

인프로세스 측정을 통한 연삭 시뮬레이션

홍민성*, 최우석**

Simulation of Ground Surface by In-process Measurement

Min Sung Hong*, Woo Seok Choi**

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 by the laser beam is introduced.

The in-process measurement of scattering intensities has been made during surface grinding processes and the surface textures of wheel working surfaces are captured. Also, in order to determine the dressing time monitoring method of a grinding wheel, a three-dimensional computer simulation of the grinding operation has been attempted based on the contact mechanism and the surface-shaping system between the grinding wheel and the workpiece. The optimal dressing time is determined by the amount of the grain wear and work surface roughness.

Key Words : Grinding operation (연삭작업), Light intensity (광강도), Grain wear (입자마모), Surface roughness (표면거칠기), Dressing time (드레싱 시기)

1. 서론

현재 기계산업은 여러 분야에서 고도의 정밀도가 요구되고 있고, 정밀 가공 중의 대표적인 연삭 작업은 가공능률의 향상에 필수적인 가공법으로 등장하게 되었다. 하지만 연삭숫돌 작업은 일반 범용 절삭기에 비해 연삭숫돌 입자의 불규칙 분포, 부정형의 숫돌 입자, 눈매움, 눈의 탈락 등 가공 중 발생하는 복잡하고 예기치 못한 현상에 때문에 이에 대한 연구가 쉽지 않았다. 그동안 진행되어온 연구를 살펴보면 실험을 통하여 드레싱된 연삭 숫

돌에서의 숫돌 입자의 연구⁽¹⁾, 숫돌 입자의 미세구조와 거동⁽²⁾, 숫돌입자의 마모상태 측정⁽³⁾ 등의 연구가 진행되어 왔다. 또한, 광산란(light scattering) 기법을 이용하여 숫돌입자의 마모나 탈락에 관한 연구가 수행되었으며,⁽⁴⁾⁽¹²⁾ 숫돌 입자의 수와 마모된 면적을 측정함으로써 연삭 공정의 실험적 모델을 향상시켰다.⁽⁶⁾

한편, 연삭 특성의 이해를 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 연삭 공정을 분석하고, 실질적인 연삭숫돌 형태의 변이성을 반영함으로써 연삭가공과 드레싱시기 등을 분석하였다.⁽⁵⁾

* 아주대학교 공과대학 기계 및 산업공학부

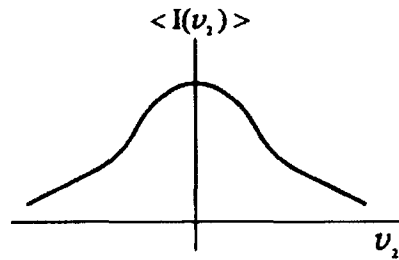
** 아주대학교 공과대학 기계공학과 대학원

본 논문에서는 기존의 실험결과를 시뮬레이션을 통하여 연삭가공중에 발생하는 연삭현상과 가공면의 표면 거칠기와의 관계를 규명하고자 하였다. 광산란 이론을 적용하여 연삭가공중에 발생하는 슛돌 작업면 변화를 시뮬레이션을 통해 슛돌면의 표면거칠기에 따른 광강도(light intensity)의 변화를 분석하였다. 이를 위해 슛돌입자의 마모현상을 contact mechanism⁽⁷⁾으로 분석하여 이를 surface-shaping system⁽⁸⁾에 접목시켜 가공표면을 예측을 하였으며, 그 결과를 바탕으로 연삭스�돌 입자의 거동 및 최적드레싱 시기를 검출하였다.

2. 광강도(light intensity)의 연삭 적용

광산란법의 기본원리는 고운 표면일수록 빛의 산란이 작아져서 반사광선들이 정반사 방향으로 집중되고, 이와 반대로 거친 표면인 경우 산란이 커져서 반사광선들이 난반사 방향으로 분산된다는 것이다. Fig. 1(a)에 광산란법의 원리를 그림으로 나타내었다.

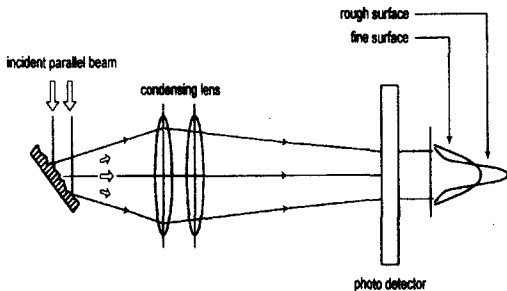
이 검출된 데이터를 바탕으로 산란패턴을 나타내며 거친 표면일수록 산란패턴의 분산으로 인하여 정규분포를 나타내고 표면이 고울수록 산란패턴이



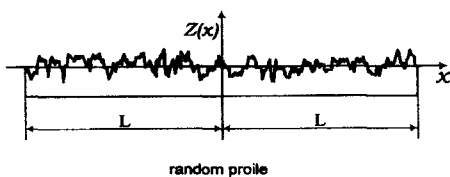
(c) Scattering intensity pattern

Fig. 1 Schematic of basic principle of light scattering method

완만한 것을 볼 수 있다. 즉, 입사광이 거친표면의 일정부분에 입사되어 반사될 때 표면돌기들에 의한 영향이 산란거동에 어떻게 반영되는가를 알 수 있다. Fig. 1(b)는 Fig. 1(a)의 광산란법의 원리를 이용하여 측정된 프로파일을 나타내고 있다. Fig. 1(c)는 Fig. 1(b)의 표면특성에 관한 정보가 제공될 때 반사각도에 따른 산란광의 강도와 거칠기 사이의 관계를 보여준다. 표면 거칠기와 광산란의 관계식은 다음과 같다.⁽⁹⁾



(a) Basic principle of light scattering method



(b) Random profile

$$I(\theta_1, \theta_2) = \rho_0^2 + \frac{\sqrt{\pi}F^2T}{2L} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{g^m}{m!\sqrt{m}} \times \exp\left(\frac{\nu_x^2 T^2}{4m}\right) \exp(-g) \quad (1)$$

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(= R_q)

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 스톨 작업면에 응용하면 입자가 마모된 면이나 연삭칩이 낀 매움을 일으킨 영역에서는 입사광이 정반사 방향으로 산란되어 광강도는 높아지게 된다. 이러한 원리에 착안하여 연삭가공중에 레이저빔을 이용한 인프로세스 측정방법으로 스톨 작업면의 상태를 감지할 수 있다. 연삭가공중 회전하는 스톨에 빔 직경이 1mm인 7mW He-Ne 레이저를 발진시키고 스톨작업면에 반사되는 산란광을 광검출기에서 입수하였다. 스톨 작업면에 입사된 빔은 스톨 작업면의 상태에 따라 각기 다른 강도 패턴을 갖고 반사되며 그 반사된 산란광을 레이저빔의 입사각과 같은 반사각을 갖는 위치에 설치된 광검출기에 의해서 신호를 입수하게 된다.⁽¹¹⁾

측정결과와 시뮬레이션에 의한 스톨작업면을 광산란 이론을 적용시켜 비교하기 위하여 식(1)을 간단히 하면 스톨작업면의 광강도는 식(6)과 같다.⁽¹²⁾ 식(6)에서 보는 바와 같이 광강도는 스톨작업면의 표면거칠기(R_q)에 따라 기하학적으로 감소함을 알 수 있다.

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

I_s : Light intensity in the specular direction

R_q : rms amplitude roughness

3. Contact mechanism과 표면가공법

3. 1 Contact mechanism

시뮬레이션을 통해 광산란법을 연삭작업면에 적용하기 위해서는 가공진행에 따른 스톨작업면의 변화를 알아야 한다. Contact Mechanism은 가공이 진행될 때 연삭 스톨과 공작물사이의 관계를 통하여 소성변형, 즉 마모현상을 분석하기위해 필요하다.

본 논문에서 연삭스톨의 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 : Wear coefficient

H_d : Indentation hardness

L : Sliding distance

P_m : Nominal pressure

3. 2 Surface-Shaping System(SS)

연삭가공의 모델링을 위하여 surface-shaping system을 이용하였다.⁽⁸⁾ SS를 이용하여 주어진 스톨입자의 형상과 스톨과 공작물간의 상대운동을 이용하여 연삭된 가공면을 구할 수 있다. SS의 기본식은 다음과 같다.

$$r_0 = B_{0,n} B_T e^4 \quad (8)$$

여기서 r_0 는 기본좌표계에서 절삭 날까지의 벡터이고, $B_{0,n}$ 과 B_T 는 각각 공구와 공작물간의 기구학적 좌표변환과 공구 좌표계에서 절삭 날까지의 기하학적 좌표변환이다. e^4 는 단위 벡터이다.

4. 시뮬레이션 결과

4. 1 광강도 I_s 와 R_q 값의 관계

각각의 연삭 횟수에 따른 광강도의 변화를 실험과 시뮬레이션을 통하여 Fig.2에 나타내었다. 시뮬레이션 상에서는 실제 연삭스톨에서 일어나는 자생작용은 고려하지 않았다.

실험결과 뿐만 아니라 시뮬레이션 결과에서 연삭 횟수에 따라서 R_q 값이 감소하는 것을 볼 수 있다. 따라서 연삭 횟수가 증가할수록 연삭스톨은 마모되거나 탈락되어 광강도는 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 실험과 시뮬레이션의 2~4 패스 사이에 광강도의 기울기가 증가하는 것을 볼 수 있는데 이것은 연삭스톨이 마모되거나 탈락되었음을 보여주고 있다. 또한 마모가 계속 진행되면 거의 일정한 값을 나타내며, 이때 드레싱이 필요하다고 생각된다.

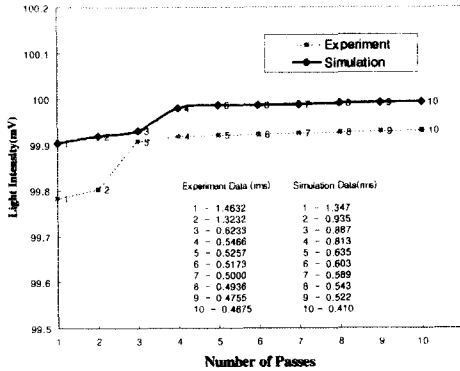


Fig. 2 Relationship between rms and light scattering intensity by experiment and simulation

4.2 연삭숫돌 입자의 시뮬레이션

3.1 절에서 설명한 바와 같이 연삭숫돌의 입자는 사각뿔이라 가정하였다. 기존의 연구에서는 연삭숫돌 입자를 반구로 가정하여 시뮬레이션 하였다.⁽⁷⁾ 그러나 숫돌입자는 날카로운 절삭 날을 가지므로 오히려 사각뿔이 실제 입자와 가까워질 수 있다. 사각뿔 입자에 대한 시뮬레이션은 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 사각뿔의 가로, 세로, 높이에 대한 x, y, z의 좌표값은 a, b, h의 값을 가지며 사각뿔의 모서리부분을 A~E라 명칭하였다.

사각뿔을 만들기 위한 기본 알고리즘은 직선 AE, BE범위 안에 표면이 생성되고 동시에 직선 BE, CE범위 안에 표면이 생성되어야 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 mechanism에서 사용된 식은 입자를 반구로 가정하였을 경우, 즉 접촉부분이 원을 나타냈을 경우이므로, 이를 접촉면이 사각형인 경우에 적용하면 근사 직경 D_h 는 다음과 같다.

Fig. 4에서는 10 패스 후 연삭숫돌의 한 입자를 확대하여 보여주고 있다. 처음 입자의 형태(사

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

각뿔)와 비교해 볼 때 숫돌 입자의 마모된 것을 볼 수 있다. Fig. 5는 10 패스후의 숫돌 작업면의 시뮬레이션 결과이다. 숫돌 입자들은 불규칙 분포로 시뮬레이션 되었으며 가공이 진행됨에 따라 마모가 일어난 것을 볼 수 있다. 이때 숫돌입자 평균출량량은 약 $30\mu\text{m}$ 였으며, 이는 실제 실험에서 설정된 숫돌의 드레싱시기와 비교하여 마모에 따른 연삭숫돌의 드레싱을 결정할 수 있었다.⁽¹¹⁾

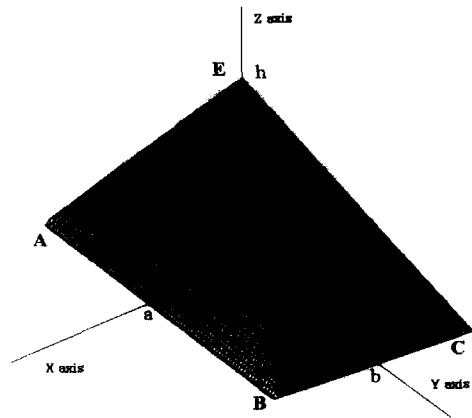


Fig. 3 Grit of grinding wheel

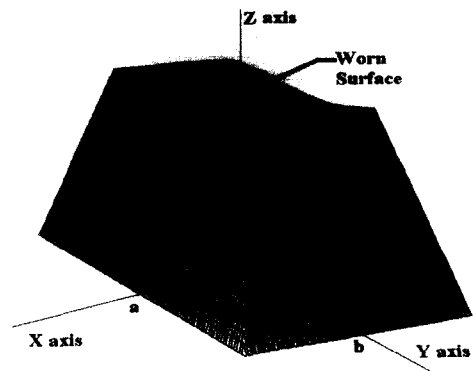


Fig. 4 Worn grit of grinding wheel after 10 passes

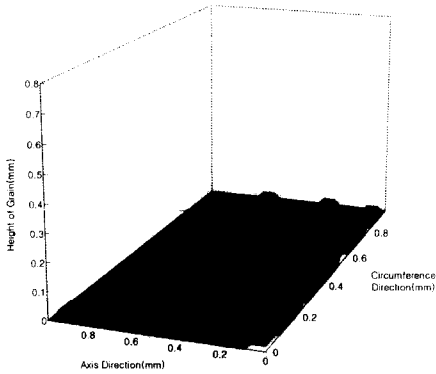


Fig. 5 Worn grits of grinding wheel after 10 passes

4. 3 연삭 가공된 공작물의 표면

Fig. 6은 마모된 슛들(Fig. 5)을 이용하여 가공된 공작물의 표면을 표면가공법을 이용하여 나타내었다. Fig. 6을 보면 가공 표면이 더 무더진 것을 볼 수 있다. 그 이유는 가공이 진행됨에 따라 연삭스uttle 입자가 마모되기 때문에 가공이 제대로 이루어지지 못함을 보여준다. 그리고 슛들입자의 마모에 따른 가공물의 형상이기 때문에 마찰력과 열 발생을 고려해 본다면 가공표면은 더욱 거칠 것으로 예상된다.

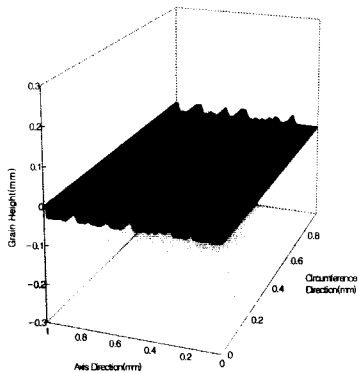


Fig. 6 Simulated surface after 10 passes

Fig. 7은 10 패스후의 공작물의 표면을 실험결과와 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 실험 결과의 R_q 값은 0.961이고 반구 모양의 입자로 가공한 표면의 R_q 값은 0.384정도이며 사각뿔의 입자로 가

공한 표면의 R_q 는 0.582였다. 반구형태의 연속스uttle 입자와 사각뿔 형태의 연속스uttle 입자로 시뮬레이션한 결과를 비교해 보면 사각뿔로 시뮬레이션한 결과가 실제 실험 결과와 더욱 근접한 것을연삭스uttle 입자와 사각뿔 형태의 알 수 있었으며, 또한 10 패스후의 2차원 프로파일을 통하여 평균 표면 거칠기 값을 측정한 결과 약 $30\mu\text{m}$ 였으며 이때 드레싱이 필요함을 알 수 있었다.

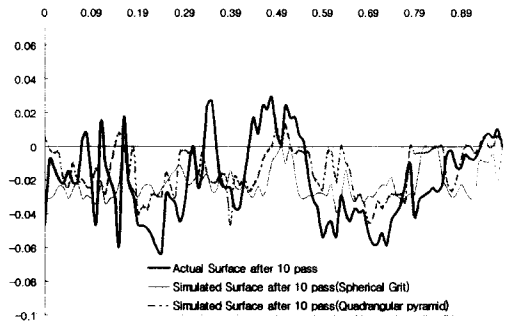


Fig. 7 Relationship between experiment and simulation after 10 passes

5. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 광산란 이론을 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 슛들면을 바탕으로 contact mechanism과 surface-shaping system을 이용하여 공작물과 연삭스uttle 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 후

에 드레싱이 필요함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Hideo 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. 김선호, 안중환, 박화영, "숫돌면의 직접관찰에 의한 드레싱 시기 최적화," 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp. 51-55, 1996.
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 Ehmann, 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.
12. Yim, D.Y. and Kim, S.W., "Optical Roughness

Measurement of Ground Surface by Light Scattering," Int. J. Machine Tools & Manufacture, Vol. 30, No. 2, pp. 283-289, 1990.