

폴리싱 고속화를 위한 연마헤드의 회전 안정성과 윤활 상태 평가

이호철^{a*}, 최민석^aRotational Stability and Lubrication State Evaluation of
the Polishing Head for High Speed PolishingHocheol Lee^{a*}, Minseok Choi^a^a Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, 125, Dongseodaero-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34158, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	20	July	2016
Revised	2	August	2016
Accepted	3	August	2016

Keywords:

Polishing head
Friction coefficient
Stribeck curve
High speed polishing
Lubrication state

ABSTRACT

High speed polishing can kinematically increase the polishing removal rate by using the conventional Preston equation, especially for hard substrates such as sapphire or diamond. However, high speed effects should be clarified beforehand considering the lubrication state and process parameter variations. In this paper, we developed a polishing experimental method and apparatus to determine the lubrication state by measuring the real time friction coefficient using two load cells. Through experiments, we obtained a boundary lubrication state above 0.35 of the friction coefficient by using low table speed and high polishing load, indicating a synchronized stable behavior in polishing head rotation. However, larger Stribeck indexes by a high speed above 200 rpm can generate a hydrodynamic lubrication state below 0.25 of the low friction coefficient. This causes the polishing head rotation to stop. A forced and synchronized head rotation is required for high speed polishing.

1. 서론

폴리싱(polishing)은 광학 렌즈와 기관 재료 가공에서 나노미터(nanometer) 이하의 표면거칠기를 달성하기 위한 초정밀 가공 공정으로서 최종 품질을 결정하는 중요 공정이다. 특히 사파이어 기관의 경우는 다이아몬드에 버금가는 고경도 재료로서 0.1 nm의 평균 표면거칠기가 필요하며, 연마공정에 한 시간의 공정 시간이 소요되어 생산성 향상의 새로운 방법이 요구되고 있다^[1]. 한편, 폴리싱의 재료제거율(polishing material removal rate) 모델은 식 (1)의 프레스턴(Preston) 공식으로서 확정적인(deterministic) 고효율 폴리싱 공정 문제 연구에 적용되어 왔다^[2,3].

$$dh/dt = kPV \quad (1)$$

식 (1)에서 h 는 가공깊이(removal depth), t 는 가공시간(polishing time), P 는 폴리싱 압력(polishing pressure), V 는 상대속도(relative velocity), k 는 프레스턴 상수(Preston constant)를 의미한다.

또한 프레스턴 상수 k 는 연마입자 슬러리(slurry)의 영향을 주로 받는 값이나, 재료제거율 증가 방법으로 연마입자 크기와 압력 증가는 잔류 스크래치의 깊이를 증가시켜 표면거칠기가 훼손되는 문제를 초래한다. 재료제거율 설정의 주요 공정 조건으로 압력 35 kPa, 속도 60 rpm (0.6 m/sec, 웨이퍼 테이블 반경 위치 400 mm 기준) 범위로서 저속의 회전 속도를 폴리싱 공정에서 통상적으로

* Corresponding author. Tel.: +82-42-821-1087

Fax: +82-42-821-1587

E-mail address: hclee@hanbat.ac.kr (Hocheol Lee).

사용하는 것으로 알려져 있으나, 연마 회전속도가 변화하는 경우에도 프레스틴 공식을 안정적으로 제어할 가능성에 관한 윤활영역 연구가 제안되어 왔다^[4]. 한편, 고속절삭가공(high-speed machining)에서 공구회전속도 20,000 rpm 이상으로, 고속화 개념은 1960년대에 시작되어 1990년대에 비로소 정착 단계에 왔으며, 절삭가공 분야의 생산성 향상에 획기적으로 기여하였다^[5,6]. 따라서 고속회전에 의한 폴리싱 고속화 장치 개발이 요구되고 있지만, 속도 증가에 의한 윤활 상태 변화와 재료제거율의 선형성 확보, 연마슬러리 공급 방법, 연마패드 에 관한 광범위한 연구가 단계적으로 필요하다.

한편 접촉하는 두 물체의 상대 속도에 따라 윤활상태를 표현하는 지수로서 Stribeck 지수(index)가 사용되며 점성계수와 속도는 비례하고, 압력에는 반비례하는 값으로 정의된다. Stribeck 지수 증가에 따라 윤활 간격도 비례하여 증가하며, 윤활 상태는 Fig. 1과 같이 경계(boundary), 혼합(mixed)/탄성유체(elastohydrodynamic), 유체(hydrodynamic) 상태 순서로 변하고 동시에 마찰계수도 변동한다^[7].

한편 연마공정 재료제거율의 식 (1)의 상수 k 값은 연마속도 150 rpm 이하에서는 재료제거율에 비례하고 마찰계수와도 관련된다는 연구결과가 있다^[8-10]. 그러나 연마 재료제거율 모델에 대한 기존 연구들에서도 연마윤활영역은 경계(boundary)윤활영역에서 유체윤활영역까지 각각 다르게 활용된다고 발표하고 있다^[11-13]. 또한 어떠한 윤활영역에서 연마 공정 조건을 사용하는 지에 대한 그 이유가 기술되고 있지는 않다. 한편 연마 고속화에 의한 연마 재료제거율 향상 위한 장애 요인으로 Fig. 1에서 보는 바와 같이 고속화에 따라 경계윤활영역을 넘어서면 마찰계수가 오히려 급격하게 감소되어 연마 재료제거율이 속도에 따라서 증가되지 않을 가능성도 있다. 따라서 혼합윤활영역을 회피하기 위한 방법으로 압력증가를 통해서 경계윤활영역을 계속 유지하거나 오히려 속도를 대폭 증가시켜서 유체윤활에서 그 연마 효과를 충분히 발생하는 방법이 제시될 수가 있다. 본 연구에서는 우선적으로 폴리싱 속도 증가에 따른 마찰계수 변화와 연마되는 윤활영역 상태를 파악하고, 경계윤활 또는 유체윤활 영역에서의 고속화 연마 메커니즘(mechanism)에 필요한 조건을 파악하는 실험 연구를 중점적

으로 수행하였다.

2. 폴리싱 고속화 실험 장치

2.1 폴리싱 실험 장치

기존 광학 연마에 사용되는 연마 기구 장치에 속도 가변 조절장치와 마찰력 변화를 감지하는 로드셀(load cell, CAS SB-20L)을 설치하여 속도와 압력에 따른 마찰계수 변화를 실시간으로 측정하도록 Fig. 2와 같이 구성하였다. 회전테이블은 최대 200 rpm까지 회전 가능하며, 회전테이블의 회전에 따른 마찰력으로 상부의 연마헤드(head)가 피봇(pivot)을 중심으로 회전하는 자전 방식 연마 장치 구조이다.

연마압력의 조절은 복동식 공압실린더로 가압하며 수직방향(z축)으로 설치된 로드셀로 확인하며 조절 가능하다. 연마헤드에 부가된 압력으로서 수직방향(z축) 힘과 마찰력으로서의 수평방향(x축)의 힘을 로드셀로 각각 측정하여 x방향으로의 마찰계수를 구하는 구조이다. 수직 항 무게는 9 kg까지 조정 가능하며, 연마헤드의 직경은 100 mm이다.

2.2 마찰계수 실시간 모니터링(monitoring) 시스템 구축

수평방향의 마찰력은 x축과 y축 2개 방향의 힘 측정이 모두 필요하나, 연마헤드의 y축 방향으로의 반력을 최소화하도록 연마헤드

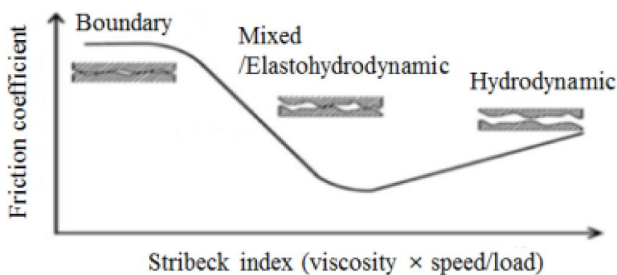


Fig. 1 Lubrication state and friction coefficient by Stribeck index^[7]

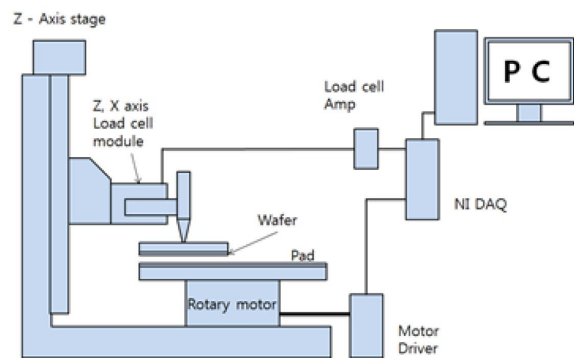
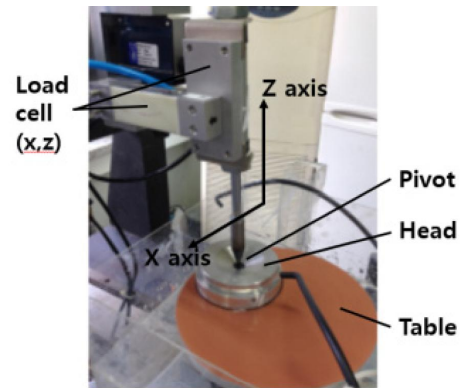


Fig. 2 Polishing experimental apparatus

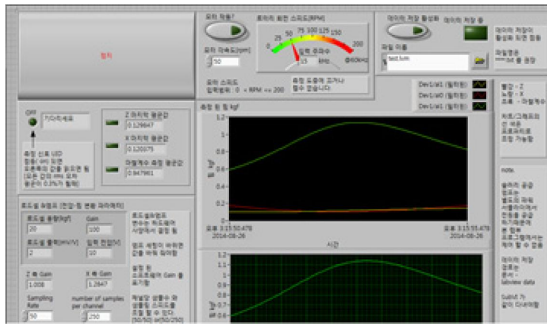


Fig. 3 Friction coefficient monitoring using Labview program

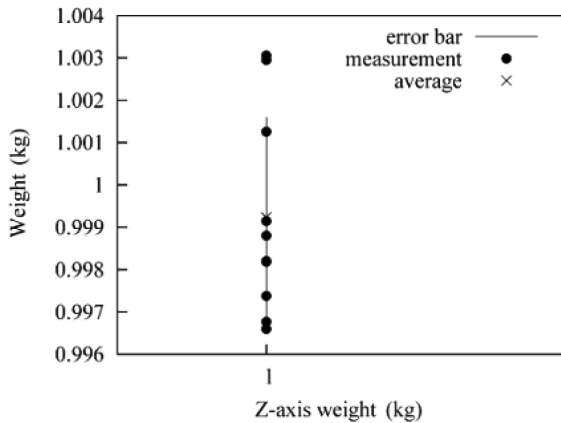


Fig. 4 Z-axis load cell repeatability by the base weight

의 피벗 위치를 직교 정렬하였으며, Fig. 3과 같이 랩뷰(Labview) 프로그래밍을 이용하여 x, z축 방향으로의 힘을 실시간 모니터링 하면서 x방향의 마찰계수를 구한다. z축 방향의 로드셀에 대한 측정값 교정을 위해 표준 분동을 이용하여 재현성(repeatability) 평가를 실시하고 Fig. 4와 같은 결과를 얻었다.

기준 분동 1 kg에 대하여 반복 측정된 결과 사용된 측정시스템은 0.4%의 재현성 오차를 보여 마찰계수 변화 평가에 충분히 활용 가능하였다. 기준 z축 분동(base weight)의 무게를 증가하면서 반복적인 측정을 통해 측정시스템의 선형성(linearity)을 평가한 결과, 측정 평균값이 기준분동 대비 거의 1에 가까운 Fig. 5와 같은 1.0055의 선형적 기울기(slope) 값을 구하였고, 기울기 값은 보정값으로 사용되었다. 3회의 측정값과 평균값, 평균값에 대한 오차 범위는 Table 1과 같다.

한편, x축 방향의 로드셀에 대한 측정값 보정을 위해 표준 분동을 이용한 실험을 실시하고 Fig. 6와 같은 선형적 결과를 얻었다. 기준분동(base weight)의 무게를 증가하며 반복적인 측정을 통해 측정 평균값은 기준분동 대비 0.9957의 선형적 기울기로 1에 가까운 값을 얻었다. 3회의 측정값과 평균값, 평균값에 대한 오차 범위는 Table 2와 같다.

또한, z축 방향 힘 증가에 따라 x축 로드셀 값은 이상적으로 분리되어 영의 값을 가져야 하나, 기구적인 조립오차 등으로 불가피하

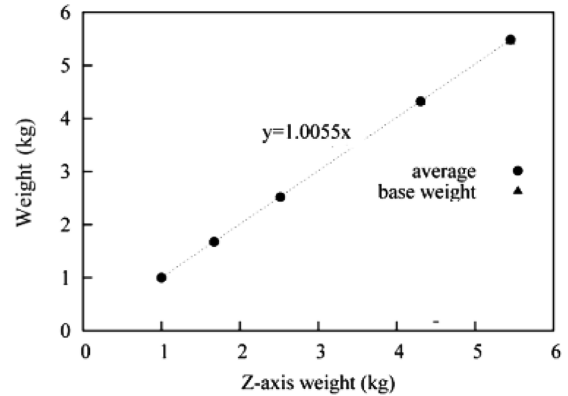


Fig. 5 Z-axis load cell linearity using the base weight

Table 1 Z-axis load cell values versus the base weights

Base weight (kg)	1st	2nd	3rd	Average	Error (%)
1	1	1.003	0.999	1.001	0.1
1.67	1.677	1.676	1.677	1.677	0.4
2.515	2.522	2.523	2.521	2.522	0.3
4.305	4.324	4.326	4.325	4.325	0.5
5.45	5.487	5.489	5.486	5.487	0.7

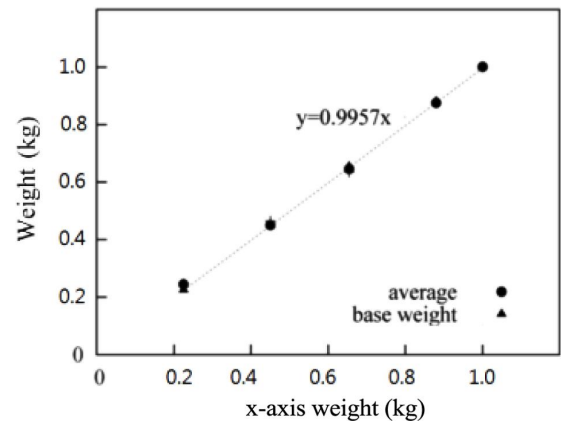


Fig. 6 x-axis load cell linearity by the base weight

Table 2 x-axis load cell values versus the base weights

Base weight (kg)	1st	2nd	3rd	Average	Error (%)
0.255	0.246	0.242	0.247	0.245	3.9
0.450	0.465	0.443	0.445	0.451	0.2
0.654	0.635	0.656	0.645	0.645	1.3
0.880	0.875	0.870	0.882	0.875	0.5
1	1	0.995	1.008	1.001	0.1

게 변동하므로 이에 대한 보정 값을 산출하기 위한 x, z축 상호간섭 값(crosstalk)을 측정하여 Fig. 7에 표시하였다. 이것은 z축 힘에

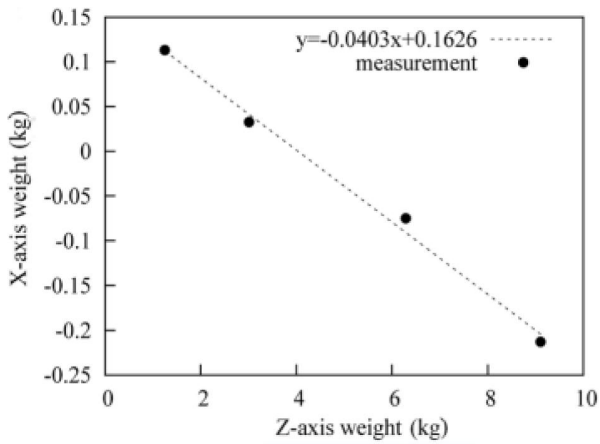


Fig. 7 Compensation method of x-axis load cell crosstalk

대해서 독립적인 x축 로드셀 배치 구조가 직교 정렬이 불완전하여 일부 굽힘을 받아 발생한 것으로 파악되며 마찰계수 계산에서 보정된다.

3. 마찰계수와 연마 헤드 회전 안정성 평가

광학 연마공정에서 하부의 테이블 모터의 회전에 따라, 상부의 연마헤드는 마찰력에 의해 Fig. 2의 실험 장치에서 피봇(pivot) 중심으로 자전 방식으로 반드시 회전해야만, 연마헤드에 부착된 가공물이 결국 회전하고 가공물 전체에 대하여 균일한 연마가 이루어진다. 따라서 연마헤드의 회전 안정성은 연마된 가공물의 평탄도에 중요한 공정 지표이다. 본 연구의 실험에서 연마 테이블의 회전 고속화에 따른 마찰계수를 실시간 모니터링 하면서 구리 웨이퍼가 부착된 연마헤드의 회전 상태를 관찰하는 실험을 수행하였다. 압력은 5단계로서 1 kg부터 9 kg까지 단계별로 증가시키고, 테이블 회전속도는 50, 100, 200 rpm으로 구분하여 증가시키면서 반복 시험하여 결과를 도출하였다. 사용된 헤드와 웨이퍼의 무게는 490 g이고, 연마헤드의 지름은 100 mm이다. Table 3은 연마 테이블의 회전 속도 50 rpm의 일반적인 사용 속도에서 헤드에 가해지는 무게를 증가하면서 마찰계수(COF: coefficient of friction) 변화를 측정하는 것이다. 가해지는 무게는 회전 중의 z축 로드셀의 측정값이다.

z축에 대한 x축 방향 마찰계수는 0.55에서 0.6의 범위의 값을 보이고, 연마 테이블 회전속도 50 rpm에서는 압력 증가에 따른 마찰계수 변화는 거의 없었다. 특히 연마헤드가 마찰력에 따라 50 rpm의 동기화(synchronization)된 속도로 회전하는 것을 타코미터(tachometer)로 확인하였다. Table 4는 연마 테이블 회전 속도를 100 rpm으로 증가시키고, 연마 압력 변화에 따른 마찰계수 변화를 측정하는 것이다.

Table 3 Friction coefficient change at 50 rpm

	Polishing table velocity (50 rpm)				
	1.1	2.6	4.5	5.6	6.8
Load (kg)	1.1	2.6	4.5	5.6	6.8
rpm/load	45.5	19.2	11.2	9.0	7.4
COF	0.6	0.55	0.57	0.55	0.55
Head rpm	50	50	50	50	50

Table 4 Friction coefficient change at 100 rpm

	Polishing table velocity (100 rpm)				
	1.1	2.6	2.8	4.4	5.0
Load (kg)	1.1	2.6	2.8	4.4	5.0
rpm/load	90.9	38.4	35.7	22.7	20
COF	0.27	0.35	0.4	0.32	0.35
Head rpm	NA	100	100	100	100

Table 5 Friction coefficient change at 200 rpm

	Polishing table velocity (200 rpm)				
	1.44	3.4	6.5	7.6	9.1
Load (kg)	1.44	3.4	6.5	7.6	9.1
rpm/load	139	58.8	30.7	26.3	22.0
COF	0.2	0.23	0.21	0.22	0.27
Head rpm	NA	NA	NA	NA	100~130

테이블 회전속도 100 rpm의 실험에서 연마 무게가 2.6 kg 이상에서는 연마헤드는 100 rpm의 동기화된 회전 속도를 보이고 마찰계수는 0.32에서 0.4의 안정적인 값을 보였다. 그러나 속도 대비 무게가 90.9인 구간에서 연마헤드가 전혀 회전하지 않는 무회전 현상을 보였다. Fig. 1에서의 연마유효영역이 경계유효영역에서 혼합유효로 상태가 변하면 마찰계수가 감소하고, 연마헤드의 자체 회전 모멘트(moment)도 충분하지 않아 연마헤드가 회전하지 않을 가능성을 보여준 것이다. Table 5는 연마 테이블 회전 속도가 200 rpm으로 증가하며, 연마압력에 따른 마찰계수 변화를 측정하는 것이다.

테이블 회전속도 200 rpm에서의 실험에서 연마 무게에 관계없이 연마헤드는 거의 무회전하는 현상을 보였다. 연마 무게를 9.1 kg까지 매우 크게 한 경우에만 연마헤드가 회전하나 미끄럼(slip) 현상을 반영한 100-130 rpm의 연마헤드 회전속도를 보였다. 무게가 9 kg까지 증가하여 연마압력이 크게 된 경우에는 Stribeck 지수가 감소하여 유효영역이 경계유효영역으로 복귀할 가능성을 보여준다. 마찰력이 불충분한 혼합 또는 유체 유효영역 경우에는 미끄럼이 발생하거나 회전하지 않음을 보여준 것이다. Fig. 8은 Table 3으로부터 Table 5까지 마찰계수 측정값을 연마 테이블 회전속도 별로 나타낸 것으로 연마 헤드의 회전과 무회전으로 구분하여 표시하였다.

테이블 회전속도 50 rpm에서는 연마헤드 회전이 동기화되고

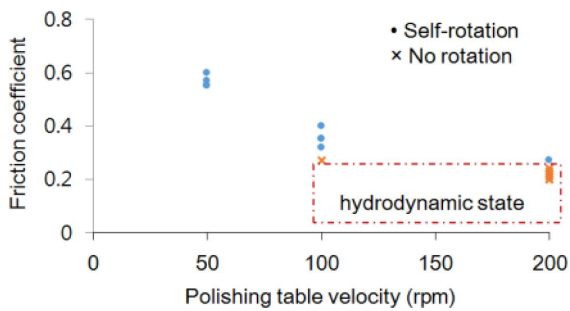


Fig. 8 Friction state and head rotation by table velocity

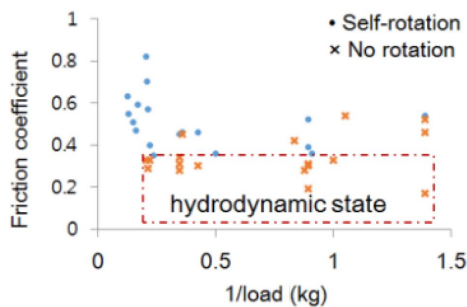


Fig. 9 Friction state and head rotation by polishing load

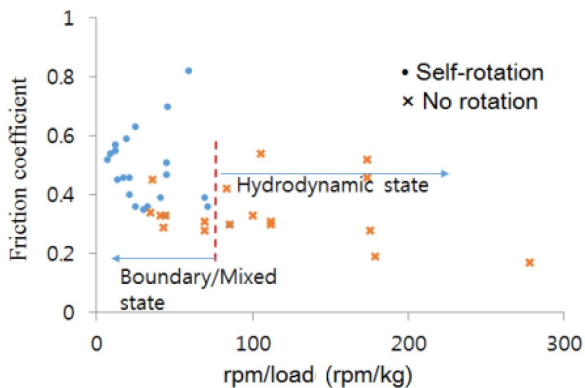


Fig. 10 Friction state and head rotation by Stribeck index

안정적이지만, 회전속도가 증가하면 마찰계수가 감소하며 마찰계수가 낮아진 유체윤활영역에서는 연마헤드가 미끄럼이 발생하거나, 동기화된 자전 회전이 불가능하였다. Fig. 9는 무게에 의한 연마압력에 따른 Table 3으로부터 Table 5까지의 마찰계수 측정값을 나타낸 것으로 연마 헤드의 회전과 무회전으로 구분하여 표시하였으며, 마찰계수가 낮아진 유체윤활영역에서는 무회전이 발생하였다.

연마압력이 일정 범위 이상으로 크고 동시에 마찰계수도 0.4 이상으로 큰 경우에는 연마헤드의 동기화 회전이 불안정이나, 연마압력이 작은 경우에는 회전이 불안정하게 된다. Fig. 10은 Stribeck 지수(= 회전속도/압력)에 따라 Table 3으로부터 Table 5까지의 마찰계수 측정값을 표시한 것으로 연마 헤드를 회전과 무회전으로 구분하여 표시하였다. 또한, Stribeck 지수 효과에 따른 경계윤활/

혼합윤활영역과 유체윤활영역의 경계를 회전과 무회전을 고려하여 추정해서 표시하였다.

연마테이블 회전을 고속화하는 경우에는, Stribeck 지수가 증가하여 마찰계수는 0.35 이하로 낮아지고 경계윤활에서 혼합윤활, 유체윤활 상태로 순차적으로 변하고, 마찰력 감소에 따른 연마헤드의 회전 또한 불안정하게 됨을 알 수 있다. 따라서 광학렌즈 연마에서 사용하여 왔던 피벗 가압방식의 자전 연마헤드의 경우, 작은 회전 속도 조건으로 주로 경계윤활영역에서 연마헤드 회전을 이용한 것으로 판단된다. 마찰계수를 0.35 이상의 경계윤활영역으로 회복하기 위해 큰 연마 압력의 공정 조건이 사용 가능하나, 이 경우 표면 거칠기가 불가피하게 증가한다. 재료제거를 향상을 위해 회전 고속화 방법으로 유체윤활영역에서 연마하는 경우, 반드시 강제적인 연마헤드의 동기화 회전 수단과 재료제거를 선형성 확보가 요구된다. 고속회전 용도의 연마 헤드는 짐벌(gimbal) 구조 등으로 연마압력 조절과 회전 토크 전달이 독립적으로 분리된 기계적 구조가 필요하다^[14].

4. 결론

본 연구에서는 연마 재료제거를 향상 위한 회전 고속화 타당성 연구로서 고속화에 따른 연마공정 윤활 상태 변화를 마찰계수와 연마헤드 회전으로 파악하는 실험 방법을 제시하였다. 수직 축에 대한 수평방향의 힘을 이용한 마찰계수 평가를 위해 두 개의 로드셀을 이용하여 실시간 마찰계수 측정 장치를 재현성과 선형성 오차율 0.7% 이하로 구축하였다. 연마 테이블 속도 100 rpm 이하로 상용화 수준의 저속에서는 마찰계수가 0.35 이상이고, 연마헤드는 연마 테이블과 동일하며 안정적인 동기화 회전속도를 보이며, 연마 영역은 경계윤활영역으로 가공대상의 균일도 확보에는 오히려 유리하다. 또한 200 rpm 이상으로 회전을 고속화시키면 마찰계수가 0.25 이하로 감소하고 특히 연마헤드가 자전 방식으로는 더 이상 회전하지 않는 미끄럼 현상을 보여, 측정된 마찰계수 값과 관계없이 연마헤드 회전으로서 혼합영역/유체윤활 영역으로의 이동 현상을 판단할 수가 있었다. 그리고 기존 폴리싱 공정 조건들에서의 회전 고속화는 연마영역이 경계윤활이 아닌 유체윤활영역으로 불가피하게 이동할 것으로 추정되며 고속화에 적합한 연마헤드 회전 제어 메커니즘(mechanism)이 필요하다.

후 기

이 논문은 2013년도 한밭대학교 교내학술연구비(과제번호 201303190001, 초고속 폴리싱 타당성 연구)의 지원을 받았다.

References

- [1] Peter Wolters Co., viewed 6 May.2016, LED Process Solutions, <www.peter-wolters.com>.
- [2] Lee, H., Yang, M., 2001, Dwell Time Algorithm for Computer-Controlled Polishing of Small Axis-symmetrical Aspherical Lens Mold, *Optical Engineering*, 40:9 1936-1943.
- [3] Lee, H., Lee, C., Je, T., 2012, Micro Polishing Force Control of the Polishing Machine with the Airbag Tool, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 21:5 714-719.
- [4] Suratwala, T. I., Feit, M. D., Steele, W. A., 2010, Toward Deterministic Material Removal and Surface Figure During Fused Silica Pad Polishing, *J. Am. Ceram. Soc.*, 93:5 1326-1340.
- [5] Recht, R. F., 1960, The Feasibility of Ultra-high Speed Machining, A Thesis for a Master, University of Denver, USA.
- [6] Kahles, J. F., 1978, High-speed Machining Possibilities and Needs, *CIRP Annals*, 27:2 551-560.
- [7] Jiao, Y., 2012, Wear and Contact Phenomena in Existing and Future Large-scale Chemical Mechanical Planarization Process, A Thesis for a Doctorate, The University of Arizona, USA.
- [8] Lee, H., Joo, S., Jeong, H., 2009, Mechanical Effect of Colloidal Silica in Copper Chemical Mechanical Planarization, *J. Materials Processing Technology*, 209:20 6134-6139.
- [9] Zhang, Z., Yan, W., Zhang, L., Liu, W., Song, Z., 2011, Effect of Mechanical Process Parameters on Friction Behavior and Material Removal During Sapphire Chemical Mechanical Polishing, *Microelectronic Engineering*, 88:9 3020-3023.
- [10] Kim, H. J., Kim H. Y., Jeong, H., Lee, E. S., Shin Y. J., 2002, Friction and Thermal Phenomena in Chemical Mechanical Polishing, *J. Materials Processing Technology*, 130 334-338.
- [11] Chen, J. M., Fang, Y., 2002, Hydrodynamic Characteristics of the Thin Fluid Film in Chemical-Mechanical Polishing, *IEEE Transaction on Semiconductor Manufacturing*, 15:1 39-44.
- [12] Tsai, H., Huang, P., Tsai, H., Chiu, S., 2011, Chemical Mechanical Polishing in Elastic Contact and Partial Hydrodynamic Lubrication: Modeling and Experiments, *Materials and Manufacturing Processes*, 26:2 319-324.
- [13] Cho, C., Park, S., Ahn Y., 2001, Three-dimensional Wafer Scale Hydrodynamic Modeling for Chemical Mechanical Polishing, *Thin Solid Films*, 389:1-2 254-260.
- [14] Lee, H., Lee, N., Song, C., Lee, H., Shin, Y., Park, C., 2005, A Novel Polishing Head with a Gimbals-like Structure for the High-speed Polishing Process, *Proceedings of the SPIE TD03*, 90-92.