

미세입자 분사 가공에서 2 차 충돌의 영향

이재민*(충남대 대학원 메카트로닉스공학과), 박영우(충남대 메카트로닉스공학과), 고태조(영남대 기계공학부)

The Effect of the Second Impact for Abrasive Jet Micromachining

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

ABSTRACT

Abrasive Jet Micromachining (AJM) is a process that uses high pressure air with micron-sized particles to erode a substrate. It has been considered as the most economic and appropriate technique to pattern glass surfaces for the flat panel applications. To accelerate the industrialization of AJM, it is necessary to understand the erosion mechanisms thoroughly. Thus, this paper introduces a new method to model the erosion mechanism in AJM. The model is developed by using the concept of the accumulation of the microdeformation caused by each particle. And this paper proposes the model added the effects of second impact. The developed model is used to simulate the erosion profile, and is compared with the model considered only first impact. It can be concluded that the proposed model predicts the erosion profile more accurately.

Key Words : Abrasive Jet Micromachining (미세입자 분사 가공), Erosion Profile (마모 형상), Micro-deformation (미소 변형), Second Impact (2 차 충돌)

1. 서론

최근 LCD 나 PDP TV 등이 널리 보급됨에 따라, 플랫 패널 등의 제작에 대한 수요가 증가하였다. 이로 인하여, 유리와 같은 경질의 재료 표면을 패터닝하는 기술에 대한 관심 또한 증가하는 추세이다. 미세입자분사가공(AJM)은 가장 경제적인 패터닝 방법 중에 하나로 해외에서는 각광을 받고 있지만, 국내에서는 마모의 형태를 예측하거나 가상 모델을 만드는 등에 대한 연구가 아직 많이 미진한 상태이다. 따라서 국내의 AJM 기술의 발전 및 산업화를 위하여 AJM 에 의한 마모 메카니즘을 이해하는 것은 매우 중요하다. 마모 메카니즘을 이해하고, 마모의 형태나 마모율 등을 모델링하여 사용자가 가공 조건을 설계하기 용이하게 하여야 할 것이다.

본 논문에서는 시간당 분사되는 입자의 양을 이용하여 시간당 모체에 가해지는 에너지를 계산하고, 이를 이용하여 마모 형상의 예측을 하는 기존의 방법보다 좀 더 정밀한 마모의 예측을 가능하게 하는 방법으로 하나의 입자가 모체에

충돌하여 생기는 변형의 형상을 예측하고, 그에 따라 변형이 된 형상의 좌표를 기억하여, 다음 입자가 충돌할 때 생기는 변형을 계속 누적시켜 마모의 형태를 예측하는 방법을 소개하고, 이와 같은 방법에서 중요한 요소 중에 하나인 입자의 2 차 충돌의 영향에 대하여 분석하였다.

입자가 모체에 1 차 충돌을 일으킨 이후 입자 자체는 물론이고, 입자가 가지고 있는 에너지 또한 그대로 소멸되는 것이 아니기 때문에 이후의 충돌로 인하여 모체에 변형이 일어날 수 있다. 2 차 이후의 충돌에서는 에너지가 많이 감소하여 마모에 영향을 미치는 에너지의 크기에 미치지 못할 수도 있으나, 비교적 에너지의 감소가 적은 2 차 충돌의 경우에는 마모에 영향을 미칠 가능성을 가지고 있다. 감소된 에너지를 가진 입자는 Fig. 1 과 같이 모체의 표면 조도에 영향을 미칠 수 있고, 또한 1 차 충돌 이후 입자의 입사각이 변화함에 따라 Fig. 2 에서 보는 것과 같이 모체의 가운데 부분에 더 많은 마모를 일으킬 수 있다.

따라서 본 논문에서는 입자가 모체에 1 차 충돌함에 따른 2 차 충돌시의 입사각 변화와

에너지 감소 및 마모 형태의 변형에 대하여 분석하고 이를 모델링 하여 간단히 시뮬레이션함으로써 1차 충돌만을 고려한 모델과 비교하였다.

2. 2차 충돌을 감안하지 않은 모델링

2.1 하나의 입자에 의한 변형

하나의 입자가 충돌하는 것에 의한 변형은 반구형으로 정의되고, 반구형의 직경방향 길이는 크랙의 길이와 같고, 깊이는 소성변형 영역의 깊이와 같다. 그렇기 때문에, 마모의 예측을 위해 우선 마모를 결정하는 크랙의 길이를 알아야 한다. 크랙의 길이를 알기 위해 분사된 입자에 의해 모재에 가해지는 부하 P 를 알아야 하는데 이는 식 (1)과 같이 정리된다.

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

이 식에서 H , ρ_p , D , v 는 각각 입자의 hardness, 밀도, 직경, 속도이다.

Radial Crack은 강도의 변화에만 영향을 미치게 되므로 Radial Crack은 고려하지 않았고, 마모에 직접적인 영향을 미치는 Lateral Crack만을 고려하였는데, 크랙의 길이 C_L 은 마찰 등이 제안한 모델을 따르고, 그 값은 식 (2)와 같다.

$$C_L = \sqrt{\frac{0.025}{(0.75)^2} (\cot\phi)^5 \left(\frac{E}{H}\right)^4 (KH)^{1/4} P^{5/8} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P}\right)^4\right]} \quad (2)$$

$$\text{(where, } P_0 = \frac{1200}{0.75^2} (\tan\phi)^{2/3} \left(\frac{E}{H}\right) \left(\frac{K}{H}\right)^3 \text{)}$$

소성변형 영역의 깊이 b 역시 마찰 등이 제안한 식을 사용하였고, 그 식은 식 (3)과 같다.

$$b = \left(\frac{E}{H}\right)^{1/2} (\cot\phi)^{1/3} \left(\frac{P}{H}\right)^{1/2} \quad (3)$$

식 (2)와 (3)에서 P_0 는 임계압력, E , H , K 는 각각 모재의 Young's modulus, hardness, fracture toughness이다.

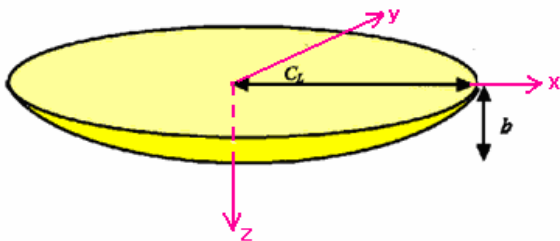


Fig. 1 Micro-deformation of single impact

식 (2), (3)을 이용하여 3차원의 변형 형태를 Fig. 1 과 같이 예측할 수 있다. 모델링의 편의성을 위해 이와 같은 변형의 형태를 2 차원으로 다시 정의하면, Fig. 2 와 같이 나타낼 수 있다.

이와 같은 형태는 x 축 방향의 반지름을 C_L 과 z 축 방향의 반지름을 b 로 하는 타원의 방정식을 이용하여 표현할 수 있는데 이는 식 (4)와 같다.

$$\frac{x^2}{C_L^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad (-C_L \leq x \leq C_L, z \leq 0) \quad (4)$$

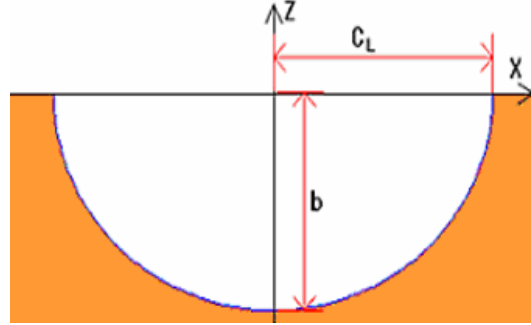


Fig. 2 Micro-deformation of the single impact in 2-D

모재가 이미 변형되어 있는 상태라면 입자를 수직으로 분사한다고 하더라도 입사각은 수직이 되지 않을 수 있다. 따라서 임의의 입사각에 의한 영향을 고려해야 하는데 이를 위하여 먼저 고려해야 할 요소는 모재가 변화함에 따라 수직으로 분사된 입자가 모재에 충돌할 때 모재와 이루는 각이다. 입자가 수직으로 분사된다고 가정할 때, 입자의 속도방향과 모재가 이루는 각은 변형된 모재의 형태에 전적으로 의존하게 된다. 그러므로, 입자가 충돌하는 지점에서의 모재의 기울기를 구해야 하는데, 이는 식 (5)와 같이 입자의 충돌지점에서의 x 축 방향의 미소변위 δx_i 와 z 축 방향의 미소변위 δz_i 의 비로 나타낼 수 있다.

$$\theta_i = \tan^{-1} \frac{\delta z_i}{\delta x_i} \quad (5)$$

이와 같은 입사각의 변화가 마모에 미치는 영향에 대해서는 이미 발표된 연구의 내용을 차용하여 식 (6)과 같이 가정하였다.

$$x \rightarrow x + \Delta z_i \tan \theta_i \quad (6)$$

식(6)을 식 (4)에 대입하면 (7)과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{(x + \Delta z_i \tan \theta_i)^2}{C_L^2} + \frac{\Delta z_i^2}{b^2} = 1 \quad (-C_L \leq x \leq C_L, z \leq 0) \quad (7)$$

2.2 다수의 입자에 의한 변형

많은 입자들이 모재에 충돌하는 경우에 대한 모델링을 위해 먼저 고려해야 할 사항은 입자들의 분포이다. 본 논문에서는 입자들의 크기와 속도는 균일하다고 가정하고, 입자들이 모재에 충돌하는 위치를 일정한 분포를 이용하여 예측하였다. 또한,

모재의 변형을 2 차원으로 모델링 하였으므로, 계산에 사용되는 입자의 수는 분사되는 입자 전체의 수와는 다르다.

계산에 사용되는 입자의 수는 Fig. 3 과 같이 예측할 수 있는데 원부분이 전체 입자의 분포를 의미하고 띠 부분이 모델링에 사용하는 입자의 분포이다. 입자의 개수는 식 (8)과 같이 구하였는데, 띠 부분의 너비를 $2C_L$ 로 정의한 것은 충돌로 인한 변형에서 x축 방향 변형 크기의 반지름이 C_L 을 넘어설 수 없으므로, 그 범위를 벗어난 위치에 충돌하는 입자들은 원의 중심선 부분, 즉 모델링 할 부분에는 영향을 미치지 않기 때문이다.

$$A_c : A_L = N_c : N_L \quad (8)$$

$$\therefore N_L = \frac{A_L}{A_c} N_c$$

식 (8)에서 A_c , N_c , A_L , N_L 은 각각 원 부분의 면적과 전체의 입자 수, 띠 부분의 면적과 입자의 수를 나타낸다.

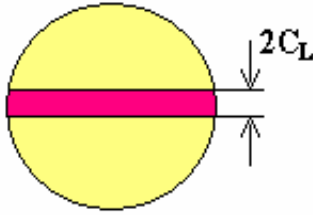


Fig. 3 Impact location of the particles

모재에 충돌하는 입자들의 위치 분포는 Fig. 4 와 같이 모재를 작게 여러 부분으로 나눈 후 각각 부분에 충돌하는 입자들이 가우스 분포를 가진다고 가정하고, 각 부분의 분포들을 모두 합하였다. 이와 같은 방법으로 분포를 계산한 결과, 비교적 실제의 모습과 유사한 경향을 띠는 것을 확인할 수 있었다.

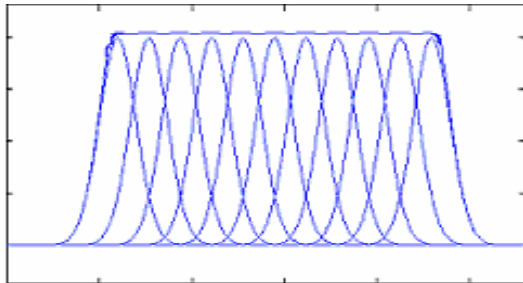


Fig. 4 Distribution concept

이와 같은 분포를 이용하여 각 입자들이 충돌할 위치를 결정하고, 각 충돌로 인한 변형들을 누적시키는데, i 번째 입자가 충돌하는 지점의 x좌표를 x_i , 입사각을 θ_i , z축 방향의 변형을 Δz_i 라

하면 하나의 입자가 충돌하여 일어나는 미세 변형은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta z_i = \frac{-2b^2 x \tan \theta_i - \sqrt{b^2 \tan^2 \theta_i + C_L^2 - x^2}}{2b^2 \tan^2 \theta_i + C_L^2} \quad (9)$$

$(x_i - C_L \leq x \leq x_i + C_L, z \leq 0)$

여기에서 Δz_i 는 변형의 범위에 있는 x값들에 각각 대응하는 값들의 배열이다.

이와 같이 구한 변형을 계속 누적시켜 전체의 변형을 예측한다. 하나의 입자가 충돌하여 생기는 마모의 형태를 저장해 두고 다음 입자가 충돌할 때에는 그 변형된 형태에 다시 마모를 추가하는 방법으로 (n-1)번째 입자까지의 충돌에 의한 마모를 z_{i-1} 이라 하고, n번째 입자에 의한 변형량을 Δz_i 라 할 때 n번째 입자까지의 충돌로 인한 전체 변형량은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$z_i = z_{i-1} + \Delta z_i$$

$$= \Delta z_1 + \Delta z_2 + \dots + \Delta z_i = \sum_{n=1}^i \Delta z_n$$

$(1 \leq i \leq \text{number of particles}) \quad (10)$

3.2 차 충돌의 영향

입자가 1 차 충돌로 인하여 소멸되는 것이 아니고, 에너지와 입사각이 변화한 채로 모재에 2 차 충돌을 일으키게 되므로, 2 차 충돌에 대한 영향을 고려하여야 한다.

입자가 1 차 충돌을 일으킨 후에는 입자가 가진 에너지가 많이 감소하게 된다. 입자의 에너지가 작아지면, 마모량이 감소하게 되고, 이는 모재의 표면 거칠기를 좋게 할 수 있다. 또한, 2 차 충돌 시에는 입자가 마모면의 중앙 부분에 더 많은 마모를 일으킬 수 있다.

먼저 입자의 에너지 변화에 대하여 생각해 보자. 입자가 가진 에너지는 대부분 1 차 충돌 시에 모재에 변형을 일으키는데 쓰인다. 하지만, 모든 에너지가 사용되지는 않으므로, 2 차 충돌 시에 일정 부분의 에너지가 모재의 변형에 사용되어진다. 에너지의 손실이 없다고 가정하면, 2 차 충돌 시에 입자가 가지는 에너지는 초기에 입자가 가지고 있던 에너지에서 1 차 충돌에서 모재에 변형을 일으키는데 사용된 에너지를 제외한 나머지가 될 것이다. 본 연구에서는 입사각이 수직이 아닐 경우 입자의 속도가 원래의 속도와 달라지는 점을 이용하여, 그로 인한 에너지의 차이를 계산하고, 식 (11)과 같이 초기에 입자가 가지고 있던 에너지에서 충돌 시에 입자가 마모에

영향을 미치는 에너지를 뺀 값으로 2 차 충돌 시에 입자가 가지는 에너지를 계산하였다.

$$E_{2nd} = E_{initial} - E_{1st} \quad (11)$$

$$= \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}m(v\cos\theta)^2$$

입자의 반사각은 1 차 충돌 시에 입자가 모재에 입사되는 각에 의해 결정되는데, 본 연구에서는 입사각과 반사각이 같다고 가정하였다. 이와 같이 입자의 반사각을 결정하고, 이를 이용하여 2 차 충돌 시에 입사각을 계산할 수 있다. 즉, 입사각과 반사각이 같다고 가정하고, 입자의 경로를 추적하여 변형된 모재의 프로파일과 비교함으로써 충돌 지점을 예측하고, 충돌 지점에서의 모재의 기울기와 반사각을 이용하여 2 차 충돌의 입사각을 결정하는 것이다.

4. 결과

1 차 충돌만을 고려한 모델과 2 차 충돌을 고려한 모델을 각각 같은 조건으로 시뮬레이션하여 그 결과를 비교하였다.

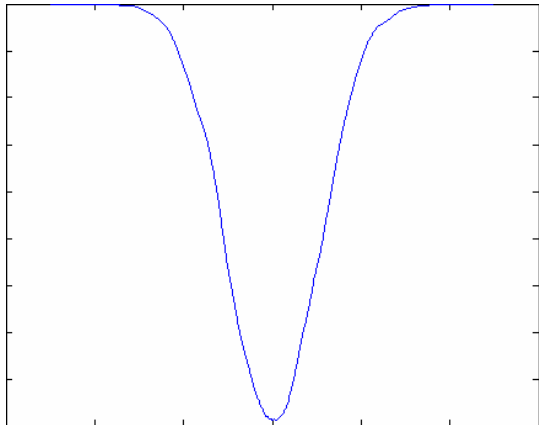


Fig. 5 Simulation result considered second impact

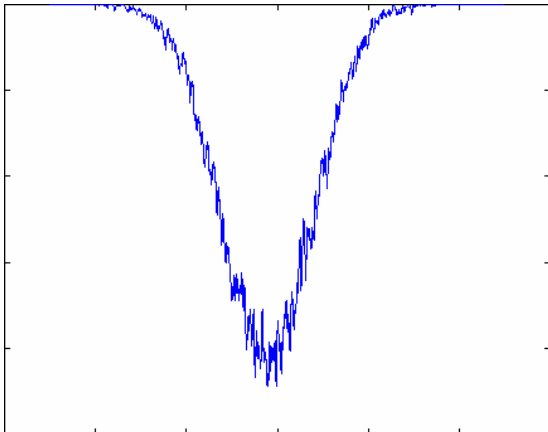


Fig. 6 Simulation result considered only first impact

Table. 1 Simulation Condition

	Parameter	Value
substrate (glass)	E(Pa)	7.64×10^{10}
	H(Pa)	5.55×10^9
	K_c (Pa m ^{1/2})	8.5×10^5
powder (Al ₂ O ₃)	ρ (kg/m ³)	3850
	Diameter(m)	3×10^{-5}
	velocity(m/s)	200
	number of particle	1000000

1 차 충돌만을 고려한 모델과 본 연구에서 2 차 충돌까지 감안하여 제안한 모델을 시뮬레이션 해 본 결과 2 차 충돌을 고려한 모델의 표면이 1 차 충돌만을 고려한 모델의 표면에 비해 매우 잘나온 것을 확인할 수 있다. 이것은 2 차 충돌 시에 입자가 가진 에너지가 작기 때문에 마모량이 적어서 표면 처리와 유사한 효과를 갖기 때문이라고 생각된다. 또한 예측했던 것과 같이 모재의 가운데 부분에 더 많은 마모를 일으키는 것을 확인할 수 있다.

이와 같은 결과는 기존의 모델이나, 다른 연구에서 수행하였던 실험의 결과와 비교해 볼 때, 1 차 충돌만을 고려한 모델보다 실제 마모 형상에 더 가까운 것을 확인할 수 있었다.

후 기

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

참고문헌

1. P. J. Slikkerveer, F. H. in't Veld "Model for patterned erosion," *Wear*, Vol. 233-235, pp. 377-386, 1999
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 최중순, 박경호, 박동삼, "Micro Abrasive Jet Machining 을 이용한 유리의 미세 홈 가공," *한국정밀공학회지*, 제 18 권, 제 10 호, pp. 178-183, 2001