

광산란법을 이용한 연삭표면 제어 Control of Ground Surface Using Light Scattering

홍민성*, 최우석**

* 아주대학교 기계 및 산업공학부

** 아주대학교 기계공학과 대학원

Abstract

In surface grinding, the conditions of the grinding wheel give a significant effect on the ground workpieces comparing with other metal removal processes.

In this paper, to assist the development, a non-contacting optical method is introduced to make in-process measurements of scattering intensities from laser beam during surface grinding processes. This show indications of changes in surface texture of wheel working surfaces. Also, in order to determine the dressing time monitoring method of grinding wheel in surface grinding, a three-dimensional computer simulation of the grinding operation has been attempted based on the contact mechanism and surface-shaping system between the grinding wheel and the workpiece. The optimal dressing time is determined based on the amount of the grain wear and work surface roughness.

1. 서론

기계가공의 생산공정은 고도의 정밀도를 요구하고 있으며 정밀 가공중의 하나인 연삭작업은 연삭 스톨을 고속으로 회전시켜서 스톨 표면의 미세한 연삭 입자로 가공물 표면을 질삭하는 방법으로 정밀도와 가공능률의 향상에 필수적인 가

공법으로 등장하게 되었다. 하지만 연삭스톨 입자는 일반 범용 질삭기에 비해 연구가 많이 진행되지는 못했다. 연삭스톨 입자의 불규칙 분포 때문에 연삭스톨 입자 거동을 연구하기는 쉽지가 않았다. 그동안 진행되어온 연구를 살펴보면 드레싱된 연삭 스톨에서의 질삭 날 연구⁽¹⁾, 질삭 날의 미세구조와 거동⁽²⁾, 스톨입자의 마모상태 측정⁽³⁾, 등의 연구가 진행되어 왔다. 대표적으로 스톨입자의 마모나 탈락에 관한 연구로 광산란(light scattering)법⁽⁴⁾을 이용하였다. 또한, 연삭 특성의 이해를 위해 시뮬레이션 기법은 연삭 공정을 분석하고, 실질적인 연삭스톨 형태의 변이성을 반영함으로써 실험결과를 예측하여 연삭가공과 드레싱의 이해를 향상시킨다.⁽⁵⁾ 또한 스톨 입자의 수와 마모된 면적을 측정함으로써 연삭 공정의 실험적 모델을 향상시켰다.⁽⁶⁾

본 연구에서는 연삭가공중에 발생하는 스톨 작업면 변화를 레이저빔을 이용하여 측정하고 시뮬레이션을 통해 스톨 작업 면의 광강도를 알아 내어 비교하였다. 실험과 시뮬레이션을 통하여 연삭가공중에 발생하는 연삭현상과 가공면의 표면 거칠기와의 관계를 통하여 규명하고자 하였다. 본 논문의 마지막으로 입자들을 불규칙적으로 배열하여 contact mechanism⁽⁷⁾에 의한 스톨과 공작물 사이의 스톨의 입자의 마모와 탈락현상을 표면 가공법(surface-shaping system)⁽⁸⁾에 접목시켜 연삭공정을 분석하여 가공표면을 예측을 하였으며 이 결과를 바탕으로 연삭스톨 입자의 거동 및 최적드레싱 시기를 검출하였다.

2. 광강도(Light intensity)의 연삭 적용

Fig. 1(a)는 광산란 방법(scattering method)의 기본적인 측정원리를 보여주고 있다. Fig. 1(b)는 측정표면에 빛을 입사시킨 후 반사광들을 검출하고 반사광선들의 산란패턴을 특성화하여 산란의 정도를 특정한 규칙에 따라 정량화 하여 표면 거칠기를 산출한 것이다. Fig. 1(c)는 산란광의 일정한 패턴을 보여준다. Bechamnn과 Kirchhoff의 산란이론을 이용하였으며, 표면 거칠기와 광산란의 관계식은 다음과 같다.⁽⁹⁾

$$I(\theta_1, \theta_2) = \rho_0^2 + \frac{\sqrt{\pi} F^2 T}{2L} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{g^m}{m! \sqrt{m}} \quad (1)$$

$$\times \exp\left(\frac{\nu_x^2 T^2}{4m}\right) \exp(-g)$$

여기서

$$F = \frac{[1 + \cos(\theta_1 + \theta_2)]}{[\cos \theta_1 (\cos \theta_1 + \cos \theta_2)]} \quad (2)$$

$$\nu_x = 2\pi(\sin \theta_1 - \sin \theta_2)/\lambda \quad (3)$$

$$\sqrt{g} = 2\pi\sigma_z (\cos \theta_1 + \cos \theta_2)/\lambda \quad (4)$$

$$\rho_0 = (\sin \nu_x L)/(\nu_x L) \quad (5)$$

이며,

θ_1 : Angle of incidence

θ_2 : Angle of reflection

T : Correlation distance between roughness elements

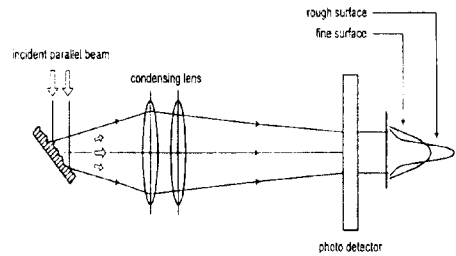
σ_z : Standard deviation of roughness heights

λ : Wavelength of light

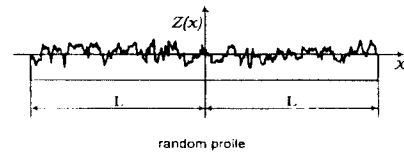
L : Sampling length

식(1)을 통하여 거친 표면에서는 입사광이 난 반사방향으로 산란되어 검출되는 광강도가 낮아지고 고운 표면에서는 입사광이 정반사 방향으로 산란되어 광강도는 높아진다는 것을 알 수 있다. 따라서 실험에서 이 이론을 적용시켜 연삭 스톱작업면에 응용하면 입자가 파모된 면이나 연삭칩이 눈 메움을 일으킨 영역에서는 입사광이 정반사 방향으로 산란되어 광강도는 높아지게 된다.

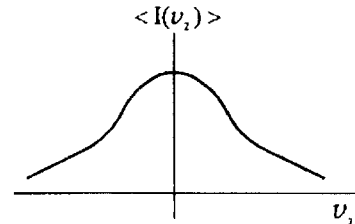
이러한 원리에 착안하여 연삭가공중에 레이저빔을 이용한 인프로세스 측정방법으로 스톱작업면의 상태를 감지할 수 있다. 연삭가공중 회전하는 스톱면에 빔 직경이 1mm인 7mW He-Ne 레이저를 발진시키고 스톱작업면에 반사되는 산란광을 광검출기에서 입수하였다. 스톱작업면에 입사된 빛은 스톱작업면의 상태에 따라 각기 다른 강도 패턴을 갖고 반사되며 그 반사된 산란광을 레이저빔의 입사각과 같은 반사각을 갖는 위치에 설치된 광검출기에 의해서 신호를 입수하게 된다.⁽¹¹⁾



(a) Basic principle of light scattering method



(b) Random profile



(c) Scattering intensity pattern

Fig. 1 Schematic of basic principle of light scattering

측정결과와 시뮬레이션에 의한 숫돌작업면의 Light scattering 이론을 적용시켜 비교하게 된다. 식(1)을 보면 다양한 θ_1 과 θ_2 의 조합이 가능하지만 가장 바람직한 환경은 입사각과 반사각이 같은 경우이다. ($\theta_1 = \theta_2$) 그리고 상관거리 T에 대해서는 무시할 수 있다. 따라서 식을 간단히 하면 다음과 같다.

$$I_s \cong \exp \left[- \left(\frac{4\pi R_q \cos \theta_1}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (6)$$

I_s : Intensity ratio in the specular direction
 R_q : rms amplitude roughness
 λ : Wavelength of light

3. Contact mechanism과 표면가공법

3. 1 Contact mechanism

본 논문에서 연삭숫돌의 입자는 균일한 사각뿔 형태로 분포한다고 가정하였다. 사각뿔의 입자와 공작물사이의 Contact mechanism을 이용한 마모량(d_c)에 대한 식은 다음과 같다.⁽¹⁰⁾

$$d_c = \left[\frac{K}{H_d} P_m \right] \cdot L \quad (7)$$

K : 마모계수
 H_d : 압입경도
 L : 미끄럼 거리
 P_m : 평균압력= W/A_a 이다.

3. 2 표면 가공법(Surface-Shaping System)

표면가공의 정확한 모델링과 시뮬레이션을 위하여 일반적인 공구 형상을 가지고 어떠한 가공이라도 수행할 수 있는 시뮬레이터가 필요하다. 그리하여 표면가공법이라는 것을 도입하였는데 표면 가공법의 기본 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁸⁾

$$\mathbf{r}_0 = \mathbf{B}_{0,n} \mathbf{B}_T \mathbf{e}^i \quad (8)$$

여기서 \mathbf{r}_0 는 기본좌표계에서 질삭 날까지의 벡터이고, $\mathbf{B}_{0,n}$ 과 \mathbf{B}_T 는 각각 공구와 공작물간의 기구학적 좌표변환과 공구 좌표계에서 질삭 날까지의 기하학적 좌표변환이다. \mathbf{e}^i 는 $\{0 \ 0 \ 0 \ 1\}^T$ 이다.

4. 시뮬레이션 결과

4. 1 광강도(Light intensity) I와 R_q 값의 관계

R_q 값은 표면거칠기에 관계하므로 표면거칠기가 나쁠수록 R_q 값은 증가하게 된다. 또한, 광강도 값은 표면 거칠기가 나쁘면 빛의 난반사가 일어나므로 광강도 값은 감소하게 된다. 이 둘의 관계를 볼 때 R_q 값에 따른 광강도 값은 감소한다.

Fig. 2는 실험으로 나타난 그래프와 이론을 이용하여 시뮬레이션된 그래프를 보여주고 있다. 본 연구의 시뮬레이션에서는 실제 연삭숫돌에서 일어나는 자생작용을 고려하지 않았다.

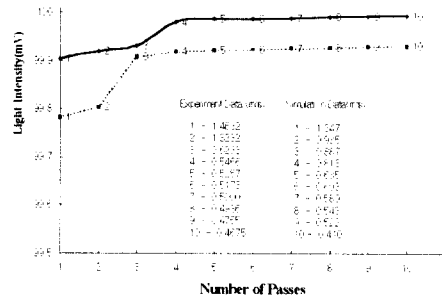


Fig. 2 Relationship between rms and light scattering intensity by experiment and simulation

실험결과 뿐만 아니라 시뮬레이션 결과의 그래프를 보면 연삭횟수에 따라서 R_q 값이 감소하는 것을 볼 수 있다. 따라서 연삭 횟수가 증가할수록 연삭숫돌은 마모되거나 탈락되어 광강도 값은 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 실험과 시뮬레

이선의 2~4 패스 사이에 급격히 그래프 기울기가 증가하는 것을 볼 수 있는데 이것은 연삭숫돌이 마모되거나 탈락됐음을 보여주고 있다. 또한, 그 이후에는 드레싱이 필요함을 알 수 있다.

4.2 연삭숫돌 입자의 Simulation

3.1 절에서 설명한 바와 같이 연삭숫돌의 입자는 사각뿔이라 가정하였다. 기존의 연구는 보통 연삭숫돌 입자를 반구로 가정하여 시뮬레이션하였다.^[7] 하지만 숫돌입자는 날카로운 절삭날을 가지므로 오히려 사각뿔이 실제 입자와 가까워질 수 있다. 사각뿔 한 입자에 대한 시뮬레이션한 그림이 Fig. 3에 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 사각뿔의 가로, 세로, 높이에 대한 x, y, z의 좌표값은 a, b, h의 값을 가지며 사각뿔의 모서리부분을 A~E라 명칭하였다.

사각뿔을 만들기 위한 기본알고리즘은 직선 AE, BE범위 안에 데이터가 있어야 하고 동시에 직선 BE, CE범위안에 있어야 한다. 즉,

$$\frac{bz}{2h} - \frac{b}{2} \leq y \leq -\frac{bz}{2h} + \frac{b}{2} \quad (9)$$

$$\frac{az}{2h} - \frac{a}{2} \leq x \leq -\frac{az}{2h} + \frac{a}{2}$$

또한 기존 Contact Mechanism에 대한 식은 입자를 반구로 가정하였을 때, 즉 접촉부분이 원을 나타냈을 때의 식을 나타내므로 사각형에 대한 근사식을 쓰면 다음과 같다.

$$d \approx D_h = \frac{4ab}{2(a+b)} \quad (10)$$

Fig. 4에서는 10 패스 후 연삭숫돌의 한 입자를 확대하여 보여주고 있다. 처음 입자의 형태(사각뿔)와 비교해 볼 때 숫돌 입자의 마모된 것을 볼 수 있다. Fig. 5는 Fig. 4를 확장하여 시뮬레이션 결과이다. 2 패스 후에 탈락을 시작하여 10 패스 후에는 거의 탈락 된 있는 조흔을 볼 수 있다. 이것은 기존의 실험결과에서 2패스만에 탈락이 시작된 것과 일치하였다. 숫돌 입자의 마모에 따라서 숫돌의 드레싱을 결정할 수 있으며 10 패스 후에 드레싱이 요구됨을 보여주고 있다.(드레싱 기준=30 μm)

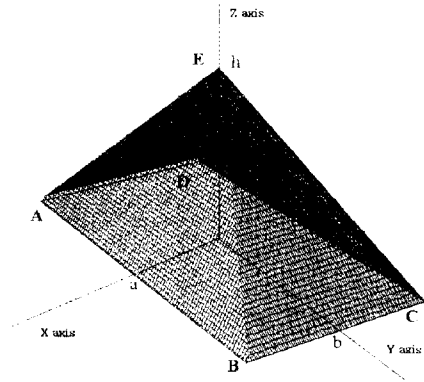


Fig. 3 Grit of grinding wheel

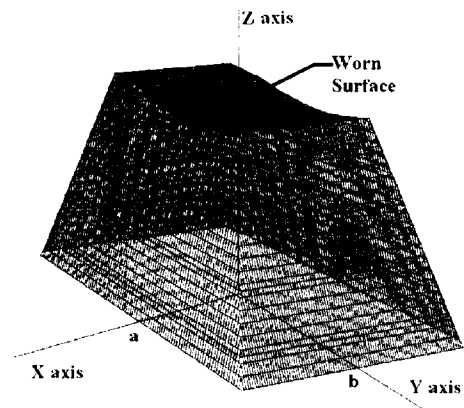


Fig. 4 Worn grit of grinding wheel after 10 passes

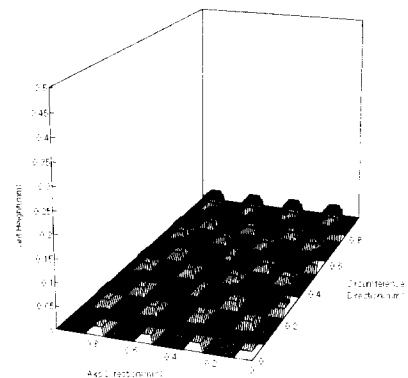


Fig. 5 Worn grit of grinding wheel after 10 passes

4.3 연삭 가공된 공작물의 표면

Fig. 6은 마모된 슷돌(Fig. 5)을 이용하여 가공된 공작물의 표면을 나타낸다. Fig. 6을 보면 가공 표면이 더 부더진 것을 볼 수 있다. 그 이유는 가공이 진행됨에 따라 연삭숫돌 입자가 마모되고 탈락되기 때문에 가공이 제대로 이루어지지 않고 있다. 그리고 슷돌입자의 마모와 탈락에 따른 가공물의 형상이기 때문에 마찰력과 열 발생을 고려해본다면 가공표면은 더욱 거칠 것이다

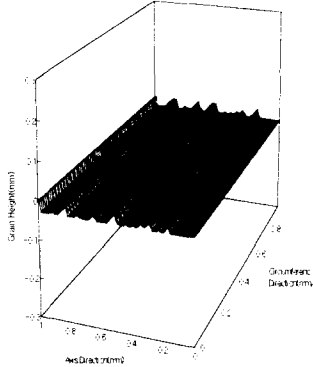


Fig. 6 Simulated surface after 10 passes

Fig. 7은 10 패스후의 공작물의 표면을 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 실험 결과의 R_q 값은 0.961이고 반구 모양의 입자로 가공한 표면의 R_q 값은 0.384정도이며 사각뿔의 입자로 가공한 표면의 R_q 는 0.582였다. 반구형태의 연삭숫돌 입자와 사각뿔형태의 연삭숫돌 입자로 시뮬레이션한 결과를 비교해보면 사각뿔로 시뮬레이션한 결과가 실제 실험 결과와 더욱 근접한 것을 알 수 있었다.

또한, 10 패스후의 2차원 프로파일을 통하여 평균 표면 거칠기 값을 측정된 결과 약 $30\mu\text{m}$ 였으며 이때 드레싱이 필요함을 알 수 있었다.

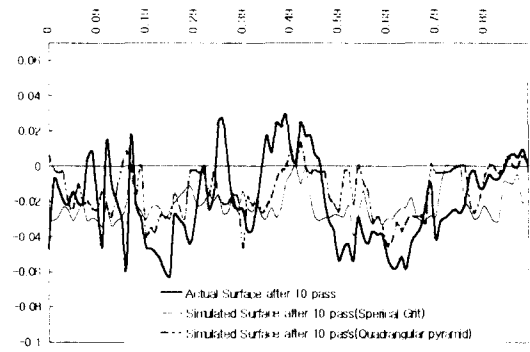


Fig. 7 Relationship between experiment and simulation after 10 passes

5. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) Bechmann과 Kirchhoff의 산란이론을 이용하여 시뮬레이션한 결과 거친 표면에서는 입사광이 난반사 방향으로 산란되어 검출되는 산란광 강도가 낮아지고, 고운 표면에서는 입사광이 정반사 방향으로 산란되어 산란광 강도는 높아지게 되었다. 이것은 실험결과와 일치하였다.

2) 시뮬레이션된 연삭 슷돌면을 바탕으로 contact mechanism과 표면 가공법을 이용하여 공작물과 연삭숫돌 입자간의 마모를 예측할 수 있었으며 마모된 정도와 가공면의 표면 거칠기에 따라 드레싱시기를 결정할 수 있었다.

3) 사각뿔의 입자로 가공된 공작물의 표면이 반구의 입자로 가공된 표면보다 실제 가공된 표면과 근접하다는 것을 알 수 있었다.

4) 실제 가공된 공작물과 시뮬레이션된 공작물에 대한 프로파일을 비교해본 결과 10 패스 후에 드레싱이 필요함을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] Hidco Tsuwa. "On the Behaviors of Abrasive

Grains in Grinding Process (Part 1)." JSPE. Vol.26. No. 4. pp. 199-205. 1961.

[2] Hideo Tsuwa. "On the Behaviors of Abrasive Grains in Grinding Process (Part 2) (Successive Cutting-edge Spacing)." JSPE. Vol.27. No. 6. pp. 409-413. 1961.

[3] Hideo Tsuwa. "On the Behaviors of Abrasive Grains in Grinding Process (Part 3) (Cutting-edge Spacing)." JSPE. Vol.27. No. 6. pp. 414-420. 1961.

[4] Yim, D.Y and Kim S.W. "Optical Roughness measurement of Ground Surfaces by Light Scattering." Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol.30. No. 2. pp. 283-289. 1990.

[5] Chen. X. and Rowe. W.B.. "Analysis and Simulation of the Grinding Process. Part I: Generation of the Grinding Wheel Surface." Int. J. Machine Tools & Manufacture. Vol. 36. No. 8. pp. 871-882. 1995.

[6] Suto, T. and Sam, T.. "Simulation of grinding process based on wheel surface characteristics." Bull. Jap. Soc. Prec. Engng. 15(1). 1981.

[7] 홍민성. "연삭가공시 연삭숫돌의 드레싱 시기 검출방법에 관한 연구." 한국공작기계학회지 제 7권 제 1호. pp. 112-118. 1998.

[8] Hong, M.S. and Ehman, K.F.. "Generation of Engineered Surfaces by the Surface-Shaping System." Int. J. Machine Tools & Manufacture. Vol. 35. No. 9. pp. 1269-1290. 1995.

[9] Beckmann. P. and Spizzichino. A.. "The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces." Pergamon Press, Oxford. 1963.

[10] Archard J.F.. "Wear Theory and Mechanics." Wear Control Handbook, edited by Peterson. M.B.

and Winer. W.O.. ASME. 1980.

[11] 김희남, 이주상, 홍민성. "평면연삭가공시 컴퓨터 시뮬레이션과 레이저 빔을 이용한 숫돌의 드레싱시기 검출기법 개발", 대한기계학회논문집 A권, 제 22권 제 9호. pp. 1731-1740. 1998.