

# 미세입자 분사 가공 조건에 따른 마모 시뮬레이션과 가공 실험 비교 Comparing the Erosion Simulation and the Experiment Result According to the Machining Conditions of Abrasive Jet Micromachining

\*#조승기<sup>1</sup>, 박영우<sup>1</sup>, 김경태<sup>1</sup>

\*#S. K. Cho(chosk79@cnu.ac.kr)<sup>1</sup>, Y. W. Park<sup>1</sup>, K. T. Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 BK21 메카트로닉스사업단 메카트로닉스공학과

Key words : Abrasive Jet Micromachining, Erosion Profile, Micro-deformation

## 1. 서론

정밀가공 기술 중 하나인 미세입자 분사가공(AJM)은 실리콘이나 유리 와 같은 경질재료 표면의 가공에 사용되고 있다. 이러한 기술의 사용에 있어 필수적인 부분이라 할 수 있는 정확한 가공량 제어에 대한 요구도 끊임없이 증가하고 있다. 가공의 정확성을 향상시키고 정밀한 제어를 하기 위한 마모 예측 시뮬레이션은 미세입자 분사가공 메커니즘의 정확한 이해와 구현에서 시작한다.

기존에 연구된 내용<sup>(1)-(3)</sup>으로 시뮬레이션을 구현하고, 실제 가공 실험 및 정밀측정을 통하여 시뮬레이션을 검증하고, 나아가 가공 조건에 따른 시뮬레이션과 가공실험 결과의 비교를 통하여 최적의 가공 조건을 도출을 위한 실험적 자료를 구현하는데 본 논문의 목적이 있다.

## 2. 미세입자 분사 가공 시뮬레이션

본 논문에서 제시하는 미세입자 분사가공의 시뮬레이션 모델링의 가장 큰 특징은 각 입자의 불규칙성을 모두 포함한다는 것이다. 즉, 타 논문에서는 마모의 전체 형태 구현에 초점을 맞추고 있지만, 본 논문에서는 일정한 범위에서 입자의 불규칙성을 도입하여 입자 각각의 마모량을 예측하는 방법을 사용한다. 따라서 시뮬레이션 수행시 매번 결과값이 미세하게 다르게 나타난다. 그러나 결국 실제 가공의 결과와 유사한 패턴을 나타낼 수 있다.

분사 입자 하나에 의해 만들어지는 마모 프로파일을 식 (1)로 가정하여 전체 형상에 대한 시뮬레이션<sup>(1)</sup>을 진행하였다.

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

여기서 Lateral Crack 인  $C_L$  과 소성변형 영역의 깊이,  $b$  는 시편과 분사입자들의 물성치에 의해 계산되어 최종적으로 입자 하나의 마모 프로파일은 식(2)와 같다.

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

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

여기서  $x$  는  $x$  축 방향의 미소변위를 나타내는데, 각 미소변위에 대응되는  $z$  축 방향의 변형,  $\Delta z_i$  을 구할 수 있다. 분사 입자 하나에 대응되는 미소변형을 구하여 모든 분사 입자를 계산하면 식 (3)과 같다.

$$z_i = z_{i-1} + \Delta z_i \quad (3)$$

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

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

여기까지는 1 차 충돌에 의한 마모를 나타낸다. 1 차 충돌이 발생할 때 분사입자들에 의해서 모체가 가공이 이루어진다고 할 수 있고, 2 차 충돌에 의해서 거칠기가 감소하며 소량의 가공이 이루어지게 된다. 2 차 충돌의 식은 1 차 충돌의 식과 동일하지만 모체에 충돌하는 입사각이 달라지며, 또한 에너지의 양이 감소하게 된다<sup>(2)</sup>.

$$\Delta z_i = \frac{-b^2 x \tan(\theta_i + \varepsilon_i) - b C_L \sqrt{b^2 \tan^2(\theta_i + \varepsilon_i) + C_L^2 - x^2}}{b^2 \tan^2(\theta_i + \varepsilon_i) + C_L^2} \quad (4)$$

(where,  $x_i - C_L \leq x_i \leq x_i + C_L, Z \leq 0$ )

식 (4)는 노즐에서 입자가 분사될 때 생기는 퍼짐각(spreading angle)<sup>(3)</sup>을 고려하여 나타낸 미소변형의 식이며 최종적으로 시뮬레이션에 사용되는 식이다. 여기서  $\varepsilon$ 은 퍼짐각을 나타내며, 분사 입자의 전체에 적용되며 위치에 따라 가중치가 결정된다. 따라서 노즐의 가장자리에 위치되는 분사 입자가 분사각이 최대가 되는 확률이 증가하게 된다. 이러한 분포는 입자가 분포하는 확률과 같게 된다. 즉 퍼짐각 자체도 가우시안 분포를 가진다고 할 수 있다. 각 입자의 제한된 불규칙성을 부여하게 된다.

## 3. 가공 및 측정 조건 설정

가공 실험에 사용된 미세입자분사 가공기는 미국의 CRYSTAL MARK 사의 SWAM BLASTER MV-241 이다. 입자 분사를 위한 노즐은 보론 카바이드 재질로 되어 있으며, 내경이 0.35mm 인 원형 노즐을 사용했고, 분사가공에 사용한 입자는 모든 실험에서 직경 17.5 $\mu$ m 의 알루미늄 세라믹을 사용하였다.

실험에 쓰인 시편은 가로, 세로, 두께가 각각 25.4mm, 75.6mm, 1mm 소다라임 유리이다. Table 1 은 실험 조건이다.

Table 1 Experimental conditions

SOD (stand off distance) (mm)	0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3
Pressure (kPa)	100, 200, 300, 400, 500
Blasting time (second)	5, 10, 15, 20, 25, 30
Flowrate (gr/min)	0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3

측정에 사용된 장비는 NanoSystem 사의 비접촉식 3 차원 표면형상 측정기인 NV-C1000 이다. 측정 가능 크기는 가로 세로가 0.24mm 이며, 전체 구간을 5 개로 나누어 측정 후 정합 과정을 거쳐 최종 마모 프로파일을 구현하였다.

## 4. 가공 실험 결과 분석

가공 실험 및 측정을 통하여 미세입자 분사 가공의 특징을 살펴보면 다음과 같다. 첫 번째 특징은 입자가 분사되는 압력에 따라 노즐에서 입자가 분사되면서 생성되는 퍼짐각의 변화이다.

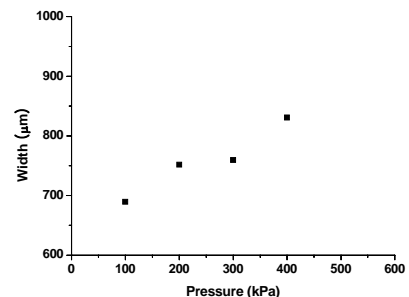


Fig. 1 Erosion width according to Pressure

Fig. 1 은 SOD, Flowrate, 분사시간이 각각 1mm, 1g/min, 10s 로 동일한 조건에서 4 번을 측정하여 평균한 값이다. 여기서 각 분사 압력에 따라서 퍼짐각이 각각, 0.1682, 0.1982, 0.2020, 0.2359rad 가 됨을 알 수 있다. 기존의 시뮬레이션에

서는 퍼짐각에 영향을 미치는 가공조건으로 SOD 만을 고려하고 있다. SOD 는 퍼짐각 자체를 변화시키는 부분은 아니지만, 시편의 마모 직경의 변화에 영향을 미친다. 그러나 실가공 결과 분사 압력에 따라 퍼짐각 자체가 변화하는 것을 알 수 있고, 이것은 시뮬레이션의 설정의 변수로 추가 적용되어야 한다.

두 번째 특징은 Fig. 2 에서 나타난 바와 같이 가공 분사 시간과 마모 깊이가 대체적으로 비례 관계에 있다는 것이다. 이것은 가공 분사 시간에 따라 마모에 관계되는 분사 입자들의 수가 비례적으로 증가하기 때문에 마모 깊이가 증가한 것으로 보인다. 이러한 결과는 압력, Flowrate 가 마모 깊이에 미치는 영향보다 상당히 크다고 할 수 있다. Fig. 2 에서는 분사 시간을 변수로 두고 나머지 조건(압력:200kPa, SOD:1mm, Flowrate:1g/min)을 동일하게 하고 두 번 가공하여 측정하였다. 동일한 가공 조건을 가진 가공에서 마모 깊이는 대체적으로 비슷하지만, 편차가 크지는 약 0.1mm 까지 나타난다.

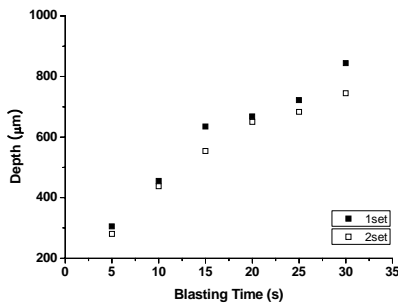


Fig. 2 Erosion depth according to blasting time

세 번째 특징으로 Flowrate 의 증가 따라서 마모 깊이가 증가하지 않고 오히려 마모 깊이가 감소하는 결과를 보였다. 이러한 현상의 원인은 Flowrate 의 증가에 따라 분사 입자들간의 충돌의 영향으로 판단되며, 추가적인 실험이 필요한 부분이라 할 수 있다. Table 2 은 가공 조건별 마모 깊이를 나타낸다.

Table 2 Erosion depth according to flowrate

Conditions	Erosion Depth
100kPa, 1mm, 1g/min, 10s	205 µm
100kPa, 1mm, 2g/min, 10s	153 µm
300kPa, 1mm, 1g/min, 10s	390 µm
300kPa, 1mm, 2g/min, 10s	259 µm

5. 시뮬레이션과 가공실험 결과 비교

기본적인 가공 변수는 시뮬레이션과 실제가공이 동일하지만 시뮬레이션에서는 분사입자의 속도를 적용하였고 실제가공에서는 분사압력으로 속도를 설정하였다. 본 논문에서는 압력으로 분사되는 입자의 속도를 측정하여 시뮬레이션상의 속도 변수로 사용하였다.

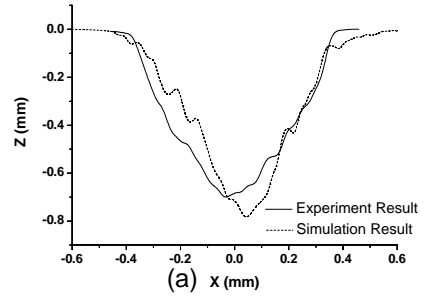
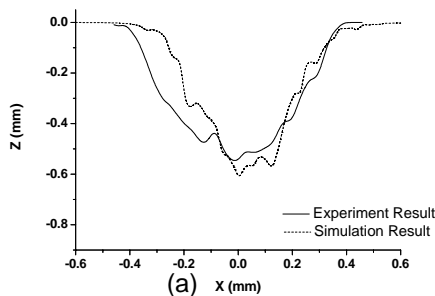


Fig. 3 Experiment and simulation result

Fig. 3 은 SOD, Flowrate 가 각각 1mm, 1g/min 이고 (a)는 압력을 200kPa, (b)는 300kPa 로 조건을 설정했다.

미세입자 분사가공이 동일한 조건으로 가공한다 하더라도 마모량에서는 오차가 발생한다. 분사가공의 특징상 수 마이크로 단위로 정확한 마모량을 제어하기는 불가능하기 때문에 그러하다. 따라서 많은 가공 샘플을 통하여 수치화된 데이터의 분석이 필요하다 할 수 있다. Fig. 3 에서 실가공 마모 최대 깊이는 200kPa 에서 약 0.55mm, 300kPa 에서 약 0.71mm 이다. 시뮬레이션 결과는 200kPa 에서 약 0.60mm, 300kPa 에서 약 0.80mm 로 나타났다.

전체적인 마모 프로파일에서는 비슷한 경향을 나타낸다. 그러나 전체 마모량은 200kPa 일때 실가공과 시뮬레이션에서는 다소 차이가 나타난다. 대체적으로 시뮬레이션보다 실가공 결과에서 마모 깊이 방향으로의 마모 보다는 깊이 방향의 수직방향으로 상당한 양의 마모가 이루어 진다고 볼 수 있다. 이러한 결과의 원인은 시뮬레이션에서 구현하고 있는 분사입자가 항상 직선으로 이동한다는 가정에 의해서 생기는 문제로 발생된다. 실가공에서는 분사입자들간의 충돌이 고압의 공기에 의한 유체 흐름에 따라서 분사입자의 이동 경로가 변하게 되며 이러한 원인으로 인하여 수직으로 분사되는 입자의 수가 줄어들며 더욱 다양한 형태의 퍼짐각을 갖는다고 할 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 미세입자 분사가공의 실제 가공을 통하여 특징을 분석하여 시뮬레이션의 메커니즘에 도입하고자 하였다. 여러 가지 가공 조건들에 따른 다양한 결과를 통하여 미세입자 분사가공의 시뮬레이션에서 반드시 고려해야 할 부분을 살펴보고 적용하기 위한 기초 연구 토대를 마련한 것에 의의가 있다. 추후에 분사가공 조건들을 시뮬레이션에 적용하여 한층 실제 가공을 예측할 수 있는 시뮬레이션 메커니즘을 구현하는 연구가 진행되어야 한다.

후기

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

참고문헌

1. 박영우, 이재민, 고태조, “미세입자 분사 가공의 마모 형상 모델링”, 2005 정밀공학회 춘계학술대회
2. 이재민, 박영우, 고태조, “ 미세입자 분사 가공에서 2 차 충돌의 영향”, 2005 정밀공학회 추계학술대회
3. 조승기, 박영우, “미세입자 분사 가공에서 2 차 충돌 입사각 변화에 따른 마모 시뮬레이션”, 2006 정밀공학회 추계학술대회