

고속카메라를 이용한 절삭공구변형의 보상에 관한 연구

배종석¹ · 서태일[#] · 김건희² · 윤길상³

Compensation for Machining Error included by Tool Deflection Using High-Speed Camera

J. S. Bae, T. I. Seo, G. H. Kim, G. S. Yoon

(Received November 16, 2006)

Abstract

This paper presents an integrated machining error compensation method based on captured images of tool deflection shapes in flat end-milling processes. This approach allows us to avoid modeling machining characteristics (cutting forces, tool deflections and machining errors etc.) and accumulating calculation errors induced by several simulations. For this, a high-speed camera captured images of real deformed tool shapes which were cutting under given machining conditions. Using image processes and a machining error model, it is possible to estimate tool deflection in cutting conditions modeled and to compensate for machining errors using an iterative algorithm correcting tool paths. This corrected tool path can effectively reduce machining errors in the flat end-milling process. Experiments are carried out to validate the approaches proposed in this paper. The proposed error compensation method can be effectively implemented in a real machining situation, producing much smaller errors.

Key Words : Machining Error, Error Compensation, Tool Deflection, Flat End-Milling, High Speed Camera

1. 서론

현재 CAD/CAM시스템의 발전에 힘입어 많은 산업현장에서 엔드 밀링 가공이 활발하게 이루어지고 있다. 그러나 엔드 밀링 가공에서 복잡한 형상의 가공을 위하여 상대적으로 지름이 작고 길이가 긴 형태의 공구 사용의 필요성이 높아지고 있으며, 이는 실제 가공에서 CAD/CAM시스템에서 고려되지 않은 다양한 형태의 가공오차를 발생시키는 원인이 된다. 가공오차의 원인으로는 공구의 파손, 런아웃, 공구 변형 등 다양한 원인이 있다.

그 중에서도 특히 공구변형에 의한 가공오차는 매우 중요한 요소라고 할 수 있다. 일반적으로 공

구변형을 극복하기 위한 방법으로는 이송속도를 줄이는 방법이 있다. 이는 간단한 방법이지만 생산성이 저하되는 문제점이 있고, 복잡한 형상의 엔드 밀링 가공 시에는 그리 효과적이지는 않다. 이러한 가공 오차의 효율적인 제어를 위한 보다 능동적인 방법으로는 공구 경로의 보상에 의한 방법이 있으며, 보상 방법으로는 가공 도중에 발생하는 절삭력을 임의의 임계 값을 넘지 않도록 실시간으로 제어하는 실시간 온라인 제어 방법과 실제 절삭 가공 이전에 가공오차의 예측을 통하여 공구 경로를 수정하는 오프라인 제어 방법이 있다[1~6].

전자의 가공오차 보상 방법의 경우 고가의 각

1. 인천대학교 기계공학과 대학원
2. 인하대학교 기계공학과 대학원
3. 한국생산기술연구원 정밀금형팀
교신저자: 인천대학교 기계공학과,
E-mail : tiseo@incheon.ac.kr

중 측정장비가 필요하고, 측정장비에 의해 가공할 중에 간섭이 될 뿐만 아니라 정확한 예측과 보상이 용이하지 않은 단점이 있다. 후자의 경우는 절삭력 예측과 이에 따른 공구 변형량 계산과 가공오차 예측의 연속적인 모델링이 필요하며 각 단계에서의 누적된 오차에 의해 정밀한 보상이 용이하지 않다.

Lo 와 Hsiao 는 앞서 언급된 방법들의 단점을 보완하기 위하여 측정데이터를 기반으로 한 가공오차보상 방법에 대한 연구를 제안하였다[7].

저자는 공구 변형에 따른 가공 오차 보상을 위해 복잡한 절삭력 예측 등의 모델링이 필요 없이 OMM System 을 이용한 가공오차의 측정과 이를 PNN 알고리즘에 적용하여 보상하는 방법을 제시하였다[8~11].

그러나 빠르고 정확하게 공구의 변형과 가공오차를 측정하기 위해서는 보다 직관적인 측정 방법이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 고속 카메라를 이용하여 가공 중 발생하는 공구의 변형 이미지를 획득하고 이를 바탕으로 가공오차를 예측하고자 한다. 이러한 고속 카메라를 이용한 공구 변형 측정은 수학적 모델링이 필요 없이 쉽고 빠른 측정을 가능하게 해 줄 수 있다는 장점이 있다. 이를 위해 고속 카메라에서 측정된 이미지를 이용하여 가공오차를 예측하고 공구의 경로를 추정하여 가공오차를 보상하고자 한다.

2. 공구 변형 이미지 획득

2.1 절삭 가공오차 특성화

밀링 가공시 동일한 가공 조건 하에서도 회전하는 공구의 절삭날 위치에 따라 절삭력이 변화한다. 따라서 공구 변형량도 공구의 회전 위치에 따라 변화함으로써 가공 곡면 상의 오차들도 일정하지 않다.

이러한 가공 오차 분포 형태의 비선형적 특징 때문에 주어진 허용 공차와 비교하기 위하여 가공오차를 특성화할 필요가 있다. 기존에 제안된 방법에서는 주어진 허용 공차와 절삭가공오차를 비교하기 위하여 공구 변형에 의해 발생한 언더컷이나 오버컷이 주 원인인 가공 오차의 최대오차(E_{max})와 최소오차(E_{min})를 기본으로 표면의 형상과 관계없이 절삭표면 전체를 포함하는 최소폭의 영역인 오차 영역(Error zone)을 정하였다. 이 경우 오차 영역 폭과 오차 영역 편차를 정의할

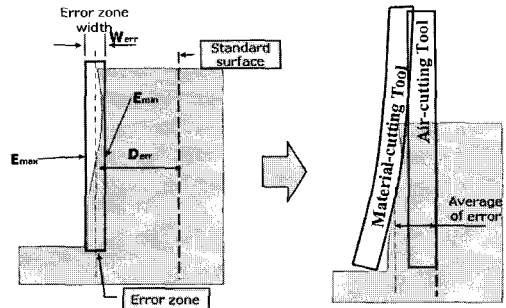


Fig. 1 Proposed parameters

Table 1 Specification of high-speed camera

Sensor, color	CMOS, gray
Basic resolution	1024 x 1024 at 2,000fps
Frame rate	60~120,000fps
Shutter speed	10~0.004ms

수 있으며 이를 통하여 표면오차의 정량적 분석과 비교를 합리적으로 수행할 수 있도록 하였다 [8~11]. 그러나 고속 카메라를 이용한 공구의 변형 이미지를 이용하는 방법으로는 가공면의 측정이 필요한 최대오차와 최소오차를 정확하게 측정할 수 없기 때문에 Fig. 1에서 보는 바와 같이 절삭 영역에서의 공구의 변형량을 측정하여 이를 평균 오차 영역으로 정의하였다.

2.2 실험 장치 구성

고속 카메라를 이용하여 가공 중 공구 변형 이미지를 획득하기 위하여 Fig. 2(b)와 같은 실험 장치를 구성하였다. 사용된 CNC머시닝센터는 두산공작기계의 DOOMAC 80V를 사용하였으며 실험에 사용된 고속 카메라(FASTCAM ultima APX, Photron_{TM})는 Fig. 2(a)와 같이 설치 하였다. 고속 카메라의 세부 사양은 Table 1과 같으며 가공 중 발생하는 칩에 의한 렌즈 및 고속 카메라의 파손을 방지하고 공작기계의 진동에 의해 이미지의 잔상이나 고속 카메라의 위치 변화가 발생할 수 있기 때문에 Nikon-mount Camera Lens를 이용하여 원거리에서 측정하였다.

2.3 공구 변형 이미지 획득

정확한 공구 변형 이미지를 획득하기 위하여 HSS 소재의 직경 6mm 4 날 플랫 타입 엔드밀을 사용하여 측면 윤곽 밀링 가공을 수행하였다.

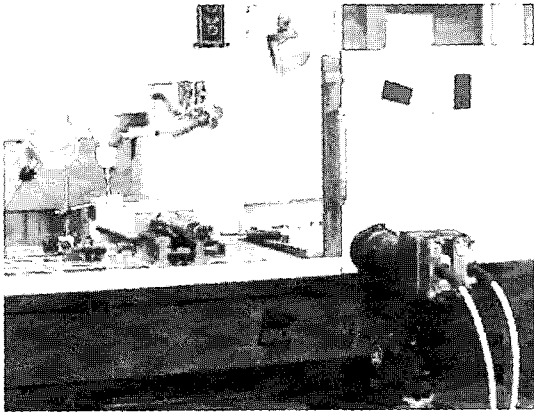


Fig. 2 (a) Picture of experimental system

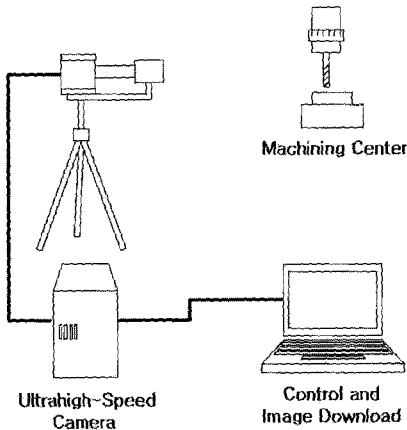


Fig. 2 (b) Schema of experimental system

Fig. 3은 실험에서 진행된 절삭 내용을 나타낸 그림으로 정확한 절입 깊이를 가공하기 위하여 가공에 사용된 엔드밀을 이용하여 소재의 기준면을 가공한 후 실제 가공을 수행하였다. 가공 시편의 재질은 SM45C이며 상세한 가공 조건은 Table 2와 같다. 실험을 통하여 획득한 이미지의 분해능은 512×512pixels 이며 1회전당 20컷의 가공 이미지를 획득하기 위하여 초당 500프레임의 속도로 촬영하였다. 실험에 사용된 촬영 시스템은 최대 8192장의 이미지를 한번에 획득할 수 있으며 따라서 약 16초 분량의 가공 이미지를 획득할 수 있다. 이미지 프로세싱 과정에서 공구의 가공 전 이미지와 가공 중의 이미지를 비교 하기 위하여 가공 직전에 촬영을 시작하였다.

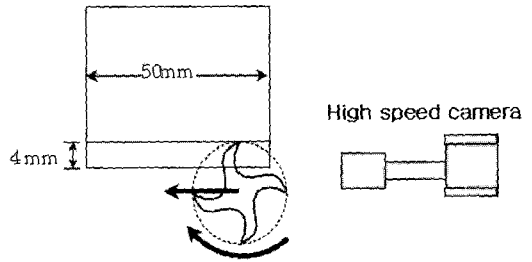


Fig. 3 Cutting process in experiments

Table 2 Conditions of machining process

Tool	
Flute part ϕ	6mm
Cylindrical part ϕ	8mm
Used length	50mm
Flute part length	30mm
Flute number	4
Helix angle	30°
Machining conditions	
Spindle Speed	1500rpm
Feedrate	30mm/min
Milling mode	Down milling
Radial depth	4mm
Axial depth	6mm (fixed)
Work piece	SM45C

3. 이미지 프로세싱을 통한 공구 변형 측정

3.1 가공 이미지 선택

고속 카메라에 의해서 촬영된 이미지를 이용해 공구의 변형을 측정하기 위하여 소재의 가공 전 이미지와 가공 중 이미지가 필요하다. 가공에 사용된 공구의 경우 Helix angle이 30°의 4날 플랫 엔드밀로서 공구의 회전에 의한 각도의 변화에 따라 이미지의 외곽 형상이 틀려지게 된다.

이는 이미지 프로세싱에서의 정확한 공구 변형 측정에 저해되는 요소로서 이를 해결하기 위하여 동일한 각도에서의 엔드밀의 이미지가 필요하다. 또한 발생하는 칩에 의해서 공구의 형상이 가려지는 경우도 공구 변형을 측정할 수 없는 이미지이다.

이러한 점을 고려하여 정확한 공구 변형량을 측정하기 위하여 Fig. 4(a)와 같은 가공 전 이미지

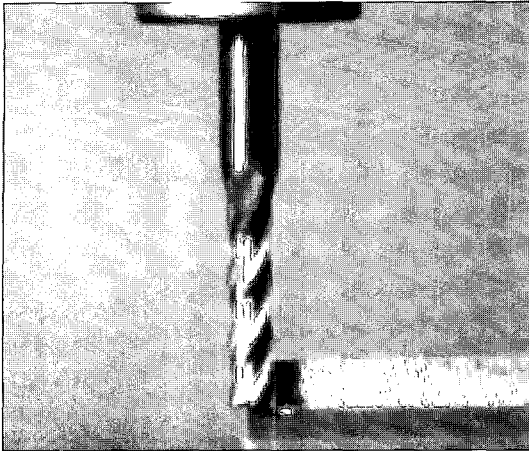


Fig. 4(a) Air-cutting image

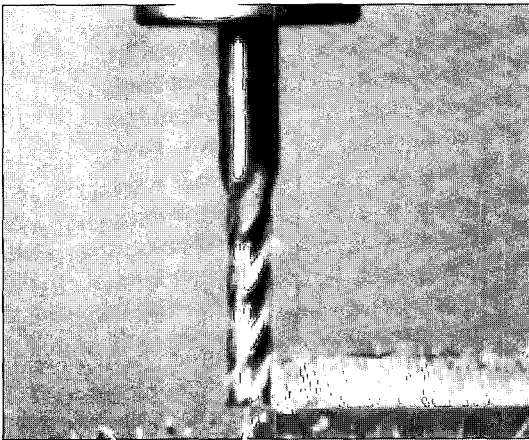


Fig. 4(b) Material-cutting image

와 1회전당 20컷의 촬영이미지를 고려하여 20배수로 Fig. 4(b)와 같은 가공 중 이미지를 선택하였다.

3.2 공구 변형 측정

획득된 가공 이미지를 이용하여 공구의 변형량을 측정하기 위하여 Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 공구의 변형이 일어나기 전 가공 이미지를 이용하여 공구 위치의 기준을 잡고 공구의 변형이 일어난 부분을 측정한다. 기준선이 정해지면 Fig. 5(b)와 같이 이미지에서 기준선과 공구 사이의 픽셀을 측정하여 공구 변형량을 알 수 있다. 그러나 고속카메라를 이용하여 촬영한 이미지의 경우 실제 거리를 측정할 별도의 기준이 존재하지 않는다.

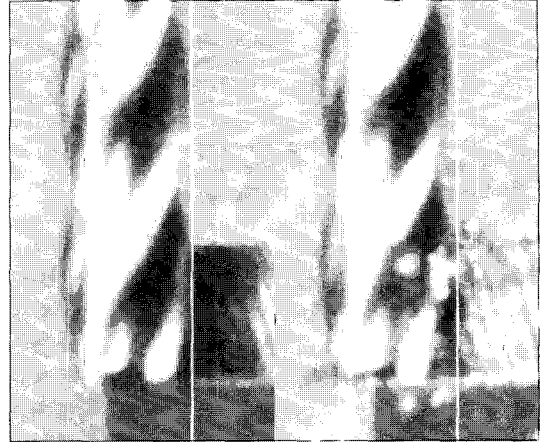


Fig. 5(a) Non-deformed and deformed tools

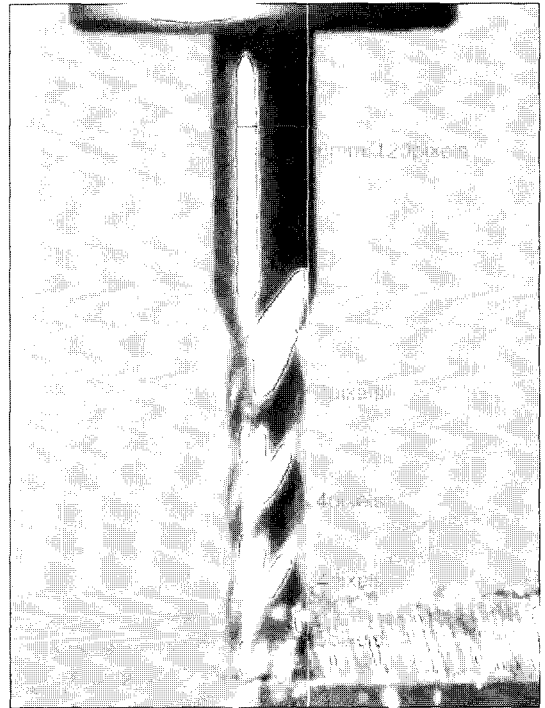


Fig. 5(b) Deflection errors in pixels

따라서 공구 변형의 거리를 알기 위해 공구 생크의 직경 8mm를 기준으로 픽셀당 거리를 계산하였다. 생크 부분의 픽셀은 120pixels이고 이를 통해 계산한 픽셀당 실 거리는 $66.7\mu\text{m}$ 이다.

Fig. 5(b)에서 측정된 공구의 변형량은 가공영역에서 평균 4.5pixels(4~5pixels)이고 앞서 계산한 픽셀당 거리를 이용하여 $300\mu\text{m}$ 의 공구 변형량을 측정할 수 있다.

4. 공구 경로 보상

가공오차를 감소시키기 위하여 Iterative tool path correction algorithm 을 적용하였다. 이는 가공 오차 만큼의 절입 량을 증가시켜 오차영역이 허용공차를 만족 할 때까지 반복적으로 수행하는 방법이다[8~11].

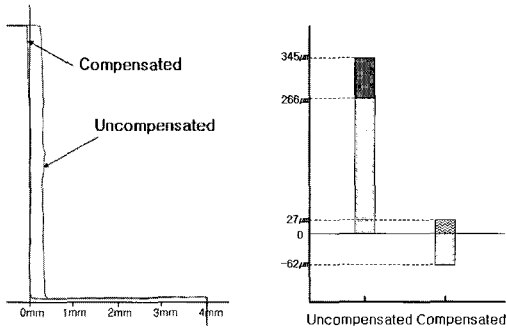


Fig. 6 Experimental results

본 연구에서는 측정된 공구 변형량을 통하여 300 μm 의 가공오차를 예측하였으며 4.300mm의 절입량을 증가시켜 1회의 가공오차 보상을 시도하였다.

Fig. 6은 실험을 통하여 프로젝터를 이용하여 측정된 보상 전후의 가공 오차 및 가공면의 윤곽형상이다. 측정된 가공오차는 보상 전 평균 305.5 μm (266 μm ~345 μm)에서 보상 후 평균 17.5 μm (27 μm ~-62 μm)로 약 94%의 가공오차 감소가 있었다. 고속 카메라를 이용하여 측정한 가공 오차는 300 μm 로 실제 측정된 데이터에 약 98% 접근하였다.

5. 결론

본 연구의 목적은 고속 카메라를 이용하여 측정된 윤곽 밀링 가공의 공구 변형량을 통해 예측한 가공오차를 오프라인 가공오차 보상에 이용하기 위한 것이다.

고속 카메라를 이용하여 측정한 가공오차는 실제 가공오차에 약 98% 근접함으로서 이 방법이

유효함을 증명했다. 또한 가공 오차 보상을 통하여 약 94%의 가공오차를 감소시킬 수 있었다. 실험에서 획득한 이미지는 최상의 상태가 아니었다. 이는 실험에 사용된 렌즈와 조명의 선택이 적절하지 못했으며 적절한 렌즈와 조명을 이용하면 더 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] S. J. Huang, C. Y. Shy, 1999, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 46, No. 1, p. 169.
- [2] R. S. Jober, Y. C. Shin, O. D. I., Nwokah, 1997, Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 119, p. 146.
- [3] T. Watanabe, S. Iwai, 1983, Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 105, p. 192.
- [4] Z. Lechniak, A. Werner, K. Skalski, K. Kedzior, 1998, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 76, p. 42.
- [5] E. M. Lim, C. H. Menq, 1997, Transactions of ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 119, p. 402.
- [6] 임태순, 이채문, 김석원, 이득우, 2002, 터빈블레이드의 5 축 고속가공에서 최적가공경로의 선정, 한국소성가공학회 2002 금형가공 심포지엄, pp. 53~60.
- [7] C. C. Lo, C. Y. Hsiao, 1998, Computer-Aided Design, Vol. 30, No. 1, p. 55.
- [8] T. I. Seo, M. W. Cho, 1999, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 16, No. 7, p. 203.
- [9] M. W. Cho, G. H. Kim, T. I. Seo, Y. C. Hong, H. H. Cheng, 2002, International Journal of Production Research, Vol. 40, No. 9, p. 2159.
- [10] M. W. Cho, T. I. Seo, H. D. Kwon, 2003, Journal of materials Processing Technology, Vol. 136, p. 88.
- [11] M. W. Cho, T. I. Seo, 2006, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 46, p. 1417.