

측면가공에서 마이크로 엔드밀의 공구변형에 의한 절삭가공오차 보상에 관한 연구

전두성*, 서태일⁺, 윤길상⁺⁺

(논문접수일 2008. 3. 17, 심사완료일 2008. 3. 29)

A Study of Machining Error Compensation for Tool Deflection in Side-Cutting Processes using Micro End-mill

Du-Seong Jeon*, Tae-il Seo⁺, Gil-Sang Yoon⁺⁺

Abstract

This paper presents a machining error compensation methodology due to deflection of micro cutting tools in side cutting processes. Generally in order to compensate for tool deflection errors it is necessary to carry out a series of simulations, cutting force prediction, tool deflection estimation and compensation method. These can induce numerous calculations and expensive costs. This study proposes an improved approach which can compensate for machining errors without simulation processes concerning prediction of cutting force and tool deflection. Based on SEM images of test cutting specimens, polynomial relationships between machining errors and corrected tool positions were induced. Taking into account changes of cutting conditions caused by tool position variation, an iterative algorithm was applied in order to determine corrected tool position. Experimental works were carried out to validate the proposed approach. Comparing machining errors of nominal cutting with those of compensated cutting, overall machining errors could be remarkably reduced.

Key Words : Micro end-mill(마이크로 엔드밀), Machining Error(가공오차), Tool Deflection(공구변형), Tool path(공구경로)

1. 서론

최근 미래 산업으로 주목 받고 있는 분야인 로봇, 연료전지, 바이오센서 및 우주산업 분야에 사용되는 기계부품들은

초소형, 고정밀도가 필수적으로 요구되고 있다. 현재까지의 마이크로 단위에서의 초소형 구조물 생산은 MEMS 기술 등의 2차원적인 형상에 국한되어 있었으며, 3차원 형상에는 적용을 하지 못하는 상황이었다. 그러나 최근에 직경 1mm

* 인천대학교 기계공학과
+ 교신저자, 인천대학교 기계공학과 (tiseo@incheon.ac.kr)
주소: 402-751 인천광역시 남구 도화동 177 인천대학교
++ 한국생산기술연구원 정밀금형팀

이하의 엔드밀이 개발되고, 분해능이 높은 공작기계와 수만 RPM의 회전속도의 구동이 가능한 스피들이 개발되며, 엔드밀을 이용한 마이크로형상의 3차원가공이 연구 되고 있다. 마이크로형상의 특징은 범용엔드밀에서 가공된 가공물의 공차범위에 해당되는 크기가 마이크로형상의 전체 크기가 될 수 있다는 것이다. 그러므로 가공오차의 극복은 필연적으로 이루어야 할 문제이다.

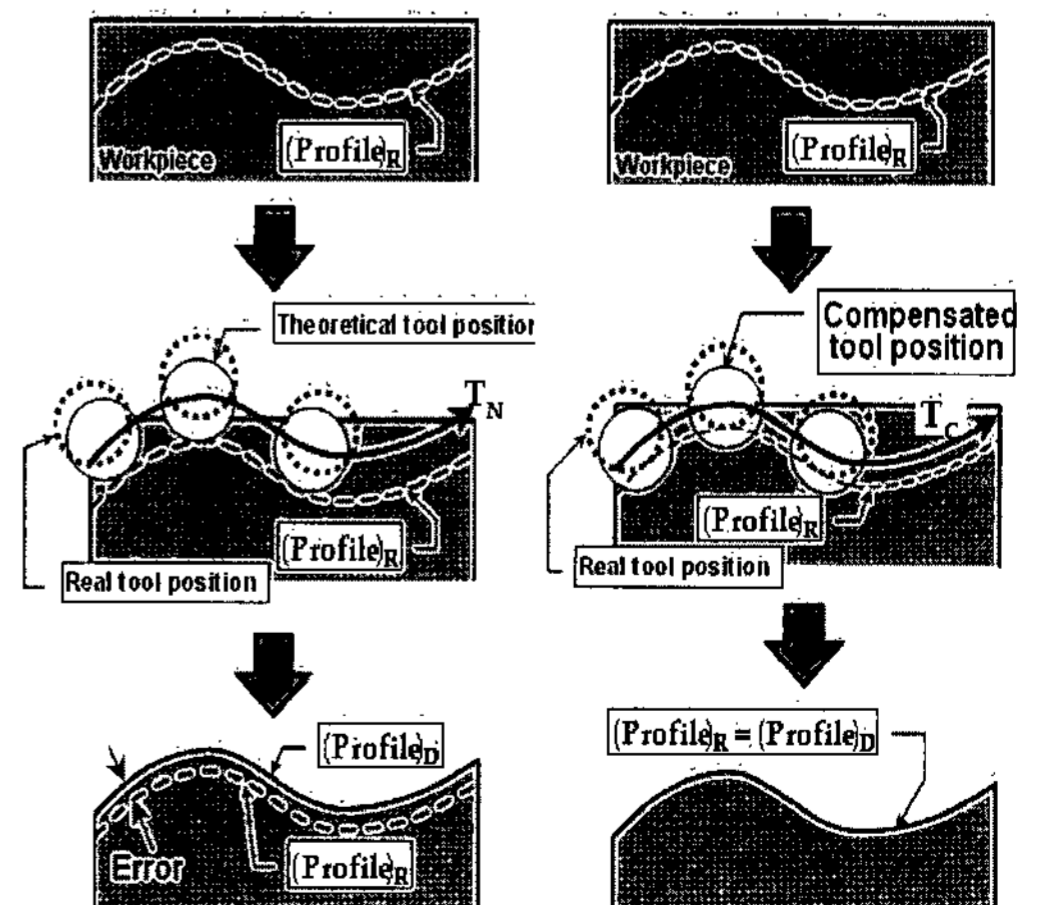
가공오차의 원인으로는 공구의 파손, 런 아웃, 공구 변형 등 다양한 원인들이 있다. 이러한 원인 중 공구의 변형에 대한 가공오차는 CAD/CAM 시스템에서 고려되지 않는 부분이다. 공구의 변형은 절삭깊이 및 공구의 이송속도와 깊은 연관을 갖고 있다. 공구이송속도(feedrate)를 증가시키면 생산성의 증가로 이어질 수 있으나, 이로 인한 공구와 공작물 사이에 발생하는 절삭력의 증가는 공구 변형량 증가의 원인이기 때문에 정확히 CAD데이터와 일치하는 절삭 결과를 얻을 수 없다. 이러한 문제를 다룬 연구는 주로 실시간 자동제어(real-time control)개념에 바탕을 두고 있으며 적응제어 이론(adaptive control theory)을 이용하여 절삭가공 시 발생하는 절삭력이 일정한 값을 초과 하지 않도록 이송속도를 제어하는 접근방법에 대한 연구가 이루어져왔다⁽¹⁾. 또한 Watanabe와 Iwai의 연구에서는 공구위치를 실시간으로 제어함으로써 가공오차를 줄이는 방법을 제안한 바 있다⁽²⁾. 이와 같은 방법을 실시간으로 구현하기 위해서는 이를 측정하기 위한 공구동력계와 센서 등 고비용의 장비가 필요하며 절삭력이나 다른 실시간 측정데이터를 기반으로 정확한 가공오차의 예측과 보상이 용이하지 않고 가공 시간이 증가되는 현상이 나타난다. 이와 반대로 오프라인 형태의 접근방법이 제시된 바 있는데, 이는 실제 절삭가공 이전에 가공오차의 예측과 공구의 경로를 수정하는 방법이다⁽³⁾. 공구경로를 수정하기 위해서는 밀링 가공의 절삭력을 예측하기 위한 모델을 수립하고 공구변형량 계산과 가공오차를 예측하기 위한 연속적인 시뮬레이션 과정을 거쳐야 한다⁽⁴⁾. 이 경우 모델링 오차의 누적에 따른 정밀한 오차 보상이 용이하지 않고 보상과정이 불필요하게 복잡해지는 단점이 있다. 또한 마이크로 엔드밀을 이용한 가공에서의 절삭력은 일반적인 엔드밀에서의 절삭력 보다 매우 작아서 측정 할 때 고정밀도의 공구동력계가 필요할 뿐만 아니라 절삭력 측정 중 여러 가지 노이즈에 의해 신호획득의 어려움이 있다⁽⁵⁾. 또한 절삭력에 측을 위한 모델링에서 무시되었던 요소들이 마이크로 가공에서는 절삭력을 결정하는데 큰 요소가 될 수 있으므로 정확한 절삭력을 예측하기가 어렵다⁽⁶⁾. 본 연구에서는 공구동력계나 다른 센서의 측정 없이 가공된 절삭물의 절삭 프로파일

을 SEM 사진을 이용하여 측정하고 공구의 변형에 의하여 발생하는 가공오차와 절삭깊이와 관계를 다항식 형태로 정의하고, 이를 이용하여 공구변형의 영향하에 있음에도 가공 오차를 현저히 줄일 수 있는 공구경로를 생성하는 반복적인 알고리즘을 적용한다. 공구변형에 의한 가공오차를 줄이기 위하여 공구의 경로를 보상하는 방법을 제시하였다. 제시된 접근방법을 실험적으로 검증하기 위하여 보상전후의 마이크로 가공을 실시하여 가공오차를 비교하였다. 전체적으로 현저한 가공오차의 감소를 볼 수 있었으며 약 84%의 감소율을 얻을 수 있었다.

2. 절삭가공오차의 보상

공구의 경로는 단순한 수작업에 의한 G-Code를 생성하는 경우도 있지만 복잡한 형상의 경우 CAD/CAM시스템에 의하여 결정되는데 이때 가공물의 형상의 기하학적 데이터만을 토대로 결정된다. 이는 공구변형에 의한 가공오차의 발생은 CAD/CAM시스템에서 고려하고 있지 않다는 것을 의미한다. 따라서 공구변형으로 발생하는 가공오차를 줄이기 위한 방법으로 앞서 언급한대로 본 연구에서는 공구경로를 수정하여 공구변형의 영향이 있더라도 가공오차가 최소로 발생하도록 하고자 한다.

본 연구에서 적용한 보상방법의 개념을 간략하게 도식화하여 설명한 것이 Fig. 1에 나타나 있다. Fig. 1-(a)는 공구 궤적 보상 개념이 적용되지 않은 일반적인 절삭 가공을 묘사



(a) Without compensation (b) With compensation

Fig. 1 General concept of compensation

하고 있다. 우선 절삭 재료의 절삭 프로파일을 구현하기 위한 공구 궤적 T_N 은 일반적으로 CAD/CAM 시스템에 의해 결정된다. 실제 절삭 가공 시 발생하는 절삭력에 의해 공구가 변형을 하여 절삭 표면에 변형된 (Profile)_D를 남긴다. 따라서 표면오차는 (Profile)_R과 (Profile)_D의 차이에 의해 결정된다. 반대로 Fig. 1-(b)는 공구 궤적 보상 개념이 적용된 경우이다. 공구 궤적 결정 모듈 내에서 공구 변형에 의해 발생할 오차를 없애기 위해 새로운 공구 궤적을 계산한다.

따라서 (Profile)_R과 최대한 일치한 (Profile)_D를 구현할 수 있게 된다.

2.1 기어의 신뢰성 평가 방법

공구의 변형에 따른 가공오차의 발생은 측면가공의 경우 축방향에 따라 균일하지 않은 량의 가공오차가 분포하게 된다. 이는 공구가 절입되는 깊이에 따라 공구의 회전각에 대하여 절삭력이 변동이 생기고 이로 인하여 공구변형량도 변한다. 또한 절삭면을 만드는 주된 공구날은 헬릭스각도로 비틀어져 있기 때문에 회전각에 따라 공구변형량과 공구날의 이동이 절삭면을 이루게 된다. 이것은 공구변형에 의하여 발생하는 가공오차는 축방향에 따라 변하게 되고 가공오차를 감소하기 위한 새로운 공구경로를 결정하는데 어떠한 가공오차를 기준으로 하여야 하는지에 대한 문제를 고려하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 축방향에 따라 변동하는 가공오차를 특성화하여 가공오차의 정도와 기준면에서 전체적인

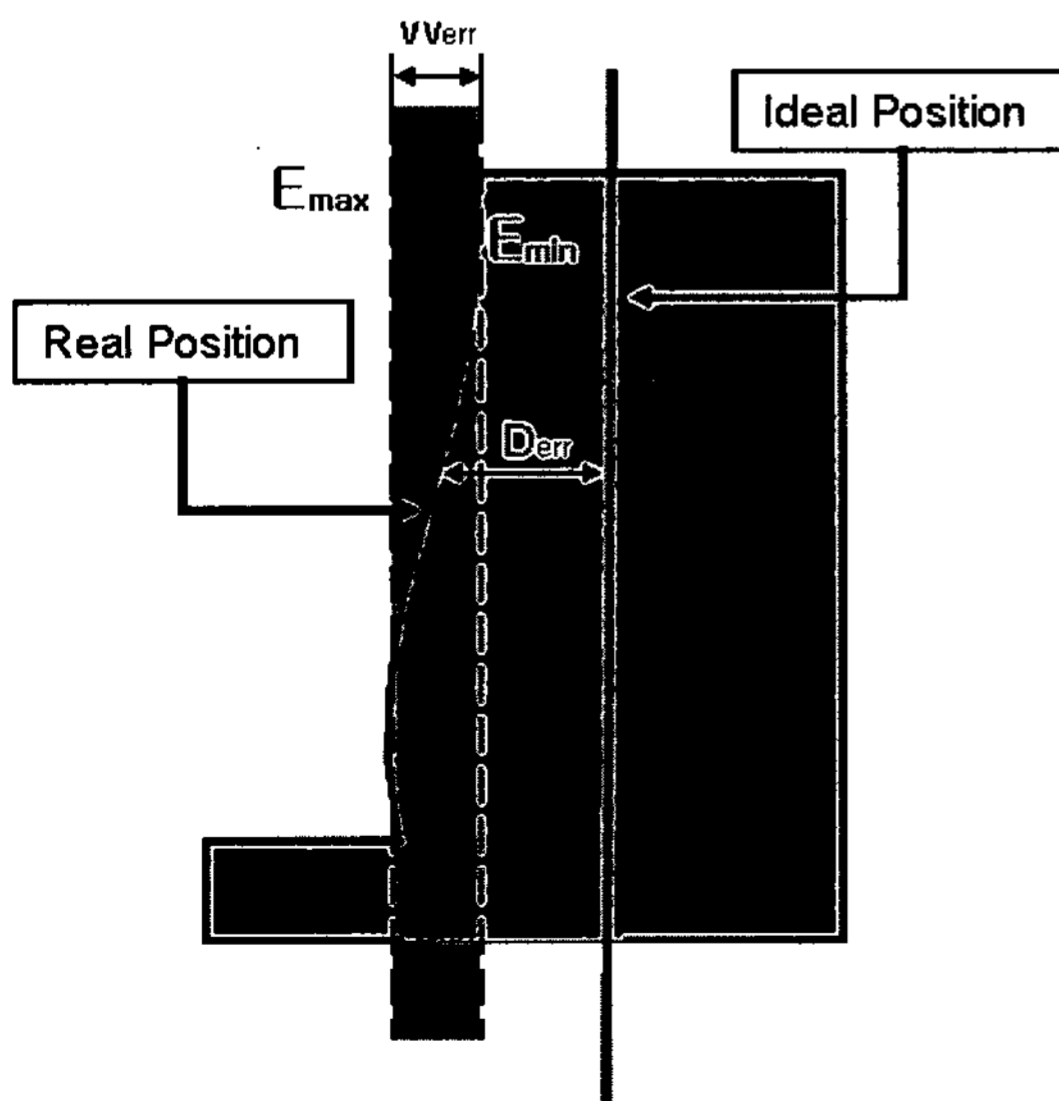


Fig. 2 Characteristic parameters of surface error

절삭면이 얼마나 떨어져서 오차가 발생하였는지를 모델링하고자 한다.

가공오차의 분포는 비선형 형태(Real Position)로 분포한다. 따라서 주어진 (Ideal Position)과 비교를 위하여 가공오차를 특성화할 필요가 있다. 본 연구에서는 절삭표면형상을 (Ideal Position)과 비교하기 위하여 특성화된 파라미터를 정의 한다. Fig. 2는 파라미터의 기하학적 정의를 보여준다. 첫째로 공구 변형량에 의해 발생한 최대오차(E_{max})와 최소오차 (E_{min})를 정의한다. 이 파라미터들을 기본으로 오차영역 (Error zone)을 정의한다. 이는 표면의 형상과 관계없이 절삭표면전체를 모두 포함하는 최소 폭의 영역을 정의한다. 이 경우 오차영역 폭(W_{err})과 오차영역편차(D_{err})를 정의할 수 있다. 이 두 개의 파라미터들은 식 (1)과 같이 계산 할 수 있다.

$$W_{err} = \frac{E_{max} + E_{min}}{2} \quad D_{err} = E_{min} + \frac{W_{err}}{2} \quad (1)$$

이들은 표면오차의 정량적 분석과 비교를 합리적으로 수행할 수 있도록 한다. 이들 정의된 파라미터들은 실제 절삭 표면에서 측정된 표면오차의 값들을 기반으로 결정된다.

2.2 공구 경로 수정

기존의 오프라인 방식의 방법에는 반복계산 시 절삭력 예측모델과 공구변형량 계산 루틴이 포함되어 매우 비효율적이다. 본 논문에서 제안된 절삭가공오차를 최소화하는 공구 경로 수정법은 앞서 정의한 특성화된 가공오차 파라미터를 이상적인 가공위치(Ideal Position)과 비교, 분석하여 계산에 의하여 공구경로를 수정한다⁽⁷⁾. 즉 공구경로 수정 시 생

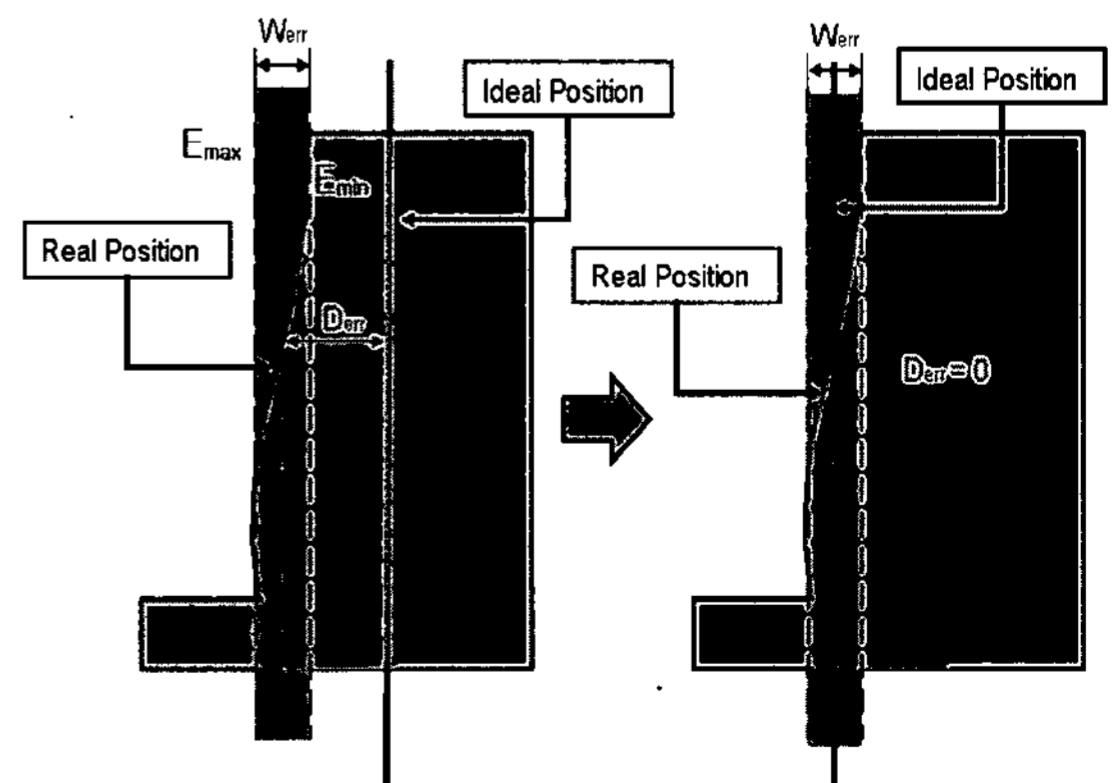


Fig. 3 Method of Machining Error Compensation

기는 절삭가공조건의 변동을 공구경로 수정에 재 고려시키는 반복계산의 형태로서 실제로 CAD 데이터 상의 형상이 변경되더라도 반복적인 가공이나 측정공정이 소요되지 않는다. Fig. 3는 본 연구에서 제안한 공구경로 수정법을 나타낸 것이다. 반복계산 시 오차 영역 폭(W_{err})의 중심이 이상적인 가공위치(Ideal Position)에 일치 하도록 한다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 마이크로 머시닝 시스템

마이크로 엔드밀링 가공을 하기 위하여 Fig. 4과 같이 서브마이크로 단위의 제어를 위한 X, Y, Z축의 3축 자유도를 가진 스테이지를 구성하여 실험에 활용하였다. X, Y 스테이지는 Newport사의 M-IMS600CCHA 스테이지를 사용하였고 Z 스테이지의 경우 동일 회사의 M-ILS200CCHA 스테이지를 사용하였다.

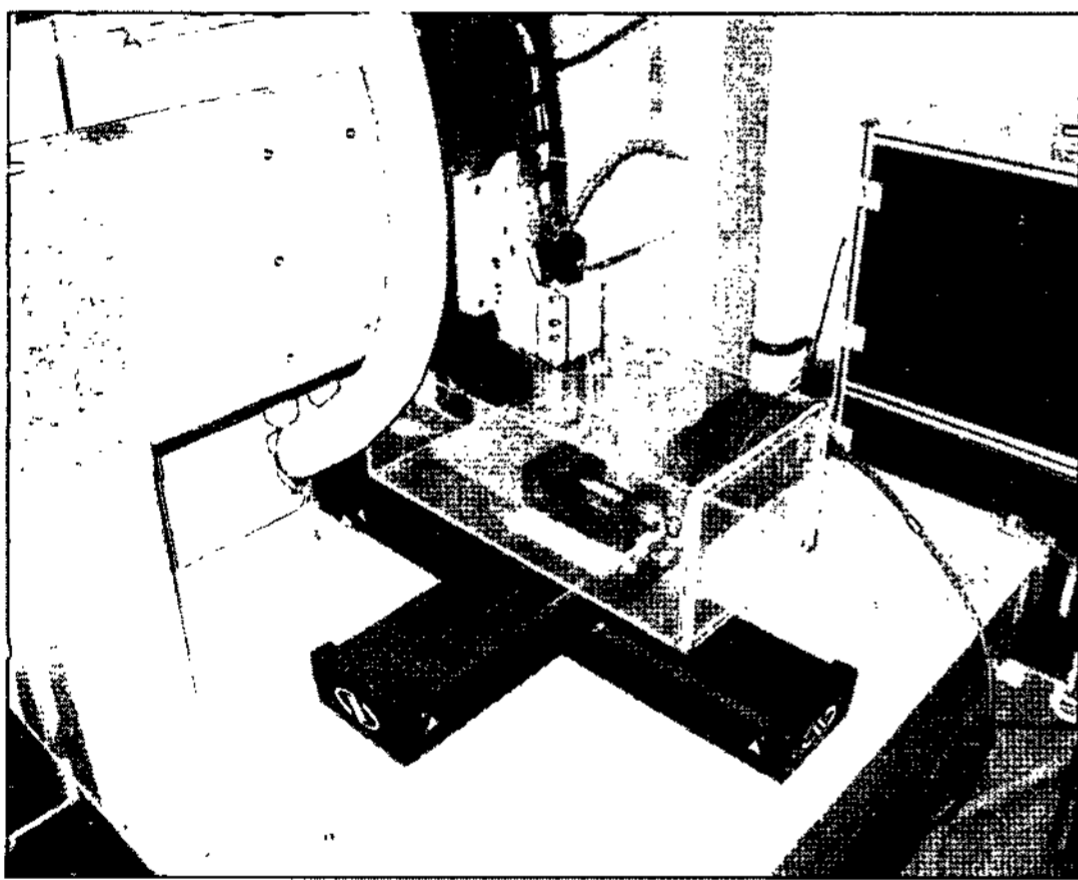


Fig. 4 Micro machining system

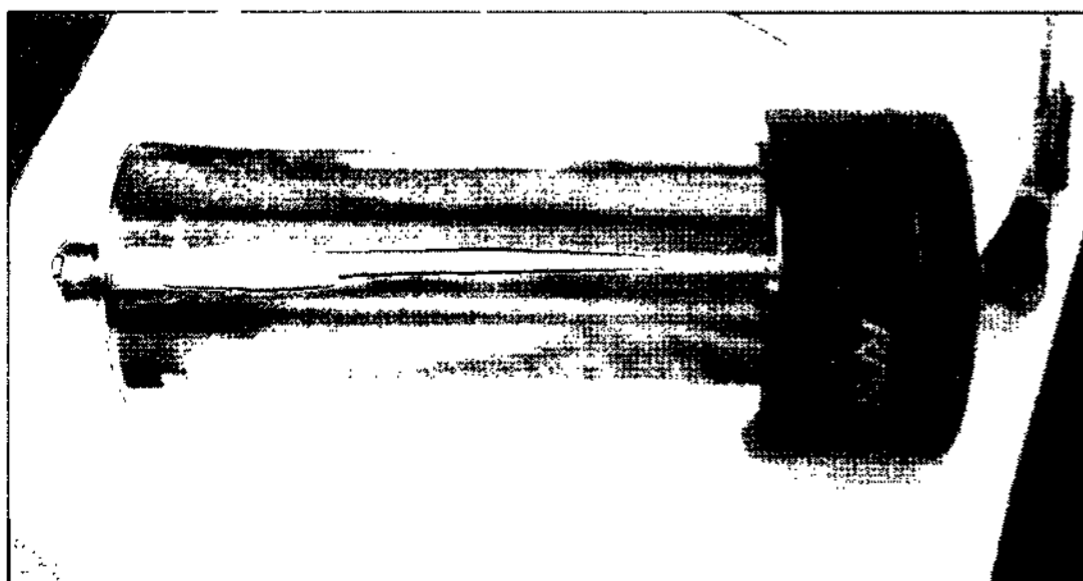


Fig. 5 Air spindle

Table 1 Micro machining system

Traveling range	600×600×200mm
Resolution	0.1μm
Accuracy	X, Y : 10μm Z : 5μm
Max velocity	X, Y : 200mm/s Z : 100mm/s
Workpiece weight	Max. 45kg
Rotational speed	Max. 100,000rpm
Spindle run-out	Max. 0.6μm
Static radial load	Min. 6kgf

모두 0.1μm의 분해능을 가지고 있어 충분히 서브 마이크로 까지 가공 제어가 가능하도록 하였다. 또한 향 후대면적 가공 실험을 위하여 600×600mm의 X, Y 축 이송범위를 수행 할 수 있도록 설계 하였다. 가공에 사용된 스피들은 에어베어링과 AC모터로 구성되어 있으며 인버터를 통해 20,000~100,000rpm까지 안정적인 구동이 가능하도록 하였다. 가공 시 진동에 의해 일어날 수 있는 가공 오차를 최소화 하기 위하여 방진장치(Isolator)로 지지되어 시스템 전체가 지면에서 떠 있을 수 있도록 하였다. 자세한 사항은 Table 1과 같다.

3.2 실험 방법

엔드밀의 반경방향의 절입깊이 혹은 측면절삭깊이 RD (Radial depth)값을 실험의 변수로 지정하기 위하여 황동 시편에 Fig. 6-(a)와 같이 여러 개의 폴을 가공한 후 마이크로 머시닝 시스템에서 가공 기준을 정하기 위하여 Fig. 6-(b)에서 보는 바와 같이 기준면을 가공 하였다. 기준면은 획득한 이미지 상에서 측정의 원점 역할을 하기 때문에 최대한 공구변형이 발생하지 않는 이송속도의 조건으로 가공

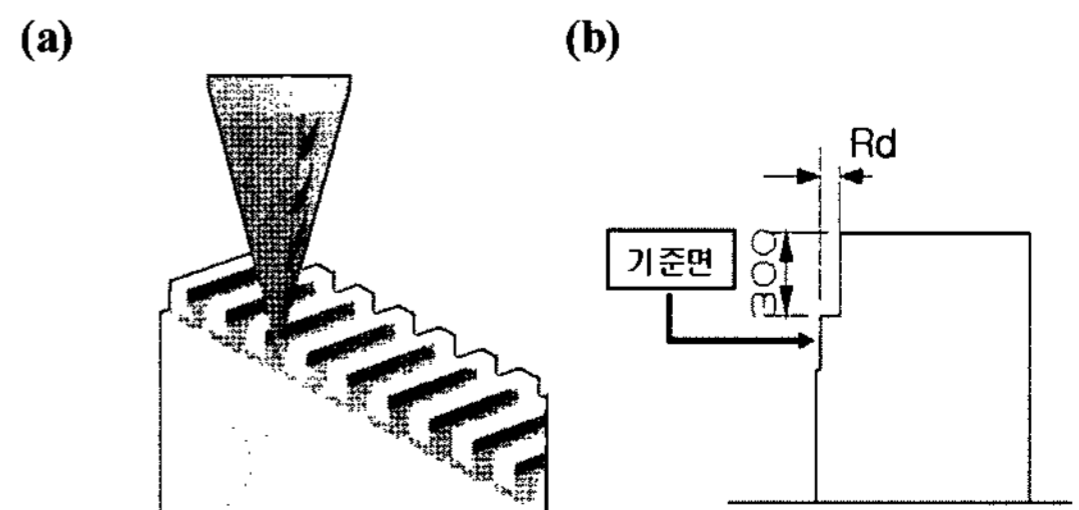


Fig. 6 Reference surface

하였다.

Table 2와 Fig. 7은 실험한 가공조건을 보여주고 있다. RD값은 기준면으로부터 30 μ m에서부터 180 μ m까지 30 μ m 씩 증가하여 변수로 주었으며 실험과정은 Fig. 8에서 보는

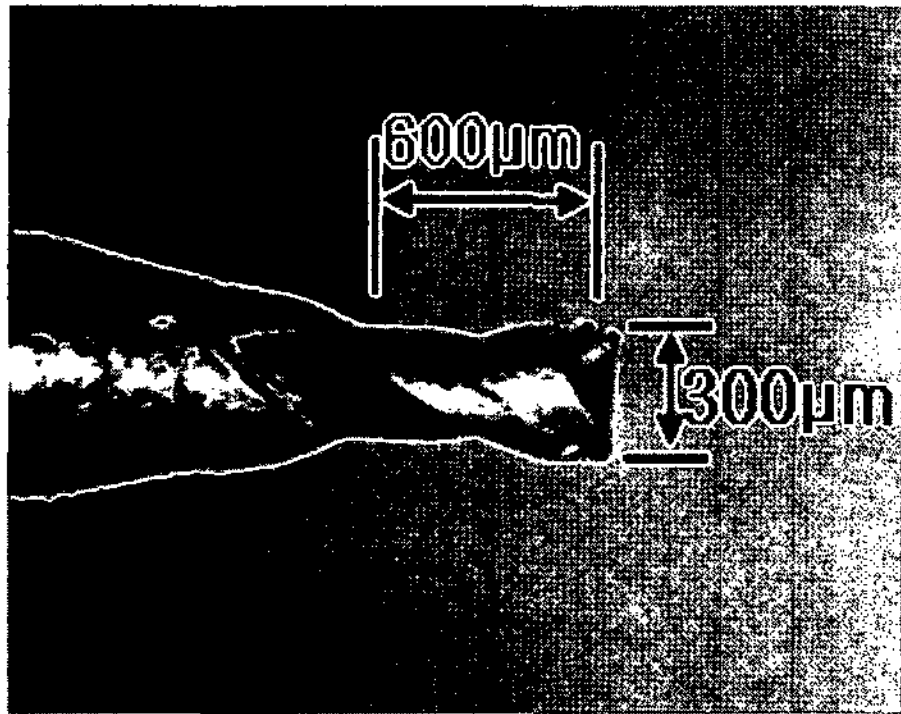


Fig. 7 Φ 300 μ m Micro end-mill

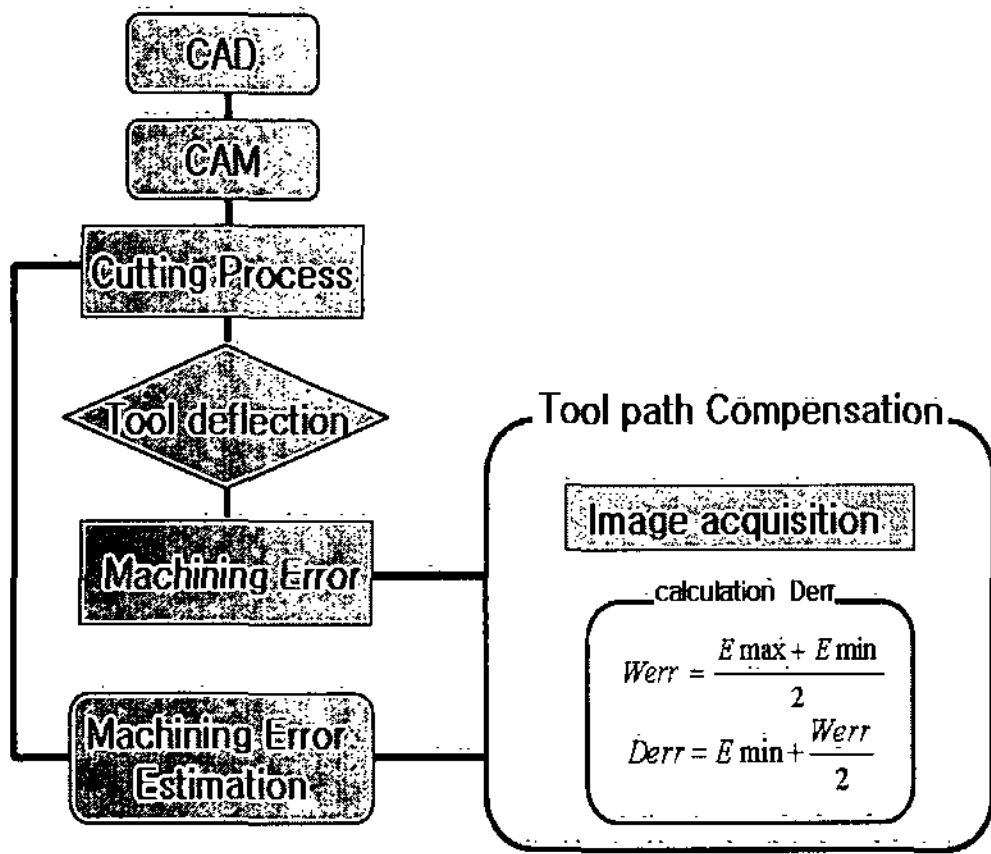


Fig. 8 Machining Error Compensation process

Table 2 Cutting conditions

Feedrate	525mm/min
RPM	40,000
Axial depth	300 μ m
Radial depth	30, 60, 90, 120, 150, 180 μ m
Tool	Φ 300 μ m, Helix angle 30° 2-flute flat end-mill, WC(초경) TiAlN coating
Workpiece	Brass
Milling mode	Down milling

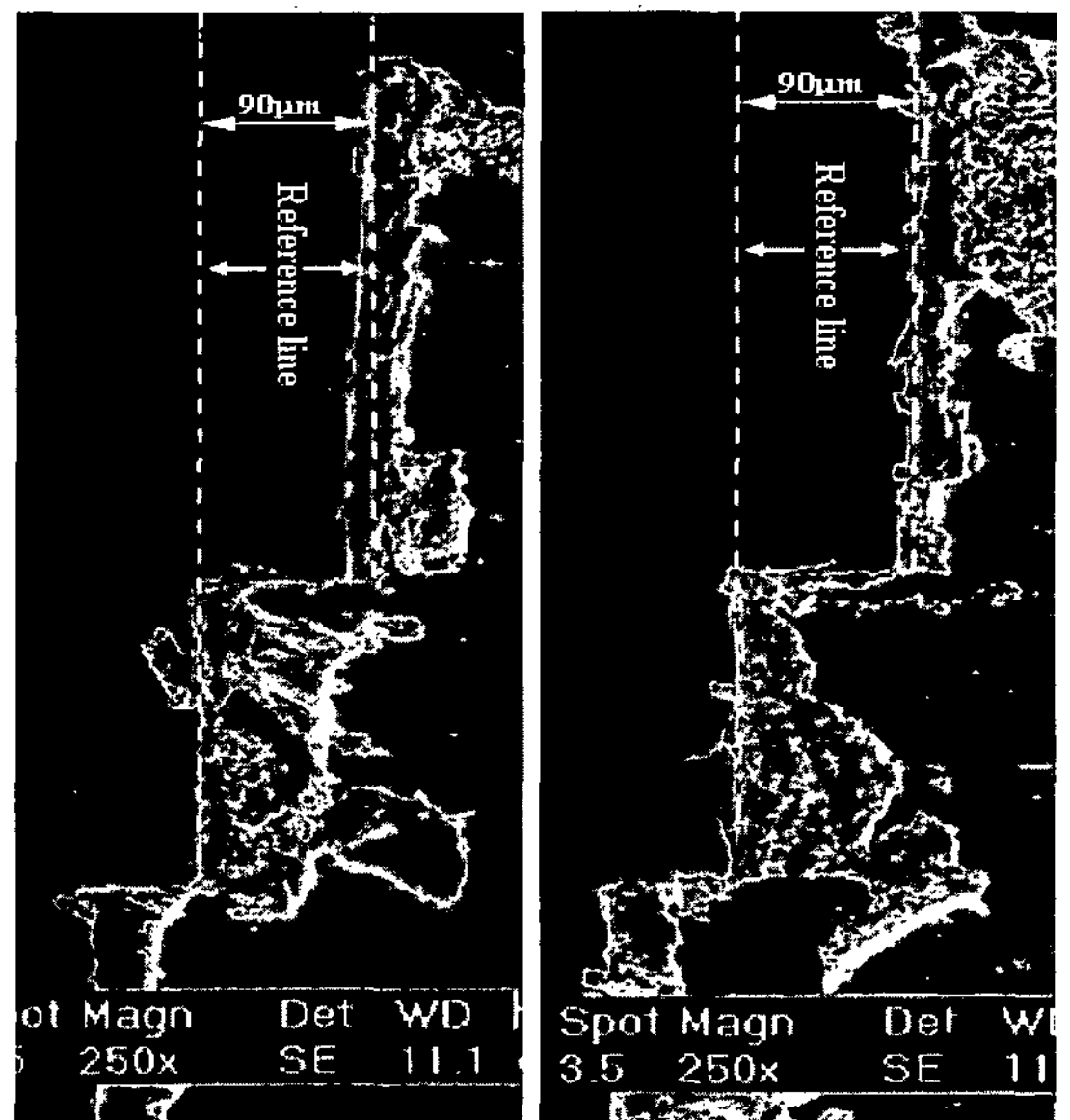
바와 같이 공구변형에 의한 가공오차를 측정하기 위하여 SEM 이미지를 얻었고, 측정된 프로파일로부터 가공오차의 특성화를 수행하여 RD값과 공구의 새로운 위치를 결정하여 가공오차를 보상하는 방법을 택하였다.

SEM 이미지 분석을 통하여 분석된 가공오차의 정량적인 량을 RD값의 함수로 표현되는 오차영역 폭(W_{err})과 오차영역편차(D_{err})를 다항식 형태의 함수로 모델링하여 보상된 공구경로를 결정하는 알고리즘을 적용할 때 사용하였다. 이를 이용하여 각각의 RD값에 대한 보상공구위치를 구하고 보상 전후의 마이크로 측면가공실험을 하여 비교하였다. 따라서 절삭력의 예측이나 다른 시뮬레이션과정을 거치지 않고 직접 가공오차의 보상을 위한 수정된 공구경로를 생성할 수 있었으며 이를 통하여 가공오차를 최소화할 수 있는 마이크로 측면가공을 할 수 있었다.

3.3 실험 결과

본 논문에서 제안된 공구변형에 의한 가공오차 보상 방법을 검증하기 위하여 가공된 황동시편을 Fig. 9에 보는 바와 같이 250배 확대 SEM 촬영을 실행하였다.

Fig. 9에 획득된 이미지에서 공구변형에 의한 가공오차를 특성화하기 위하여 Fig. 10 와 같이 그래프화 하여 이상적인



(a) Non-compensated

(b) Compensated

Fig. 9 SEM images of machined profiles

가공위치(Ideal position)과 오차 영역 폭(W_{err})을 획득한 후 보상 값을 계산 하였다.

Fig. 11는 각각의 RD값에 대하여 획득된 가공 오차 값에 대한 그래프이다. Fig. 12에서 보는 바와 같이 오차 영역 폭(W_{err})의 중심이 (Ideal position)에 근접 하는 것을 볼 수가 있었고, Fig. 13에서와 같이 다른 가공조건에서도 같은 경향을 보임을 알 수 있었다. Table 3은 각 RD 값에 따른 가공오차와 오차보상율에 대한 데이터이다. 각각의 오차 보상율에 대한 결과를 계산 후 전체의 가공오차보상율에 대

하여 계산 결과 평균 84%의 결과를 나타내었다. 이로써 공구 경로 보상이 가공오차를 극복할 수 있다는 가능성을 보여주었다.

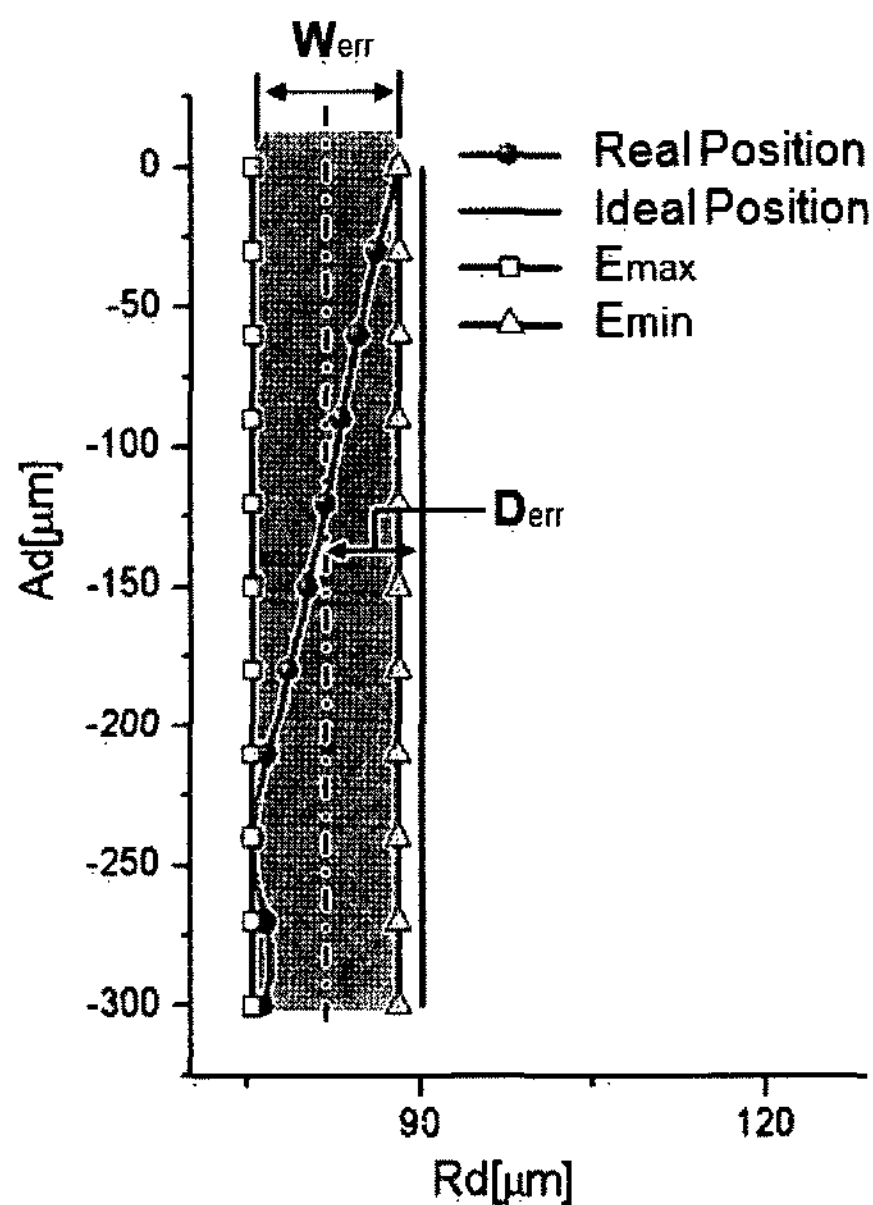


Fig. 10 Non-compensated machined profile(RD=90 μ m)

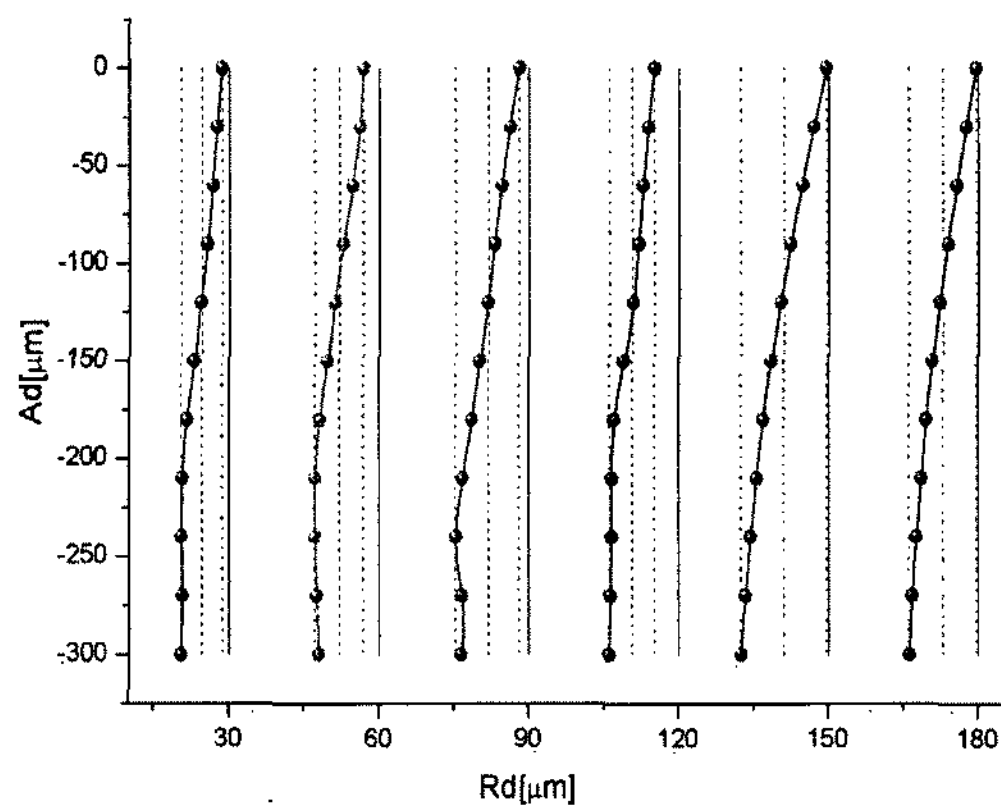


Fig. 11 Non-compensated machined profile

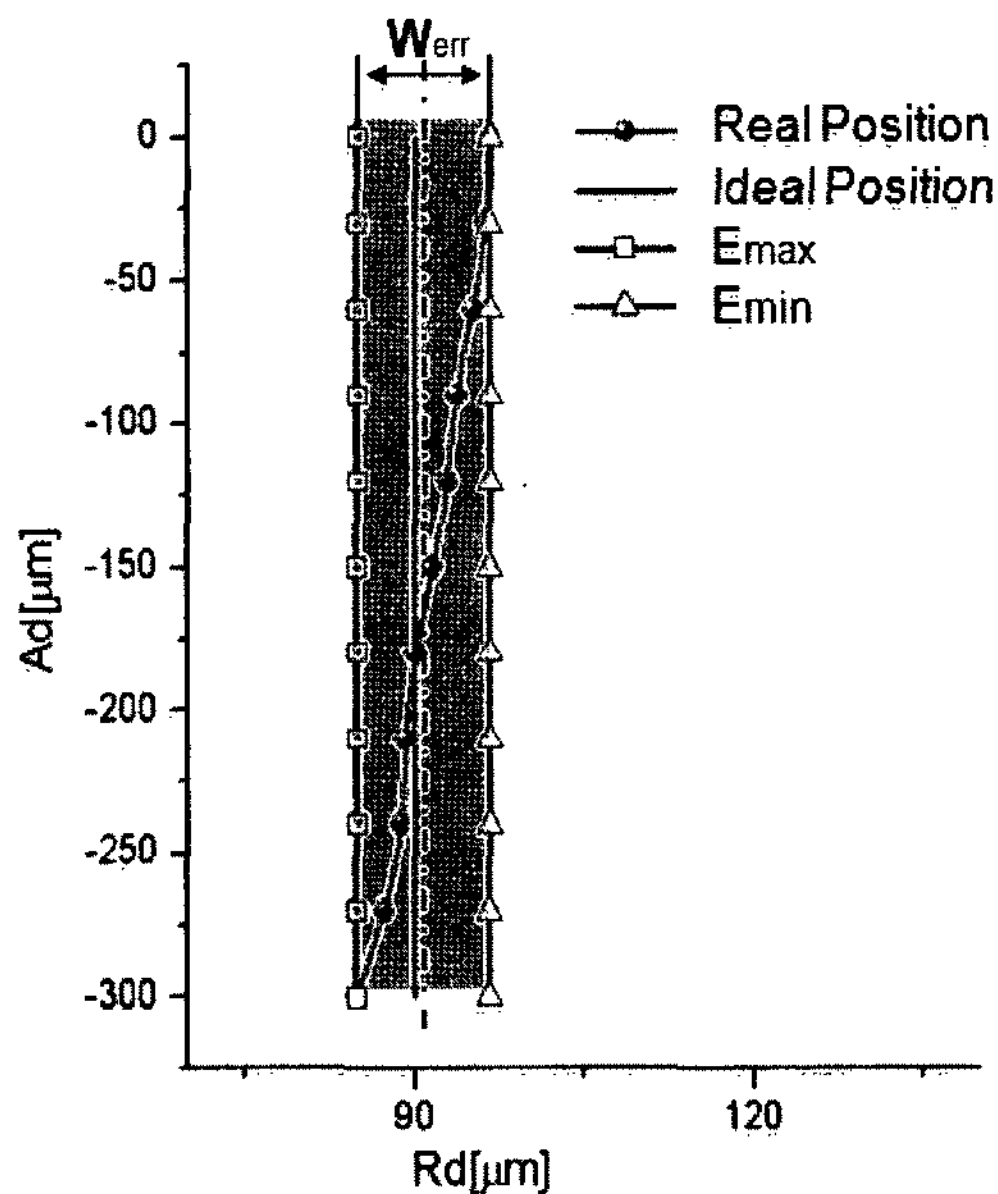


Fig. 12 Compensated machined profile(RD=90 μ m)

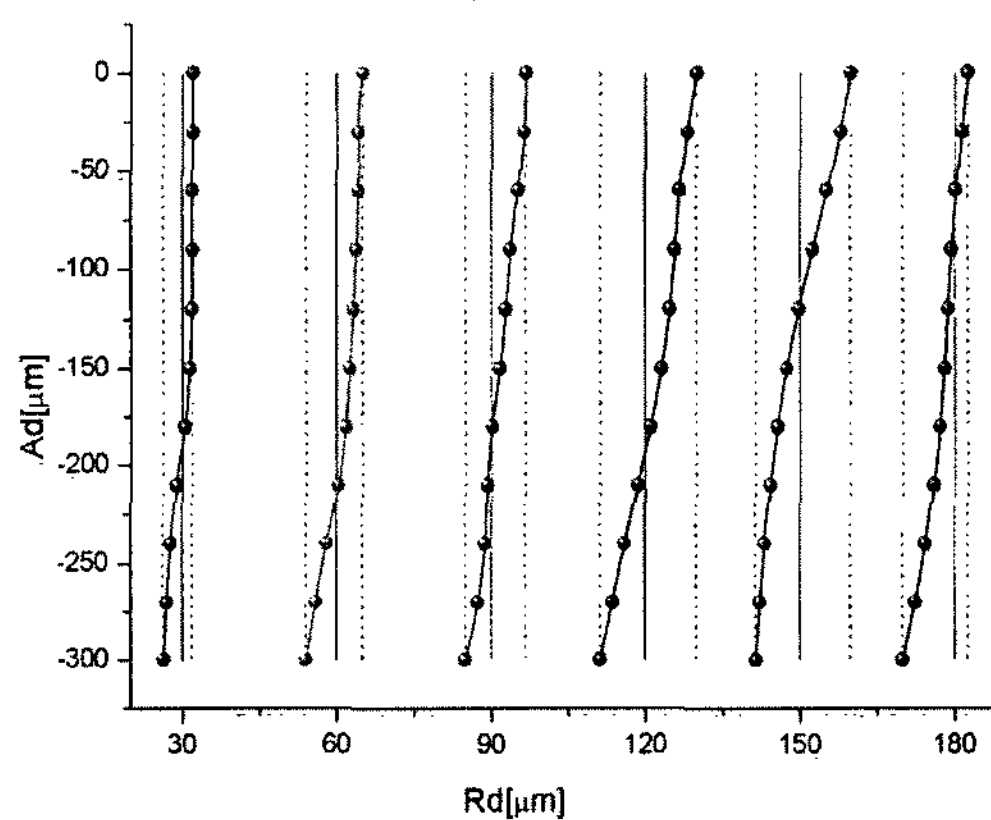


Fig. 13 Compensated machined profile

Table 3 Compensation rate

RD (μ m)	30	60	90	120	150	180
Derr_보상 전(μ m)	5.44	7.98	8.29	9.50	9.04	7.19
Derr_보상 후(μ m)	0.82	0.50	0.79	0.51	0.59	3.74
보상율	84%	93%	91%	94%	93%	47%

4. 결론

본 연구의 목적은 마이크로 엔드밀을 이용한 측면가공에서의 공구변형에 의한 가공오차를 공구의 경로를 보상하여 가공오차를 줄이는 것이다. 기존의 범용엔드밀 가공에서 공구변형에 의한 가공오차의 보상은 일련의 시뮬레이션과정이 요구되었다. 절삭력의 예측과 이를 바탕으로 공구변형량과 가공오차 발생량 예측에 관한 과정이 요구되었다. 본 연구에서는 특정한 절삭조건을 모델링 범위를 결정하고 이 범위 내에서 특정시편의 마이크로 엔드밀 가공을 수행하고 가공면의 SEM 이미지 추출 후에 가공오차의 정량적인 분석을 하였다. 가공오차가 공구의 축방향을 따라 균일하지 않은 형상의 프로파일을 남기기 때문에 가공오차의 특성화를 통하여 공구경로 보상알고리즘에 적용하는데 기준으로 사용하였다. 공구경로의 수정은 반복적인 알고리즘을 적용하여 공구의 위치가 변화함에 따라 절삭조건이 변화하는 것을 반복적인 알고리즘으로 고려하였다. 수정된 공구경로에 대하여 적용한 결과는 보상 전 측정된 값들과 보상후의 데이터의 비교 분석을 통한 결과 가공오차가 감소하였음이 증명되었고, 실험된 각 RD값에 대하여 전체적으로 평균 84%의 오차감소를 볼 수가 있었다.

후 기

본 연구는 인천대학교 2006년도 자체연구비에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

- (1) Fussell, B. K. and Srinivassan, K., 1989, "An Investigation of the End Milling Process Under Varying Machining Conditions," *Transactions of The ASME, Journal of Engineering for Industry*, Vol. 111, pp. 27~36.
- (2) Watanabe, T. and S. Iwai, 1983, "A Control System to Improve the Accuracy of Finished Surfaces in Milling," *Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 105, pp. 192~199.
- (3) Lechniak, Z., A. Werner, Skalski, K., and Kedzior, K. 1998, "Methodology of Off-line Software Compensation for Errors in the Machining Process on the CNC Machine Tool," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 76, pp. 42~48.
- (4) Kline, W. A., Devor, R. E., and Shareef, I. A., August 1982, "The Prediction of Surface Accuracy in End Milling," *Transactions of the ASME*, Vol. 104, pp. 272~278.
- (5) Chae, J. and Park, S. S., 2007, "High frequency bandwidth measurements of micro cutting forces," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, No. 9, pp. 1433-1441.
- (6) Vogler, M. P., DeVor, R. E., and Kapoor, S. G., 2004, "On the Modeling and Analysis of Machining Performance in Micro-endmilling, Part I: Surface Generation," *ASME Journal of Manufacturing and Science Engineering*, Vol. 126, No. 4, pp. 684~693.
- (7) Cho, M. W., Lee, S. H., and Seo, T. I., 1999, "On-Machine Measurement of Sculptured Surfaces on Based in CAD/CAM/CAI Integration; I. Measurement Error Modeling," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 172~181.