

마이크로 엔드밀링에서 공구변형 가공오차 보상에 관한 연구

손종인¹ · 송병욱^{2,*}

LG이노텍, Lens내재화TASK, 책임연구원¹
인천대학교 기계공학과^{2,*}

A Study on Compensation for tool deformation machining errors in micro end-milling

Jong-In Son¹ · Byeong-Uk Song^{2,*}

LG Innotek, Lens internalization TASK, Professional¹

Department of Mechanical Engineering, Incheon National University^{2,*}

(Received October 04, 2023 / Revised December 07, 2023 / Accepted December 31, 2023)

Abstract: In this study, we introduce research aimed at minimizing machining errors without compromising productivity by compensating for the machining errors caused by tool deformation. Our approach experimentally establishes the direct correlation between cutting depth and machining error, and creates predictive models using mathematical functions. This method allows for the prediction of compensated cutting depths to obtain the desired cutting profiles, thereby maximizing the compensation of machining errors in the cutting process.

Key Words: Micro End-milling, Compensation, Tool Deformation, Machining Errors, Depth of cut

1. 서론

절삭가공이란 절삭공구를 활용해 불필요한 부분을 제거하여 원하는 형상을 가공하는 방식을 말한다. 특히 마이크로 엔드밀링은 다양한 부품의 고집적화, 최소화 등의 산업전반의 요구에 따라 기존의 절삭가공과 더불어 중요성이 빠르게 대두되고 있다.

매크로나 마이크로 스케일 절삭가공과 마찬가지로 가공속도나 깊이 등 절삭 조건에 따라 생산성, 품질 등이 좌우되므로 최적의 절삭 조건을 설정하는 일은 절삭가공 공정에서 무엇보다 중요하다. 절삭조건 중 절삭깊이는 절삭가공이하는 물리적 현상을 지배하는 중요한 요인으로 절삭력과 가공정밀도, 생산성 등 가공품질과 밀접한 관련이 있다.

이들 중 공구변형은 과도한 절삭력에 의하여 발생하며, 가공오차를 발생시키는 중요한 요인이다. 과도한 절삭력은 이송속도 혹은 재료제거율에 비해

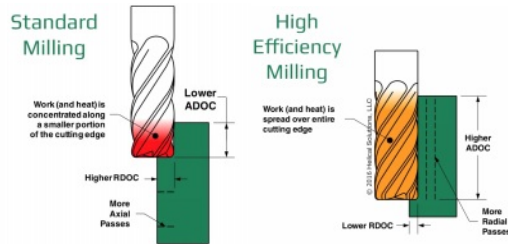
하여 절삭가공의 생산성을 개선하기 위한 노력을 방해하는 주요 요인이 된다. 이를 피하기 위하여 재료제거율을 낮추는 방향으로 절삭가공조건을 조정할 경우 절삭력을 줄일 수는 있겠지만 생산성의 저하를 피하기 어렵다.

마이크로 엔드밀링에서는 절삭가공조건이 가공 생산성의 주요인자가 된다. 절삭깊이는 매우 중요한 가공조건중의 하나이다. 평엔드밀의 경우 축방향 절삭깊이 A_d (Axial Depth of Cut)와 반경방향 절삭깊이 R_d (Radial Depth of Cut)가 정의되는데, 이들의 적절한 조절이 절삭가공의 효율에 깊은 관계가 있다. Fig. 1은 이 두 절삭깊이와 절삭가공 효율과의 관계를 보여 준다. Fig. 1(a)에서는 A_d 에 비하여 상대적으로 R_d 가 크다. 이럴 경우의 절삭가공에서 공구의 국부적으로 가공열이 집중되어 공구의 수명이 저하될 수 있다. 이와 반대로 Fig. 1(b)에서는 R_d 는 작게 가공하면서 A_d 를 상대적으로 더 적용할 경우 공구에서 발생하는 가공열이 분산되면서 고효율의 절삭가공을 수행할 수 있다. Fig. 1는 기존의 엔드밀링에 대한 설명이지만 마이크로 엔드밀링도 마찬가지로의

† 교신저자: mempisto8610@naver.com

* 본 논문에 대한 저작권은 저자들에게 있으며 CC BY-NC-SA를 만족하는 조건으로 이용할 수 있습니다.

현상이 발생한다.



(a) 기존 절삭가공 (b) 고효율 절삭가공

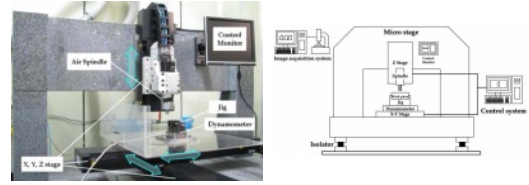
Fig. 1 Depth of cut and cutting process efficiency

본 연구에서는 고효율의 마이크로 엔드밀링을 지향하면서 정밀절삭가공의 핵심이 될 수 있는 공구변형의 문제를 해결하기 위하여 공구변형에 의하여 발생하는 가공오차를 보상하여 생산성의 저하 없이 가공오차를 최소화하기 위한 연구를 수행하였고 이를 소개하고자 한다.

기존의 연구⁵⁾는 절삭력 모델연구를 통한 절삭력 예측⁶⁾, 공구변형량 예측⁷⁻⁹⁾, 가공오차 예측¹⁰⁾ 등을 통하여 가공오차 보상을 위한 공구궤적의 보상 등의 일련의 과정을 생략하고, 절삭깊이와 가공오차의 직접적인 상관관계를 실험적으로 규명하고 수학적인 함수로 예측모델을 만들어 원하는 절삭 프로파일을 얻을 수 있는 보상된 절삭깊이를 예측하는 방법으로 절삭가공오차를 최대한 보상하는 방법론을 제시한다.

2. 마이크로 엔드밀링 시스템의 구성

마이크로 엔드밀링 시스템은 일반적으로 두 가지 종류로 나뉜다. 첫 째로 전체 시스템이 마이크로 스케일로 작게 설계 및 제작되는 경우이다. 이 시스템은 가공물의 스케일도 중요하지만 시스템 자체를 마이크로 스케일과 어울리게 작게 제작하는 경우이다. 두 번째 방식은 가공물의 가공스케일이 마이크로이며 이를 구현하기 위한 시스템의 스케일에 제한을 두지 않는 경우이다. 이런 방식은 가공물의 전체스케일은 상대적으로 크지만 가공패턴이나 형상이 마이크로 스케일로 정밀하게 가공될 경우 요구되는 시스템의 형태이다. 본 연구에서는 두 번째 방식의 마이크로 엔드밀링 시스템을 구성하고 연구에 사용하였다.



(a) 마이크로 엔드밀링 시스템 (b) 시스템의 구성도

Fig. 2 Micro end-milling system

Table 1 Specification of micro end-milling system

Classification	Specification
Traveling range	X, Y-axis : 600 mm, Z-axis : 200 mm
Motion resolution	X, Y, Z-axis : 0.02 μ m
Accuracy	X, Y-axis : $\pm 3.0 \mu$ m, Z-axis : $\pm 1.7 \mu$ m
Repeatability	X, Y, Z-axis : 0.2 μ m
Max. velocity	X, Y-axis : 200 mm/s, Z-axis : 100 mm/s
Rotational speed	Max. 100,000 RPM
Spindle run-out	Max. 0.6 μ m
Static radial load	Min. 6 kgf
Workpiece weight	Max. 45 kgf
Lubrication	Dry cutting

Fig. 2는 본 연구에서 사용된 마이크로 엔드밀링 시스템을 보여 준다. 앞서 언급된 두 번째 방식의 대면적 가공이 가능한 마이크로 엔드밀링 시스템으로 전체적인 사양은 Table 1에 나타나 있다. 전체 구조는 강성을 구현하기 위하여 석정반을 가공하여 문형방식의 구조를 취하고 있다. X, Y, Z축이 600 × 600 × 200 mm의 최대 스트로크를 가지고 있으며, 공압 베어링 방식의 고속 스피들이 Z축에 장착되어 있다. 전체시스템은 공압으로 작동되는 진동흡수 장치(Isolator)가 외부진동을 막아준다. 절삭력의 실시간 측정을 위하여 공구동력계를 장착하였다. Fig. 2(a)는 마이크로 엔드밀링 시스템의 설명이 추가된 근접사진이고, Fig. 2(b)는 본 시스템의 구성도를 보여준다.

3. 마이크로 엔드밀링 실험연구

3.1. 슬롯과 윤곽가공의 기초실험

마이크로 엔드밀링에서 발생하는 공구변형에 의한 가공오차를 실험적으로 고찰하기 위하여 절삭시편을 가공하고 전자주사현미경(SEM) 사진을 통하여 가공오차를 분석하는 기초실험을 수행하였다. Fig. 3은 실

험에서 사용된 마이크로 엔드밀의 형상을 보여준다.

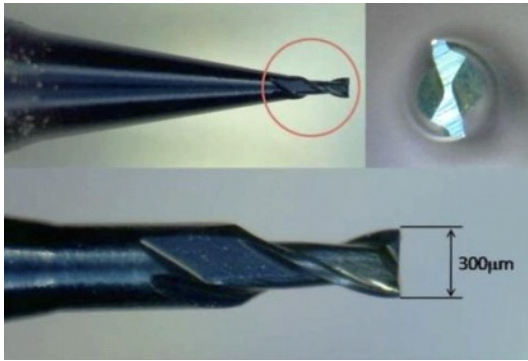


Fig. 3 Shape of used micro end-mill

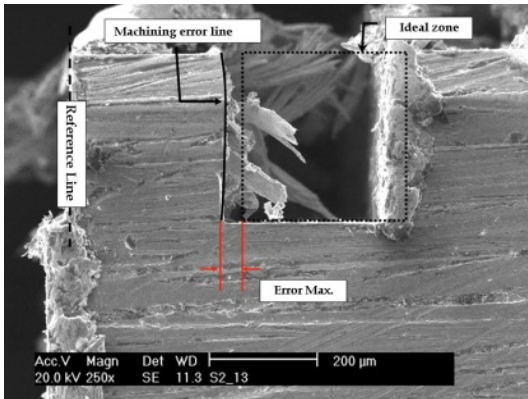


Fig. 4 Basic test of micro slot end-milling

Fig. 4는 $A_d = 300 \mu\text{m}$, 이송속도 (Feedrate) $F_D = 80 \text{ mm/min}$ 모재는 6/4 황동을 슬롯가공한 결과이다. 기준면(Reference Line)을 먼저 가공하고 이상적인 슬롯(Ideal Zone)은 $300 \times 300 \mu\text{m}$ 크기의 정사각형 형태이나, 실제 슬롯은 좌측으로 치우쳐 있는 가공 오차면(Machining Error Line)으로 가공되었다. 공구 변형의 변동을 통하여 정사각형의 형상이 아니고, 밑단에 최대오차가 발생하는 형상으로 슬롯가공이 이루어졌다.

Fig. 5는 $A_d = 500 \mu\text{m}$, $R_d = 170 \mu\text{m}$, 이송속도 $F_D = 200 \text{ mm/min}$ 일 경우 윤곽가공 기초 실험 결과를 보여준다. 윤곽가공은 상대적으로 전체적인 절삭깊이가 적기 때문에 이송속도 F_D 를 상향조정하여 기초 실험을 수행하였다. 이 때에 마찬가지로 우측으로 기울어지는 가공오차가 관찰되었다.

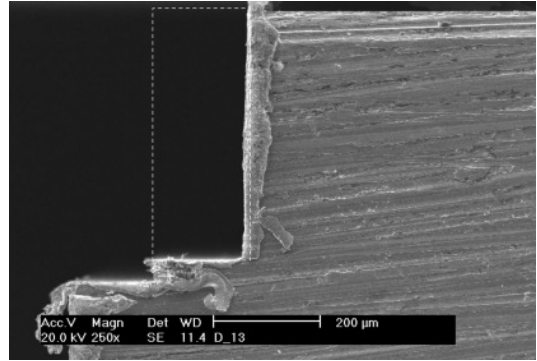


Fig. 5 Basic test of micro side end-milling

윤곽가공에서 오차보상을 위한 공구위치 혹은 공구경로의 수정을 적용할 경우 절삭깊이가 변동하고 이에 따라 절삭력이 변동하며 공구변형도 변화를 일으킨다. 그러나 슬롯가공은 공구의 절삭날부가 완전히 모재에 절삭가공을 수행하게 되어 R_d 값이 절삭날부의 직경과 동일하게 되고 공구변형이 발생하더라도 R_d 값은 변동이 없다. 따라서 윤곽가공과는 달리 반복계산이 필요하지 않는다. Fig. 6는 이상적인 마이크로 슬롯가공과 공구변형에 의한 가공오차 발생을 도식화하여 보여준다.

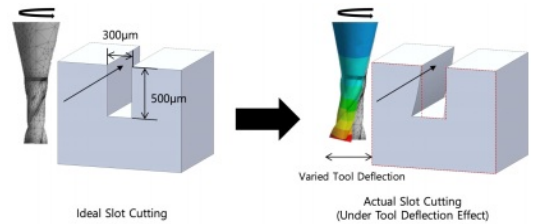


Fig. 6 Ideal slot cutting and actual slot cutting with cutting errors caused by tool deformation

3.2. 가공오차 특성화와 오차 보상

기초실험을 통하여 윤곽가공과 슬롯가공 모두 우측으로 기울어진 비선형적 형상의 가공면을 관찰하였다. 그러나 공구변형과 가공오차가 일치하지 않는다는 것은 이미 연구되었다^{1,9-13)}. 가공오차를 정밀하게 보상하기 위하여 가공오차를 정량적으로 분석하고 절삭조건과의 관계를 규명할 필요가 있다. 가공오차는 축방향으로 비선형적인 프로파일을 보여주는데 어느 부분을 기준으로 보상을 수행하여야 하는지에 대한 고려가 요구된다. 이를 위하여 가공오

차를 포함한 절삭면의 특성화를 통하여 가공면의 특성을 규정할 필요가 있다. 본 연구에서는 가공면의 폭과 기준면에서 떨어진 거리를 정량적으로 정의하였다.

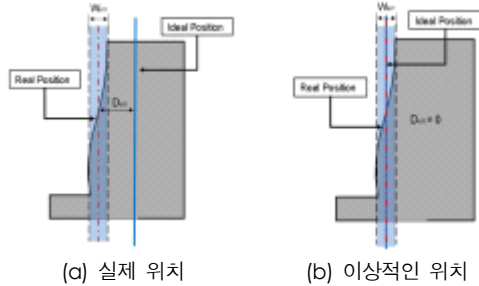


Fig. 7 Characterization of machining errors

Fig. 7은 윤곽가공을 중심으로 가공오차의 특성화를 위한 두 가지 요인의 정의를 보여 준다. 공구변형에 의한 가공오차의 발생은 비선형 형상의 절삭면을 형성하는데 이때 절삭면 프로파일의 양쪽 끝단을 기준으로 오차폭을 정의할 수 있다. W_{err} 은 이 오차폭 (Width of Errors)을 의미한다. 축방향을 따라 가공오차가 변동하게 되는데 기준면으로 부터 얼마나 떨어져서 치수오차를 얼마나 발생하는지 축방향을 따라 변동이 있다. 이를 최대한 오차보상을 하기 위하여 기준면을 중심으로 오차를 균일하게 발생하도록 보상을 하여야 한다. D_{err} 은 오차폭 W_{err} 의 중심선이 기준면에서 떨어진 거리(Deviation of Errors)를 의미한다. Fig. 7에서 좌측그림은 Ideal Position은 초기 설계된 가공면을 의미하며, Real Position은 공구변형에 의하여 발생한 가공오차면을 의미한다. 우측그림과 같이 Real Position을 공구위치를 수정하여 Ideal Position에 최대한 근접하도록 하는 것이 본 연구의 오차보상의 기본개념이다.

4. 가공오차 보상 실험

4.1 윤곽가공오차 특성화

윤곽가공 절삭실험을 통하여 공구변형에 의하여 발생하는 가공오차 보상을 위한 실증적 연구를 수행하였다. SEM을 이용하여 절삭면의 이미지를 획득하고 이를 분석하여 가공오차 등의 측정을 수행하였다. 윤곽가공 실험을 위하여 절삭가공을 선정하였다. $F_D = 525 \text{ mm/min}$ 로 선정하고, $A_d = 300 \text{ }\mu\text{m}$ 으로 고

정하고, R_d 는 30, 60, 90, 120, 150 μm 으로 변화시켜 가면서 마이크로 엔드밀링 실험을 수행하였다.

가공오차의 특성화를 위하여 기본 데이터를 측정하였다. 가공물의 상단에서 기준면에서 떨어진 거리를 측정하고 가공면이 기울어진 각도를 측정하였다. 이를 통하여 상단에서의 오차값을 E_{top} 하단에서의 오차값을 E_{bot} 으로 정의하고, 가공면이 기울어진 각도를 α_{draft} 로 명명하였다. 기울어진 가공면이 직선이라고 가정하면, 식 1과 같은 관계가 성립한다.¹⁾

$$E_{bot} = E_{top} + A_d \cdot \tan(\alpha_{draft}) \quad (1)$$

여기서 가공오차 특성화를 위하여 정의된 W_{err} , D_{err} 와 측정된 E_{top} , E_{bot} , α_{draft} 와의 관계는 다음과 같다.¹⁾

$$W_{err} = A_d \cdot \tan(\alpha_{draft}) \quad (2)$$

$$D_{err} = E_{top} + \frac{A_d \cdot \tan(\alpha_{draft})}{2} \quad (3)$$

이와 같은 관계를 기반으로 윤곽가공에서 중요한 절삭조건인 R_d 값의 변화에 따라 가공오차 특성화 요인인 W_{err} , D_{err} 의 변동을 예측할 수 있다.

4.2. 절삭면 SEM 사진 분석

마이크로 엔드밀링에 의한 윤곽가공의 절삭면 프로파일을 분석하기 위하여 SEM 사진을 획득하고 사진을 기준으로 AUTOCAD를 이용하여 절삭면의 각 부위의 형상치수를 측정하였다. 각각의 절삭조건에 따라 사진과 함께 가공오차 특성화를 위하여 E_{top} , E_{bot} , α_{draft} , W_{err} , D_{err} 의 값을 측정하고 계산하여 Fig. 8에서 보여 준다.

Fig. 8(a)는 $F_D = 525 \text{ mm/min}$, $R_d = 30 \text{ }\mu\text{m}$ 일 경우 윤곽가공면의 SEM 사진 분석 자료이다. 여기서, $E_{top} = 2.455 \text{ }\mu\text{m}$ 이고 식 1에 의하여 계산하면 $E_{bot} = 8.619 \text{ }\mu\text{m}$ 이다. $\alpha_{draft} = 1.177^\circ$ 로 측정되었다. 식 2을 이용하여 계산하면 $W_{err} = 6.164 \text{ }\mu\text{m}$ 이고, 식 3을 이용하여 계산하면 $D_{err} = 5.537 \text{ }\mu\text{m}$ 이다.

Fig. 8(b)는 $F_D = 525 \text{ mm/min}$, $R_d = 60 \text{ }\mu\text{m}$ 일 경우 윤곽 가공면의 SEM 사진 분석 자료이다. 여기서, $E_{top} = 4.789 \text{ }\mu\text{m}$ 이고 식 1에 의하여 계산하면 $E_{bot} = 18.837 \text{ }\mu\text{m}$ 이다. $\alpha_{draft} = 2.681^\circ$ 로 측정되었다. 식 2을

이용하여 계산하면 $W_{err} = 14.048 \mu\text{m}$ 이고, 식 3을 이용하여 계산하면 $D_{err} = 11.813 \mu\text{m}$ 이다.

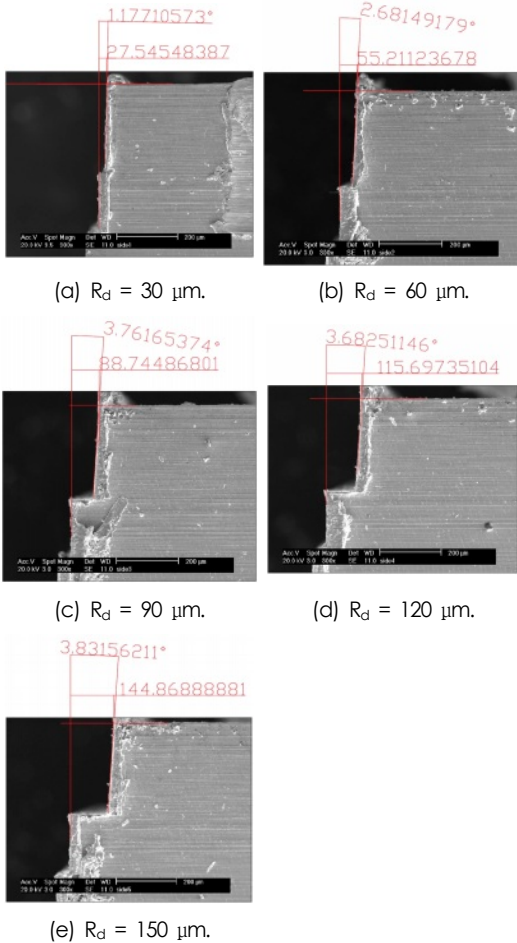


Fig. 8 Micro side cutting profile in case of $F_D = 525 \text{ mm/min}$

Fig. 8(c)는 $F_D = 525 \text{ mm/min}$, $R_d = 90 \mu\text{m}$ 일 경우 윤곽 가공면의 SEM 사진 분석 자료이다. 여기서, $E_{top} = 1.255 \mu\text{m}$ 이고 식 1에 의하여 계산하면 $E_{bot} = 20.981 \mu\text{m}$ 이다. $\alpha_{draft} = 3.762^\circ$ 로 측정되었다. 식 2을 이용하여 계산하면 $W_{err} = 19.726 \mu\text{m}$ 이고, 식 3을 이용하여 계산하면 $D_{err} = 11.118 \mu\text{m}$ 이다.

Fig. 8(d)는 $F_D = 525 \text{ mm/min}$, $R_d = 120 \mu\text{m}$ 일 경우 윤곽 가공면의 SEM 사진 분석 자료이다. 여기서, $E_{top} = 4.303 \mu\text{m}$ 이고 식 1에 의하여 계산하면 $E_{bot} = 23.614 \mu\text{m}$ 이다. $\alpha_{draft} = 3.683^\circ$ 로 측정되었다. 식 2을

이용하여 계산하면 $W_{err} = 19.311 \mu\text{m}$ 이고, 식 3을 이용하여 계산하면 $D_{err} = 13.958 \mu\text{m}$ 이다.

Fig. 8(e)는 $F_D = 525 \text{ mm/min}$, $R_d = 150 \mu\text{m}$ 일 경우 윤곽 가공면의 SEM 사진 분석 자료이다. 여기서, $E_{top} = 5.131 \mu\text{m}$ 이고 식 1에 의하여 계산하면 $E_{bot} = 25.225 \mu\text{m}$ 이다. $\alpha_{draft} = 3.832^\circ$ 로 측정되었다. 식 2을 이용하여 계산하면 $W_{err} = 20.094 \mu\text{m}$ 이고, 식 3을 이용하여 계산하면 $D_{err} = 15.178 \mu\text{m}$ 이다.

4.3. 오차보상을 위한 공구위치의 수정

가공오차를 보상하기 위하여 R_d 의 변화에 따른 E_{top} , E_{bot} , α_{draft} 의 변화를 관찰하였다. Fig. 9는 이들의 변화를 그래프로 보여 준다. R_d 의 증가에 따라 E_{top} , E_{bot} , α_{draft} 가 전체적으로 증가하는 거동을 보이지만, $R_d = 90 \mu\text{m}$ 에서 일시적으로 E_{top} 의 측정값이 순간적으로 낮게 측정되었는데 이는 실험 시 순간적인 과도한 절삭력이 발생하여 모재가 과하게 절삭되어 나타난 현상으로 예측된다.

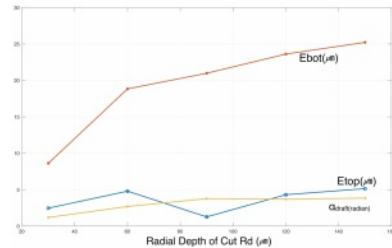


Fig. 9 Variation graph of E_{top} , E_{bot} and α_{draft} according to R_d

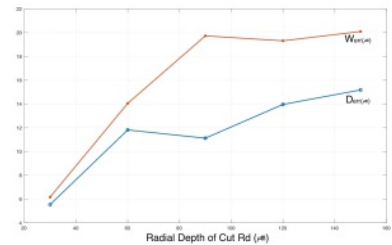


Fig. 10 Variation graph of W_{err} and D_{err} according to R_d

또한 R_d 의 변화에 따른 W_{err} , D_{err} 의 변화를 분석할 필요가 있다. Fig. 10는 이들의 변화를 그래프로 보여 준다. 마찬가지로 R_d 의 증가에 따라 W_{err} , D_{err} 가 전체적으로 증가하는 거동을 보이지만, D_{err} 는

E_{top} 에 영향을 받는 식 (3)을 이용해 계산되었기 때문에 아래 그림과 같이 $R_d = 90 \mu\text{m}$ 에서 감소하는 경향을 보인다.

W_{err} 와 D_{err} 를 기반으로 가공오차 보상을 위한 공구의 새로운 위치를 결정하여야 하는데, 가공오차의 변화를 R_d 에 대한 변화로 관찰하였기 때문에 공구 위치를 수정하는 것은 결국 새로운 R_d 값을 정의하는 것과 동일하다. 여기서 두 가지 R_d 값을 정의하였다. $(R_d)_{ideal}$ 은 이상적으로 주어진, 즉 설계된 절삭면을 얻기 위하여 주어진 공구위치에 따라 예상되는 반경방향 절삭깊이를 의미하며, $(R_d)_{real}$ 은 공구변형에 의하여 발생하는 가공오차를 포함한 실제 얻어지는 가공면을 기준으로 측정된 반경방향 절삭깊이를 의미한다. $(R_d)_{real}$ 은 실제 절삭면이 기울어져 있기 때문에 다음의 식 4로 정의한다.

$$(R_d)_{real} = (R_d)_{ideal} - D_{err} \quad (4)$$

여기서 $(R_d)_{ideal}$ 은 초기에 주어진 절삭깊이이고, D_{err} 은 실험을 통하여 얻어진 데이터를 이용하여 계산되어진다. 따라서 $(R_d)_{real}$ 을 X축으로 정의하고 $(R_d)_{ideal}$ 를 Y축으로 하여 Fig. 11와 같은 그래프를 얻을 수 있다.

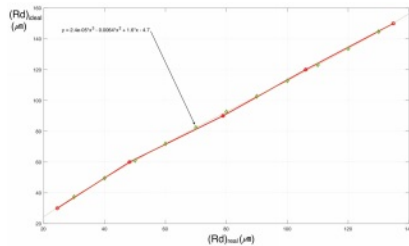


Fig. 11 Variation graph of $(R_d)_{ideal}$ according to $(R_d)_{real}$

여기서 붉은색 점은 측정 및 계산값이다. 본 데이터를 3차 함수를 이용하여 보간을 하면 식 5의 함수 관계를 얻을 수 있다.

$$(R_d)_{ideal} = 2.4 \times 10^{-5} (R_d)_{real}^3 - 0.0064 (R_d)_{real}^2 + 1.60 (R_d)_{real} - 4.7 \quad (5)$$

Fig. 11에서 녹색 점들과 선은 식 5를 그래프로

그려서 나타낸 것이다. 식 5는 원하는 절삭면인 $(R_d)_{real}$ 을 얻기 위하여 공구의 위치를 얼마나 수정해야 하는지, 즉 $(R_d)_{ideal}$ 을 얼마나 주어야 하는지 계산하는 식이 된다. Table 2은 원하는 반경방향 절삭깊이 $(R_d)_{real}$ 과 수정된 $(R_d)_{ideal}$ 과의 관계를 수치적으로 보여 준다.

식 5는 공구변형에 의하여 발생하는 가공오차를 보상하기 위하여 공구위치의 수정에 의한 절삭깊이를 고려하기 위하여 반복계산이 요구되는 기존의 오차보상법 대신 직관적으로 실험데이터를 기반으로 $(R_d)_{real}$ 과 $(R_d)_{ideal}$ 과의 함수관계를 규명하여 원하는 절삭면을 얻을 수 있는 공구위치 즉 측면 절삭깊이인 R_d 를 계산할 수 있었다.

Table 2 Real radial depth of cut $(R_d)_{real}$ and ideal radial depths of cut $(R_d)_{ideal}$

원하는 $(R_d)_{real}$	수정된 $(R_d)_{ideal}$
30 μm	37.404 μm
40 μm	49.557 μm
50 μm	61.009 μm
60 μm	71.904 μm
70 μm	82.388 μm
80 μm	92.603 μm
90 μm	102.695 μm
100 μm	112.808 μm
110 μm	123.086 μm
120 μm	133.673 μm
130 μm	144.714 μm

4.4. 슬롯가공에서 오차보상

마이크로 엔드밀링을 이용한 슬롯가공은 마이크로 채널과 같은 형상을 가공할 때 필요한 절삭가공 모드이다. 공구가 모두 절입하게 되기 때문에 일반적으로 재료제거율이 향상되고 그에 따라 절삭력과 공구변형이 과도하게 발생된다. Table 3은 본 실험의 절삭가공조건을 상세히 보여주고 있다.

Table 3 Micro cutting conditions

Classification	Specification
RPM	40,000
Axial depth(μm)	500
Feedrate(mm/min)	120, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 540
Tool	$\phi 0.3(\text{mm})$, 2-flute flat end-mill
Workpiece	Brass

슬롯가공에서 공구변형에 의하여 발생하는 가공오차를 보상하기 위하여 공구의 위치를 수정하는 방법

은 공구의 위치가 변동하더라도 절삭깊이가 변하지 않기 때문에 발생한 가공오차 만큼 공구의 위치를 수정하여 보상을 하였다.

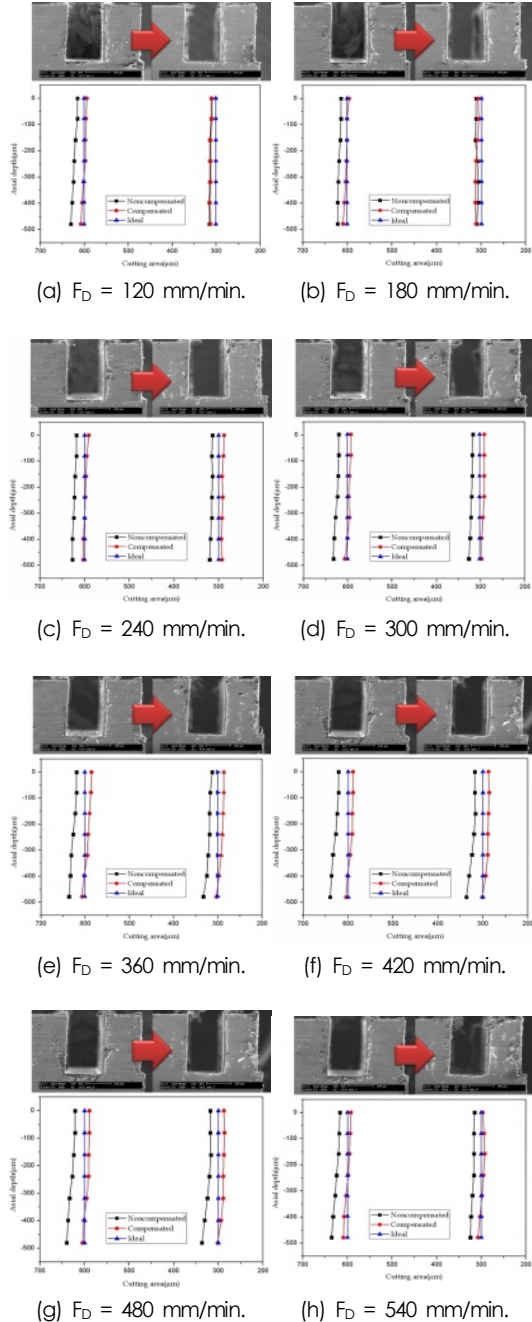
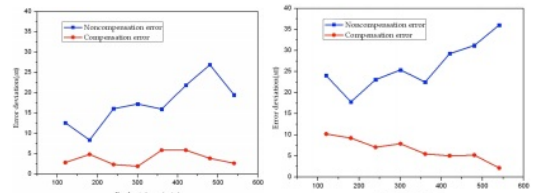


Fig. 12 Slot cutting profiles of Non-compensated and compensated R_d according to F_d variation

가공면이 한쪽으로 기울어진 형상으로 나타나기 때문에 설계된 슬롯형상과 실제 가공될 슬롯형상이 최대한 가공오차가 작게 나오게 보상하기 위하여 W_{en} 의 중심이 최대한 이상적인 슬롯형상에 일치하게 하여 D_{en} 이 최소화 되도록 하였다. 슬롯가공에서는 공구위치의 변동에 따른 절삭깊이의 변화가 없기 때문에 절삭가공조건의 변화를 주기 위하여 이송속도를 변화를 주었다.

이송량 F_D 가 120~540 mm/min으로 변화할 경우 보상전후의 슬롯절삭에서의 좌우측 가공오차를 분석하였다. Fig. 12는 그 결과를 보상전후로 비교한 실험결과 이다. 이 결과를 전체적으로 분석한 결과가 Fig. 13이다. Fig. 13(a)는 좌측 절삭면 프로파일이고 Fig. 13(b)는 우측 절삭면 프로파일이다.

좌측의 경우 이송량이 증가함에 따라 보상전의 가공 오차가 약 15 μm 에서 최대 약 37 μm 가 나타났다. 동일한 절삭조건에서 공구경로의 보상을 적용한 후의 가공오차가 최대 약 11 μm 에서 약 3 μm 까지 감소함을 알 수 있었다.



(a) 좌측 프로파일 (b) 우측 프로파일

Fig. 13 Machining error analysis before and after compensation according to feedrate change

우측 프로파일의 경우 이송량이 증가함에 따라 보상전의 가공오차가 약 7 μm 에서 최대 약 27 μm 가 나타났다. 동일한 절삭조건에서 공구경로의 보상을 적용한 후의 가공오차가 최대 약 6 μm 에서 약 2 μm 까지 감소함을 알 수 있었다.

일반적으로 이송량은 증가할수록 재료제거율과 함께 절삭력과 공구변형이 증가하는데 슬롯가공의 경우 공구의 위치를 수정하여도 다른 절삭조건은 변화하지 않는다. 따라서 슬롯가공 실험에서 이송속도를 변화시키면서 가공오차의 변화와 오차보상후의 가공오차 발생의 추이를 관찰하였다. 이송속도의 증가에 따라 가공오차가 증가하는 추세이지만 보상을 통하여 일정한 가공오차를 유지할 수 있었다.

4. 결론 및 토의

본 연구의 목적은 미세절삭가공에서 이송속도를 저하시키지 않으면서 공구변형에 의한 가공오차를 최소화하여 생산성을 극대화 하는데 있다. 이를 위하여 공구의 위치 즉 공칭 절삭깊이를 조절하여 실제로 얻어지는 절삭깊이와의 관계를 실험적으로 규명하고 수학적함수로 모델링하였다. 이를 바탕으로 가공오차 보상을 실험적으로 검증하였다. 공구의 위치의 변화에 따른 절삭깊이의 변화가 없는 슬롯가공을 따로 분리하여 연구하였다. 이는 미세공구에 의한 윤곽가공에서 공구의 변형에 따른 가공오차를 보상하기 위하여 공구위치를 수정하면 절삭깊이가 변화하고 따라서 일련의 반복계산이 요구되는 기존의 연구와는 달리 본 연구에서 제시한 수학적 모델링을 통하여 공칭절삭깊이와 공구변형에 따른 실제 절삭깊이와의 관계를 직접적으로 규명하고 이 관계를 이용하여 원하는 절삭깊이를 원기위한 보상된 공칭절삭깊이를 얻어내는 방법론을 제시하였다. 슬롯가공에서는 공구위치의 변화에 따라 절삭깊이가 변화하지 않기 때문에 이송속도를 변화시키면서 가공오차의 변화를 분석하였고 이의 보상을 실험적으로 검증하였다. 일련의 구체적인 연구결과는 다음과 같다.

1) 공구변형과 실제 절삭면의 프로파일이 일치하지 않는다는 것을 기반으로 가공오차를 특성화하고 오차보상의 기준으로 설정하였다. R_d 를 증가시키면서 윤곽가공을 통하여 가공오차의 변화와 가공오차 특성화 인자인 W_{err} 과 D_{err} 의 변화를 관찰하였다. 이를 통하여 R_d 와 W_{err} 과 D_{err} 의 관계를 관찰하고 원하는 R_d 을 얻기 위하여 공칭 R_d 와 실제 공구변형에 의하여 발생하는 R_d 와의 관계를 3차 함수식을 정의하였다. 공구변형에 의하여 발생하는 가공오차를 보상하기 위하여 공구위치의 수정에 의한 절삭깊이를 고려하기 위하여 반복 계산이 요구되는 기존의 오차보상법 대신 직관적으로 실험데이터를 기반으로 $(R_d)_{real}$ 와 $(R_d)_{ideal}$ 와의 함수관계를 규명하여 원하는 절삭면을 얻을 수 있는 공구위치를 예측하는 모델을 제시할수 있었다.

2) 슬롯가공은 공구위치의 변화와 상관없이 반경 방향 절삭깊이 R_d 의 변화가 없기 때문에 D_{err} 만큼 공구위치를 수정하여 가공하는 보상법을 적용하였다. 슬롯가공의 실험에서는 $300 \times 500 \mu m$ 의 고세장비 (High Aspect Ratio)형상의 마이크로 채널을 가공하

였다. 절삭깊이는 고정하고 이송속도를 높여가면서 슬롯가공을 하였다. 공구의 위치를 수정하여 가공오차를 보상하는데 공구의 위치가 변동하여도 절삭가공조건이 변동이 없고 절삭력이나 공구변형이 변동하지 않기 때문에 발생하는 오차만큼 공구의 위치를 수정하여 보상실험을 수행하였다. 최소 약 40%에서 최대 약 93% 가공오차 보상율을 얻었다. 이송속도가 증가할수록 가공오차가 정량적으로 증가하기 때문에 오차 보상율도 증가하였다. 보상 이후 전체적인 가공오차가 $10 \mu m$ 이하로 보상되었으며, 대부분의 가공오차는 $10 \mu m$ 이하로 보상을 수행할 수 있었다.

참고문헌

- 1) Cho, M.W., Kim, G.H., Seo, T.I., Hong, Y.C., and Cheng, H.H., "Integrated Machining Error Compensation Method using OMM Data and Modified PNN Algorithm", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.46 pp.1417 - 1427, 2006.
- 2) Cho, M.W., Lee, S.H. and Seo, T.I., "On-Machine Measurement of Sculptured Surfaces Based on CAD/CAM/CAI Integration : I. Measurement Error Modeling", Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol.16:10 pp.172 - 181, 1999.
- 3) Cho, M.W., Seo, T.I. and Kwon, H.D., "Integrated Error Compensation Method using OMM System for Profile Milling Operation", Journal of Materials Processing Technology, Vol.136 pp.88 - 99, 2003.
- 4) Kim, J.S., "A Study on the surface roughness of STD 11 material according to the helix angle of ball endmill" Proc. Kor. Soc. D. M. Conf., Vol.17:1 pp.33-39, 2023
- 5) Seo, K.H, Son, M.K., Yoon, G.S. and Ko, Y.B., "A Study on machining conditions on surface roughness in EPS End-milling", Proc. Kor. Soc. D. M. Conf., Vol.11:2 pp.46-50, 2017
- 6) Kline, W.A., DeVor, R.E. and Lindberg, J.R., "The Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts", International Journal of Machine Tool Design and Research, Vol.22:1 pp.7 - 22, 1982.
- 7) Saffar, R.J., Razfar, M.R., Zarei, O. and

- Ghassemieh, E. "Simulation of Three-dimension Cutting Force and Tool Deflection in the End Milling Operation Based on Finite Element Method", Simulation Modelling Practice and Theory, Vol.16:10 pp.1677 - 1688, 2008.
- 8) Kops, L. and Vo, D.T., "Determination of the Equivalent Diameter of an End Mill Based on its Compliance", CIRP Annals, Vol.39 pp.93 - 96, 1990.
- 9) Ha. S.J., Park. J.Y., Kim. G.H. and Yoon. G.S., "Micro cutting process technology for micro molds parts", Proc. Kor. Soc. D. M. Conf., Vol.13:1 pp.5-12, 2019
- 10) Cho, M.W. and Seo, T.I., "Machining Error Compensation Using Radial Basis Function Network Based On CAD/CAM/CAI Integration Concept", International Journal of Production Research, Vol.40:9 pp.2159 - 2174, 2002.
- 11) Xu, A.P., Qu, Y.X, Zhang, D.W. and Huang, T., "Simulation and experimental investigation of the end milling process considering the cutter flexibility", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.43 pp.283 - 292, 2003.
- 12) Dépincé, P. and Hascoët, J.Y., "Active integration of tool deflection effects in end milling. Part 1. Prediction of milled surfaces", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.46 pp.937 - 944, 2006.
- 13) Shirase, K. and Altintas, Y., "Cutting Force and Dimensional Surface Error Generation In Peripheral Milling With Variable Pitch Helical End Mills", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.36 pp.567 - 584, 1996.

저자 소개

손 종 인 (Jong-In Son)

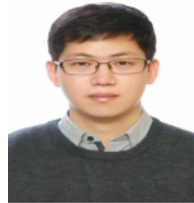


- 2023년 8월 인천대학교 기계공학(공학박사)
- 2009년~2013년: 한국생산기술연구원, 금형성형연구그룹, 연구원
- 2018년~2021년: (주)연우, 금형기술센터, 차장
- 2021년~현재: LG이노텍, Lens 내재화TASK, 책임연구원

< 관심분야 >

사출금형, 사출성형, CAE, 제조기술

송 병 옥 (Byeong-Uk Song)



- 2013년 2월: 인천대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2013년 3월 ~ 현재: 인천대학교 기계공학과 박사과정

< 관심분야 >

사출금형, 마이크로 절삭가공