

# 연마 브러쉬 접촉력 산출

## Contact Force Estimation for an Polishing Brush

\*#이병수<sup>1</sup>, 박재현<sup>2</sup>

\*#Byoungsoo Lee(blee@kmu.ac.kr)<sup>1</sup>, J.-H. Park<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 계명대학교 기계자동차공학부, <sup>2</sup>한국과워트레인(주)

Key words : Polishing Machine, Reciprocating Machine, Disturbance, Brush Contact, Contact Force Estimation

### 1. 서론

브러쉬 연마기는 서로 접촉한 브러쉬와 피가공물의 횡방향 상대 운동을 이용하여 표면을 연마하는 가공기이다. 브러쉬 연마기의 대표적인 피가공물은 절삭공작기의 공구팁이다. 횡방향 상대 운동은 브러쉬의 회전과 피가공물의 공전과 자전 운동에 의해 발생한다. 피가공물 표면이 브러쉬와의 상대운동 방향에 대해서 평행하면 기대한 표면 가공 품질을 얻을 수 있지만, 피가공물의 표면에 요철이 있거나 상대운동 방향에 대해서 평행하지 않으며 피가공물의 모서리가 무더지는 불량 발생한다.

피가공물 모서리의 무더짐 불량을 최소화하는 방안으로 Fig. 1과 같은 새로운 형식의 연마 방식을 개발하였다. 개발한 연마 방식은 브러쉬와 피가공물에 횡방향 상대 운동과 더불어 상하 왕복 운동을 추가하는 것이다. 개발한 새 방식으로 시험 연마한 결과, 옛 방식이라면 모서리 무더짐 불량이 있을 피가공물의 불량이 없어짐을 확인할 수 있었다. 하지만 연마 품질에 대한 상하 왕복운동에 의한 접촉력의 민감도가 높았다. 즉, 접촉력의 크기가 품질에 큰 영향을 미친다. 그러므로 균질한 품질을 얻기 위해서는 접촉력의 측정 및 관리가 중요하다.

하지만 접촉력의 측정하는 것이 연마기 구조상 매우 어렵다. 그 이유는 접촉력을 측정하기 위해서 로드셀을 브러쉬 상하왕복 운동 기구나, 피가공물 테이블 밑에 설치해야하는데, 그 구조물은 무겁고, 무게에 대한 접촉력의 비율이 0.5%도 되지 않기 때문이다. 또한 회전 기구의 회전 불균일이 로드셀 출력에 노이즈로 나타난다. 그러므로 직접적인 접촉력 측정보다는 간접적인 산출의 방법이 더 신뢰성 높은 대안이 된다.

접촉력 산출에 관련한 연구는 그리 많이 이루어지지 않았다. 국내에서는 Oh, et. al.<sup>1</sup>이 공구와 연결된 탄성체의 변위를 이용하여 연마압력을 계산하여 공구의 이동량을 제어하는 방법을 개발한 논문을 발표하였고, 대부분의 연구가 연마 방법의 개선이나<sup>2</sup>, 접촉력의 분포가 연마 품질에 끼치는 영향 등에 집중되어 있음을 확인하였다.

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

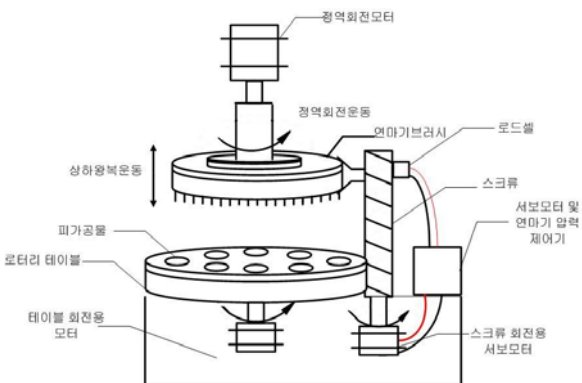


Fig. 1 Mechanism of a proposed brush-type polishing machine

### 2. 왕복운동 기구의 외란 산출

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

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

이다. 만약 왕복기구가 조화운동을 한다고 가정하면, 즉

$$x(t) = A \sin \omega t \tag{2}$$

$$\ddot{x}(t) = -\omega^2 A \sin \omega t = -\omega^2 x(t)$$

이 된다. 식(2)를 식(1)에 대입하고  $p(t)$ 에 대해 정리하여 다음의 식을

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

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

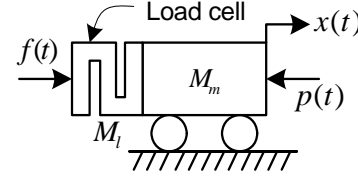


Fig. 2 Schematic model for contact force estimation

### 3. 연마 브러쉬 접촉력 산출 실험

제2장에서 제안한 외란 산출 방법이 브러쉬 연마기의 접촉력 산출에 적용될 수 있음을 보이기 위하여 Fig. 3과 같이 실제 연마기와 구조가 유사한 소형 시험 장치를 제작하였다. 이 장치는 Fig. 2의 장치에 조화 왕복운동을 발생시키는 서보 모터와 기구를 추가한 것이다.

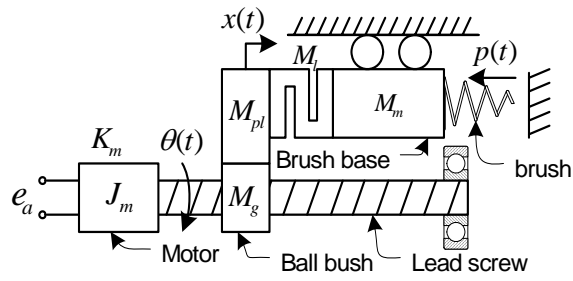


Fig. 3 Schematic diagram of brush type polishing machine where brush is modeled as spring

이 기구의 운동방정식은 다음과 같다.

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

여기서

- $J_m$  = 모터회전자의 관성모멘트
- $J_s$  = 리드스크류의 관성모멘트
- $l$  = 리드스크류의 리드
- $M_g, M_{pl}$  = 볼너트, 가이드의 질량
- $x(t)$  = 브러쉬 변위
- $\theta(t)$  = 모터 각변위
- $e_a$  = 모터 제어 입력
- $k_m$  = 모터의 토크상수

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

조화운동 제어기는 최대값을 알고 있는 외란, 시스템 파라미터의 불확실성, 계의 비선형성에 대해서 강건해야하며, 조화운동 지령에 대한 추종 성능이 우수해야한다<sup>3</sup>. 후보 제어기로 슬라이딩모드 제어기를 고려하였고 제어기 설계에 대한 사항에 대한 언급을 본 논문에서는 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  $\tilde{p}(t)$ 는 참 값  $p(t)$ 와 다르며 다음의 식과 같다.

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

그러므로 접촉력 산출 값의 오차는

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

이며 왜곡은  $\omega^2(M_l + M_m)$ 에 선형적으로 비례하여 산출 값에 더해진다는 것을 알 수 있다.

접촉력 산출 실험을 위하여 제작한 실험 장치에는 브러쉬 대신 브러쉬를 모사하기 위한 스프링을 장착하였고, 스프링과 벽면의 간격을 조정하여 왕복 운동 중에 접촉하도록 하였다. 설계한 제어기는 외란과 비선형 마찰에도 불구하고 강건하였으며, 조화 변위 지령에 우수한 추종 성능을 보였다. Fig. 4는 지령과 변위 측정 값의 그래프이다.

실험 장치 그림인 Fig. 3에는 없지만 브러쉬를 모사하는 스프링이 접촉하는 면에는 로드셀을 설치하여 접촉력을 측정할 수 있게 하였다. 측정 값은 산출 값의 정확성을 검증하기 위한 수단으로 이용하였다. 설계한 슬라이딩 모드 제어기는 조화 위치 명령을 외란에도 불구하고 정확히 추종하였으며 변위 입력과 변위 측정값을 Fig. 4에 그래프로 표시하였다. 실험에 사용한 조화 변위 입력 지령 값의 진폭은 6mm이며, 주기는 1초이다. Fig. 5는 식(3)으로 추산한 접촉력 산출 값과 로드셀로 측정된 접촉력의 비교 그래프이며 접촉 중 매우 정확하게 접촉력을 산출하고 있음을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

왕복 운동하는 일반적인 기구와 그 기구에 작용하는 외란이 존재하는 시스템에서 외란을 산출하는 방법을 제안한 후, 브러쉬 연마기의 접촉력 산출에 적용하는 예를 실험 결과와 함께 제시하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기구가 조화운동하는 경우 외란을 산출하는 방법을 제시하였다.
2. 외란을 산출하는 방법을 브러쉬와 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 측정된 값과 비교하였다. 비교 결과 우수한 성능을 확인하였다.

#### 참고문헌

1. Oh, C. J, Jeon, M. S, Kim, I. H, 2004, "Development of In-Progress Polishing Pressure Control System", Journal of Korean Society of Precision Engineering Vol. 21, NO. 1, pp. 109~115.
2. G.Q. Cai, Y.S. Lu, R. Cai, H.W. Zheng, "Analysis of Lapping and Polishing Pressure Distribution," Northeastern University, China, 1997.
3. Slotine, J. J. E, Li, W, Applied Nonlinear Control, Prentice-Hall, 1991.
4. Wong, L. K. Leung, F.H.F. and Tam P. K, 1988, "A Chattering Elimination algorithm for Sliding Mode Control of Uncertain Non-Linear Systems", Mechatronics, Vol. 8, pp. 756-775.

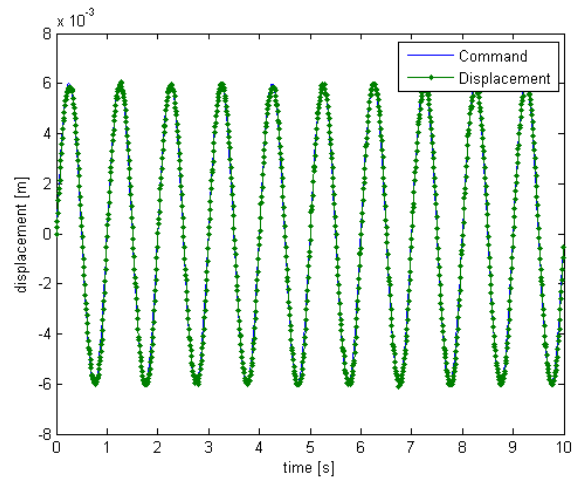


Fig. 4 Controlled sinusoidal displacement of the brush base

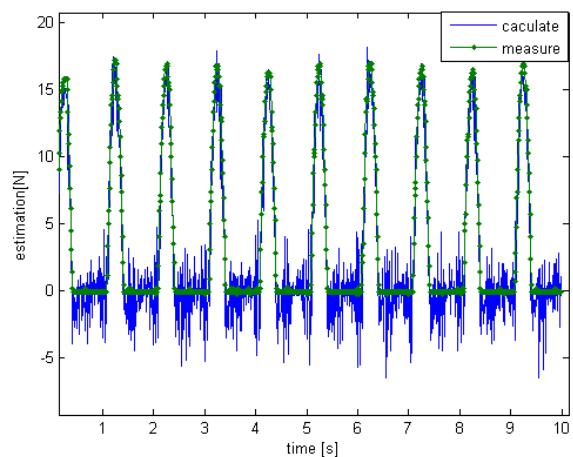


Fig. 5 Estimated contact force compared with the measurement