J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng., Vol. 30, No. 3, June 2014, pp. 139~145 ISSN 1229-4845(Print) · 2287-4666(Online)
Journal of the Korean Society of Tribologists & Lubrication Engineers http://Journal.kstle.or.kr

DOI http://dx.doi.org/10.9725/kstle.2014.30.3.139

선형 Roll-CMP에서 공정변수에 관한 통계적 분석

왕 함[1] · 이현섭[2] · 정해도[1†]

[1]부산대학교 기계공학부, [2]동명대학교 기계공학과

Statistical Analysis on Process Variables in Linear Roll-CMP

Han Wang[1], Hyunseop Lee[2] and Haedo Jeong[1†]

[1]School of Mechanical Engineering, Pusan National University
[2]Dept. of Mechanical Engineering, Tongmyong University

(Received March 12, 2014 ; Revised April 30, 2014 ; Accepted May 4, 2014)

Abstract − Nowadays, most micro-patterns are manufactured during flow line production. However, a conventional rotary chemical mechanical polishing (CMP) system has a limited throughput for the fabrication of large and flexible electronics. To overcome this problem, we propose a novel linear roll-CMP system for the planarization of large-area electronics. In this paper, we present a statistical analysis on the linear roll-CMP process of copper-clad laminate (CCL) to determine the impacts of process parameters on the material removal rate (MRR) and its non-uniformity (NU). In the linear roll-CMP process, process parameters such as the slurry flow rate, roll speed, table feed rate, and down force affect the MRR and NU. To determine the polishing characteristics of roll-CMP, we use Taguchi's orthogonal array L16 (44) for the experimental design and F-values obtained by the analysis of variance (ANOVA). We investigate the signal-to-noise (S/N) ratio to identify the prominent control parameters. The "higher is better" for the MRR and "lower is better" for the NU were selected for obtaining optimum CMP performance characteristics. The experimental and statistical results indicate that the down force and roll speed mainly affect the MRR and the down force and table feed rate determine the NU in the linear roll-CMP process. However, over 186.3 N of down force deteriorates the NU because of the bending of substrate. Roll speed has little relationship to the NU and the table feed rate does not impact on the MRR. This study provides information on the design parameter of roll-CMP machine and process optimization.

Keywords – linear roll-CMP (선형 롤-화학기계적 연마), taguchi method (다구찌법), material removal rate (연마율), non-uniformity (불균일도)

1. 서 론

최근 반도체 제조 공정에서 화학기계적 연마(chemical mechanical polishing: CMP)는 300 mm 직경의 웨이퍼 상에서 30 nm 급 이상의 소자기술을 구현하기 위하여 널리 이용되고 있다[1]. 반도체 뿐만 아니라 다층 회로기판(multilevel circuit board: MLB), 표면실장(packaging) 및 평탄 디스플레이(flat panel display: FPD) 역시 배선 폭의 감소에 따라 종래의 화학적 식각(etching) 대신 CMP 공정을 도입하려 하는 추세에 있다. 그러나, 기판 형태 및 면적의 다양성과 두께가 매우 얇은 유연기판(flexible substrate)의 도입은 기존의 로터리(rotary) CMP 장비를 적용함에 있어 기판의 찢김(tearing), 접힘(folding)으로 인한 문제를 야기할 수 있다.

본 연구에서는 유연기판의 표면 연마에 적용가능한 선형 Roll-CMP(linear roll-chemical polishing)공정에서 각각 공정 변수가 연마율(material removal rate: MRR) 및 연마 불균일도(non-uniformity: NU)에 미치는 영향에 관하여 다구찌법(Taguchi method)을 통해

†Corresponding author : hdjeong@pusan.ac.kr
Tel: +82-51-510-3210, Fax: +82-51-518-8442

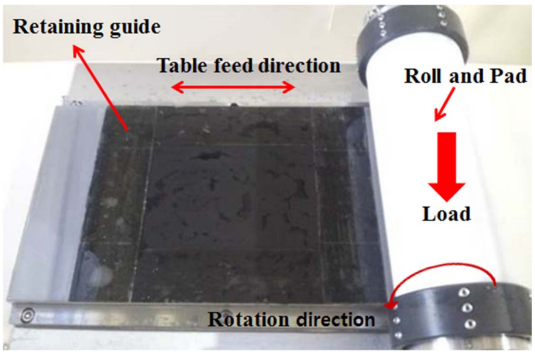

Fig. 1. Top-view of linear roll-CMP system [3].

Fig. 2. Side-view of linear roll-CMP machine [3].

접근하였다. 이를 위하여 동박 적층판(copper clad laminate: CCL)을 이용한 CMP 실험을 실시 하였으며, 연마 결과의 분석을 통해 선형 Roll-CMP 공정의 주요 인자를 제안하고자 한다.

2. 연구방법 및 내용

2-1. 선형 Roll-CMP 시스템

기존의 CMP 공정은 슬러리(slurry)를 공급하면서, 연마패드(polishing pad)와 연마 대상물 사이의 면접촉을 통하여 웨이퍼로 하중을 인가하고, 연마 대상물과 연마패드의 상대운동에 의해 연마 대상물의 표면을 가공한다. 따라서, 대면적 유연 기판의 경우 높은 마찰력으로 인한 기판의 찢김 혹은 접힘 등의 현상이 발생할 수 있으며 기존의 슬러리 공급방식에서는 기판 외주부분의 슬러리 공급 양이 중심부근보다 많아 공급되는 슬러리의 양을 기판 전면에서 균일하게 제어하는 것이 매우 어렵다[2]. 이에 본 논문에서는 선 접촉 연마 메커니즘을 이용한 선형 Roll-CMP 장치를 동박 적층판의 표면 연마에 이용하였다. Fig. 1과 2는 실험에 이용한 선형 Roll-CMP 장치의 외관이다. 연마패드를 롤의 나선방향으로 감고 양 끝을 고정시켰다. 테이블(table)에는 공정 중 기판의 미끄러짐을 방지하기 위하여 고무계열의 필름을 부착하고 아크릴을 이용하여 리테이닝 가이드(retaining guide)를 두었다. 테이블은 좌우 왕복운동이 가능하도록 설계되었다. 롤은 공압 실린더(air-cylinder)를 통하여 기판 위로 가압되며, 축을 중심으로 시계 방향과 반시계 방향의 회전이 가능하다. 슬러리는 롤 위에서 감겨져 있는 연마패드로 공급된다[3].

2-2. 실험계획법

본 연구에서는 다구찌법을 이용한 실험계획법을 활용하였다. 실험계획법에서 실험 후 얻어지는 데이터를 특성치(characteristic value)라 하고, 이 특성치에 영향을 주는 원인 중에서 실험에서 취급된 원인을 인자(factor), 실험을 하기 위한 인자의 실험조건을 인자의 수준(level)이라고 한다.

CMP공정에서 궁극적인 목적은 평탄화 측면에 볼 때 연마율과 불균일도이다[4]. 이를 실험계획법의 목표로 설정하고 각각의 공정변수에 따라 선형 Roll-CMP 공정의 주요 인자를 도출해 보기로 하였다.

선형 Roll-CMP 장비를 이용한 가공에서는 연마율과 연마불균일도가 다양한 인자들에 의하여 결정된다. 따라서, 실험 횟수를 최소화하면서 각 인자들이 연마율과 연마 불균일도에 미치는 영향을 확인하기 위하여 다구찌 직교배열표(orthogonal array)를 활용하였다. 본 실험에 사용된 직교 배열표는 Table 1과 같이 하중(down force), 롤의 회전 속도(roll speed), 테이블 이송량(table feed rate), 슬러리 유량(slurry flow rate)의 4개 인자가 4개의 수준으로 나누어 졌다(L16(4^4)).

Table 1. Experimental conditions

Parameters	Conditions
Pad	SUBA-Lite (Nitta Haas Inc., Japan)
Slurry	MS-5000 (Nitta Haas Inc., Japan)
Polishing time	5 min
Down force (A)	76.5 ~ 238.3 N
Roll speed (B)	300 ~ 750 rpm
Table feed (C)	2.4 ~ 16.9 mm/s
Slurry flow rate (D)	50 ~ 200 ml/min

Table 2. Orthogonal array for taguchi method

No.	A	B	C	D	MRR (ìm/min)	NU (%)
1	76.5	300	2.4	50	0.15	28.63
2	76.5	450	7.5	100	0.27	28.21
3	76.5	600	12.2	150	0.35	17.25
4	76.5	750	16.9	200	0.66	12.57
5	129.4	300	7.5	150	0.49	10.02
6	129.4	450	2.4	200	0.85	15.17
7	129.4	600	16.9	50	0.80	10.75
8	129.4	750	12.2	100	0.93	8.55
9	186.3	300	12.2	200	0.69	9.45
10	186.3	450	16.9	150	1.03	7.46
11	186.3	600	2.4	100	1.25	10.92
12	186.3	750	7.5	50	1.15	10.42
13	238.3	300	16.9	100	0.87	10.12
14	238.3	450	12.2	50	0.99	9.15
15	238.3	600	7.5	200	1.69	8.18
16	238.3	750	2.4	150	1.89	13.92

2-3. 실험조건 및 방법

Table 1은 선형 Roll-CMP 실험 조건을 나타낸 것이다. 실험에 사용된 기판은 인쇄 회로 기판에 이용되는 동박 적층판(ISOLAR Laminate Systems Corps.)을 이용하였다. 에폭시 레진(epoxy resin)과 continuous filament fiber glass가 19 μm 두께의 구리막과 가열 및 가압을 통해 적층된 구조이며, 실험을 위하여 150 mm × 100 mm의 크기로 준비되었다. 실험에 사용된 슬러리는 MS-5000 슬러리(Nitta Haas Inc., Japan)이며, 산화제(oxidizer)로 과산화수소(hydrogen peroxide: H_2O_2) 3.6 wt%가 첨가되었다. 연마율은 가공 온도에 영향을 많이 받으며, 온도 상승에 비례하여 증가하기 때문에 슬러리 온도를 45로 가열하였다[5]. 연마패드는 부직포 구조를 가진 SUBA-Lite(Nitta Haas Inc., Japan)를 사용하였다.

Table 2는 본 실험에 이용된 L16(4^4) 다구찌 직교배열표이다. 하중은 76.5 N, 129.4 N, 186.3 N, 238.3 N의 수준을 선정하였고, 롤의 회전속도는 300 rpm, 450 rpm, 600 rpm, 750 rpm을 선정하였다. 또한, 테이블 이송량은 2.4 mm/s, 7.5 mm/s, 12.2 mm/s, 16.9 mm/s이며, 슬러리의 유량은 50 ml/min, 100 ml/min, 150 ml/min, 200 ml/min의 조건을 이용하였다. 연마 전, 연마패드 표면이 전체적으로 안정된 수준의 조건에 이르게 하기 위하여, 더미(dummy)를 이용하여 20분간 브레이크 인(break-in)을 실시 하였다[6]. 또한, 공정 간 브러시(brush)를 이용하여 매 1분 동안 컨디셔닝(conditioning)을 실시하였다[7]. 총 연마시간은 5분이었으며, 표면저항 측정기를 통해 연마 전과 후 구리 박막의 두께를 측정해서 연마율을 계산하였다. 측정은 CCL 표면의 25지점에서 이루어졌다.

본 논문에서 연마율은 Roll-CMP 공정 전의 두께에서 Roll-CMP 공정 후의 두께를 뺀 값을 총 연마시간으로 나눈 값으로 정의하였다. 또한 불균일도는 CCL의 두께편차와 CCL과의 접촉 상태의 차이에 의해 영향을 받으며, CCL 두께에 대한 표준 편차를 평균으로 나눈 값의 백분율로 정의하여 계산하였다. 연마 불균일도는 아래의 식 (2)로 계산되었다.

$$NU(\%) = \frac{\sigma}{MRR_{avg}} \times 100 \quad (2)$$

여기서, σ는 연마율의 표준편차이고, MRR_{avg}는 연마율의 평균값이다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 연마율

다구찌 실험계획법을 통해 얻어진 각 인자의 수준에 따른 연마결과에 관한 해석을 상용 통계소프트웨어(Minitab 14, Minitab Inc.)를 통해 해석하였다. 연마율에 관한 신호대 잡음의 비(signal to noise ratio: S/N ratio) 분석을 위해 “망대특성(larger is better)”를 선택하였으며, 연마 불균일도에 관한 S/N비 분석을 위해 “망소특성(smaller is better)”를 선택하였다[8]. 이는 연마율 측면에서는 연마율이 더 큰 값이, 연마 불균일도

Table 3. Response table for signal to noise ratios on MRR (Larger is better)

Level	A	B	C	D
1	-10.1447	-6.7767	-2.6056	-4.3224
2	-2.5441	-3.1538	-2.9493	-2.8186
3	0.0465	-1.1402	-3.2648	-2.3822
4	2.1975	0.6259	-1.6250	-0.9215
Delta	12.3422	7.4027	1.6398	3.4009
Rank	1	2	4	3

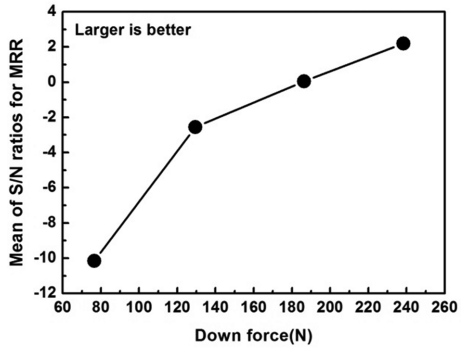

Fig. 3. Mean of S/N ratio for down force on MRR.

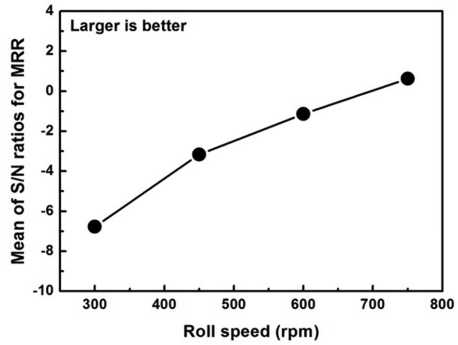

Fig. 4. Mean of S/N ratio for roll speed on MRR.

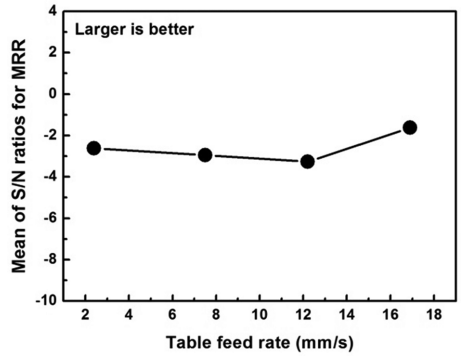

Fig. 5. Mean of S/N ratio for table feed rate on MRR.

측면에서는 더 작은 값을 가지는 것이 바람직하기 때문이다. Table 3은 본 실험에서 연마율에 대한 S/N 비를 나타낸 것이다. Table 3의 결과에 따르면, 본 연구에서 수행한 실험의 결과에서 연마율에 큰 영향을 미치는 인자는 하중(A)이고, 다음으로 롤의 회전속도(B), 슬러리의 유량(D), 테이블 이송량(C)의 순으로 연마율에 영향을 주고 있음을 알 수 있다. Fig. 3-6은 각 인자의 연마율에 대한 대한 수준별 S/N 비의 변화

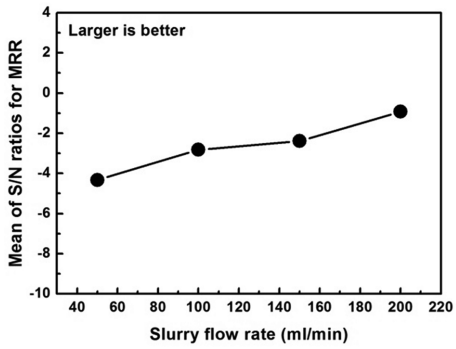

Fig. 6. Mean of S/N ratio for slurry flow rate on MRR.

Table 4. ANOVA table on MRR

Source	Degrees of freedom	Sum of squares	Mean squares	F-ratio
A	3	2.154	0.718	42.64
B	3	0.861	0.287	17.04
C	3	0.182	0.061	3.61
D	3	0.105	0.035	2.07
Error	3	0.051	0.051	-
Total	15	3.353	-	-

를 도시한 것이다.

구리(copper)는 재료의 특성상 화학적 반응성이 뛰어나기 때문에, 구리의 CMP는 재료를 제거하는데 있어서 기계적 요소인 압력과 속도 못지 않게 슬러리의 특성에 대한 의존도가 아주 높다[9]. 우선 슬러리에 함유된 산화제(oxidizer)에 의해 구리의 표면에 부동태층(passivation layer)이 형성되고, 동시에 화학적 에칭(etching)이 발생한다. 이 때 발생하는 구리 이온은 착화제(complexing agent) 혹은 킬레이트제(chelating agent)에 의해 제거된다. 본 연구에서는 기존 면접촉을 이용하는 CMP 공정과는 달리 선접촉 방식으로 재료가 연마되기 때문에 충분한 연마율을 확보하기 위하여 화학적 반응성이 큰 구리 박막 연마용 슬러리를 선정하였다.

Tosun 등[10]과 Ikram등[11]은 높은 F-비가 공정의 결과에 큰 영향을 미친다고 하였으며, 이를 와이어 방전가공의 연구에 적용하였다. Table 4에 도시된 ANOVA 분석의 결과에 따르면, 하중(A)와 롤의 회전속도(B)는 연마율에 매우 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 그 중에서 연마율에 영향을 미치는 주요한 인자는 하중

(A)과 롤의 회전속도(B)인 것으로 판단된다.

일반적으로 CMP공정에서 연마율은 작용압력과 상대속도에 비례한다는 프레스턴 방정식(Preston's equation)으로 기술한다[12]. 본 실험 결과는 선형 Roll-CMP에서도 프레스턴 방정식이 동일하게 적용이 되고 있음을 보여준다. 테이블 이송량의 변화는 상대속도에 영향을 주지만, 그 크기의 변화가 매우 작으며 연마 중 슬러리가 기판 위에 정체되기 때문에 연마율의 큰 변화보다는 연마 불균일도에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 또한, 슬러리의 투입 유량에 따른 연마율의 증가는 슬러리의 화학적 반응의 증가와 참여 연마입자의 증가에 의한 것으로 생각된다[13, 14]. 슬러리 유량의 변화는 연마율의 변화에 영향을 미치지만, 선 접촉에 의한 국부적 가압 방식으로 인하여 연마 가공에 참여할 수 있는 연마 입자가 한정적이기 때문에 연마율이 상승하는데 한계가 있다. 비록 슬러리 유량이 연마율에 미치는 영향은 하중 및 롤의 속도에 비하여 상대적으로 작지만, 공정 중 이에 관한 영향을 완전히 무시하지는 못할 것으로 판단된다.

3-2. 연마 불균일도

연마 불균일도는 CMP에서 광역평탄화의 성능을 나타내는 중요한 지표 중 하나로 공정의 수율(yield)과 직접적인 연관이 있다. 일반적인 반도체 공정과는 달리 다층회로기판 및 평탄 디스플레이 공정에서는 15% 미만 정도의 연마 불균일도를 산업계에서 요구하고 있다.

Table 5의 결과에 따르면, 본 연구에서 수행한 실험의 결과에서 연마 불균일도에 큰 영향을 미치는 인자는 하중(A)이고, 다음으로 테이블 이송량(C), 슬러리의 유량(D), 롤의 회전속도(B)의 순으로 연마 불균일도에 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

Table 5. Response table for signal to noise ratios on NU (Small is better)

Level	A	B	C	D
1	-26.22	-22.19	-24.10	-22.34
2	-20.73	-22.33	-21.91	-22.13
3	-19.52	-21.10	-20.53	-21.27
4	-20.11	-20.96	-20.04	-20.84
Delta	6.70	1.36	4.06	1.50
Rank	1	4	2	3

Table 6. ANOVA table on NU

Source	Degrees of freedom	Sum of squares	Mean squares	F-ratio
A	3	389.46	129.82	8.05
B	3	41.85	13.95	0.86
C	3	119.82	39.94	2.48
D	3	33.80	11.27	0.70
Error	3	48.41	16.14	-
Total	15	633.34	-	-

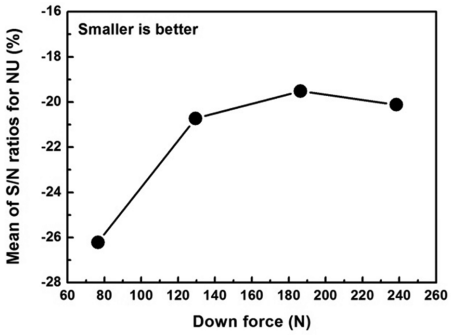

Fig. 7. Mean of S/N ratio for down force on NU.

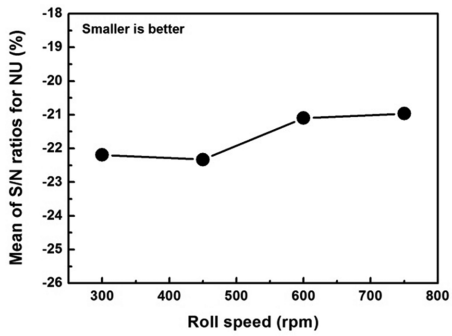

Fig. 8. Mean of S/N ratio for roll speed on NU.

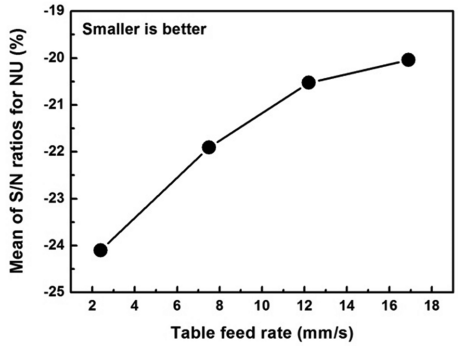

Fig. 9. Mean of S/N ratio for table feed rate on NU.

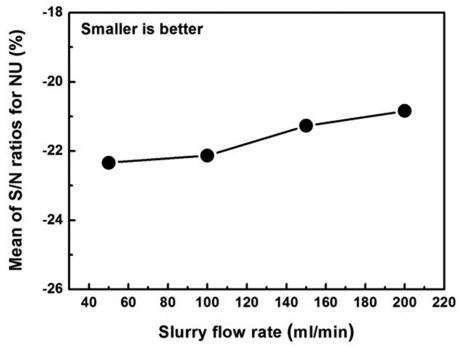

Fig. 10. Mean of S/N ratio for table feed rate on NU.

하중(A)은 연마율에 가장 큰 영향을 주는 인자로 연마 불균일도에 관한 식 (2)에서 분모를 크게 증가시키기 때문에 연마 불균일도를 크게 낮추는 것으로 생각이 되며, 연테이블 이송량(C)의 증가는 CCL 위에 정체되는 연마 슬러리를 빠르게 연마에 참여시켜 기판 위에서 불균일한 화학적 반응이 발생하는 시간을 줄이는 것으로 판단된다. 슬러리의 유량이 증가할수록 연마 불균일도는 향상되는 결과를 보이지만, 그 효과는 하중(A)와 테이블 이송량(C)에 비하여 작게 나타났다. 이는 롤에 감겨진 연마패드 위로 공급되는 슬러리의 양이 늘어날수록 CCL 기판으로의 슬러리 공급이 보다 균일하게 이루어지기 때문인 것으로 생각된다. 반면, 연마율의 향상과 큰 관련이 있는 롤의 회전속도(B)는 연마 불균일도에 큰 영향을 미치지 못했다. Fig. 7-10은 각 인자의 연마 불균일도에 대한 수준별 S/N 비의 변화를 도시한 것이다.

Table 6에 도시된 ANOVA 분석의 결과에 따르면 F-비가 높은 하중(A)과 테이블 이송량(C)는 연마 불균일도에 가장 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 하지만, 186.3 N 이상의 높은 하중 조건으로 연마패드가 CCL을 가압하는 경우, 기판의 휘어짐이 시각적으로 확인되었으며, 이로 인하여 다소 높은 연마 불균일도를 보이는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 선형 Roll-CMP 공정에서 하중(A), 롤의 회전속도(B), 테이블 이송량(C) 및 슬러리 유량(D)가 연마율 및 연마 불균일도에 미치는 영향에 관한 통계적 분석을 실시하였다. L16(4^4) 다구찌 직교배열표를 통하여 실험을 실시하였으며, S/N 비의 분석과 ANOVA 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 선형 Roll-CMP의 가압 하중(A)과 롤 회전속도(B)에 따라서 연마율이 증가하는 현상은 프레스턴 방정식의 식에서 압력과 속도에 따라서 연마율이 증가하는 현상과 동일함을 알 수 있었다.

2) 연마율에 가장 큰 영향을 주는 인자는 가압 하중(A)이고, 연마 롤의 회전속도(B), 슬러리 유량(D), 테이블 이송량(C) 순으로 연마율에 기여하고 있음을 알 수 있었다.

3) 연마 불균일도에 가장 큰 영향을 주는 인자는 가압 하중(A)이고, 다음으로 테이블 이송량(C), 슬러리의 유량(D), 롤의 회전속도(B) 순으로 연마 불균일도에 영향을 주고 있음을 알 수 있었다.

본 연구는 선형 Roll-CMP 공정의 안정화와 장치 설계에 중요한 정보를 제공할 것으로 보이며, 향후 선형 Roll-CMP 공정에 관한 보다 다양한 연구가 이루어질 것으로 기대된다.

Acknowledgement

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

References

[1] Yang, W. Y. and Sung, I. H., “Study on Within-Wafer Non-uniformity Using Finite Element Method”, *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 28, No. 6, pp. 272-277, 2012.

[2] Copperta, J., Rogers, C., Phillpossian, A. and Kaufman, F. B., “Characterizing Slurry Flow During CMP Using Laser Induced Fluorescence”, *Proceedings of CMP-MIC*, pp. 307-314, 1997.

[3] Kim, S. S., Development of linear roll CMP system for large area micropatterns, M.S, Thesis, Graduate School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Republic of Korea, 2013.

[4] Chio, M. H., Kim, N. H., Kim, S. Y. and Chang, E. G., “A Study on DOE Method to Optimize the Process Parameters for Cu CMP”, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, Vol.18, pp. 24-29, 2005.

[5] Jeong, Y. S., Kim, H. J. and Jeong, H. D., “The Effect of Slurry Flow Rate and Temperature on CMP Characteristic”, *JKSPE*, Vol. 21, No. 11, pp. 46-52, 2004.

[6] Park, J, H., Kinoshita, M., Yoshida, K., Matsumura, S. and Jeong, H. D., “Stability and Improvement of

Polishing Pad in W CMP", *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, Vol. 20, No. 12, pp. 1027-1033, 2007.

[7] Lee, S. H., Kim, H. J., Ahn, D. G. and Jeong, H. D., "A Study on Novel Conditioning for CMP", *J. Kor. Soc. Precis. Eng.*, Vol. 16, No. 5, pp. 40-47, 1999.

[8] Lu, W. J., Jin, J., Ko, T. J. and Beak, D. K., "Study of Optimal Machining Conditions of Ultrasonic Machining By Taguchi's Method", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 2, pp. 213-218, 2013.

[9] Joo, S. B., Lee, H. L. and Jeong, H. D., "Analysis of Cu CMP according to The Variation of Corrosion Inhibitor Concentration", *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, Vol. 27, No. 1, pp. 121-124, 2008.

[10] Tosun, N., Cogun, C. and Tosun, G., "A study on kerf and material removal rate in wire electrical discharge machining based on Taguchi method", *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 152, pp. 316-322, 2004.

[11] Ikram, A., Mufti, N. A., Saleem, M. Q. and Khan, A. R., "Parametric optimization for surface roughness, kerf and MRR in wire electrical discharge machining (WEDM) using Taguchi design of experiment", *J. Mater. Sci. Technol.,* Vol. 27, Issue 7, pp. 2133-2141, 2013.

[12] Yang, W. Y., Yang, J. C. and Sung, I. H., "A Study of the Effects of Pressure Velocity and Fluid Viscosity in Abrasive Machining Process", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 27, No. 1, pp. 7-12, 2011.

[13] Lee, H. S. and Jeong, H. D., "Chemical and mechanical balance in polishing of electric materials for defect-free surfaces", *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, Vol. 58, pp. 485-490, 2009.

[14] Lee, H. S. and Jeong, H. D., "A wafer-scale material removal rate profile model for copper chemical mechanical planarization", *Int. J. Mach. Tool. Manufact.*, Vol. 51, pp. 395-403, 2011.