

미세형상 가공을 위한 Micro Slot 가공에서의 공구변형에 의한 가공오차 보상

손종인*, 윤길상⁺, 서태일⁺⁺

(논문접수일 2008. 3. 17, 심사완료일 2008. 3. 27)

Machining Error Compensation for Tool Deflection in Micro Slot-Cutting Processes for Fabrication of Micro Shapes

Jong-In Sohn*, Gil-Sang Yoon⁺, Tae-Il Seo⁺⁺

Abstract

Micro end-milling has been becoming an important machining process to manufacture a number of small products such as micro-devices, bio-chips, micro-patterns and so on. Despite the importance of micro end-milling, many related researches have given grand efforts to micro end-milling phenomenon, for example, micro end-milling mechanism, cutting force modeling and machinability. This paper strongly concerned actual problem, micro tool deflection, which causes excessive machining errors on the workpiece. To solve this problem, machining error prediction method was proposed through a series of test micro cutting and analysis of their SEM images. An iterative algorithm was applied in order to obtain corrected tool path which allows reducing machining errors in spite of tool deflection. Experiments are carried out to validate the proposed approaches. In result, remarkable error reduction could be obtained.

Key Words : Micro end-mill(마이크로 엔드밀), Tool deflection(공구변형), Slot-cutting processes(슬롯가공), Machining error compensation(절삭가공오차)

1. 서론

최근 마이크로 단위에서의 가공형상을 요구하는 연료전지

에서의 분리판 채널, 바이오칩의 미세채널, 유기EL의 도광판 패턴제작 등이 미래의 원동산업으로 부각되면서 Meso-Micro 패턴 제작에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 현재 위와 같은 제품을 가공하는 일반적인 방법으로 화학

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

적, 전기적 방법을 이용한 MEMS 방법이 활발히 연구되고 있으나 대량생산을 위한 금형제작을 위해서는 3차원적인 기계적 가공을 반드시 필요로 하며 이를 위한 기계적 마이크로 절삭가공의 연구가 필수적이다. 마이크로 패턴 가공의 경우 적용되는 용도에 따라서 다양한 기하를 갖게 되지만 일반적으로 수백 μm 에서 수십 μm 까지의 가공형상을 필요로 한다.

이를 기계적으로 가공하기 위해서는 직경 $\Phi 1$ 이하의 마이크로 공구를 사용하여야 한다. 가장 일반적인 절삭공구인 엔드밀을 사용할 경우 직경 $\Phi 1$ 이하의 엔드밀은 작은 공구직경에 비해 긴 날장을 갖고 있어 CAD/CAM에서 고려되지 않는 여러 요인의 가공오차가 발생하게 된다. 이 같은 가공오차의 대표적인 요인으로는 단일보(Cantilever)형상을 지닌 엔드밀이 약한 강성을 가지고 있어 절삭력에 의해 형상이 변형되며 이에 따라 공구의 경로를 변형시키는 가공오차를 들 수 있다⁽¹⁻³⁾. Dow는 직경 $\Phi 1$ 이하의 볼 엔드밀 가공시의 절삭조건과 절삭력의 예측과 측정, 공구변형으로 인한 형상오차분석을 통하여 오차를 최소화 할 수 있는 방법을 제시하였다⁽⁴⁾. 이는 일반적인 엔드밀에서의 보상방법과 비슷하며 통상적인 엔드밀 보상방법에 적용할 수 있다. 그러나 절삭력의 직접적인 측정 등과 같은 매우 복잡한 실험 단계를 거쳐야 하기 때문에 보다 효율적인 공구 변형과 보상 방법이 필요하다. 이를 위하여 기존 범용 엔드밀의 가공에서 공구변형에 의해 발생하는 가공면 오차를 예측, 측정하여 이에 따른 새로운 공구 경로를 생성하여 오차를 보상하는 연구가 이루어 졌다⁽⁵⁾.

마이크로 엔드밀에서도 직경 $\Phi 1$ 이상의 엔드밀과 같은 기하 구조를 갖고 있다. 그러나 엔드밀 형상의 측정이 어렵고 정확하지 못하기 때문에 절삭력 모델을 정립하기가 어렵고 이에 따라서 가공된 실질적인 형상오차와 이를 보상하는 방법을 통하여 연구가 진행 될 수 있다. 공구의 변형은 일반적인 단일보 형상을 띄고 있으나 절삭날의 기하로 인하여 공구의 반경에 따라서 엔드밀이 변형하지 않고 이에 Kops가 제시한 유효직경만큼의 단일보 형상으로 일반화시켜 공구가 변형된다는 조건을 적용시킬 수 있다⁽⁶⁾. 일반적으로 공구변형에 관한 가공오차를 줄이는 방법으로 이송속도를 줄이는 방법을 선택할 수 있으나 이는 제품의 생산속도의 저하를 더불어 가져오기 때문에 이를 극복할 수 있는 연구가 진행되어야 한다. 현재 정밀도의 차이가 제품의 성능에 많은 영향을 미치는 미세 채널가공과 관련하여 공구변형에 의한 가공오차 생성도 심도 있게 고려되어야 할 사항이다. 이에 따라 본 연구에서는 마이크로 엔드밀을 이용한 실제적인 가공에서의 공구변형에 의한 가공오차를 측정하고 새로운 공구

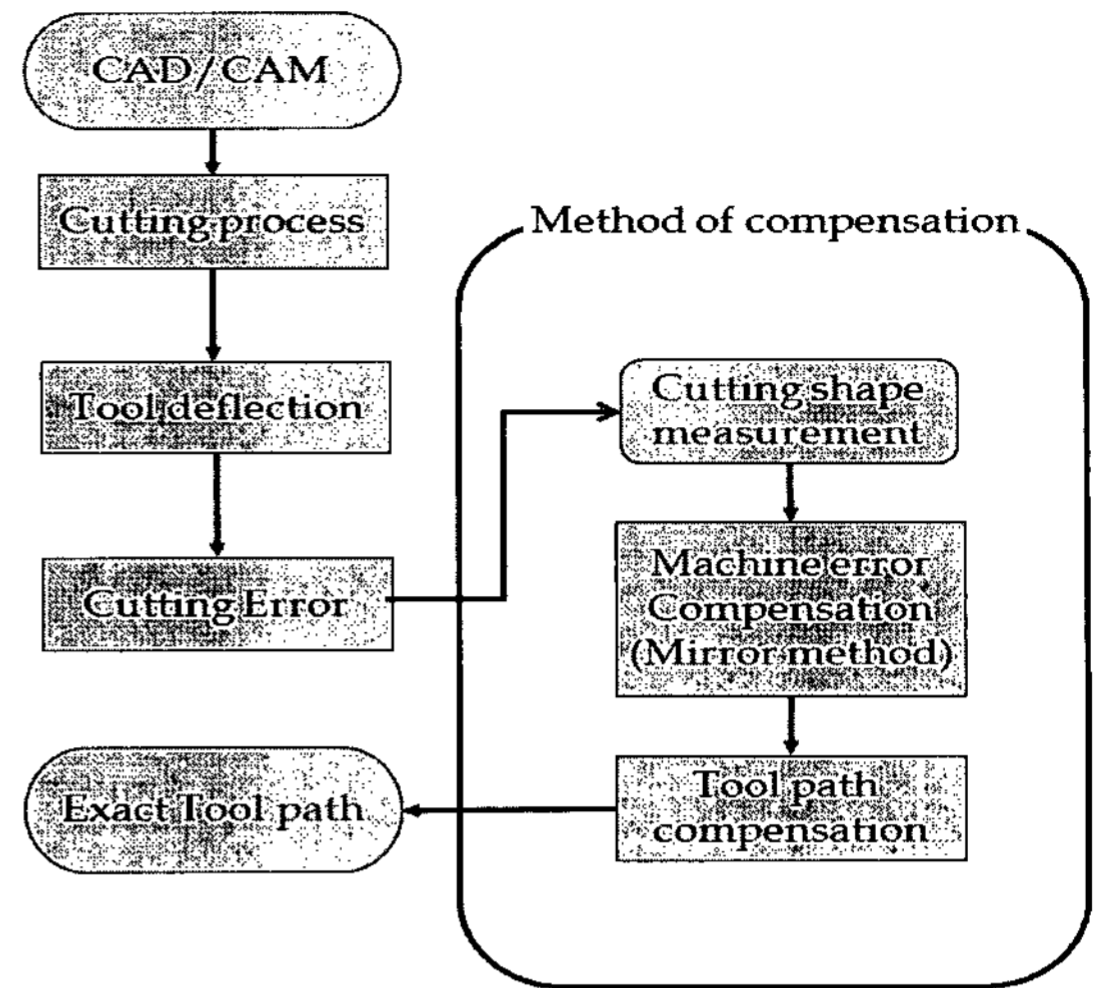


Fig. 1 Summary of machining error compensation for tool deflection

경로를 보상하는 방법을 통하여 공차범위 내에서 가공오차를 줄이는 방법을 연구하였다. 가공형상의 오차측정을 통하여 공구변형에 의한 가공오차의 보상에 관한 연구를 하기 위하여 우선 계획되어진 가공 형상을 정밀 가공 장치를 통하여 슬롯(Slot)가공 하였다. 이를 통하여 생성된 가공형상을 SEM을 통하여 측정하였고 이를 정량화 시켜 공구 변형에 의한 가공오차의 보상 값을 계산하였다. 그 후 계산되어진 보상 값을 통하여 수정된 새로운 공구경로를 설정하고 마이크로 가공 및 SEM 영상 분석을 통하여 본래 계획되어진 슬롯가공과의 정량화된 일치성을 분석하는 검증을 거쳤다. 이와 같은 실험 방법을 통하여 복잡한 공구 절삭력측정 및 예측 등의 과정을 생략하고 공구변형에 의한 가공오차를 보다 빠르고 정확하게 수정할 수 있다. 본 연구의 수행 과정은 다음 Fig. 1과 같다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장비

마이크로 엔드밀 가공을 하기 위하여 Fig. 2과 같이 서브 마이크로 단위의 제어를 위한 X, Y, Z축의 3축 자유도를 가진 스테이지(Stage)를 구성하여 실험에 활용하였다. X, Y, Z 스테이지는 모두 $0.1\mu\text{m}$ 의 분해능을 가지고 있어 충분히 서브 마이크로 까지 가공 제어가 가능하도록 하였다. 이에 따라 수십 마이크로 단위에서의 가공에서는 필요한 만큼의

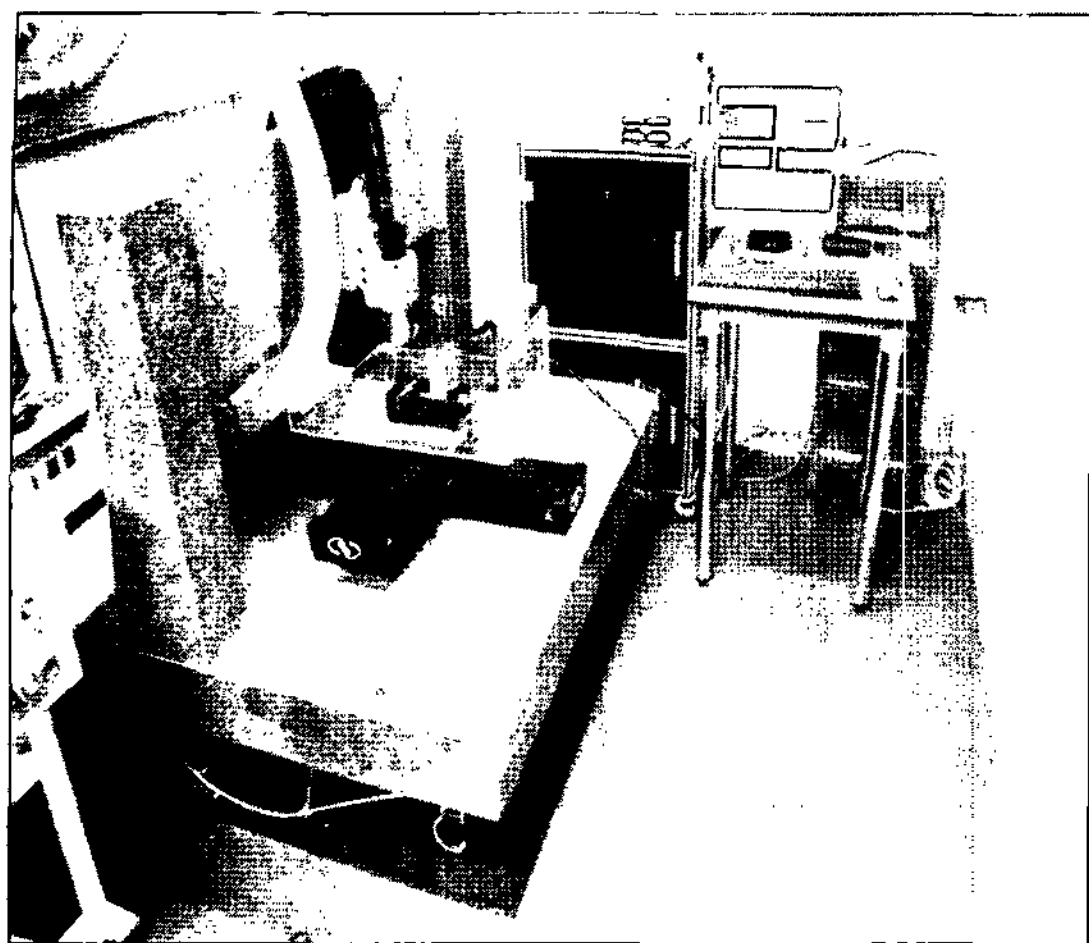


Fig. 2 Micro machining system

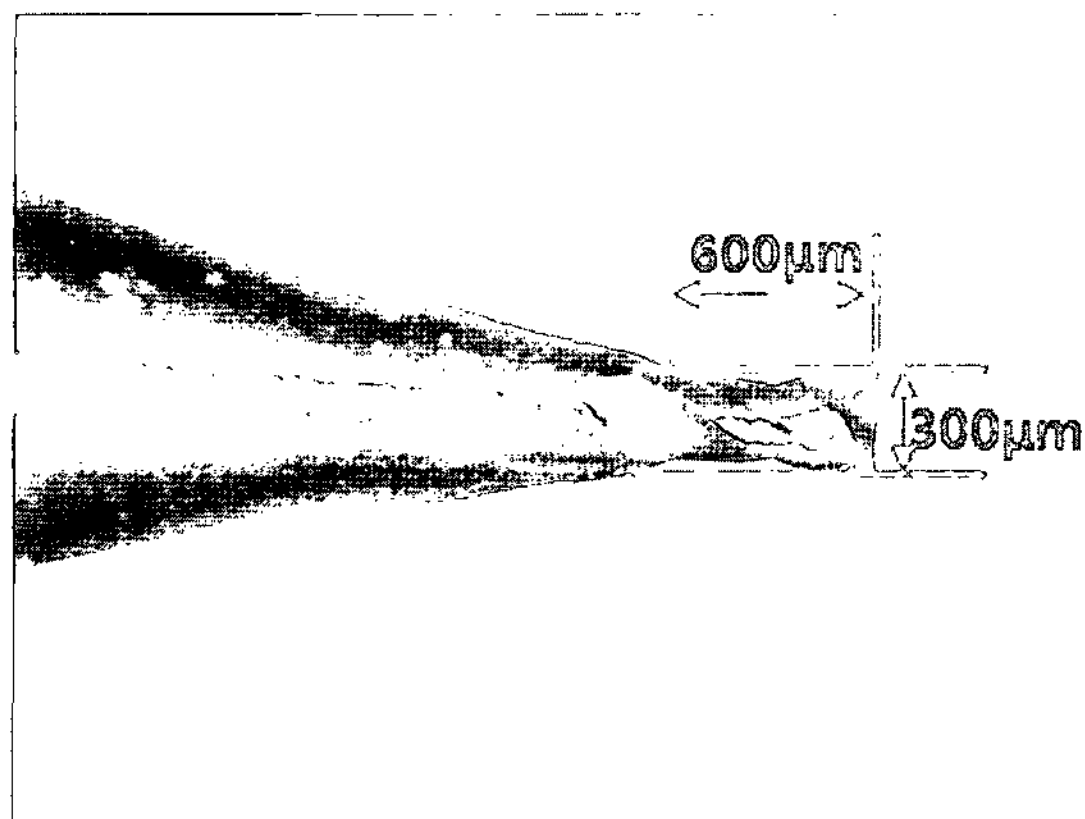


Fig. 3 Micro end mill

정밀도를 충분히 유지할 수 있다. 가공에 사용된 스피indle은 에어베어링과 AC모터로 구성되어 있으며 인버터를 통해 100,000rpm까지 구동이 가능하도록 하였다. 에어 베어링의 사용과 관련하여서는 절삭 공구의 반경이 커지고 가공 반경이 커짐에 따라서 충분한 토크를 발휘 할 수 없는 단점을 가지고 있으나, $\Phi 1$ 이하의 마이크로 엔드밀의 경우 발생하는 절삭력이 적기 때문에 에어 베어링에서도 충분한 토크를 가지고 사용할 수 있으며, 오히려 절삭 시 발생할 수 있는 진동을 완화시킬 수 있다. 가공 시 그 외의 요소에 의해 발생하는 진동에 따라 일어날 수 있는 가공 오차를 최소화하기 위하여 진동완화장치(Isolator)로 지지하였다. 자세한 사항은 Table 1과 같다.

실험에 사용된 엔드밀의 경우 마이크로 슬롯을 가공하기

Table 1 Specification of Micro machining system

Traveling range	X, Y, Z-axis : 600×600×200mm
Resolution	X, Y, Z-axis : 0.1µm
Accuracy	X, Y-axis : 10µm, Z-axis : 5µm
Repeatability	X, Y, Z-axis : 0.2µm
Max. velocity	X, Y-axis : 200mm/s, Z-axis : 100mm/s
Rotational speed	Max. 100,000rpm
spindle run-out	Max. 0.6µm
Static radial load	Min. 6kgf
Workpiece weight	Max. 45kgf
Lubrication	Dry cutting

위한 기둥을 직경 $\Phi 1$ 의 엔드밀(한국 OSG, EDS-1)을 이용하여 가공하였고 마이크로 엔드밀의 슬롯가공에서의 공구변형을 관찰하기 위하여 사용한 공구는 직경 $\Phi 0.3$ (장진공구, 2HCE)를 사용하였다. 마이크로 슬롯가공에 사용된 $\Phi 0.3$ 엔드밀의 사진은 Fig. 3에서 자세히 보여주고 있다.

2.2 마이크로 엔드밀 가공

마이크로 엔드밀을 이용한 가공은 미세채널가공의 기초가 되는 슬롯가공시의 공구변형에 관한 실험을 하였다. 초기 기초적인 슬롯에서의 경향성을 쉽게 보기 위해 연성재질인 황동을 사용하였다. 여러 가지 가공 조건 중 Michael⁽⁷⁾의 연구에 의하면 축방향 깊이는 가공면의 조도생성에 큰 영향을 주지 않으므로 슬롯가공 시 공구변형에 관한 경향성을 쉽게 측정할 수 있도록 축방향 깊이를 엔드밀의 전체 날 길이 600µm에서 500µm의 과도한 축방향 깊이의 조건으로 고정하여 가공 하였다. 그리고 가공 생산성에 가장 큰 영향을 주는 이송 속도 차이에 따른 공구 변형을 관찰하기 위하여 이송속도를 0.12m/min에서 0.54m/min 까지 이송속도 증분을 0.06m/min으로 하여 실험 하였다. 본 실험 조건에 관한 조건은 Table 2에 자세히 설명하였다.

변형된 가공형상을 측정하기 위하여 윗면과 옆면에 변형이 없는 기준면을 가공하고 이를 기준으로 기준면으로부터 가공된 슬롯까지의 거리를 측정하여 본래 의도하였던 가공면까지의 거리와 비교하였다. 본래 가공하고자 하는 슬롯의 형상은 Fig. 4에 나타내었다. 기준면을 가공하는 이유는 처음 시편의 정밀도를 높게 유지하고 스테이지자체의 정렬오차를 줄인다 하더라도 수 마이크로 단위의 절삭에서는 전자와

Table 2 Cutting conditions

RPM	40,000rpm
Axial depth	500 μ m
Feedrate	120, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 540 (mm/min)
Tool	∅ 0.3(mm), 2-flute flat end-mill
Workpiece	Brass

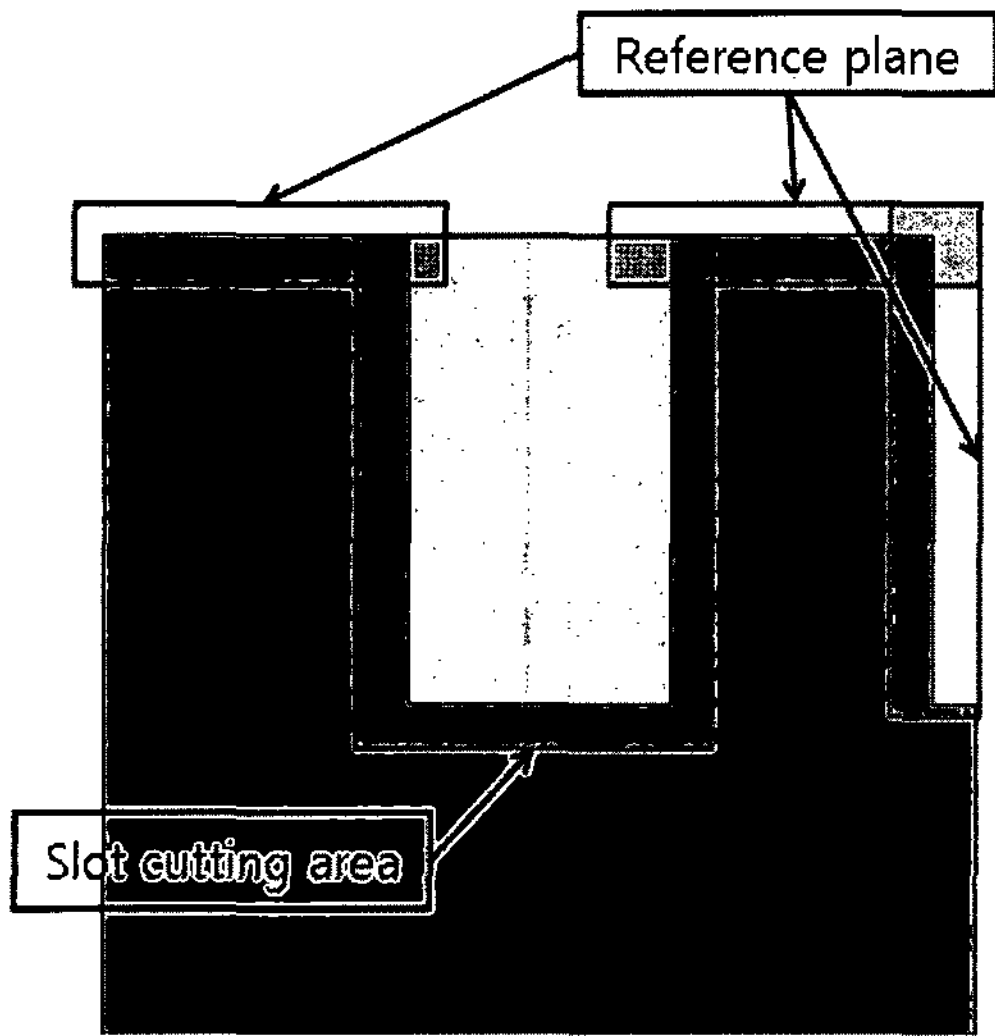


Fig. 4 Reference and cutting area in micro slot cutting

같은 오차가 매우 크게 작용하기 때문에 다른 오차변수를 제거하고 공구변형에서만 야기되는 가공오차를 측정하기 위해서이다. 마이크로 엔드밀을 이용한 슬롯가공이후 공구 변형에 의한 가공오차를 측정할 경우 가공된 기준면을 기준으로 측정을 하게 된다. 기준면은 공구 변형에 영향을 주지 않는 조건으로 윗면은 깊이 50 μ m로 이송속도 120mm/min으로 가공 하였으며 옆면은 50 μ m의 깊이로 이송속도 100mm/min으로 가공하였다. 이 두 개의 기준면은 기초 실험 결과 공구변형이 거의 일어나지 않음을 알 수 있었고 이를 통하여 슬롯가공에서의 가공오차를 측정할 수 있다. 본 실험에서는 이송 속도에 따른 공구의 변형량과 이에 상응하는 가공오차와의 상관관계를 알아보기 위하여 모두 9개의 미소 채널을 일률적으로 같은 공구를 사용하여 가공하였다. 이렇게 가공할 경우 공구를 교체하거나 피삭재를 교체할 경우 발생할 수 있는 오차를 최소한으로 줄일 수 있다. 슬롯은 기준면으로부터 300 μ m 읍셋하여 가공 하였으며 실제 가공하고자 하는 형상

은 Fig. 4와 같다. 이 형상을 기준으로 하여 공구변형이 일어날 경우 측정되는 가공오차와 비교할 수 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 가공오차의 정량화

공구 변형에 따른 가공오차를 정량화하기 위하여 우선 SEM을 통해 획득된 영상으로 전체 가공되어진 축방향 깊이 500 μ m를 20 μ m로 나누어서 각 부분을 측정하여 보고 기준면으로부터 가장 오차가 많이 일어나는 부분을 E_{max} (Maximum error)로 정의 하고 오차가 가장 적게 일어나는 부분을 E_{min} (Minimum error)로 정의한다. 이 E_{max} 의 값과 E_{min} 값의 오차영역 폭을 W_{err} (Error width)로 정의 하고 E_{max} 와 E_{min} 의 오차영역 편차를 D_{err} (Error deviation)로 정의한다.

$$W_{err} = E_{max} - E_{min} \quad (1)$$

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

위와 같은 정의를 내린 이유는 일반적인 엔드밀 가공의 경우 가공 오차를 일으키는 공구변형이 일정한 양만큼 일어나는 것이 아니라 공구의 특정 기하와 절삭력에 요인 하여 전체 절삭 날에 걸쳐 비선형적으로 일어나기 때문이다. 마이크로 엔드밀의 경우에도 이를 위하여 처음 기준이 되는 오차 영역과 공구 경로 보상 값을 정하기 위하여 위와 같은 정의를 이용하였다.

3.2 공구경로 보상 방법

가공오차를 최소화하기 위한 공구경로보상 알고리즘은 공구변형량에 의한 가공오차를 고려하여 새로운 공구경로를 결정하는 방법을 말한다. 공구의 새로운 경로를 결정하면 절삭깊이의 변화가 일어나고 따라서 가공오차의 량도 변화하기 때문에 이것을 고려하기 위하여 반복계산(Iteration)이 요구된다. 본 논문에서는 Fig. 1에서 보여준 봐와 같이 거울법(Mirror Method)라는 알고리즘을 제시하고 적용하였다. 거울법은 공구경로를 미세하게 나누고 각각의 순간적인 공구 위치에 접선방향으로 거울을 부착시킨 후에 거울에 반사된 가공오차의 량만큼 공구위치를 변화하며 그 후 추가로 발생하는 가공오차를 계속 새로운 공구위치에 누적하여 이론적으로 공칭공구위치와 실제공구위치가 일치하는 위치를 찾아내는 알고리즘이다⁽⁵⁾.

거울법은 공구의 새로운 위치를 결정해나가는 반복계산

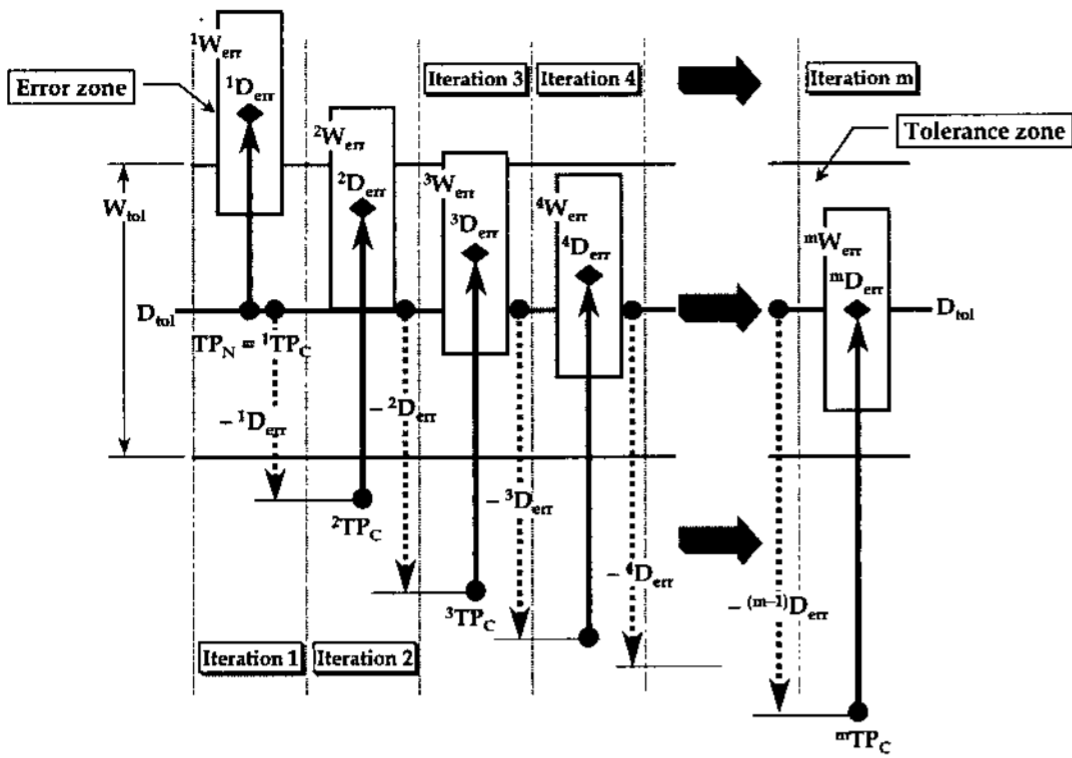


Fig. 5 Method of machining error compensation

시에 절삭깊이의 변화를 고려하게 되는데 슬롯가공에 있어서 가공오차의 양만큼 공구위치를 변화하여도 측면절삭깊이 나 축방향절삭깊이의 변화가 발생하지 않기 때문에 결론적으로 한 번의 계산으로 수정된 공구위치를 결정할 수 있다. 그러나 슬롯가공을 하였을 경우 양쪽측면의 가공오차가 동일하게 발생하지 않는다. 슬롯의 왼쪽 부분과 오른쪽 부분의 오차 값이 서로 다른 경향성을 나타내고 있다. 이는 양쪽 부분이 처음 절입하여 가공되어질 경우 생성되는 칩의 두께와 이에 따른 절삭분력의 차이에 기인한다고 판단된다. 이에 따라서 상향절삭 부분인 슬롯의 왼쪽 부분의 D_{err} 값과 하향 절삭 부분인 슬롯의 오른쪽 D_{err} 값의 평균값을 보상 값으로 정해주게 되는데 이럴 경우 상향절삭 부분은 좀 더 적은 보상 값을 가지게 되며 하향절삭 부분은 좀 더 많은 보상 값을 가지게 된다. 그러나 상향절삭부분에 비해 하향절삭 부분에서 공구변형에 의한 가공 오차율이 더 적으므로 전체적인 가공오차의 보상은 훨씬 능률적으로 보상할 수 있다.

3.3 실험 검증 및 결과 값

공구의 변형에 의해서 공구의 실제 가공경로 오차가 변화하게 된다. 축방향 깊이 $500\mu\text{m}$ 로 가공전후의 배율을 같게 하여 SEM을 통하여 촬영을 하였다. 실험 후의 결과 값을 주목해 보면 본래 가공되어야 하는 부분보다 더 많이 가공된 것을 영상측정을 통해 알 수 있었다. 영상을 통하여 이를 측정하는 방법은 가공되어진 슬롯을 위쪽의 기준면으로부터 축방향 깊이로 $20\mu\text{m}$ 로 나눈 후 옆쪽의 기준면으로부터 본래 가공하고자 하는 이상적 지점과 나누어진 점사이의 오차 값을 측정하였다. 전체 오차 값 중에서 최대 오차 값을 E_{max} 로 하고 최소 오차 값을 E_{min} 으로 하여 앞서 말한 식 (2)를 이용하여 D_{err} 을 구하였다. 구하게 된 D_{err} 을 스테이지의 제

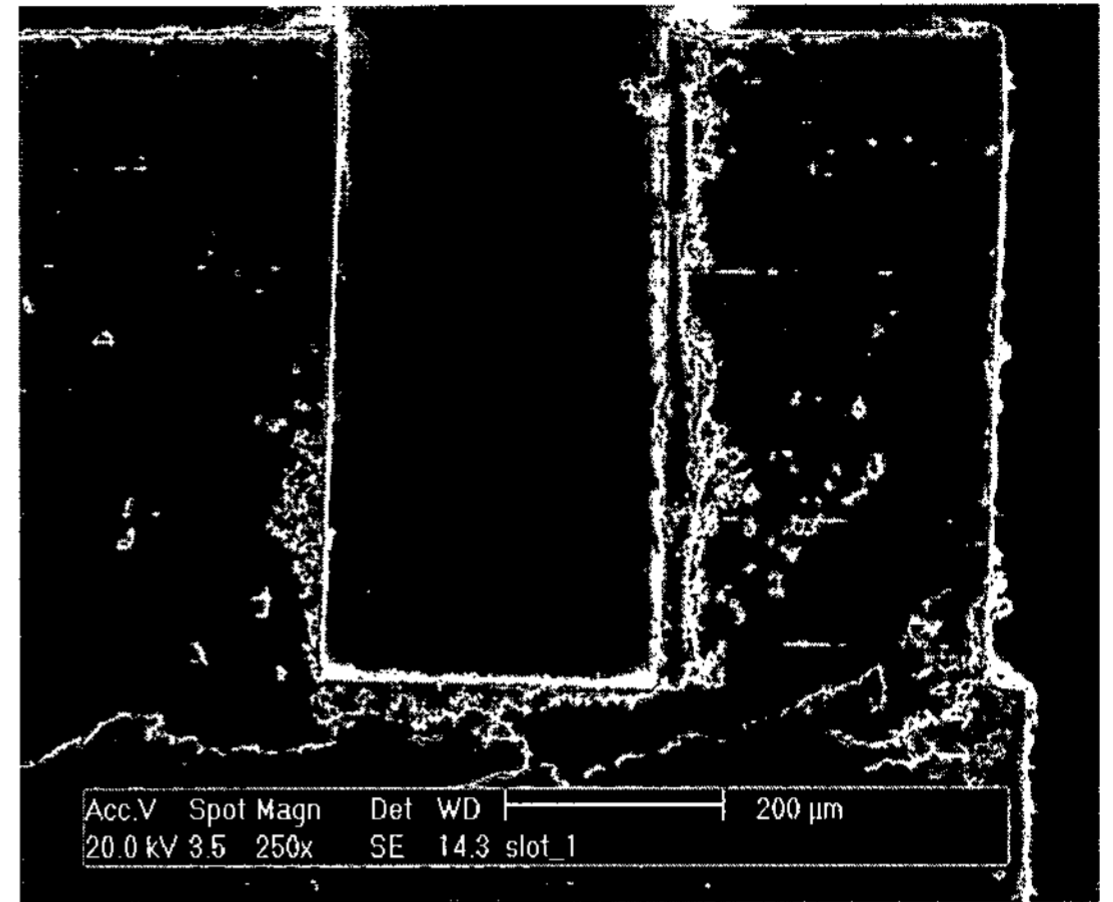


Fig. 6 Noncompensation micro slot cutting(feedrate : 120mm/min)

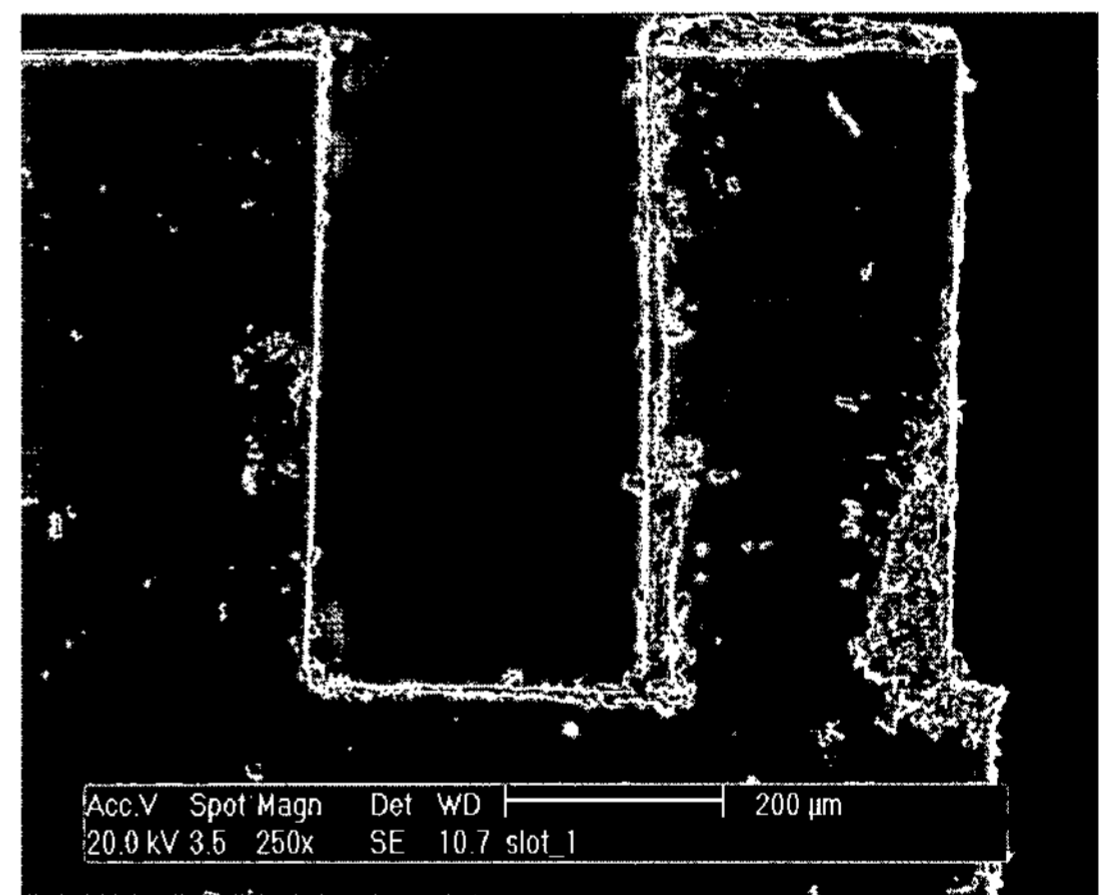


Fig. 7 Compensation micro slot cutting(feedrate : 120 mm/min)

어 프로그램에서 보상 값을 적용하여 새롭게 공구 경로를 수정하여 가공 오차를 보상하였다. 실험을 검증하기 위한 SEM을 통한 영상은 아래의 Fig. 6과 Fig. 7에서 보여주고 있다.

Fig. 8에 나타나 있는 그래프를 보면 알 수 있듯이 보상전의 가공면 보다 보상후의 가공면이 처음 가공하고자 하는 가공면(Ideal position)에 더 가깝게 나타나 있음을 알 수 있다. Fig. 9와 Fig. 10에서는 위와 같은 방법을 이용하여 측정된 하향절삭면과 상향절삭면에서의 보상전후의 평균오차율을 이송속도별로 나타내고 있다. 이를 통하여 가공오차의 보

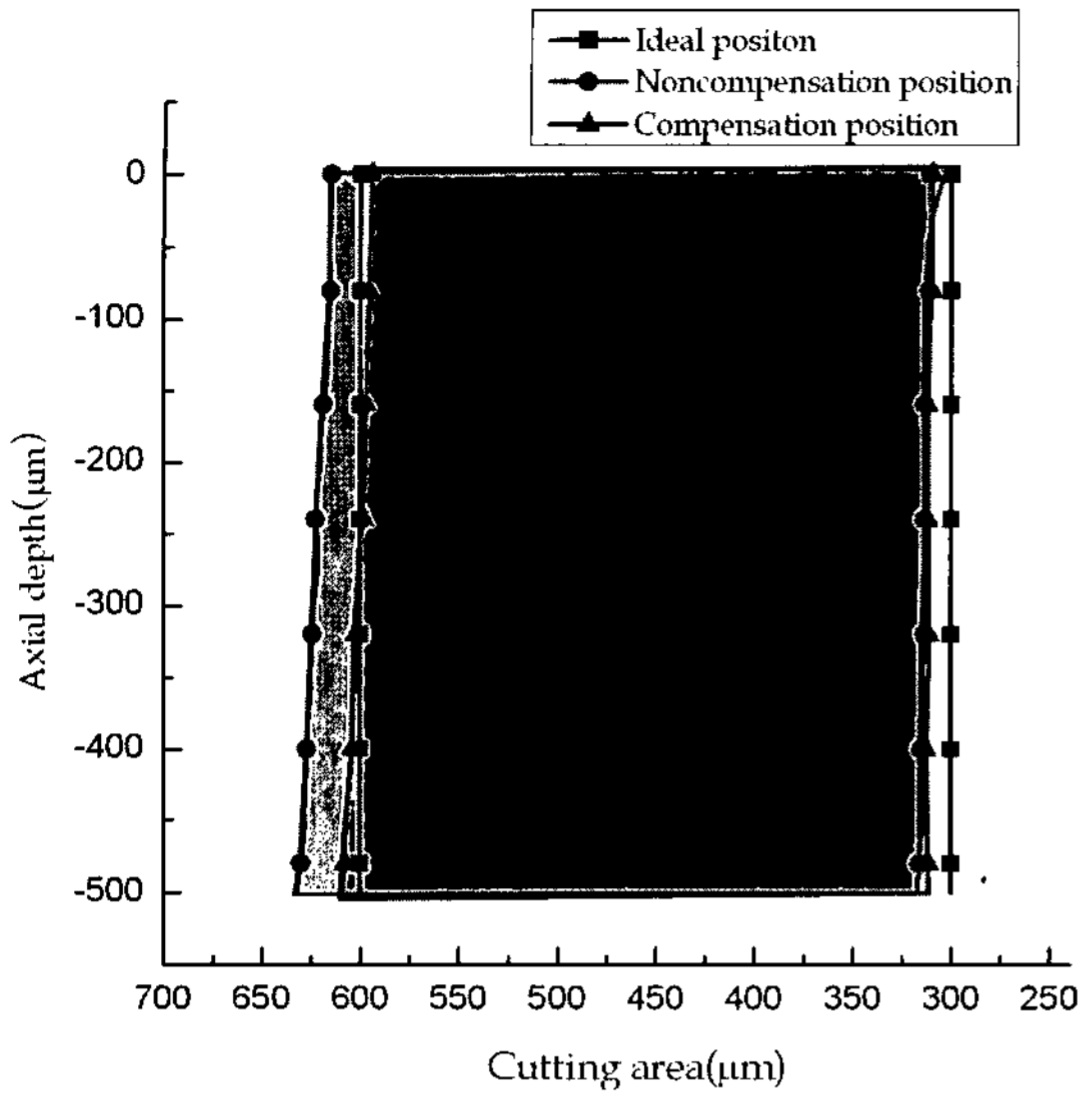


Fig. 8 Noncompensation cutting, compensation cutting and ideal cutting zone(feed rate : 120mm/min)

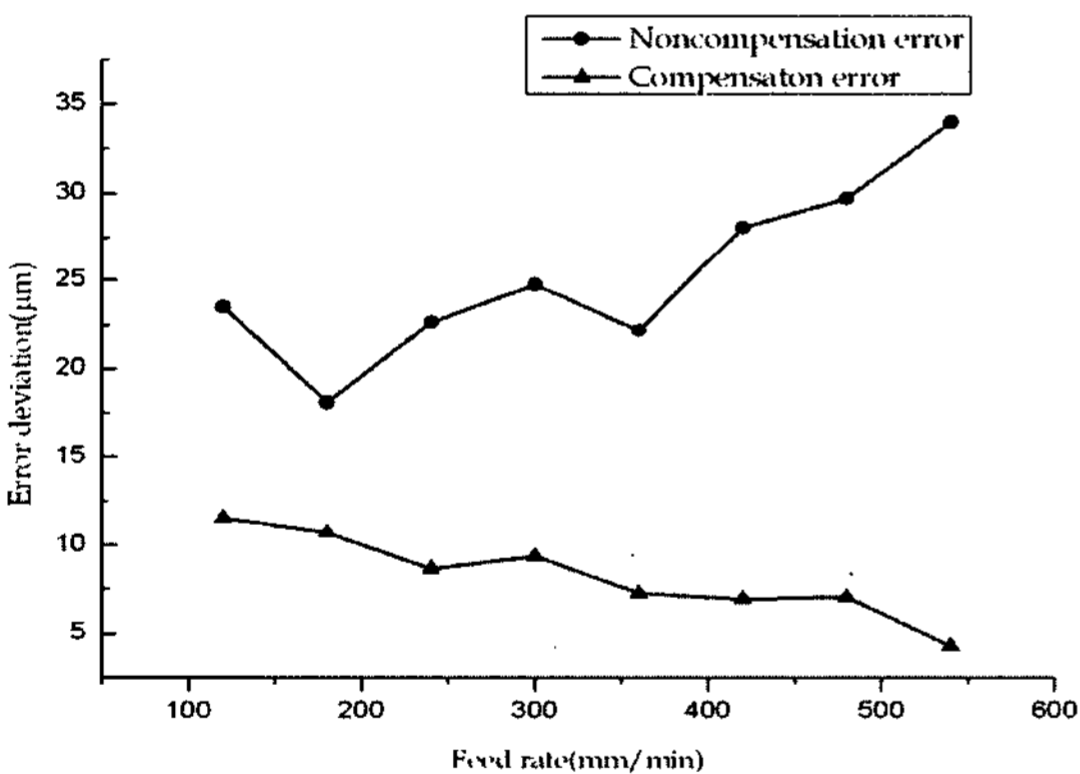


Fig. 9 Noncompensation and compensation error according to feedrate in down-milling side

상이 본 연구와 같은 과정을 거칠 때 가공공차에 적합하도록 보상되어짐을 알 수 있다. 공구 변형에 의한 가공오차 특성에 대한 실험을 위하여 정확한 실험 장치를 구성하였다 하더라도 미처 생각지 못했던 요인에 의하여 가공오차가 발생할 수 있다. 이 같이 미처 검증되지 못했던 다른 오차 부분도 실험의 정확도를 위하여 간과할 수 없는 중요한 사항이다. 이 같은 사항을 검증하기 위하여 슬롯의 윗면을 SEM을 통하여 측정 하였다. 처음 공구가 절입 되는 순간부터 공구의 변형이 일어나기 때문에 공구 변형에 의한 경로의 오차 또한

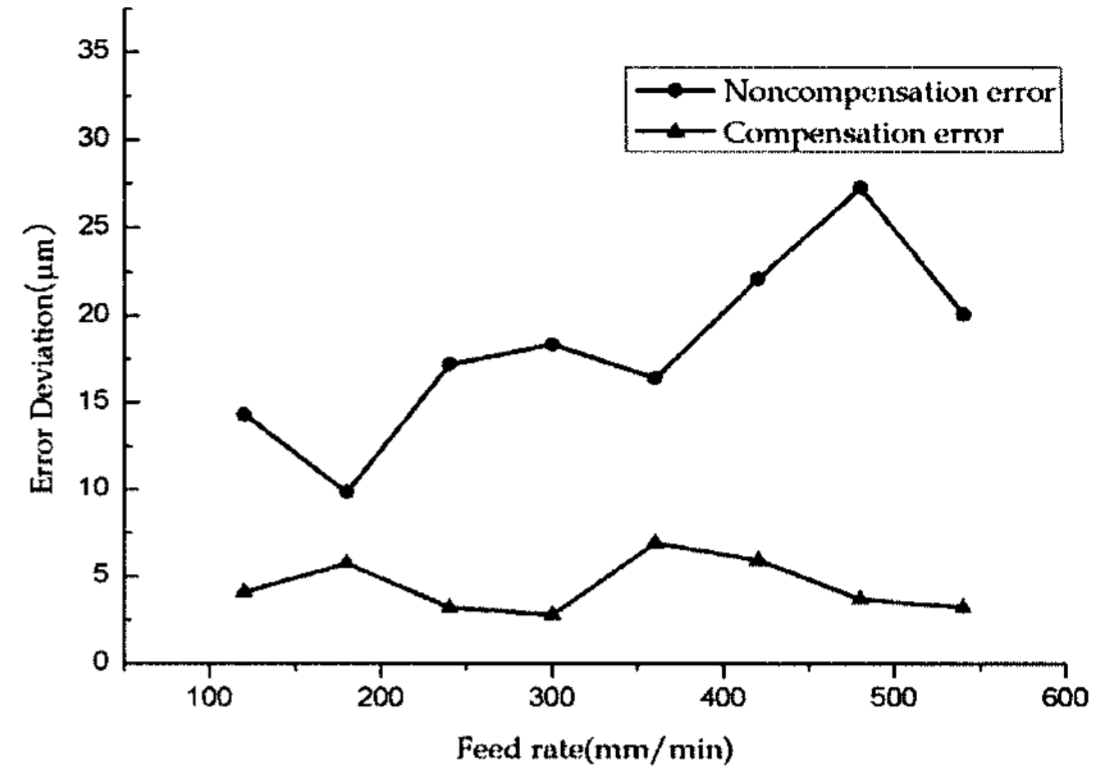


Fig. 10 Noncompensation and compensation error according to feedrate in up-milling side

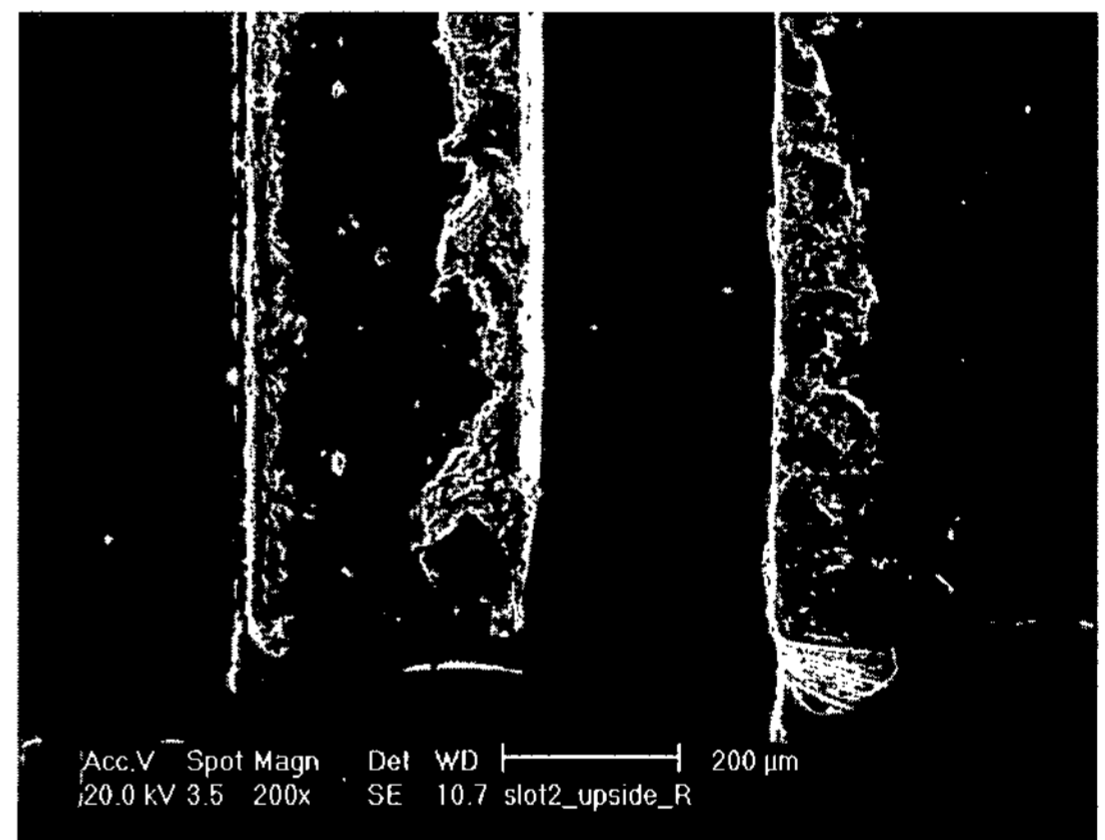


Fig. 11 The end part of micro slot cutting

공구가 절입 되는 순간부터 일어난다고 볼 수 있다. 절삭되어진 부분의 위쪽을 측정하여 공구의 가공경로 중 마지막 부분의 사진을 파악해본 결과 공구가 절입되어 연속적으로 가공이 이루어진 면과는 달리 마지막 가공을 끝내고 나오는 부분에서 절삭력이 적어짐에 따라서 공구변형도 적어지고 이로 인한 가공 오차도 처음 가공 프로그램 되었던 가공 경로로 변하는 부분을 볼 수 있다. 이를 통하여 실험의 결과 측정된 가공오차는 본 연구과제의 중요 논점이었던 공구의 변형에 의한 오차라 판단할 수 있다.

공구 변형에 관하여 파생되어지는 가공 오차를 공구 경로를 수정함으로써 보상 전 가공 오차의 평균값을 기준값으로 하여 상향절삭 부분에 대해서는 23% 향상된 가공을 할 수 있었으며 하향절삭 부분에 대해서는 44% 향상된 가공을 할 수 있었다.

4. 결론

마이크로 엔드밀을 이용한 슬롯가공의 경우 공구 변형에 의해서 가공오차에 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있었다. 또한 이 가공 오차는 이송속도와 관련하여 점증적으로 증가하는 것 또한 알 수 있었다. 본 실험을 통하여 마이크로 엔드밀의 가공 오차에 대한 정의와 이에 따른 가공 보상 값을 적용하였을 경우 실질적으로 도출되어 지는 가공오차의 값을 알 수 있었고 이를 통하여 얻게 되는 E_{max} 값을 통한 가공오차 보상에 의해서 충분히 공구의 경로를 허용 공차 이내로 수정할 수 있음을 알 수 있다. 이는 절삭력 예측, 공구 변형량 예측 등의 복잡한 실험 및 이론정립의 단계를 거치지 않고도 충분히 원하는 형상의 제작이 용이하다는 것을 보여준다. 추후 본 연구와 같은 방법을 통하여 여러 가공 조건과 이에 관련된 공구변형에 의한 가공 오차 실험이 누적될 경우 실험식에 의한 공구변형의 모델링을 정립하고 보상 값을 가공 초기부터 사용하여 보다 안정된 가공 조건 성립이 기대된다. 이를 통하여 마이크로 엔드밀의 미세가공 연구에 적용하게 된다면 보다 빠르고 정확한 가공 조건을 성립할 수 있게 된다. 이는 가공품의 원가 절감은 물론 가공 후 제품의 성능향상에 크게 도움이 될 수 있으리라 기대된다. 이를 위하여 보다 많은 가공 조건에 따른 추가 실험을 통하여 일반화된 공구 변형에 관한 모델링을 적립할 수 있는 후속 연구를 진행하도록 할 것이다.

후 기

본 연구는 인천대학교 2005년도 자체연구비에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

- (1) Kline, W. A., Devor, R. E., and Lindberg, J. R., 1982, "The Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 22, pp. 7~22.
- (2) Uriarte, L., Gerrero, A., Zatarain, M., Santiso, G., Lopez, L. N., Lamikiz, A., and Albizuri, J., 2007, "Error budget and stiffness chain assessment in a micromilling machine equipped with tools less than 0.3 mm in diameter," *Precision Engineering*, Vol. 31, pp. 1~22.
- (3) Sinan F., Caroline M., Conley, M. B., Wasserman, and Burak, O., 2007, "An experimental investigation of micro-machinability of copper 101 using tungsten carbide micro-endmills," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, pp. 1088~1100.
- (4) Dow, T. A., Miller, E. L., and Kenneth, G., 2004, "Tool force and deflection compensation for small milling tools," *Precision Engineering*, Vol. 28, pp. 31~45.
- (5) Cho, M. W., Seo, T. I., and Kwon, H. D., 2003, "Integrated error compensation method using OMM system for profile milling operation," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 136, pp. 88~99.
- (6) Kops, L. and Vo, D. T., 1990, "Determination of the Equivalent Diameter of an End Mill Based on its Compliance," *Annals of the CIRP*, Vol. 39, pp. 93~96.
- (7) Vogler, M. P., Devor, R. E., and Kappor, S. G., 2004, "On the Modeling and Analysis of Machining Performance in Micro-Endmilling, Part I: Surface Generation," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 126, pp. 685~694.