

# 가공 영상을 이용한 엔드밀 변형과 가공오차에 대한 연구

## Study of End-mill Deflection and Machining Error using Machining Image

\*손종인<sup>1</sup>, #서태일<sup>1</sup>, 이학용<sup>1</sup>, 손현승<sup>1</sup>, 윤길상<sup>2</sup>

\*J. I. Sohn<sup>1</sup>, #T. I. Seo(tiseo@incheon.ac.kr)<sup>1</sup>, H. Y. Lee<sup>1</sup>, H. S. Sohn<sup>1</sup>, G. S. Yoon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>인천대학교 기계공학과 <sup>2</sup>한국생산기술연구원 정밀금형팀

Key words : end-mill deflection, machining error, machining image, machining error compensation

### 1. 서론

경쟁력을 갖춘 제품을 생산하기 위해서는 정밀한 제품의 가공이 선행되어야 한다. 최근 마이크로 엔드밀을 이용한 초정밀 절삭을 요구하는 경우가 늘어나고 있다. 이와 같은 연구의 선행 조건으로는 일반적인 마크로 영역에서의 정밀 절삭에 관한 기본 연구가 매우 중요하다. 여러 가지 제품의 가공방법 중 엔드밀을 이용한 3차원 가공은 생산성과 생산비용에 있어서 효율적인 방법이다. 이때 CAD/CAM 시스템을 이용한 데이터를 이용한 CNC공작기계를 이용하게 된다. 처음 설계되었던 의도와는 달리 절삭력의 변화<sup>[1,2]</sup>에 따른 공구는 절삭표면에 오차를 발생시키게 된다. 이때 발생하는 오차를 줄이기 위해서는 공구의 직경에 대비하여 짧은 축 방향 깊이를 가져야 하지만 절삭시의 재료의 고정구와 가공 형상 특성상 가지게 되는 공구와 재료의 표면간의 간섭을 피하기 위해서는 공구의 반경에 비하여 상대적으로 길이가 훨씬 길게 된다. 종전까지 이를 해결하여 정밀한 가공을 하기 위해서 이송속도를 최적화하는 많이 이루어 졌다. 이송속도의 최적화는 즉각적인 공구 변형을 측정하기에 어렵고 생산성에 대한 효율을 낮추게 된다. Ong는 하향 절삭을 이용하여 슬롯의 가공 중 발생하는 공구변형에 의한 가공오차에 관한 연구를 진행하였다.<sup>[3]</sup> 이를 통한 가공에서는 결국 공구 변형에 의한 가공오차로 인하여 처음 설계되었던 가공 형상을 얻기 위하여 재가공을 하여야 하며 이는 생산성 측면에서 불리함을 가지게 된다. 본 연구에서는 슬롯 가공에서 축방향 깊이(Axial depth)에 따른 공구변형에 의한 가공오차의 측정을 통하여 새로운 공구경로를 수정하여 공차범위 내에서 가공오차를 줄일 수 있도록 하는 것에 목적을 두었다.<sup>[4]</sup> 이때 가공되는 형상을 초고속 카메라를 이용하여 관찰하고 이때 획득되어진 이미지와의 대비 분석을 통하여 가공오차의 형성에 관한 검증을 거쳤다.<sup>[5]</sup> 실험과정과 가공오차의 수정과정은 Fig. 1과 같다.

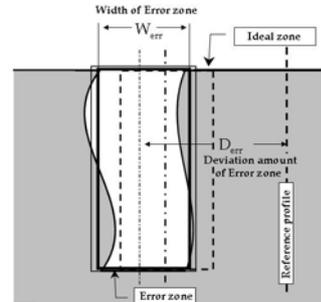


Fig. 2 Characterization of machining error compensation

중심선과 본래 의도하였던 가공 범위의 중심에 대한 오차를 계산하여 공구의 경로를 다시 수정하는 방법을 통하여 공구 변형에 의한 가공오차를 수정하였다.

### 3. 실험방법

엔드밀에 가공에서의 공구변형에 따른 가공오차를 측정하기 위하여 이송속도와 축방향 절삭 깊이에 따른 조건별로의 가공오차를 측정하였다. 피삭재는 일반적으로 기계부품에 가장 많이 사용되는 Middle Steel(SM45C)를 사용하였다. 절삭조건은 Table 1에 정의 되어있다. 이때 발생하는 공구의 변형은 일반적인 단순 지지보로 생각하였다. 이때 측정되는 피삭재의 가공형상은 실측 투영기를 사용하여 측정하였으며 실제 가공시의 회전하는 엔드밀과 피삭재 사이의 공구변형 영상을 얻기 위하여 초고속카메라(High Speed Camera)를 이용하였다. 초당 2000프레임의 화면을 저장하였다. 본 연구를 위한 전체적인 실험에 따른 장비의 준비 및 과정은 Fig. 3의 사진에 나타나 있다.

Table 1 Cutting condition

공구 직경	6(mm)
공구의 헬릭스각	30°
공구 유효 길이	43(mm)
공구날 갯수	2 개
재료 재질	Middle Steel(SM45C)
공구 회전 속도	1250RPM
이송 속도	60(mm/min)
절삭 깊이	6, 8, 10(mm)

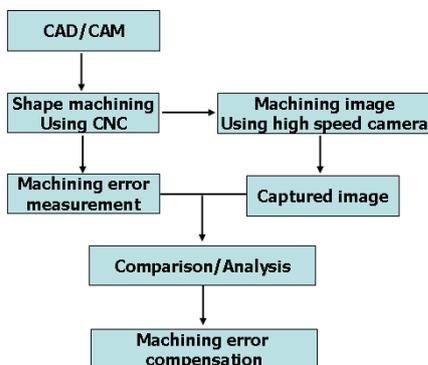


Fig. 1 Summary of experimentation

### 2. 가공오차의 수정

엔드밀을 이용한 슬롯가공은 하향절삭면과 상향절삭면의동시적인 가공을 통하여 절삭이 일어난다. 이에 따라서 가공 조건의 절삭력에 의하여 슬롯의 좌측과 우측면에 각기 가공오차가 발생하게 된다. 기존의 본 연구실에서 사용되던 가공오차의 수정에 의한 방법에 의해 가공오차를 수정할 경우<sup>[6]</sup> 슬롯의 전체적인 가공오차는 공차범위 안에 들어오지 못하게 된다. 이를 해결하기 위하여 Fig. 2와 같이 공구변형에 의한 가공오차의 오차범위에서

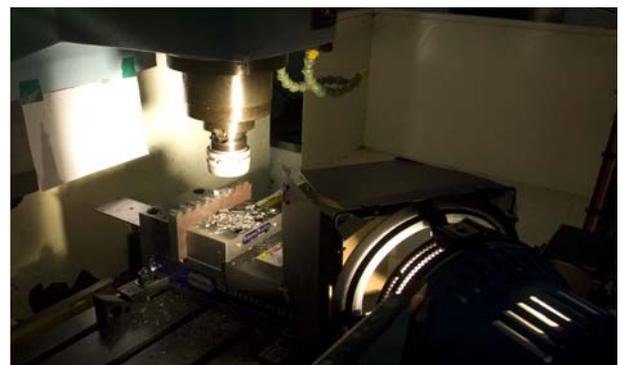


Fig. 3 Experimental work

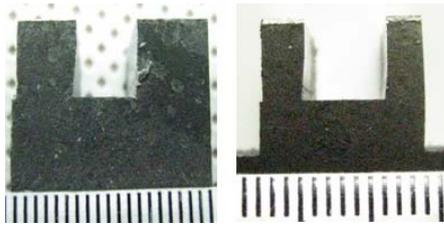


Fig. 4 Cutting shape image  
(a)Noncompensation (b)Compensation  
(Feed rate:60mm/min, Axial depth:8mm)

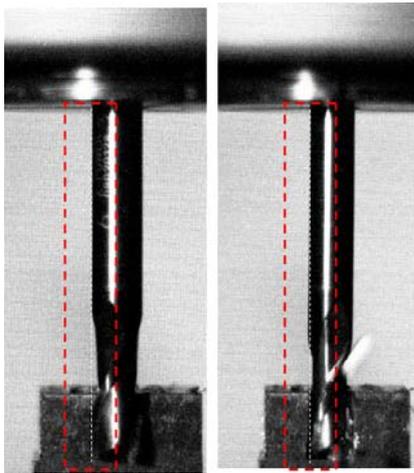


Fig. 5 Tool deflection image analysis  
(a)Ideal running (b)Machining running  
(Feed rate:60mm/min, Axial depth:8mm)

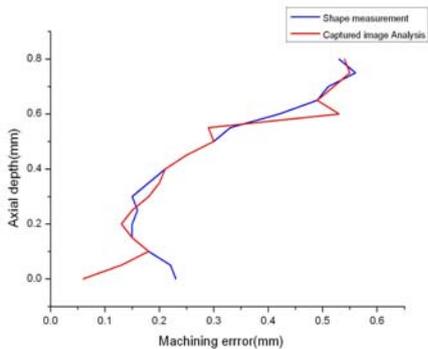


Fig. 6 Machining error comparison between shape measurement and captured image analysis  
(Feed rate:60mm/min, Axial depth:8mm)

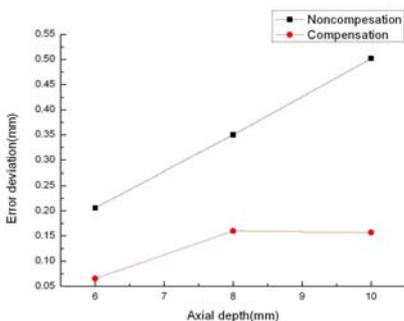


Fig. 7 Error deviation between noncompensation machining and compensation machining for Axial depth in Feed rate:60mm/min

#### 4. 결론

처음 공구의 변형에 의한 가공오차 보상전의 절삭된 형상과 보상후의 절삭 형상은 Fig. 4와 같다. Fig. 5에 나타난 엔드밀 가공 중 측정된 공구 변형에 대한 이미지 영상에 대해 살펴보면 처음 절삭 전 회전에서의 공구와는 달리 절삭 가공중의 공구변형을 알 수 있다. 이를 이미지 분석을 통한 픽셀수로 계산하여 나타내었을 경우 Fig. 6의 그래프와 같이 최종 가공형상의 실측오차와 유사한 형태를 보이고 있다. 그러나 축방향 깊이에 대해 실측값과 가공 이미지 분석 값에서 오차를 나타내고 있는데 이는 이미지 분석시의 해상도에 의한 오차로 판단된다. 이와 같은 방법을 통하여 축방향 절삭 깊이에 따라서 보상 전후의 오차량을 계산한 경우 Fig. 7과 같이 현저하게 가공 오차가 줄어들게 되는 것을 알 수 있다. 본 연구를 통하여 절삭력에 의한 공구변형과 가공오차의 발생과의 관계가 시각적인 영상 관측에 의해 검증되었다. 또한 기존의 매크로 영역에서 앞서 얘기하였던 공구 경로 수정을 통한 가공오차 보상의 방법으로 공구변형에 의한 가공오차를 실험적 방법에 의하여 해결할 수 있었다. 이를 바탕으로 다양한 가공조건에서 공구변형의 측정과 추후 이루어질 절삭력 측정을 통한 공구 변형에 대한 실험적 관계식을 정립할 경우 공구 변형에 의한 가공오차의 예측을 가능하게 할 수 있고 정밀 가공에 대한 생산성 향상을 가져올 수 있으리라 기대된다. 또한 현재 절삭 가공에서 큰 화두가 되고 있는 마이크로 영역에서의 엔드밀을 이용한 3차원 기계절삭에서의 공구 변형에 의한 가공오차를 해소하는데 기초적인 데이터로 이용할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

1. J. Tlustý, "Dynamics of High-Speed Milling", Journal of Engineering for Industry, 108, 59-67, 1986
2. W. A. Kine, R. E. Devor and J. R. Lindberg, "The Prediction of cutting forces in end milling with application to cornering cuts", Int. J. Mach. Tool Des. Res. 22, 7-22, 1982
3. T. S. Ong, B. K. Hinds, "The application of tool deflection knowledge in process planning to meet geometric tolerances", Machine Tools & Manufacture, 43, 731-737, 2003
4. 서태일, 김건희, 조명우, 홍연찬, "PNN을 이용한 기상측정데이터 기반 가공오차보상법", 한국공작기계학회 논문집, 15, 92-97, 2006
5. T. I. Seo, D. S. Kim, M. W. Cho, G. H. Kim, G. S. Yoon, Y. M. Heo, J. S. Sin, "Micro Tool Deflection Compensation Using Real Captured Images of Deformed Tool Shapes" Proceeding APCOM 2007, 168KR, 139, 2007
6. 서태일, 조명우, "공구궤적의 수정에 의한 절삭표면의 오차 보상", 한국정밀공학회 99년도 춘계학술대회, 875-878