

미세입자 분사 가공의 마모 형상 모델링

박영우*(충남대학교), 이재민(충남대학교 대학원), 고태조(영남대 기계공학부)

Erosion Profile Modeling of Micro Abrasive Jet Machining

Y. W. Park, J. M. Lee(Mechatronics Eng., CNU), T. J. Ko(Mech. Eng. Dept. YNU)

ABSTRACT

Abrasive jet machining is a well-known process for patterning window glass and mirrors. The technics is now being developed for the production structure with high precision. This paper describes erosion profile modeling of micro abrasive jet machining and compares with other researcher's model.

Key Words : Abrasive jet machining(입자 분사 가공), Micro particle(미세 입자), Erosion profile(마모 형상)

1. 서론

반도체용 부품이나 마이크로 머신용 부품 등은 대부분 경취재료의 미세가공을 통하여 만들어진다. 그러므로 세라믹이나 유리 와 같은 경취재료의 미세 가공 기술이 절실히 요구되고 있지만, 이런 재료는 열적, 화학적 가공을 할 경우 변질층일 발생하는 등의 문제점이 생기게 된다. 이에 따라 미세가공을 위한 연구가 국내·외에서 활발히 이루어 지고 있는데 그 중 가공능률을 높이면서도 가공열에 의한 가공 변질층을 거의 발생시키지 않는 미세입자 분사가공이 주목받고 있다.

입자분사가공(Abrasive Jet Machining, AJM)은 고압으로 만든 가스(일반적으로 공기)에 산화알루미늄 입자와 같은 경질의 미소입자를 주입하고 고속으로 분사함으로써 공작물에 충격을 가하여 미량씩 식각(erosion)하는 공정이다. 사용하는 입자의 평균 직경은 30 μ m 정도이며, 큰 운동 에너지를 전달할 수 있기 때문에 세라믹, 유리, 티타늄 등 가공이 어려운 재료의 가공에 많이 도입되고 있다. 이러한 입자분사가공 기술을 마이크로 구조물의 제작에 적용하려는 기술이 미세입자 분사가공이다. 최근에 새로운 형태의 평면 디스플레이가 개발됨에 따라 취성재료

의 기계적인 부식 방법으로 각광을 받고 있으며 선진국에서는 이미 1990년대 후반 이후 체계적인 실험적 및 이론적 연구를 통하여 다양한 분야에 미세입자 분사가공을 적용할 수 있는 기술을 확보하는 등 관심이 집중되고 있다⁽¹⁾⁻⁽²⁾. 이에 따라, 미세입자 분사가공의 메커니즘에 대한 보다 명확한 이해, 이를 통한 보다 실제에 가까운 모델링 등을 요구하고 있다.

이에 대한 연구는 입자의 충돌에 의해 발생하는 크랙으로 인해 마모가 발생하기 때문에 크랙의 발생에 대해 먼저 알아야 한다. 따라서 입자와 모재의 특성에 따라 발생하는 크랙의 크기를 결정할 마찰 등의 Indentation Model을 토대로 연구가 실행되었다.⁽³⁾ 그 중 대표적인 것이 Slikerveer 등이 제시한 방법⁽²⁾인데 이는 시간당 분사되는 입자의 양을 이용하여 입자 전체가 가지고 있는 에너지를 계산하고, 계산된 전체 에너지를 이용하여 마모되는 양을 예측하는 것이다. 하지만 이런 방법은 각각의 입자에 의한 변형을 계산하는 것이 아니고 전체의 입자가 가진 에너지를 이용하여 계산이 이루어지기 때문에 각각의 입자에 의한 변형을 모두 감안할 수 없고, 그로 인해 보다 정확한 마모 형상의 예측에는 한계가 있는 것이 사실이었다.

그러므로 본 연구에서는 기존의 방법과는 달리 하나의 입자가 모재에 충돌하여 생기는 변형의 형상을 예측하고, 그에 따라 변형이 된 형상의 좌표를 기억하여, 다음 입자가 충돌할 때 생기는 변형을 계속 누적시키는 방법을 제안하고, 얻어진 결과를 기존의 시뮬레이션 모델 및 실제 실험치와 비교하여 보았다.

2. Modeling

2.1 Single Impact Case

입자 분사 가공은 에너지를 가지고 있는 미세 입자의 분사를 통하여 크랙을 생성하고, 생성된 크랙이 마모를 발생시킨다는 점을 이용하여 가공하는 방법이다. 따라서 마모를 결정하는 크랙의 길이를 알아야 한다. 본 연구에서도 크랙의 길이를 예측하는 것은 기존의 다른 많은 연구들과 마찬가지로 마찰의 Indentation Model을 이용하였다. 실제 취성재료의 특성에 따르면 어떤 충격이 가해졌을 때 Radial Crack과 Lateral Crack의 2가지 Crack이 발생하지만 Radial Crack의 경우에는 마모량에 직접적인 영향을 미치지 않기 때문에 Radial Crack의 크기는 고려하지 않았다. 마찰의 Indentation Model에서 제시한 Lateral Crack의 길이는 아래의 식(1)과 (2)를 이용하여 식(3)과 같은 식으로 구해진다.

$$P = [2\pi \sqrt{2} \sqrt{H} (\tan\theta) \rho_p]^{\frac{2}{3}} \left(\frac{D}{2}\right)^2 v^{\frac{4}{3}} \quad (1)$$

$$P_r/P_{r0} = 1 - u_r/u_{r0} \quad (2)$$

$$C_L = C_l (\cot\theta)^{\frac{5}{6}} \left(\frac{E}{H}\right)^{\frac{1}{4}} (KH)^{-\frac{1}{4}} P^{\frac{5}{8}} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{1}{4}}\right]$$

$$\text{단, } P_0 = \frac{1200}{0.75^2} (\tan\theta)^{-\frac{2}{3}} \frac{E}{H} \left(\frac{K}{H}\right)^3$$

$$C_l = \sqrt{0.025 / (0.75)^2} \quad (3)$$

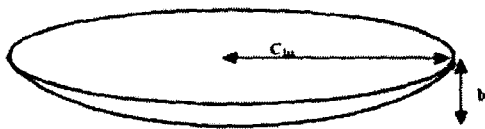


Fig. 1 Erosion profile of single impact

이 방법을 이용하여 구한 Lateral Crack의 길이와 소성변형 영역의 깊이를 이용하여 하나의 입자가 충돌하였을 경우에 발생하는 마모의 형태를 예측한다.

분사된 입자에 의해 발생한 마모가 반구형이라 가정하면 하나의 입자가 충돌하였을 때의 마모는 Fig. 1과 같은 형태를 갖게 된다.

이런 방법으로 변형의 profile을 일정한 식으로

나타내는 것이 가능하다. 변형을 가로방향을 x축으로 깊이방향을 z축으로 하는 2차원의 식으로 나타내면 식(4)와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{x^2}{C_l^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad (4)$$

하지만 이런 형태는 입자가 수직으로 분사될 경우로 국한된다. 그러므로 입자가 임의의 입사각을 가지고 있을 경우에 대한 보정이 필요하다. 입자가 수직이 아닌 임의의 입사각 θ 를 가지고 있을 경우 이론적으로 그 변화의 형태는 Fig. 2와 같이 제안된다. 즉, 모재를 2D로 보았을 때 길이 방향을 x축, 깊이 방향을 z축이라 하면 x성분의 값이 $x + z \tan\theta$ 와 같이 변하는 것이다⁽⁵⁾.

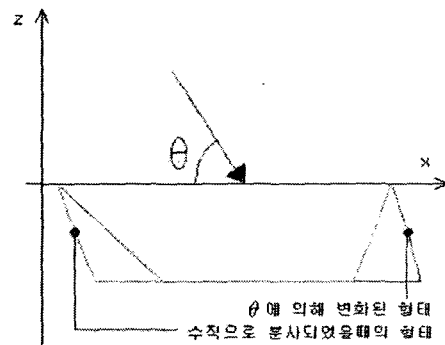


Fig. 2 Profile at impact angle θ
: ($x \rightarrow x + z \tan\theta$)

이를 앞에 언급한 변형의 식인 식(4)에 대입하면 아래와 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\frac{(x + z \tan\theta)^2}{C_l^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad (5)$$

이렇게 얻은 식 (5)를 이용하여, 수직으로 입자가 분사되는 경우뿐 아니라 임의의 입사각을 가지고 분사되는 변형의 형태를 예측할 수 있다. 그러므로 식 (5)를 다양한 각도로 분사되는 입자의 변화를 나타낼 수 있는 일반식으로 사용할 수 있다.

2.2 Multi Impact Case

2.1에서 얻은 일반식을 이용하여 다양한 각도로 분사되는 하나의 입자에 의한 변형을 예측할 수는 있지만 많은 수의 입자들이 분사되는 경우는 예측할 수 없다. 다량의 입자가 분사되는 가공의 경우에 대한 연구는 다양한 방법으로 수행되어 왔는데 서론에도 언급한 것과 같이 그 중 Slikerveer 등이 제안한 방법이 대표적인 것으로, 이런 방법들은 일정 시간

에 분사되는 입자들의 에너지를 가지고 시간에 따른 마모량을 예측하는 것이 보통이었다. 하지만, 이런 방법으로 마모를 예측할 경우에는 비교적 간단하게 마모량을 예측하여, 마모의 개략적인 양과 형태를 나타낼 수는 있지만 Fig. 3에서 보는 바와 같이 정확한 마모의 형태를 예측하는 것은 쉽지 않을 것이다. 따라서 기존의 방법은 마모의 형태가 아닌 마모량이나 전체의 깊이 등을 기준으로 결과를 비교하고 있다. 물론 이런 방법은 쉽게 마모량을 예측할 수는 있겠지만, 보다 정밀한 마모 형태 변화의 예측을 필요로 하는 가공의 경우에는 적합하지 않을 것이다.

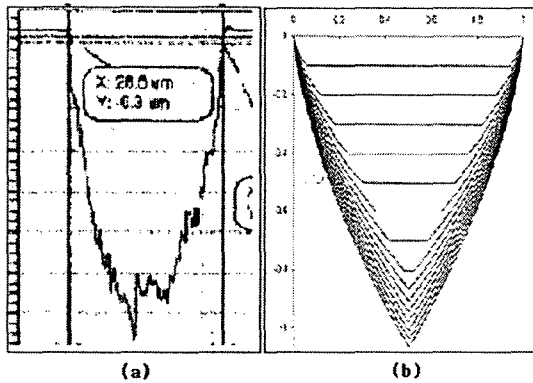


Fig. 3 (a) Experimental data
(b) Slikerveer's Simulation data

앞에서 언급한 단점의 보완을 위하여 본 연구에서 사용한 방법은 각각의 입자에 의한 변형을 누적시켜 전체 변형의 형태를 예측한 것이다. 즉, 하나의 입자가 충돌하여 생기는 마모의 형태를 저장해 두고 다음 입자가 충돌할 때에는 그 변형된 형태에 다시 마모를 추가하는 방법인 것이다. (n-1)번째 입자까지의 충돌에 의한 마모를 z_{n-1} 이라 하고, (n)번째 입자에 의한 변형량을 Δz 라 할때 (n)번째 입자까지의 충돌로 인한 전체 변형량은 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$z_n = z_{n-1} + \Delta z \quad (6)$$

이럴 경우 입자들이 수직으로 분사된다고 가정하더라도 모재에 충돌할 때에는 이미 변형된 모재이기 때문에 입자와 모재가 이루는 각은 수직이 아닌 변형된 형태에 의한 입사각이 될 것이다. 그러므로 입자가 충돌되는 점에서 변형된 모재의 profile을 미분하여 식(7)과 같이 입자와 모재가 이루는 각을 예측하였다.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\delta z}{\delta x} \quad (7)$$

이렇게 얻은 입사각을 식(5)에 대입하여 하나의 입자가 충돌하였을 때의 변형을 예측하고, 그 변형

을 다시 식 (6)에 대입하여 변형을 누적시켰다.

즉, 입자가 충돌한 지점의 x 좌표를 p라 하면 x가 $(p - C_i)$ 에서 $(p + C_i)$ 인 구간의 z값을 식(6)과 (8)을 이용하여 변화시키는 것이다.

$$\Delta z : \frac{(x + \Delta z \tan \theta)^2}{C_i^2} + \frac{\Delta z^2}{b^2} = 1 \quad (8)$$

이와 같이 각 입자마다의 충돌에 의한 변형을 누적시켜 마모의 형태를 예측하는 방법은 그 계산이 기존의 방법에 비해 복잡하지만, 입자 하나 하나에 의한 변형을 지속적으로 계산하여 마모의 형태를 예측하는 것이기 때문에 전체 입자가 가지고 있는 에너지를 이용하여 마모의 형태를 예측하는 방법보다 실제 마모 형태와 유사한 결과를 얻을 수 있다.

3. 결과

3.1 Simulation

2절에서 Modeling한 방법의 검증을 위하여 Simulation을 수행하였다. 비교를 위하여 기존에 다른 연구에서 수행한 Simulation과 같은 조건을 이용하였다⁽⁶⁾.

Table 1 Condition for Simulation

	Parameter	Value
substrate (glass)	E(Pa)	7.64×10^{10}
	H(Pa)	5.55×10^9
	$K_c(\text{Pa m}^{1/2})$	8.5×10^5
powder (Al_2O_3)	$\rho(\text{kg/m}^3)$	3850
	Diameter(m)	3×10^{-5}
	velocity(m/s)	200
	number of particle	100000

분사되는 입자들의 분포는 가우스 분포의 조합을 이용하여 예측하였다. x축을 미소 구간으로 나누어 각 구간별로 가우스 분포를 따라 입자들이 분사된다고 가정한 후, 각각의 구간에서의 입자들의 분포를 모두 합하여 예측하는 방법으로, 분포의 형태는 Fig. 4에 제시한 히스토그램과 같다.

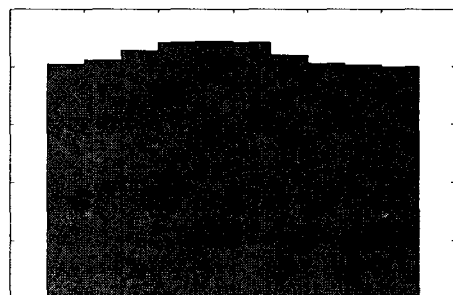


Fig. 4 Distribution of particles

3.2 결과 비교

우선 기존의 Simulation은 마모의 형태를 자세히 나타내지 않았기 때문에 마모 형태의 측면에서 살펴 보면, Fig. 5 와 같이 본 연구의 Simulation이 실제 마모 형태에 근접해 있는 것을 확인할 수 있다.

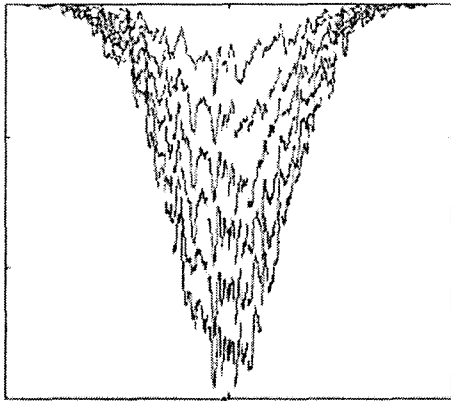


Fig. 5 Simulation result

실제 실험에서의 마모 형태와 비교해보면, 양쪽 끝단에서 약간의 차이가 있는 것을 확인할 수 있지만, 이것은 Simulation의 오차가 아니고 마스크에 대한 부분을 고려하지 않았기 때문에 마스크를 두고 실험을 수행한 실험치보다 양 끝단 쪽에 조금 더 마모가 일어난 것이다.

기존의 Simulation에서는 마모 형태에 대해서는 거의 언급하지 않고 있고, 마모율의 측면에서만 검증을 수행하고 있기 때문에 마모 형태의 직접적인 비교는 쉽지 않다. 다른 연구에서 수행한 실험값과의 직접적인 비교 또한 연구 수행 과정에서 사용한 parameter의 종류가 다르기 때문에 쉽지 않다.

하지만 Slikkerveer 등의 Simulation Model의 결과 값과 비교한 결과, erosion rate(마모율, 마모된 모재의 질량과 분사된 입자들의 질량비)는 Table 2와 같이 유사하게 나타남을 알 수 있었다.

Table 2 Result and Compare

Description	ϵ (%)
Erosion experiments ⁽⁶⁾	5.06
Slikkerveer's Simulation after 1000000 impacts ⁽⁶⁾	5.11
Simulation after 1000000 impacts	5.36

4. 결론

미세입자 분사가공의 마모 형태를 새로운 방법으로 모델링하였다. 기존의 방법들과는 달리 각 입자들의 마모의 형태를 누적시켜 전체 마모 형태를 예측하였다. 대체적인 결과들은 기존의 방법들과 유사하지만 마모의 형태는 실제 가공물에 보다 근접한

Simulation 결과를 얻을 수 있었다. 실제로 실험을 수행하지 못했기 때문에 정확한 결과의 비교를 할 수 없었던 것은 미흡한 점으로 남지만 현재까지 수행된 다른 연구들과의 비교를 통하여 연구의 결과를 검증함으로써 만족스러운 결과가 도출되었음을 확인할 수 있었다. 추후에 실제 실험을 통한 추가적인 검증 작업을 거쳐 수정 또는 보완해야 할 사항에 대하여 검토하고, 3차원 모델로의 확장에 관한 연구를 수행할 것이다. 또한 마스크를 적용한 상태의 연구 및 다양한 각도에서 분사되는 입자들의 경우에 대한 연구를 추가적으로 수행하여, 다양한 조건에서 입자를 분사할 때 실제 가공 결과와 유사한 결과를 도출할 수 있는 Erosion profile model을 개발할 수 있을 것이다.

후기

본 연구는 한국 과학 재단 목적 기초 연구(R01-2004-000-10556-0) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. P. J. Slikkerveer, P. C. B. Bouten, F. H. in't Veld, H. Scholten, "Erosion and Damage by Sharp Particles," *Wear*, Vol. 217, pp. 237-250, 1998.
2. P. J. Slikkerveer, F. H. in't Veld "Model for patterned erosion," *Wear*, Vol. 233-235, pp. 377-386, 1999
3. D. B. Marshall, B. R. Lawn, and A. G. Evans "Elastic/Plastic Indentation Damage in Ceramics : The Lateral Crack System," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 65(1), pp. 64-77, 1980.
4. P. J. Slikkerveer, F. H. in't Veld "High quality mechanical etching of brittle materials by powder blasting," *Sensors and Actuators*, Vol. 85, pp. 296-303, 2000.
5. E. Belloy, A. Sayah, M. A. M. Gijs, "Oblique powder blasting for three-dimensional micromachining of brittle materials," *Sensors and Actuators A*, Vol. 92, pp. 358-363, 2001.
6. M. A. Verspui, G. de With, A. Corbijn, P. J. Slikkerveer, "Simulation model for the erosion of brittle materials," *Wear*, 233-235, pp. 436-443, 1999.
7. 최중순, 박경호, 박동삼, "Micro Abrasive Jet Machining을 이용한 유리의 미세 홈 가공," 한국정밀공학회지, 제18권, 제10호, pp. 178-183, 2001