

연마 브러시 접촉력 산출

Contact Force Estimation for a Polishing Brush

이병수^{1,✉}
Byoungsoo Lee^{1,✉}

1 계명대학교 기계자동차공학부 (Faculty of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung Univ.)
✉ Corresponding author: blee@kmu.ac.kr, Tel: 053-580-5349

Manuscript received: 2009.6.30 / Revised: 2009.9.10 / Accepted: 2009.10.8

A new contact force estimation technique is proposed. Keeping the contact force at a certain level between finishing tool and the object is essential since the quality of the finished surface is very sensitive to the contact force during the finishing process. However, the contact force measurement cannot be obtained by simply installing load cells under machine table or in the middle of tool linkage. The reason is that the weight of the machine table and the tool linkage are much heavier than the force to be measured. To that end, a method for estimating disturbance is proposed for a system that is similar to the mechanism of the finishing machine, and the same method is applied to estimate the contact force of the brush-type finishing machine. To verify the effectiveness of the proposed method, a small scale test set-up has been built and the method has been tested.

Key Words: Polishing Machine (연마기), Brush Contact (브러시 접촉), Contact Force Estimation (접촉력 산출)

기호설명

J_m = moment of inertia of motor armature
 J_s = moment of inertia of lead screw
 l = lead of the screw
 M_g, M_{pl} = mass of ball nut and guide, respectively
 $x(t)$ = displacement of brush mechanism
 $\theta(t)$ = angular displacement of motor
 $e_a(t)$ = control voltage input for motor
 K_m = torque constant of motor
 $p(t)$ = disturbance

1. 서론

절삭공작기 등에 사용되는 공구·팁의 생산 공정 중 공구 팁의 코팅 후 표면 조도 개선을 위한

연마에는 주로 브러시 형태의 연마기가 사용된다. 브러시 연마기는 서로 접촉한 브러시와 피가공물의 횡방향 상대 운동을 이용하여 표면을 연마하는 가공기이다. 횡방향 상대 운동은 브러시의 회전과 피가공물의 공전과 자전 운동에 의해 발생한다. 피가공물 표면이 브러시와의 상대운동 방향에 대해서 평행하면 기대한 표면 가공 품질을 얻을 수 있지만, 피가공물의 표면에 요철이 있거나 상대운동 방향에 대해서 평행하지 않으며 피가공물의 모서리가 무더지는 불량 발생하기도 한다(Fig. 1 참조).

피가공물 모서리의 무더짐 불량을 최소화하는 방안으로 Fig. 2 와 같은 새로운 형식의 연마 방식을 개발하였다.¹ 개발한 연마 방식은 브러시와 피가공물에 횡방향 상대 운동과 더불어 상하 왕복 운동을 추가하는 것이다. 개발한 새 방식으로 시험 연마한 결과, 옛 방식이라면 모서리 무더짐 불량이

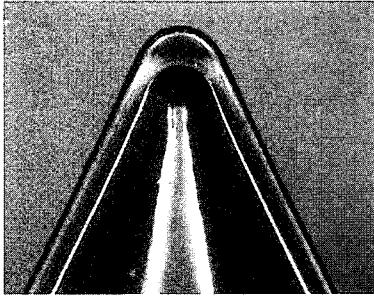


Fig. 1 Edge of the tool tip is crowned due to a poor polishing

있을 피가공물의 불량에 있어짐을 확인할 수 있었다. 하지만 연마 품질에 대한 상하 왕복운동에 의한 접촉력의 민감도가 높았다. 즉, 접촉력의 크기가 품질에 큰 영향을 미친다. 그러므로 균일한 품질을 얻기 위해서는 접촉력의 측정 및 관리가 중요하다.

하지만 접촉력의 측정하는 것이 연마기 구조상 매우 어렵다. 그 이유는 접촉력을 측정하기 위해서 로드셀을 브러시 상하왕복 운동 기구나, 피가공물 테이블 밑에 설치해야 하는데, 그 기구나 구조물은 무겁고, 무게에 대한 접촉력의 비율이 매우 작기 때문이다. 또한 회전 기구의 회전 불균일이 로드셀 출력에 노이즈로 나타난다. 그러므로 직접적인 접촉력 측정보다는 간접적인 산출 방법이 더 신뢰성 높은 대안이 된다.

연마기 공구의 접촉력 측정 및 산출에 관련한 연구는 많이 이루어지지 않았다. 국내에서 오창진 등²은 연마 공구 기구를 탄성체로 지지하고, 탄성체의 변위가 가한 힘에 비례한다는 사실로부터 공구의 접촉력을 측정하였으며, 실시간으로 측정된 접촉력이 지정한 값을 갖도록 선형 강건제어기를 이용하여 접촉력을 제어하는 연구를 수행하였다. 이런 방법은 공구에 스트레인 게이지 등으로 힘을 측정할 수 있는 상황에서만 가능하다.

연마기와 관련된 대부분의 연구가 연마 방법의 개선이나, 시뮬레이션을 통한 압력 분포의 해석, 접촉력 또는 압력의 분포가 연마 품질에 끼치는 영향 등에 집중되어 있다. 노승국 등³은 유한요소법을 이용하여 웨이퍼 최종연마기의 압력 분포에 대한 해석을 수행하였다. Cai 등⁴은 랩핑머신 작업 중 접촉 압력 분포가 가공 품질에 큰 영향을 미치므로 탄성 접촉 모델을 만들고, 그 모델에 바탕을 둔 접촉 압력의 영향을 연구하였다. Horn⁵은 웨이퍼 표면 평행도 개선 가공 시 가공시간, 수율, 연

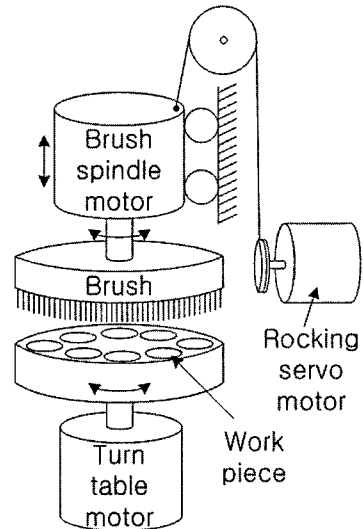


Fig. 2 Mechanism of a proposed brush type polishing machine

마 분체의 마모 등에 영향을 미치는 현상에 대한 모델을 기반으로 한 시뮬레이션 해석을 수행하는 연구를 하였다. Zhao 등⁶과 Zhan 등⁷도 각각 곡면을 갖는 피연마체, 방전가공에서의 연마 성능에 대한 연구를 수행하였다.

본 논문은 왕복 운동하는 질량과 그 질량에 작용하는 제어력과 외란이 존재하는 시스템에서 외란을 산출하는 방법을 제안하고 브러시 연마기의 접촉력 산출에 적용하는 예를 제시하고 서술한다. 또한 소규모 시험 장치 제작과 실험을 통하여 제안한 방법의 유효성과 신뢰성도 함께 검토한다.

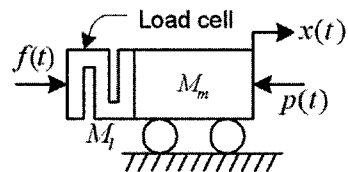


Fig. 3 Schematic model for disturbance $p(t)$ estimation

2. 연마 브러시의 접촉력 산출

외란을 산출하는 방법을 설명하기 위하여 Fig. 3 과 같이 왕복 운동하는 기구를 고려하자. 왕복 운동하는 1 자유도 질량에 로드셀 등으로 측정할 수 있는 제어력 $f(t)$ 가 가해지고, 그 값을 알지 못하는 외란 $p(t)$ 가 더해지면 운동방정식은

$$(M_l + M_m)\ddot{x}(t) = f(t) - p(t) \quad (1)$$

이다. 만약 왕복기구가 조화운동을 한다고 가정하면, 즉 외란 $p(t)$ 에도 불구하고 제어력 $f(t)$ 가 정해진 방법에 의해 왕복기구가 조화운동을 하도록 작용한다면, 변위와 가속도는

$$\begin{aligned} x(t) &= A \sin \omega t \\ \ddot{x}(t) &= -\omega^2 A \sin \omega t = -\omega^2 x(t) \end{aligned} \quad (2)$$

가 된다. 여기서 A 는 진폭, ω 는 조화운동의 각진동수이다. 식(2)를 식(1)에 대입하고 $p(t)$ 에 대해 정리하여 다음의 식

$$p(t) = f(t) + \omega^2 (M_l + M_m)x(t) \quad (3)$$

을 유도할 수 있다. 즉, 기구가 각속도가 결정된 조화운동을 하며 질량을 알고 있고 제어력을 측정할 수 있다면 식(3)에 의해 외란 $p(t)$ 를 산출할 수 있다.

3. 연마 브러시 접촉력 산출 실험

제 2 장에서 제안한 외란 산출 방법이 브러시 연마기의 접촉력 산출에 적용될 수 있음을 보이기 위하여 Fig. 4 와 같이 실제 연마기와 구조가 유사한 소형 시험 장치를 제작하였다. 이 장치는 Fig. 3 의 장치에 조화 왕복운동을 발생시키는 서보 모터와 기구를 추가한 것이다. 조화 왕복운동 발생기 구로는 Allen G. Ford 가 설계한 Ford 기구 또는 five Cardan-gear mechanism⁸ 등을 이용할 수 있으나, 이러한 기구로는 정현 운동 왜율에 대한 접촉력 측정 오차의 분석 등의 목적으로 정현파를 왜곡시키는 등 파형을 변경할 수 없으므로 운동 생성 기능이 유연한 서보 기구를 택하였다. 또한 브러시를 모사하기 위하여 스프링을 브러시 대신 장착하였다.

이 기구의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &\left[M_g + M_{pl} + M_l + M_m + \left(\frac{2\pi}{l} \right) (J_m + J_s) \right] \ddot{x} \\ &= \left(\frac{2\pi}{l} \right) k_m e_a(t) - p(t) \end{aligned} \quad (4)$$

식(4)는 식(1)과 유사함을 알 수 있다. 식(4)의 운동방정식은 제어기 설계 및 실현을 위한 모델이며, 제어기가 조화운동을 실현하면 접촉력 산출에는 식(3)을 사용한다. 즉, 서보 모터의 입력 $e_a(t)$ 를 통해 기구를 조화 왕복 운동시키고 외란으로서의 접촉력 $p(t)$ 를 산출한다.

조화운동 제어기는 최대값을 알고 있는 외란, 시스템 파라미터의 불확실성, 계의 비선형성에 대해서 강건해야 하며, 조화운동 지령에 대한 추종 성능이 우수해야 한다.⁹ 후보 제어기로 슬라이딩모드 제어기¹⁰ 를 고려하였고 다음과 같은 슬라이딩 함수를 정의하였다.

$$s = \lambda e + \dot{e}$$

여기서 $e = x_d - x$ 이며 위치 지령 x_d 에 대한 실제 위치 x 의 오차 값이다. 제어 목표는 시스템의 상태를 슬라이딩 평면 $s = 0$ 에 유지시키는 제어 입력을 시스템에 공급하는 것이다. 제어기 설계는 본 논문의 목적이 아니므로 이에 대한 자세한 언급은 하지 않는다.

조화운동의 왜율(歪率)과 접촉력의 산출 정밀도에 대한 상관관계는 식(3)을 통해 알 수 있다. 변위 $x(t)$ 에 왜곡이 발생하며 그 왜곡이 $x(t) + \Delta x(t)$, 제어력 측정의 오차와 노이즈는 $f(t) + \Delta f(t)$ 의 형태로 나타난다고 가정하면, 접촉력 산출 값 $\bar{p}(t)$ 는 참 값 $p(t)$ 와 다르며 다음의 식과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{p}(t) &= p(t) + \Delta p(t) \\ &= f(t) + \Delta f(t) + \omega^2 (M_l + M_m)(x(t) + \Delta x(t)) \end{aligned} \quad (5)$$

그러므로 접촉력 산출 값의 오차 $\Delta p(t)$ 는

$$\Delta p(t) = \Delta f(t) + \omega^2 (M_l + M_m) \Delta x(t) \quad (6)$$

이며, 왜곡은 $\omega^2 (M_l + M_m)$ 에 선형적으로 비례하여 산출 값에 더해진다는 것을 알 수 있다. 그러므로 접촉력 산출 값의 정밀도를 높이기 위해서는 정밀한 각속도 측정 값, 정확한 브러시 기구의 정현운동을 필요로 한다.

접촉력 산출 실험을 위하여 제작한 실험 장치에는 브러시를 모사하는 스프링이 장착되었는데 스프링과 벽면의 간격을 조정하여 브러시 기구가 조화 왕복 운동하는 동안 스프링이 벽면에 접촉하

도록 하였다. 또한 Fig. 4 에는 생략되었지만 브러시를 모사하는 스프링이 접촉하는 면에는 로드셀을 설치하여 접촉력을 측정할 수 있게 하였다. 측정값은 산출값의 정확성을 검증하기 위한 수단으로 사용하였다. 시스템의 파라미터는 Table 1 과 같다.

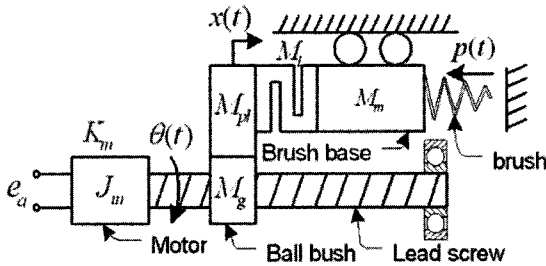


Fig. 4 Schematic model of proposed brush-type polishing machine with contact force estimation mechanism

Table 1 System parameters

Parameter	Value
l	5 mm
k_m	0.0785 N·m/A
$J_m + J_s$	16 g·cm·s
$M_g + M_{pl} + M_l + M_m$	0.75 kg

설계한 슬라이딩 모드 제어기는 조화 위치 지령을 브러시 접촉에 의한 외란, 비구조적 불확실성 및 기구의 비선형 마찰에도 불구하고 매우 정확히 추종하였으며 변위 지령과 변위 측정값을 Fig. 5 에 그래프로 표시하였다.

왕복운동의 주기가 1 초이며 진폭이 6mm 인 경우에 대해서 접촉력 산출 결과를 Fig. 6 에 그래프로 나타내었으며 산출 알고리즘의 신뢰도를 검증하기 위해서 측정값과 비교하였다. 이 그래프는 10 초 동안의 실험 결과이다. 실선은 산출 알고리즘에 의한 접촉력 산출값이며, 점선은 브러시와 접촉하는 로드셀의 지시값이다. 두 그래프가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있는데 다만 접촉이 이루어지지 않는 구간에서, 즉 접촉력 측정값이 영인 구간에서, 접촉력 산출값에 약간의 노이즈가 나타나는 것을 알 수 있는데 이는 스위칭 모드 제어기의 높은 주파수의 스위칭 때문이다. 하지만 브러시가 접촉 후에는 이러한 고주파 노이즈가 사

라지며, 산출값이 참값을 아주 정확히 지시하고 있는 것을 확인할 수 있다.

또한 다른 브러시의 질량과 왕복운동 주기에 대한 접촉력 산출의 결과도 제시한다. 실험 장치에는 별도의 질량을 추가하거나 제거할 수 있는 기구가 마련되어있는데 100g 을 제거하여 질량이 0.65kg 이 되도록 수정하여 실험하였다. 접촉력 산출 결과를 Fig. 7 에 나타내었는데 측정치와 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 하지만 이 경우에 접촉력 산출 계산식에 변동된 질량을 입력해주어야 한다. Fig. 8 은 속도를 두 배 증가시켜 왕복운동 주기를 0.5 초로 한 경우의 실험 결과이다. 이 경우에도 역시 접촉력 산출값이 측정값과 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

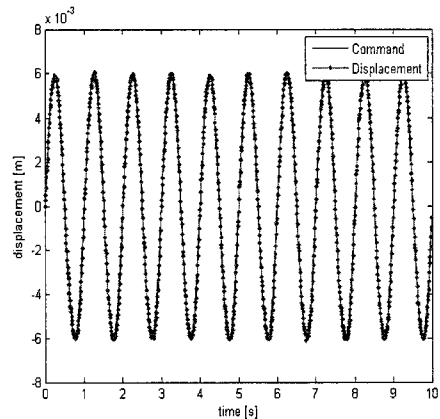


Fig. 5 Controlled sinusoidal displacement of the brush mechanism

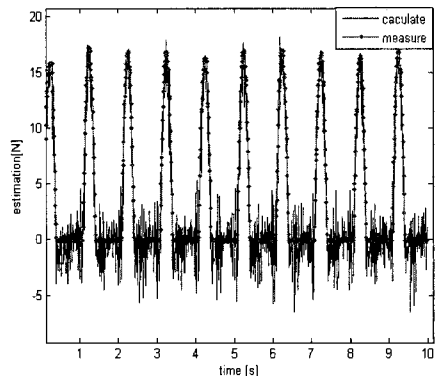


Fig. 6 Estimated contact force compared with the measurement for verification purpose

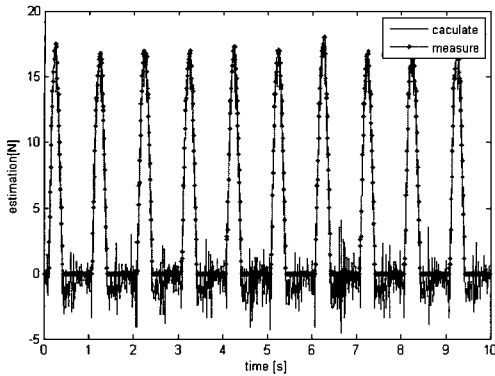


Fig. 7 Contact force with brush mass reduced to 0.65kg

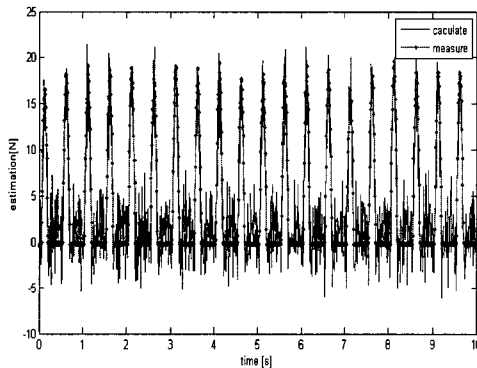


Fig. 8 Contact force when the frequency doubles, i.e. 2Hz

4. 결론

왕복 운동하는 일반적인 기구와 그 기구에 작용하는 외란이 존재하는 시스템에서 외란을 산출하는 방법을 제안한 후, 브러시 연마기의 접촉력 산출에 적용하는 예를 실험 결과와 함께 제시하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다. 물론 기구가 조화운동을 해야 한다는 전제 조건의 존재한다.

- 1) 기구가 조화 운동하는 경우 외란을 산출하는 방법을 제시하였다.
- 2) 외란을 산출하는 방법을 브러시와 피가공물의 접촉력을 산출하기 위한 방법에 응용하였다.
- 3) 접촉력 산출 오차는 조화운동의 왜율(歪率)에 선형적으로 비례하는 것을 확인하였다.
- 4) 제안한 방법의 유효성과 신뢰성을 검증하기 위하여 시험 장치를 제작하였고 산출한 접촉력의 산출 값을 측정 한 값과 비교하였다. 비교 결과 우수한 성능을 확인하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부·한국산업기술평가원 지정 계명대학교 전자화자동차부품기술혁신센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. Lee, B. and Park, J.-H., "Contact Force Estimation for a Polishing Brush," Proc. of Korean Society for Precision Engineering Spring Conference, pp. 515-516, 2009.
2. Oh, C. J., Jeon, M. S., and Kim, I. H., "Development of In-Progress Polishing Pressure Control System," Journal of Korean Society for Precision Engineering, Vol. 21, No. 1, pp. 109-115, 2004.
3. Ro, S. K., Park, J. K., Lee, S. Y. and Pyun, D. S., "Analysis of Contact Pressure Distribution for a 12" Wafer Final Polishing Machine," Proc. of Korean Society for Precision Engineering Spring Conference, pp. 749-750, 2007.
4. Cai, G. Q., Lu, Y. S., Cai, R. and Zheng, H. W., "Analysis on Lapping and Polishing Pressure Distribution," Northeastern University, China, pp. 235-238, 1997.
5. Horng, T.-L., "Estimation of material removal with the help of pad deformation in planarization process," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 182, No. 1-3, pp. 139-145, 2007.
6. Zhao, J., Saito, K., Kondo, T., Narahara, H. and Igarashi, S., "A New Method of Automatic Polishing on Curved Aluminum Alloy Surface at Constant Pressure," Int. J. Mech. Tools Manufact., Vol. 35, No. 12, pp. 1683-1692, 1995.
7. Zhan, J. M., Zhao, J., Xu, S. X. and Zhu, P. X., "Study of the contact force in free-form-surface compliant EDM polishing by robot," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 129, No. 1, pp. 186-189, 2002.
8. Chironis, N. P. and Sclater, N., "Mechanisms and Mechanical Devices Source Book, 2nd Ed.," McGraw-Hill, 1996.
9. Slotine, J. J. E. and Li, W., "Applied Nonlinear Control," Prentice-Hall, 1991.
10. Wong, L. K., Leung, F. H. F. and Tam, P. K., "A

Chattering Elimination algorithm for Sliding Mode
Control of Uncertain Non-Linear Systems,”
Mechatronics, Vol. 8, No. 7, pp. 756-775, 1988.