하는 것이 관찰된다.

4. 결론

본 연구에서는 CMP 패드 컨디셔닝에서 컨디셔너 다이아몬드 팁과 패드 간 접촉 특성이 절삭 메커니즘에 미치는 영향을 분석하기 위해, 팁 형상을 구조화된 CVD 다이아몬드 컨디셔너 디스크를 사용하였다.

CVD 절삭날 개수가 서로 다른 Disk A, Disk B, Disk C에 대해 동일한 컨디셔닝 하중으로 패드 컨디셔닝을 수행한 결과, 절삭날 개수가 적을수록 PCR이 더 높은 값을 나타냈다. 이는 절삭날 개수가 적을수록 패드와의 접촉 면적이 감소하여 절삭날 1개당 전달되는 집중 하중이 증가하고, 그 결과 3가지 절삭 모드(Cutting, Plowing, Rubbing) 중 Cutting의 비중이 커지는 것으로 확인하였다.

또한 컨디셔닝 시간 누적에 따른 패드 프로파일을 비교한 결과, 3가지 디스크는 서로 다른 경향을 보였으며, 디스크가 패드

가장자리 영역을 이탈한 시점에서 발생하는 구별된 절삭 거동을 조사하였다. 패드의 가장자리 영역에서 CVD 절삭날과 패드의 접촉면 형태에 따라 End Edge와 Side Edge로 구분하였다. End Edge 및 중심부 영역에서는 절삭날이 패드와 정면으로 접촉하므로, 절삭날에 작용하는 집중 하중의 크기가 3가지 절삭 모드에 비중에 좌우하는 주요 변수로 작용하였다. 반면, Side Edge에서는 절삭날의 측면이 패드와 접촉하므로 절삭날의 집중 하중 크기 영향보다 측면 절삭에 참여하는 절삭날의 개수가 더 지배적인 변수로 작용하였다.

추가적으로, 동일한 접촉 면적 조건에서 절삭날의 집중 하중만을 변화시킨 경우의 패드 프로파일을 비교한 결과, 집중 하중 크기 차이에 따른 영향보다 절삭날 개수 차이에 따른 접촉 면적 변화가 패드 프로파일 형성에 더 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

본 연구는 패드 컨디셔닝에서 CVD 절삭날이 패드에 미치는 절삭 거동의 영향을 접촉 면적 및 절삭날의 집중 하중 크기, 그리고 패드 가장자리 영역에서 발생하는 구별된 절삭 거동을 해석하였다. 다만 본 연구는 PCR 및 패드 프로파일을 기반을 중점으로 하여 컨디셔닝 조건이 공정 성능에 미치는 영향을 정량적으로 확장할 필요가 있다. 또한 절삭 메커니즘을 패드 컨디셔닝에 적용하여 절삭 거동을 이해하고 CVD 절삭날과 패드 사이의 접촉면에 따른 절삭 모드 전환을 고려하였으므로 향후 컨디셔너 디스크 선택 및 컨디셔닝 하중 설정에 있어 본 연구의 활용을 기대할 수 있을 것이다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

1. Lee, H., Kim, H., Jeong, H., (2022), Approaches to sustainability in chemical mechanical polishing (CMP): A review, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 9(1), 349-367.
2. Luo, J., Dornfeld, D. A., (2001), Material removal mechanism in chemical mechanical polishing: theory and modeling, *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 14(2), 112-133.
3. Kim, H. J., Jeong, H. D., Lee, E. S., Sin, Y. J., (2003), Velocity and friction force distribution in rotary CMP equipment, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 20(5), 39-46.
4. Lee, S., Kim, H., Ahn, D., Jeong, H., (1999), A study on novel conditioning for CMP, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 16(5), 40-47.

5. Park, B., Lee, H., Kim, H., Seo, H., Kim, G., Jeong, H., (2004), Characteristics of friction affecting CMP results, *Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers*, 17(10), 1041-1048.
6. Lee, H., Lee, S., (2017), Investigation of pad wear in CMP with swing-arm conditioning and uniformity of material removal, *Precision Engineering*, 49, 85-91.
7. Son, J., Lee, H., (2021), Contact-area-changeable CMP conditioning for enhancing pad lifetime, *Applied Sciences*, 11(8), 3521.
8. Lee, D., Lee, K., Jeong, S., Kim, H., Cho, H., Jeong, H., (2019), Effect of diamond abrasive shape of CMP conditioner on polishing pad surface control, *Tribology and Lubricants*, 35(6), 330-336.
9. Harsha, A., Tewari, U., (2003), Two-body and three-body abrasive wear behaviour of polyaryletherketone composites, *Polymer Testing*, 22(4), 403-418.
10. Jeong, J., Shin, Y., Shin, J., Jeong, H., (2026), Convergence behavior of pad surface microtexture under CMP conditioning, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 207, 110512.
11. Korkut, I., Donertas, M., (2007), The influence of feed rate and cutting speed on the cutting forces, surface roughness and tool-chip contact length during face milling, *Materials & design*, 28(1), 308-312.
12. Zhou, Y., Davis, E. C., (1999), Variation of polish pad shape during pad dressing, *Materials Science and Engineering: B*, 68(2), 91-98.



Jiho Shin

M.Sc. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Pusan National University. Her research interest is CMP pad conditioning.
E-mail: jh.shin@pusan.ac.kr



Jongmin Jeong

Ph.D candidate in the Department of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research interest is polishing pad surface and pad conditioning control.
E-mail: jmjeong@pusan.ac.kr



Yeongil Shin

Ph.D in the Department of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research interest is copper CMP and dishing control.

E-mail: oil5108@pusan.ac.kr



Haedo Jeong

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research fields include chemical mechanical polishing (CMP), grinding, polisher and consumable design, and post-CMP cleaning.

E-mail: hdjeong@pusan.ac.kr