



웨이퍼 연마 불균일도 향상을 위한 다중 영역 압력 제어

Multi-zone Pressure Control for Improvement of Within Wafer Non-uniformity in CMP

이태산¹, 이은호¹, 정해도¹,#
Tae San Lee¹, Eun Ho Lee¹, and Hae Do Jeong¹,#

¹ 부산대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Pusan National University)
Corresponding Author / E-mail: hajeong@pusan.ac.kr, TEL: +82-51-510-2463
ORCID: 0000-0003-1838-659X

KEYWORDS: CMP (화학적 기계적 연마), Multi zone (다중 영역), Pressure control (압력 제어), NU-improvement (불균일도 향상), Wafer (웨이퍼)

Chemical Mechanical Polishing (CMP) is a crucial process in advanced semiconductor manufacturing, essential for achieving global planarization of the wafer surface, which directly impacts device performance and yield. Uniform material removal across the wafer is vital; however, non-uniformity frequently occurs, even with nominally uniform applied pressure. A prevalent issue is the edge effect, where the removal rate at the wafer edge significantly differs from that at the center, resulting in reduced uniformity and compromised device reliability. To tackle this challenge, this study explores the effectiveness of a multi-zone pressure-controlled carrier in enhancing polishing uniformity. Conventional single-zone carriers can only influence a narrow region of approximately 5–7 mm at the wafer edge, leading to limited improvements in non-uniformity of about 3%. In contrast, the multi-zone carrier allows for precise pressure control over a broader range, extending from 3 mm to 20 mm from the wafer edge. Experimental results show that this approach reduces non-uniformity to below 3% while effectively addressing edge removal deficiencies. These findings underscore the significant potential of multi-zone carriers to improve CMP process precision. Consequently, the proposed method is anticipated to enhance both productivity and quality in semiconductor fabrication.

Manuscript received: September 5, 2025 / Revised: December 15, 2025 / Accepted: January 5, 2026
This paper was presented at KSPE Spring Conference in 2025

1. 서론

반도체 제조 공정에서 CMP는 다층 구조 형성에 있어 필수적인 평탄화 기술로 자리매김하였으나, 여전히 웨이퍼 전면에서 균일한 재료 제거율을 확보하는 데 한계가 존재한다. 기존의 단일 영역 캐리어는 웨이퍼 전면에 동일한 압력을 인가하는 방식으로, 웨이퍼 중심부와 가장자리 간 재료 제거율 차이를 충분히 보정하지 못한다[1]. 이러한 문제를 해결하기 위해 여러 방법이 실험적으로 이루어졌으며 그중 EPC-ring을 사용하여 불균일도 향상을 할 수 있었다[2]. 그러나 2000년대 이후 웨이퍼의 직경이 300 mm 까지 대형화됨에 따라, EPC-ring의 구조적 특성상 웨이퍼 장착에 물리적 제약이 발생하는 문제가 대두되었다. 또한, 웨이퍼 가장

자리(Edge) 부위의 연마 불균일도 문제는 여전히 해결되지 않은 기술적 과제로 남아 있었으며, 이에 따라 다중 영역 캐리어 기술의 개발이 본격적으로 가속화되었다. 이 기술은 구분된 각 영역에 독립적으로 압력을 인가함으로써, 재료 제거율의 공간적 분포를 보다 정밀하게 제어할 수 있도록 고안되었다[3]. 선행된 연구에서는 다중 영역 압력 제어가 웨이퍼 변형이나 응력 불균일 문제를 개선하는 효과가 있음이 수치해석 및 실험적으로 검증되었으며, 특히 12인치 웨이퍼에서 종별 압력 분포가 웨이퍼 휨과 계면 윤활 거동에 큰 영향을 미친다고 보고되었다[4]. 또한 리테이너 링의 구조적 설계가 연마 균일도 개선에 중요한 역할을 한다는 점도 밝혀졌으며[5], 금속 삽입형 링, 코너 라운딩, 그루브 설계 등이 에지 효과를 완화하고 WIWNU를 낮추는 데 효과적

Table 1 Comparative characteristics of rigid and membrane carriers

	Conventional polishing	CMP
Target	TTV	Planarization
Reference surface	Backside	Frontside
Flatness	Backside must be flat	Not required
Result	Uneven	High-quality

임이 확인되었다[6]. 한편, 패드 그루브 패턴 최적화와 같은 소모품 설계 연구 역시 병행되고 있으며, 이러한 연구는 연마 불균일도를 동시에 개선할 수 있는 새로운 방향성을 제시하고 있다. 종합하면, CMP 공정의 연마 불균일도 문제는 단일 영역 압력 방식의 구조적 한계와 에지 효과에서 비롯되며, 이를 극복하기 위해 다중 존 압력 제어와 리테이너 링 최적화가 핵심 기술로 주목받고 있다[7]. 종합적으로 볼 때, CMP 공정에서 발생하는 연마 불균일도 문제는 단일 영역 압력 제어 방식의 구조적 한계와 에지 효과에서 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위한 핵심 기술로는 다중 존 압력 제어와 리테이너 링의 최적화가 주목받고 있다. 이에 본 연구에서는 다중 존 캐리어를 기반으로 한 압력 분포의 최적화와 에지 효과의 완화를 주요 목표로 설정하였다.

2. 실험내용

종래 폴리싱과 단일 영역 및 다중 영역 CMP를 각각 수행하고, 그결과를 관찰하여 비교하였다.

2.1 종래의 폴리싱과 CMP 비교

종래의 폴리싱(Conventional Polishing)은 웨이퍼의 두께 균일성(TTV, Total Thickness Variation)을 개선하기 위하여, 그리고 화학기계적 연마(CMP)는 웨이퍼 표면 패턴의 평탄화를 향상시키기 위한 적용된다는 점에 큰 차이가 있다. 따라서 적용 방식과 장비 구성에 있어 본질적인 차이를 가진다. 가장 두드러진 차이점은 웨이퍼 기준면의 설정 방식이다. 종래의 폴리싱은 Fig. 1과 같이 강체 캐리어(Rigid Carrier)를 사용하여 백킹 필름(Backing Film) 등의 방법으로 고정하며, 이때 연마 기준면은 웨이퍼의 뒷면에 해당한다. 이러한 방식은 백사이드 폴리싱(Backside Polishing)의 개념에 기반한다. 이에 따라, 연마 품질 확보를 위해 웨이퍼 뒷면의 평탄도가 핵심 요소로 작용한다. 반면, CMP는 Fig. 2와 같이 멤브레인 캐리어(Membrane Carrier)를 이용하여 진공으로 웨이퍼를 고정하고, 연마 기준면을 앞면(Front Side)에 설정한다. 멤브레인 캐리어는 연마 중 가압 시 내부가 유연하게 팽창하여 웨이퍼 전면에 균일한 압력을 전달할 수 있으며, 이에 따라 뒷면의 평탄도에 크게 의존하지 않고도 안정적이고 정밀한 표면 제거가 가능하다.

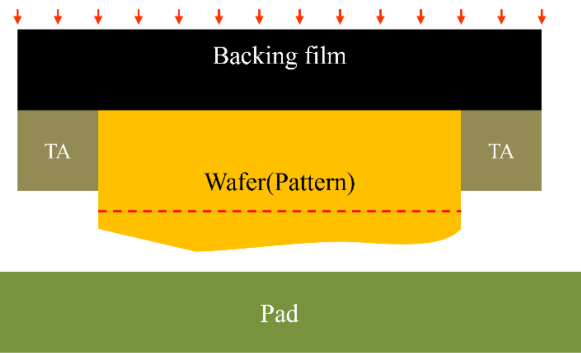


Fig. 1 Structure of the rigid carrier with an attached wafer

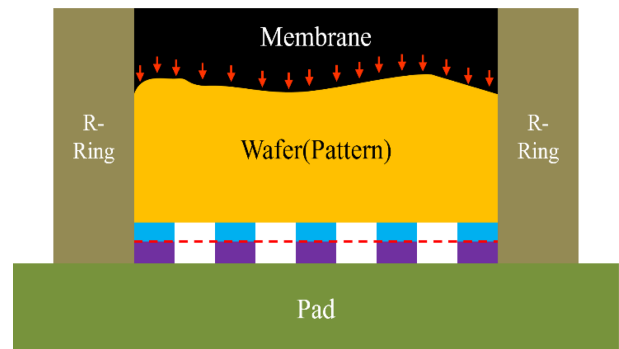


Fig. 2 Structure of the membrane carrier with an attached wafer

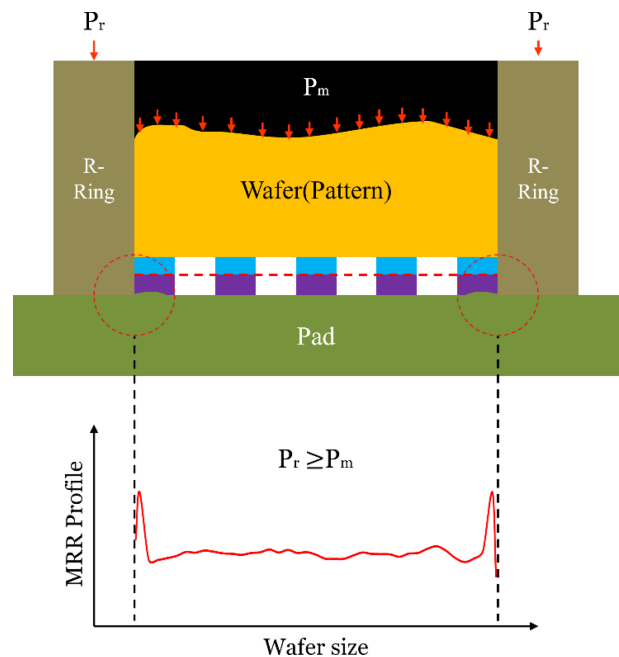


Fig. 3 Edge effect of removal rate profile due to rebounded pad pressurized by retaining ring

2.2 패드 리바운딩 현상으로 인한 에지 효과

앞서 언급한 바와 같이, 멤브레인 캐리어의 가장 큰 장점은 멤브레인 구조를 통해 웨이퍼 전면에 균일한 압력을 전달할 수

Table 2 Polishing conditions

	Wafer No. 1	Wafer No. 2
Wafer pressure	5.0 psi	5.0 psi
R-ring pressure	5.0 psi	6.0 psi

Table 3 Non-uniformity at retainer ring pressure of 5 psi

Retainer ring: 5 psi		
Edge exclusion	3 mm	4.5 [%]

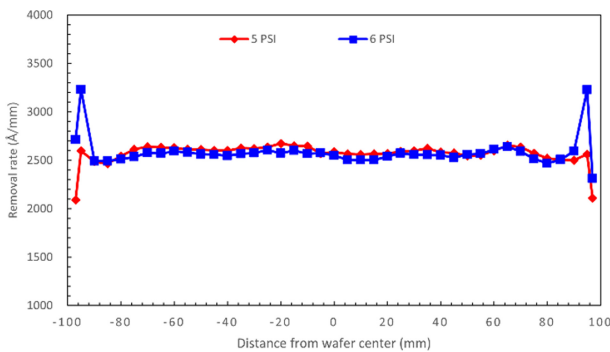


Fig. 4 Comparison of removal rate profiles after CMP under wafer pressure of 5 psi and retaining ring pressures of 5 psi and 6 psi

있다는 점이다. 그러나 구조적 특성상 멤브레인과 웨이퍼 사이의 고정력이 약해질 수 있으며, 이를 보완하기 위해 리테이너 링을 함께 사용한다. 리테이너 링은 웨이퍼 고정 안정성을 높이는 데 기여하지만, 동시에 패드 리바운딩 현상을 유발할 수 있다. 이는 리테이너 링에 집중된 압력이 패드에 전달되면서 패드가 국부적으로 변형되는 현상으로, 그 결과 웨이퍼 에지 영역에서 제거율이 왜곡된다[8]. Fig. 3을 통해 실제 제거율 분포를 살펴보면, 웨이퍼 중심부에서는 균일한 연마가 이루어지지만, 가장자리에서는 제거율이 급격히 증가하거나 감소하는 비정상적인 패턴이 나타난다. 즉, 멤브레인 캐리어는 중심부 연마에서는 높은 균일도를 제공하는 장점이 있으나, 에지 영역에서는 리테이너 링의 기계적 영향으로 인해 연마 균일도 확보에 한계가 존재함을 확인할 수 있다.

2.2.1 에지 효과에 따른 연마 균일도 변화 분석

본 실험의 목적은 CMP 공정에서 자주 발생하는 에지 효과의 영향을 실험적으로 검증하고, 이를 시각적으로 제시하는 데 있다. 이를 위해 동일한 산화막 블랭킷 웨이퍼를 대상으로 연마 전후의 상태를 비교·분석하였다. Tables 2 및 3의 결과에 따르면, 리테이너 링 압력이 5 psi일 때 연마 불균일도는 4.5%로 낮은 수준을 유지하였다. 반면, 압력이 6 psi로 증가할 경우 연마 불균일도는 6.1% 수준으로 악화되는 현상이 나타났다. 이러한 결과는 Fig. 4를 통해 명확히 확인할 수 있다. 리테이너 링 압력이 6 psi일 때, 웨이퍼 가장자리로부터 5 mm 영역에서 연마율이 급격히 변화하는

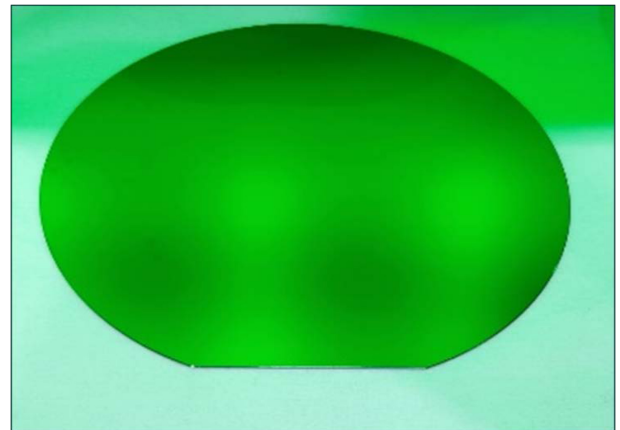


Fig. 5 Oxide blanket wafer before CMP

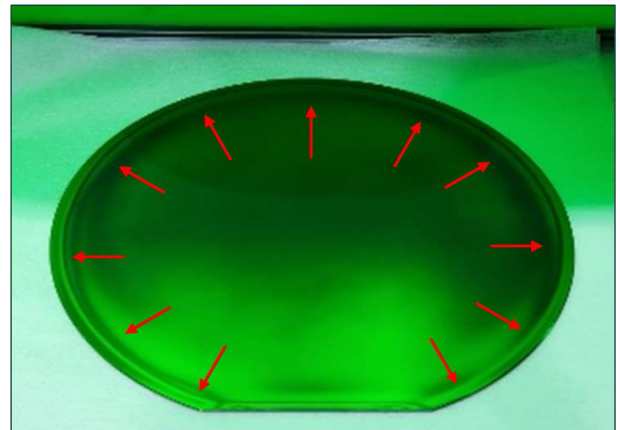


Fig. 6 A wafer with non-uniform thickness of oxide film at edge region observed after CMP

에지 효과가 발생한 것이 관찰되었다. 이는 리테이너 링 압력 변화에 따라 발생하는 패드 리바운드 효과가 연마 결과에 실질적인 영향을 미친다는 사실을 실험적으로 입증한 것이다. 또한 Figs. 5와 6을 통해 에지 효과 발생 전후의 웨이퍼 형상 차이를 명확히 확인할 수 있었으며, 이는 에지 효과의 시각적 검증에 뒷받침한다.

2.3 다중 영역 제어 캐리어

2.3.1 다중 영역 제어 캐리어의 필요성

본 연구에서는 멤브레인 캐리어를 이용하여 8인치 웨이퍼에 대한 연마 실험을 수행하고, 연마 영역 내 압력 분포 및 제거율 변화 양상을 세분화하여 분석하였다. 기존 연구에서는 웨이퍼 전면의 평균 제거율 분포에 중점을 두었으나, 본 연구에서는 웨이퍼 가장자리 기준 약 30 mm 구간에 주목하여, 연마 특성이 뚜렷하게 변화하는 영역이 존재함을 확인하였다. 이에 따라 Fig. 7과 같이 웨이퍼 반경을 기준으로 연마 영역을 세 구간, 즉 Zone 1(가장자리 영역, 95-99 mm), Zone 2(중간 영역, 85-95 mm), Zone 3(중심 영역, 0-85 mm)으로 구분하고, 각 구간의 특성을 분석하였다.

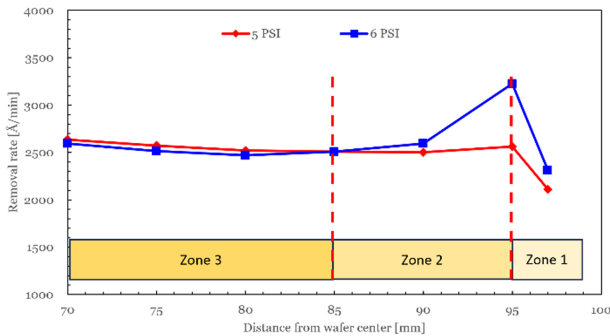


Fig. 7 A comparison of removal rate profiles after CMP under a wafer pressure of 5 psi and retaining ring pressures of 5 and 6 psi at a 30 mm edge zone, along with the corresponding multi-zone configuration

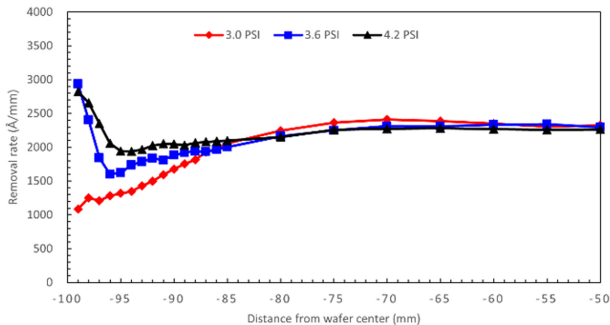


Fig. 8 Comparison of removal rate profiles according to pressure of zone 1

2.3.2 영역별 성능 평가

본 실험은 다중 영역 제어 캐리어를 활용하여, 각 영역의 압력 변화가 웨이퍼 연마 결과에 미치는 영향을 정량적으로 분석하는 것을 목적으로 하였다. 해당 캐리어는 개별 영역별로 독립적인 압력 제어가 가능한 구조를 가지고 있어, 구역별 연마 특성을 보다 정밀하게 평가할 수 있다. 실험은 총 4개 그룹으로 나누어 진행되었으며, 각 그룹에서는 하나의 영역만을 변수로 설정하고, 나머지 영역은 기준 압력으로 고정하여 실험의 정밀도를 높였다. Figs. 8-11은 각 영역별 압력 변화에 따른 재료 제거율을 프로파일 형식으로 나타낸 그래프이다.

그룹 1은 압력 변화에 따른 Zone 1의 제거율 변화를 관찰하고자 하였다. Fig. 8은 Zone 1을 제외한 나머지 영역의 압력을 3 psi로 고정한 상태에서, Zone 1의 압력을 3.0에서 4.2 psi까지 점차 증가시킨 실험 결과를 보여준다. 압력이 증가함에 따라 웨이퍼 중심으로부터 약 85 mm 지점에서 제거율이 점진적으로 변화하기 시작했으며, 95 mm 지점부터는 제거율이 급격히 증가하는 양상이 관찰되었다.

그룹 2는 Zone 2의 압력 변화에 따른 제거율 변화를 관찰하기 위해, Zone 2를 제외한 나머지 영역의 압력을 3.0 psi로 고정한 상태에서 Zone 2의 압력을 3.0에서 4.2 psi까지 점차 증가시키며 실험을 진행하였다. 그 결과, Fig. 9에서 확인할 수 있듯이 Zone 2의 압력 변화에 따라 웨이퍼 중심으로부터 약 70 mm

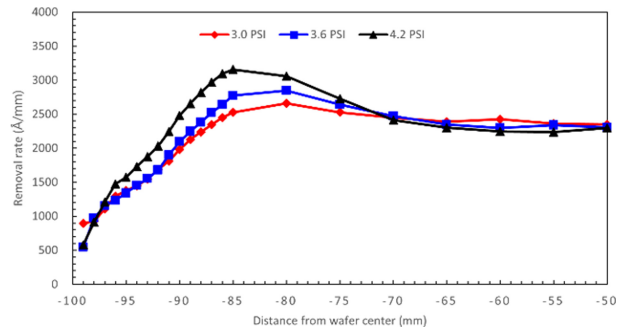


Fig. 9 Comparison of removal rate profiles according to pressure of zone2

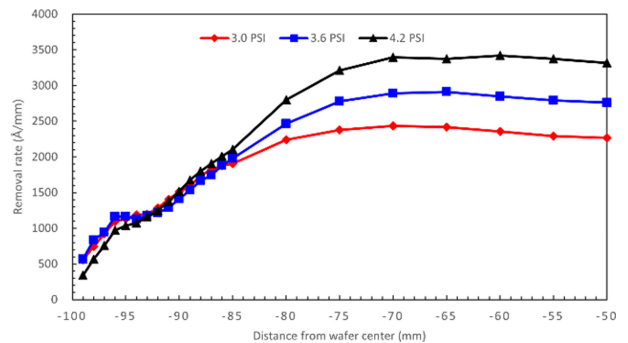


Fig. 10 Comparison of removal rate profiles according to pressure of zone 3

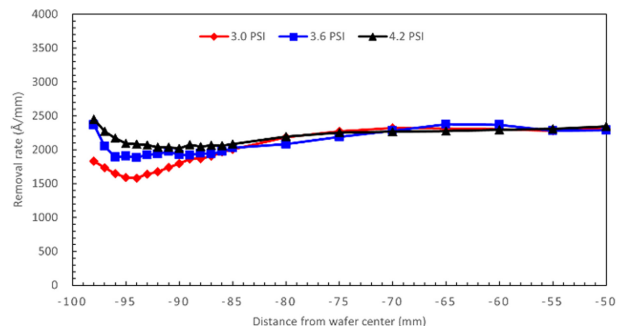


Fig. 11 Comparison of removal rate profiles according to pressure of retaining ring

지점에서 제거율 변화가 시작되었으며, 85 mm 지점에서는 제거율이 급격히 감소하는 양상이 나타났다.

그룹 3은 Zone 3의 압력 변화에 따른 제거율 변화를 관찰하기 위해, Zone 3을 제외한 나머지 영역의 압력을 3.0 psi로 고정한 상태에서 Zone 3의 압력을 3.0에서 4.2 psi까지 점차 증가시키며 실험을 진행하였다. 그 결과, Fig. 10에서 확인할 수 있듯이 Zone 3의 압력 변화에 따라 웨이퍼 중심으로부터 70 mm 지점까지는 제거율이 일정하게 유지되었으며, 이후 85 mm까지는 점진적인 변화가 나타났고, 85 mm 이후부터는 제거율 변화가 거의 없는 양상을 보였다.

그룹 4는 리테이너 링의 압력 변화에 따른 재료 제거율을 확인하고자 하였다. 실험은 리테이너 링을 제외한 나머지 영역의

Table 4 Non-uniformity at retainer ring pressure of 6 psi

Retainer ring: 6 psi		
Edge exclusion	3 mm	6.1 [%]

압력을 3.0 psi로 고정한 상태에서, 리테이너 링의 압력을 3.0에서 4.2 psi까지 점차 증가시키며 진행되었다. 그 결과, Fig. 11에서 확인할 수 있듯이 Zone 1의 결과를 나타낸 Fig. 8과 유사한 경향이 관찰되었다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 분석 및 해석

앞선 연구에서는 다중 영역 압력 제어가 연마 특성에 미치는 영향을 정량적으로 파악하기 위해, 각 Zone의 압력을 독립적으로 변화시키며 제거율 및 연마 불균일도에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과, Zone 3는 상대적으로 독립적인 거동을 보였으며, 해당 영역의 압력 변화가 다른 영역의 연마 특성에 미치는 영향은 제한적인 것으로 나타났다. 이는 Zone 3가 주로 웨이퍼의 중심부에 위치하며, 타 영역과의 기계적 상호작용이 적기 때문에, 국소적인 압력 조절을 통해 개별적으로 연마 조건을 조절할 수 있음을 시사한다.

반면, Zone 1, Zone 2, 그리고 Retainer Ring은 서로 유기적인 상호작용을 보이며, 명확한 비독립적 관계를 형성하고 있었다. 세 영역 모두 웨이퍼 가장자리 또는 중간 경계에 위치하며, 각각의 압력 변화가 다른 두 영역의 연마 특성에 직·간접적인 영향을 미치는 경향이 두드러졌다. 예를 들어, Zone 1의 압력을 증가시킬 경우, 단순히 해당 영역의 제거율만 증가하는 것이 아니라 인접한 Zone 2의 균일도에도 변화가 나타났으며, Retainer Ring의 영향력 역시 전체 연마 균일도에 중요한 변수로 작용하였다. 이러한 결과는 CMP 공정에서의 다중 압력 제어가 단일 변수 제어 방식으로는 충분히 설명될 수 없음을 보여준다. 특히, 특정 영역의 성능 향상을 위해 개별 압력만을 조정할 경우, 오히려 다른 영역의 균일도 저하를 초래할 수 있어 전체 공정 성능의 불균형을 유발할 수 있다. 따라서, Zone 1, Zone 2, Retainer Ring의 압력은 상호 연계된 변수로 간주하여 동시 제어 기반의 접근이 필요하다.

3.2 에지 효과 저감을 위한 최적 제어 조건

앞서 실험한 결과들을 바탕으로 에지 효과 저감을 위한 최적 조건을 다음과 Table 4와 같이 확인할 수 있었다.

Fig. 11은 다중 영역 제어 캐리어(Multi-zone Carrier)를 활용하여 에지 효과를 효과적으로 제어한 결과를 나타낸 그래프이다. 보다 정밀한 분석을 위해 Fig. 13에서는 웨이퍼 가장자리 30 mm 구간을 확대하여, 단일 영역 제어 캐리어 다중 영역 제어 캐리어의 연마 특성을 비교하였다. 그 결과, 단일 영역 제어

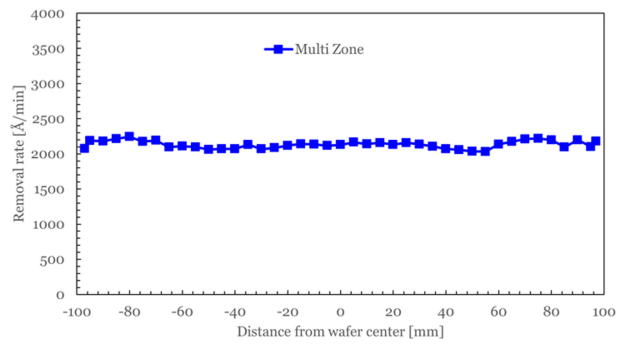


Fig. 12 Material removal rate profile in CMP using a multi zone carrier

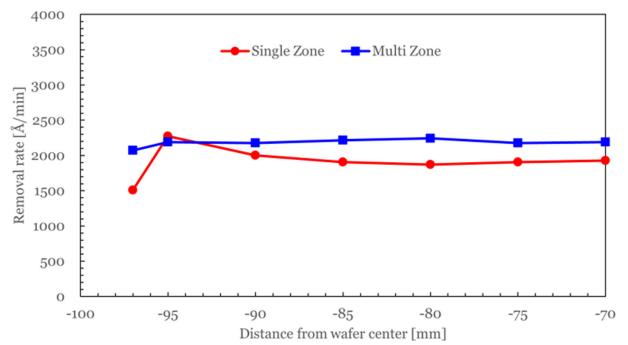


Fig. 13 Comparison of removal rate profiles using single-zone and multi-zone carriers at 30 mm edge region

Table 5 CMP results using multi-zone carrier

Edge exclusion	Single zone	4.5 [%]
	3 mm	Multi zone

캐리어에서는 웨이퍼 가장자리 5 mm 구간에서 압력 변화가 급격히 발생하는 반면, 다중 영역 제어 캐리어에서는 해당 구간에서 거의 변화가 없는 안정적인 양상을 보이는 것이 관찰되었다. 또한 Table 4에 따르면, 가장자리 3 mm 구간에서의 연마 불균일도가 4.5%에서 2.5%로 개선된 것이 확인되었다. 이는 다중 영역 제어 방식이 에지 효과를 효과적으로 제어하고, 연마 균일도를 향상시키는 데 기여함을 보여준다.

4. 결론

실험 결과, 에지 효과는 웨이퍼 수율에 직접적인 영향을 미치는 요소이며, Zone 1, Zone 2, 리테이너 링 간의 상호작용이 웨이퍼 가장자리 연마 특성에 결정적인 역할을 한다는 점이 입증되었다. 반면, Zone 3는 웨이퍼 중심부에 위치하여 가장자리로부터 약 15 mm 이후 구간부터는 영향력이 현저히 줄어드는 독립적인 영역으로 확인되었다. 이를 바탕으로 Zone 3의 압력을 고정하고 Zone 1, Zone 2, 리테이너 링의 압력을 조합한 총 27개의 실험을

수행하였으며, Zone 1과 2의 압력 제어가 웨이퍼 가장자리 약 3 mm 이내 영역의 제거율에 직접적인 영향을 미치는 반면, 리테이너 링 단독 압력 변화의 영향은 제한적인 것으로 나타났다.

한편, 본 연구는 실험 기반의 분석을 통해 유의미한 결론을 도출하였으나, CMP 공정 특성상 연마 패드의 마모, 슬러리 조성, 온도 변화 등 다양한 소모성 요소에 의해 동일 조건에서도 결과의 편차가 발생하는 한계가 존재한다. 결과의 일관성을 확보하기 위해서는 수많은 반복 실험과 정밀한 변수 제어가 필수적이며, 이는 공정의 복잡성을 시사한다.

따라서 향후 연구에서는 이와 같은 실험 데이터를 기반으로, 각 영역의 입력 압력과 연마 결과 간의 전달함수(Transfer Function)를 도출하고, 이를 통해 피드백 제어 기반의 자동화 시스템을 구축하는 방향이 필요하다. 이와 같은 접근은 단발성 실험 결과를 넘어, CMP 데이터베이스를 기반으로 한 멀티존 캐리어 압력 제어 최적화 및 공정 자동화에 활용될 수 있다.

특히, CMP 공정 데이터를 학습한 AI 기반 제어 모델을 통해 압력 제어를 최적화하고 에지 효과를 사전에 예측하는 시스템을 구현한다면, CMP 공정의 정밀도 향상과 품질 안정성 확보에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

1. Wang, T., Lu, X., (2011), Numerical and experimental investigation on multi-zone chemical mechanical planarization, *Microelectronic Engineering*, 88(11), 3327-3332.
2. Park, Y., Lee, Y., Yuh, M., Jeong, H., (2012), Reduction of edge exclusion by EPC ring in CMP process, *Proceedings of the International Conference on Planarization/CMP Technology*, 1-6.
3. Shiu, S.-J., Yu, C.-C., Shen, S.-H., (2004), Multivariable control of multizone chemical mechanical polishing, *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 22(4), 1679-1687.
4. Zhao, D., Wang, T., He, Y., Lu, X., (2013), Effect of zone pressure on wafer bending and fluid lubrication behavior during multi-zone CMP process, *Microelectronic Engineering*, 108, 33-38.
5. Park, J., Hong, S., Lee, S., Jin, Y., Kim, T., (2019), Investigation of step structure in CMP retainer ring to improve within-wafer non-uniformity, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33(7), 3391-3395.
6. Zhang, S., Liu, Y., Li, W., Cao, J., Huang, J., Zhu, L., Guan, Z., (2022), Numerical analysis of the effect of retaining ring structure on the chemical mechanical polishing abrasive motion state, *Materials*, 16(1), 62.
7. Hong, S., Bae, S., Choi, S., Liu, P., Kim, H., Kim, T., (2020), A numerical study on slurry flow with CMP pad grooves, *Microelectronic Engineering*, 234, 111437.
8. Touzov, M. M., Fujita, T., Doy, T. K., (2001), Novel retaining ring to reduce CMP edge exclusion, *Proceedings of the IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing*, 337-340.



Taesan Lee

M.Sc. in the Department of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research interest is precision engineering.
E-mail: tslee@gnpotech.com



Eunho Lee

M.Sc. in the Department of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research interest is precision engineering.
E-mail: ehlee@gnpotech.com



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