

< 논문 >

V- 그루브 미세가공에서의 공구 및 공작물 셋업 해석

조 정 우[†] · 양 민 양^{*}

(2006년 1월 31일 접수, 2006년 5월 20일 심사완료)

Analysis of Tool and Workpiece Setup in v-Groove Micromachining

Jung-Woo Cho and Min-Yang Yang

Key Words : V-groove Micromachining(V-그루브 미세가공), Tool Setup Error(공구 셋업 오차), Workpiece Setup Error(공작물 셋업 오차), Setup Error Condition(셋업 오차 조건)

Abstract

As the requirement of LCD products which are large screen and have high brightness increases, the role of light guide panel (LGP) of which micro-features diffuse the light uniformly on surface is getting important. In general, there are many errors in machining like machine tool error, process error, setup error and etc. The amount of setup error in general machining is not so big in comparison with the others, so it is mostly neglected. But, especially in v-groove micromachining, setup error has a significant effect on micro-features. Low quality product and high cost are resulted from setup error. In v-groove micromachining, to confirm the effect of setup error, it is identified and then setup error synthesis model is derived from analysis of tool and workpiece setup. In addition, to predict the micro-features affected by setup error and enhance the production efficiency, the setup condition satisfying the tolerance of micro-features is geometrically analyzed and presented.

기호설명

- T_{tool} : 공구 셋업 오차에 의한 변환 행렬
- $T_{workpiece}$: 공작물 셋업 오차에 의한 변환 행렬
- M : x, z 축 상의 병진 이동 행렬
- C_{syn} : 셋업 오차 합성 변환 좌표
- C_t : 공구 셋업 오차에 의한 공구 좌표
- C_w : 공작물 셋업 오차에 의한 공작물 좌표

1. 서 론

오늘날 디스플레이 시장 규모가 급격히 커짐에 따라 LCD는 핸드폰에서 대형 TV에 이르기까지 많은 제품에 적용되고 있다.

최근에는 디스플레이의 대화면화와 화질개선과 관련하여 고휘도가 문제로 대두되면서 이와 관련

하여 LCD 성능 향상의 중심축인 LGP(light guide panel)의 중요성이 부각되고 있다. LGP는 램프의 선 광원을 LGP 표면의 광학적 패턴을 이용하여 빛을 전체 면에 일정하게 확산시키는 중요한 역할을 하고 있다. 이러한 광학적 패턴은 지금까지 스크린 인쇄 방식, 사출 방식 및 스탬핑 방식에 의해 형성되어 왔다. 하지만 최근에는 넓은 면적에 미세한 형상이 조밀하게 분포된 플라스틱 제품이 요구되고 있기 때문에 이러한 제품을 만들기 위해서는 원하는 정밀도와 표면 조도를 갖는 미세한 형상이 만들어지도록 정밀하게 금형을 가공하는 초정밀 가공기술이 필요하다. 따라서 최근에는 기계적인 강도를 가지면서 모델 변경시 패턴과 금형 설계 및 개발에 소요되는 시간도 단축시킬 수 있는 v-cutting 제조 방식이 각광을 받고 있다.

대면적에 미세한 형상을 조밀하게 분포될 수 있도록 하기 위한 공정은 제품 설계에서부터 금형 가공과 사출을 통한 제품 완성에 이르기까지 아주 복잡하고, 제조 공정 시간이 매우 길며, 작업 중 오차가 발생하기 쉽다. 이와 같은 공정에서 나타나는 오차는 가공기의 이송부분 및 기계 구조물 형상부에서 발생하는 기하학적 오차(geometric error),

[†] 책임저자, 회원, 한국과학기술원 대학원 기계공학과
E-mail : supremeclown@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3264 FAX : (042)869-5224

* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

가공기 구동시 자체 발열에 의해 야기되는 열변형 오차(thermal error), 가공 공정 중 채터와 같이 절삭력에 의해 발생하는 오차(cutting force induced error) 그리고 공구 및 공작물 셋업 시 발생 하는 셋업 오차(setup error)가 있다.^(1,2)

기존에는 가공 공정 중 발생하는 오차를 근원적으로 제거하여 가공 정밀도를 향상시키기 위해 각각의 오차들 중 특히 큰 비중을 차지하는 오차들에 대한 해석이 많이 이루어졌다. 단일의 오차 예측으로는 가공기의 정밀도를 효과적으로 개선시키기 위해 가공기의 기하학적 오차 및 열변형에 의한 오차를 특성화시켜 보정을 위한 모델링을 하였다.⁽³⁻⁵⁾ 복합적인 오차 예측으로는 밀링 머신에서 기하학적 오차와 절삭력에 의한 오차를 하나의 모델을 통해 예측하였다.⁽⁶⁾ 셋업 오차는 밀링에서의 공구 셋업 오차 규명 및 측정 방법에 관한 연구⁽⁷⁾와 고정구에 의한 공작물의 위치 오차에 관한 연구⁽⁸⁾가 각각 이루어졌다.

최근에는 대면적에 미세한 형상을 전사시키는 작업과 같은 고정밀 제품의 필요성이 증가함에 따라 공작기계에 대한 사용자 요구는 그 특성이 단순 전사에 의해 얻어지는 가공 품질을 뛰어넘어 더욱더 고도화되고 있다. 이에 가공기는 더욱 정밀해지고, 가공기 자체의 오차는 크게 개선되고 있다. 반면 미세형상 가공 공정은 고도의 정밀성을 요구하는 작업임에도 불구하고, 셋업 자체가 작업자에 의해 인위적으로 이루어지고 있다. 미세 가공에서의 셋업 오차는 불균일한 미세형상을 만들어내어 제품의 품질을 저하시키고, 불량품 생산으로 인해 생산 시간과 비용이 증가되어 생산성을 저하시키는 결과를 초래한다.

따라서 v-그룹브 미세형상 가공에서 최종 제품 품질을 개선시키고, 신속한 제조 공정을 통해 생산성을 향상시키기 위해 셋업 오차를 규명하고, 셋업 오차들의 복합적인 이론적 해석과 측정 시스템을 통한 정량적인 분석으로 형상 정밀도를 만족하는 셋업 조건을 제시해야 할 필요성이 있다.

2. V-그룹브 미세가공에서의 셋업 오차

2.1 셋업 오차 해석

작업자에 의해 인위적으로 발생하는 셋업 오차가 LGP 표면의 미세 형상에 포함되면 빛의 균일성에 큰 영향을 미쳐 그 역할을 제대로 할 수가 없다. 따라서 형상 정밀도를 향상시켜 고정밀도를 확보하기 위해서는 우선 셋업 오차에 대한 명확한 규명이 필요하다.

V-그룹브 미세형상 가공에서의 셋업 오차는 크게 두 가지로 분류된다. 원하는 형상을 만들기 위해 사용되는 도구와 그 대상물인 재료, 즉 공구와 공작물 셋업 오차로 나눌 수 있다. 공구와 공작물 오차는 이들을 고정시킬 때 클램핑(clamping)

방법, 클램핑 강도, 클램핑 하중 분포의 균일성 그리고 접촉되는 면의 상태에 따라 공구와 공작물 작물의 위치가 변하여 발생하게 된다. 공구의 경우 이와 같은 요인들에 의해 클램핑 되는 공구 홀더(holder) 부분에서 변형이 일어나거나 틸팅(tilting)이 생겨 공구 끝점의 위치가 변하게 된다. 공작물의 경우에도 여러 요인들에 의해 공작물이 들어올려지거나 들어지는 등 여러 방향으로 틸팅이 생겨 가공면의 수평이 유지되기가 어렵다. 이 두 가지 셋업 요인에 의해 v-그룹브 미세가공에서 기하학적 형상 변화가 생기게 되고 제품의 품질이 떨어지게 된다.

본 연구에서는 공정 중에 일어나는 오차를 공구와 공작물 셋업으로부터 발생하는 셋업 오차(setup error)와 그 이외의 오차, 즉 가공기 내에서 발생하는 기하학적, 열적 변화에 의한 가공기 오차(machine tool error), 가공시 절삭력에 의한 공정 오차(process error) 및 기타 오차를 하나로 묶어 크게 두 가지로 분류하여 셋업 오차가 v-그룹브 미세형상 가공에 미치는 영향을 알아보고자 한다.

2.1.1 공구 셋업 오차

일반적으로 공구 셋업 오차는 가공하기 전 준비 작업에서 나타난다. 가공하고자 하는 미세형상은 공구가 기울어짐에 따라 공구 끝점의 위치가 변하고, 또한 절삭 깊이가 달라지기 때문에 결론적으로 원하는 형상을 얻을 수가 없다.

공구 셋업시 생기는 오차는 x, y, z 각 축에 대한 회전 오차(rotation error)와 병진 오차(translation error)로 나눌 수 있다. Fig. 1(a)와 같이 공구의 끝점 위치가 3 개의 회전 오차($\theta_x, \theta_y, \theta_z$)와 3 개의 병진 오차($\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$)에 의해 달라지게 된다. 회전 오차와 병진 오차에 의한 각 축의 변환은 각각 식 (1), 식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며,

$$(a) T_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & -\sin\theta_x & 0 \\ 0 & \sin\theta_x & \cos\theta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (b) T_y = \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$(c) T_z = \begin{bmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & 0 & 0 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(a) T_a = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (b) T_b = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta y_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$(c) T_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

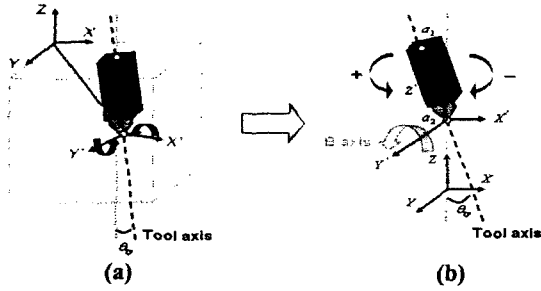


Fig. 1 Schematic of tool setup error

총 6 개의 오차에 의한 공구의 기하학적인 위치 변화 움직임은 식 (3)과 같이 각각의 회전 오차 행렬과 병진 오차 행렬의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$T_{tool} = T_t \cdot T_r = (T_{tx} T_{ty} T_{tz}) (T_{rx} T_{ry} T_{rz}) \quad (3)$$

본 연구에서는 다음과 같은 가정에 의해 공구 셋업 오차 모델을 간소화시킨다. 첫째, 공구는 세이핑(shaping) 가공을 위해 사용되는 v-type의 비회전 공구이고, rigid body motion에 의해 움직인다고 가정한다. 둘째, 실제 v-그루브 가공에서는 y 축에 해당하는 5 축 CNC system의 B 축을 회전시켜 원하는 형상을 가공하고, 또한 보정이 가능하므로 x, z 축의 회전오차는 고려하지 않고, y 축에 의한 회전 오차만 발생한다고 가정한다. 셋째, 공구 셋업의 병진 오차는 기준이 되는 가공기의 직선 이송에 의한 원점 셋팅으로 보정이 가능하다는 가정하에 공구 셋업 오차에서 제외시킨다. 따라서 공구 셋업 오차는 Fig. 1(b)에서와 같이 y 축 회전에 의한 틸팅 각도로만 나타낼 수 있으며, 식 (3)의 공구 셋업 균일변환행렬은 식 (4)로 간단해진다.

$$T_{tool} = T_{ry} = \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.1.2 공작물 셋업 오차

공작물 셋업 오차 또한 가공하기 전 준비 작업 중에 발생하는 오차로서 가공면이 평평하지 않고 기울어진 정도에 따라 가공 후 미세 형상이 달라지게 된다. 공작물 셋업시 생기는 오차는 공구 셋업과 마찬가지로 x, y, z 각 축에 대한 회전 오차(rotation error)와 병진 오차(translation error)로 나눌 수 있다. Fig. 2와 같이 공작물계의 공작물 스테이지에 대해 공작물의 위치가 3 개의 회전 오차($\theta_{wx}, \theta_{wy}, \theta_{wz}$)와 3 개의 병진 오차($\Delta x_w, \Delta y_w, \Delta z_w$)에 의해 달라지게 된다.

공작물의 기하학적인 위치 변화 움직임은 공구와 마찬가지로 식 (5)와 같이 회전 오차 행렬과 병

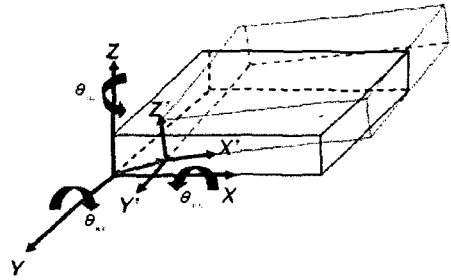


Fig. 2 Schematic of workpiece setup error

진 오차 행렬의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$T_{workpiece} = W_t \cdot W_r = (W_{tx} W_{ty} W_{tz}) (W_{rx} W_{ry} W_{rz}) \quad (5)$$

하지만 본 연구에서는 다음과 같은 가정에 의해 공작물 셋업 오차 모델을 간소화시킨다. 첫째, 공작물은 매우 정밀하고 완벽한 치수를 가지고 있으며, rigid body motion에 의해 움직인다고 가정한다. 둘째, 병진 오차는 기준이 되는 가공기의 직선 이송에 의한 원점 셋팅으로 보정이 가능하다는 가정하에 공작물 셋업 오차에서 제외시킨다. 또한 회전 오차는 나노 단위의 틸팅 테이블에 의해 보정 가능하다는 가정하에 문제에 접근한다. 따라서 공작물 셋업 오차는 각 축에 대한 회전 오차, 즉 x 축에 대한 회전오차(pitch), y 축에 대한 회전오차(roll), z 축에 대한 회전 오차(yaw)로 구분되며 공작물 셋업의 균일변환행렬은 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$T_{workpiece} = W_r = W_{rx} W_{ry} W_{rz} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{wx} & -\sin \theta_{wx} & 0 \\ 0 & \sin \theta_{wx} & \cos \theta_{wx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_{wy} & 0 & \sin \theta_{wy} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_{wy} & 0 & \cos \theta_{wy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_{wz} & -\sin \theta_{wz} & 0 & 0 \\ \sin \theta_{wz} & \cos \theta_{wz} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{wy} \cos \theta_{wz} & -\cos \theta_{wy} \sin \theta_{wz} & \sin \theta_{wy} & 0 \\ \cos \theta_{wx} \sin \theta_{wz} & \cos \theta_{wx} \cos \theta_{wz} & 0 & 0 \\ +\cos \theta_{wx} \sin \theta_{wy} \sin \theta_{wz} & -\sin \theta_{wx} \sin \theta_{wy} \sin \theta_{wz} & -\sin \theta_{wx} \cos \theta_{wy} & 0 \\ \sin \theta_{wx} \sin \theta_{wz} & \sin \theta_{wx} \cos \theta_{wz} & \cos \theta_{wx} \cos \theta_{wy} & 0 \\ -\cos \theta_{wx} \cos \theta_{wz} \sin \theta_{wy} & +\cos \theta_{wx} \sin \theta_{wz} \sin \theta_{wy} & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.2 셋업 오차 합성 모델

공구와 공작물 오차에 의한 미세 형상의 변화를 확인하기 위해서는 앞 절에서 설명한 공구와 공작물의 변환 행렬에 대한 복합적인 모델이 필요하다. 가공기가 완벽하다는 가정하에 공구와 공작물 셋업 오차가 포함된 상태에서 공구를 x, z 방향으로 이송시켜 공구가 공작물과 만나는 부분을 가공되는 부분으로 나타낸다. 먼저 셋업 오차에 의한 공작물 표면의 변환은 앞 절의 식 (6)에 의해 이루어진다. 이 때 이미 알고 있는 공구의 기하학적 형상으로부터 공구 표면의 좌표 변환과

주어진 절삭 깊이로 가공을 하기 위해 가공기를 통해 초기 위치 x, z 방향으로 공구를 이동시킨다. 이는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{tool} = M T_{py} \quad (7)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{py}) & 0 & \sin(\theta_{py}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_{py}) & 0 & \cos(\theta_{py}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\theta_{py}) & 0 & \sin(\theta_{py}) & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_{py}) & 0 & \cos(\theta_{py}) & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

식 (6)과 식 (7)에 의해 변환된 좌표를 공구와 공작물이 서로 접치는 부분에 대해 하나의 모델로 나타내기 위해 식 (8)과 같은 방법을 적용시켰다.

$$\begin{aligned} \text{if } C_w \geq C_t \\ C_{syn} &= C_t \\ \text{else} \\ C_{syn} &= C_w \end{aligned} \quad (8)$$

공구 및 공작물 합성 모델로부터 공구와 공작물 셋업 오차에 의한 미세형상의 변화를 확인할 수 있으며, 실제 가공 프로파일과 서로 비교해 셋업 오차와 나머지 다른 오차를 서로 분류함으로써 셋업 오차의 정도를 파악할 수 있다.

3. 셋업 오차 조건 제시

V-그루브 미세 가공에서 기하학적 형상 변화에 영향을 주는 셋업 오차 요소에는 앞 절에서 설명한 것과 같이 y 축에 대한 공구의 회전 오차 (θ_{py})와 각 축에 대한 공작물의 회전 오차 ($\theta_{wx}, \theta_{wy}, \theta_{wz}$)가 있다. 이 외에 전체 가공면의 측면에서 봤을 때 광경자의 산과 산 사이 거리인 피치 (p), 가공 방향의 공작물 치수(L), 절삭 깊이(d), 미세형상 그루브의 개수(n), 그리고 공구 끝점과 가공기의 B 축 사이의 거리(D)에 의해 미세형상이 변하게 된다. 이와 같은 공정에서 원하는 형상 정밀도를 만족하는 셋업 오차 범위를 제시하기 위해 오차가 포함되었을 때 각 축에 대하여 미세 형상 변화를 기하학적으로 해석하고, 이를 가공 시작점과 종료점에서 이상적으로 가공했을 때 서로 비교함으로써 오차 정도를 확인할 수 있다.

본 연구에서는 가장 많이 사용되고 있는 내각이 90° 인 v-type 의 다이아몬드 공구를 사용하여 공작물의 각 축에 대하여 오차가 포함되었을 때의 가공 형상 변화를 기하학적으로 해석하였다. 먼저 공작물의 x 축에 대해 회전 오차가 발생하였을 때 공작물 길이 방향으로 가공을 하면 미세형상의 깊이는 깊어지거나 얇아진다. 깊이가 변함에 따라 형상의 폭도 달라지게 된다. Fig. 3 은 (+)방향의

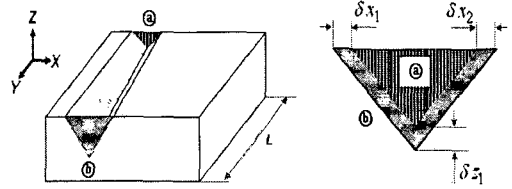


Fig. 3 Micro-features with setup error by workpiece rotation about the x axis

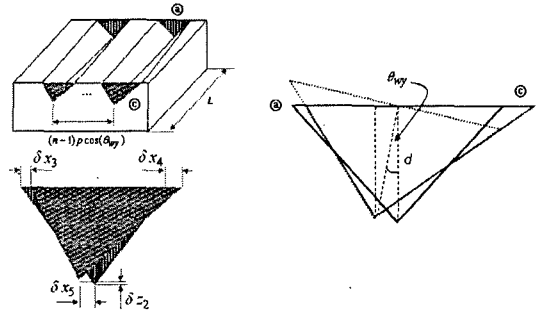


Fig. 4 Micro-features with setup error by workpiece rotation about the y axis

x 축 회전 오차에 의해 형상 깊이가 깊어지고 폭이 넓어지는 경우이다. 이 때 ㉑는 이상적인 가공시 가공 시작점에서의 형상을, ㉒는 x 축에 대한 회전 오차에 의해 실제 가공시 가공 종료점에서의 형상을 나타낸다. 여기서 미세형상 오차는 $\delta_{x1}, \delta_{x2}, \delta_{x3}$ 로 정의하였고, 원하는 형상 정밀도 (P_f)를 만족하는 x 축에 대한 회전 오차 범위는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta z_1 = \delta x_1 = \delta x_2 = L \times |\tan(\theta_{wx})| \leq P_f \quad (9)$$

공작물의 y 축 회전 오차에 의한 형상 오차 발생 양상은 피치 방향, 즉 x 축 방향으로 이동하여 새로운 그루브를 가공할 때마다 미세 형상의 깊이가 달라지게 된다. 이 때 미세 형상은 가공 방향에 대해서는 큰 영향을 받지 않지만 형상이 틀어짐에 따라 고려해야 할 오차 요소들이 많다. Fig. 4 는 (+) 방향의 y 축 회전에 의해 발생하는 오차를 셰이핑 가공에 의한 최종적인 미세 형상을 기하학적으로 해석한 것이다. 이 때 미세 형상 오차를 $\delta_{x2}, \delta_{x3}, \delta_{x4}, \delta_{x5}$ 로 정의하였고, 원하는 형상 정밀도(P_f)를 만족하는 y 축에 대한 회전 오차 범위를 식 (10), (11), (12), (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta z_2 = d[1 - \cos(\theta_{wy})] + (n-1)P \sin(\theta_{wy}) \leq P_f \quad (10)$$

$$\delta x_3 = d - [\tan(\theta_{wy}) + \tan(45^\circ - \theta_{wy})] \times [d \times \cos(\theta_{wy}) + (n-1)p \times \sin(\theta_{wy})] \leq P_f \quad (11)$$

$$\delta x_4 = [d \times \cos(\theta_{wy}) + (n-1)p \times \sin(\theta_{wy})] \times [\tan(45^\circ + \theta_{wy}) - \tan(\theta_{wy})] - d \leq P_f \quad (12)$$

$$\delta x_5 = [d \times \cos(\theta_{wy}) + (n-1)p \times \sin(\theta_{wy})] \times \sin(\theta_{wy}) \leq P_f \quad (13)$$

z 축의 회전 오차에 의해 미세 형상의 가공 시작점과 끝점에서의 면적과 위치가 틀려지게 된다. Fig. 5는 (+) 방향의 z 축 회전 오차에 의해 발생하는 오차를 δx_6 , δx_7 , δx_8 로 정의하여 형상 정밀도를 만족하는 z 축 오차 범위를 각각 식 (14), 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta x_6 = \delta x_7 = L \times |\tan \theta_{wz}| + \frac{d}{|\cos \theta_{wz}} - d \leq P_f \quad (14)$$

$$\delta x_8 = L \times |\tan \theta_{wz}| \leq P_f \quad (15)$$

마지막으로 공구의 y 축에 대한 오차는 Fig. 6과 같이 공작물의 y 축 회전 오차와 달리 형상만 달라질 뿐 가공 깊이는 일정하게 가공된다. 따라서 공구의 y 축에 회전 오차에 의한 미세 형상의 기하학적 오차는 δz_3 , δx_9 , δx_{10} , δx_{11} 로 정의하여 식 (16), (17), (18), (19)로 나타낼 수 있다.

$$\delta z_3 = D - D \times \cos(\theta_y) \leq P_f \quad (16)$$

$$\delta x_9 = \tan(\pi/4 - \theta_y) \times [d - (D - D \cos(\theta_y))] - d + D \sin(\theta_y) \leq P_f \quad (17)$$

$$\delta x_{10} = d + D \sin(\theta_y) - \tan(\pi/4 + \theta_y) \times [d - (D - D \cos(\theta_y))] \leq P_f \quad (18)$$

$$\delta x_{11} = D \times \sin(\theta_y) \leq P_f \quad (19)$$

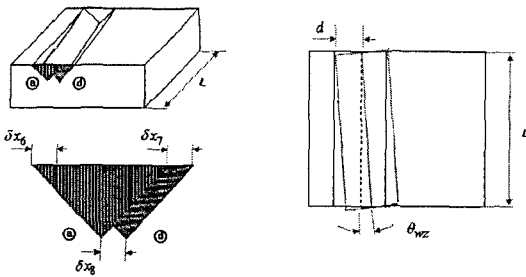


Fig. 5 Micro-features with setup error by workpiece rotation about the z axis

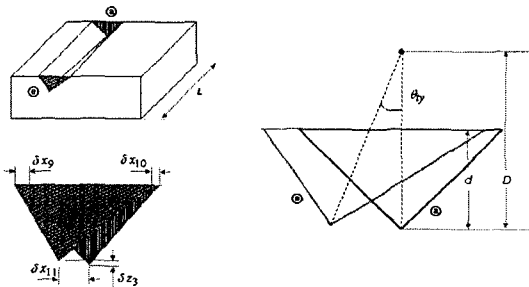


Fig. 6 Micro-features with setup error by tool rotation about the y axis

원하는 형상 정밀도를 만족하는 미세 형상을 가공하기 위해 공구와 공작물 각 축에 대한 오차는 여러 오차 범위를 모두 포함하는 것을 최대 오차 범위로 규명한다.

4. 실험 및 결과

4.1 실험 내용

공구 및 공작물의 셋업 오차가 미세형상에 미치는 영향을 가공을 통해 확인하기 위해서 실험은 셋업 오차 측정, 가공, 가공 후 프로파일 측정의 세 가지 과정으로 나눠 진행하였다.

각 축에 대한 셋업 오차는 머신 비전 시스템, 레이저 변위 센서, 갭 센서로부터 여러 번의 측정을 통해 얻은 평균값으로 나타내었다. 가공 실험은 소형 5 축 CNC 시스템에서 실행하였으며, 가공 변수 즉, 절삭 속도(cutting speed), 변화에 따른 condition 1 과 절삭 깊이(cutting depth)의 변화에 따른 condition 2의 두 가지 조건에서 가공 실험을 하였다. 각 조건에서의 가공은 보정 전과 보정 후로 나뉘진다. 가공 실험에 사용된 공구는 Fig. 7 과 같이 내각이 90° 인 V 타입의 다이아몬드 공구이고, 공작물로는 공구 마모의 영향을 최소화시키기 위해 6:4 황동(brass)을 사용하였다. 마지막으로 가공 후 미세형상의 프로파일을 측정함으로써 미세형상의 변화를 비교 및 확인하였고, 보정 전의 가공과 보정 후의 가공을 이상적인 가공과 비교하여 공구 및 공작물 셋업 오차가 전체 오차 중에서의 포함 정도를 확인하였다.

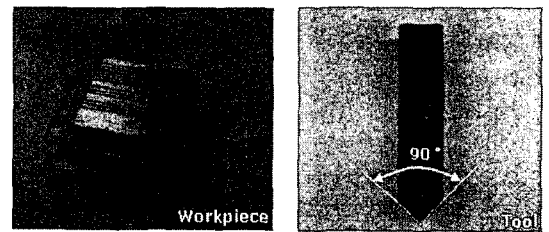


Fig. 7 Workpiece and tool for v-groove micromachining

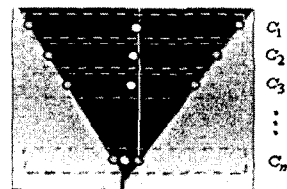


Fig. 8 Tilting angle of v-groove tool

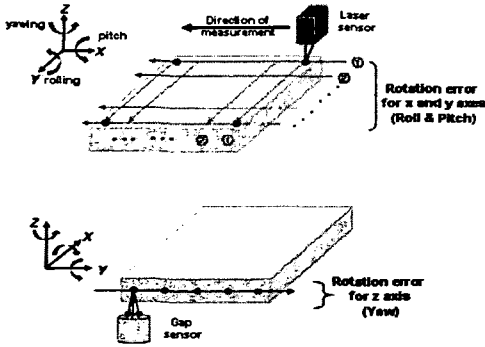


Fig. 9 Measurement method of laser displacement and gap sensor

4.2 셋업 오차 측정 방법

본 연구에서는 측정 대상 표면에 결점이 나 변형을 일으키지 않고, 수십 μm 크기의 미세 형상을 좀 더 정확하게 측정하기 위해 비접촉식 측정 방법을 사용하였다. 공구 셋업 오차는 머신 비전 시스템을 구축하여 측정하였고, 공작물 셋업 오차는 레이저 변위 센서(LK-G35, Keyence)와 갭 센서(S 600-2, Micro-epsilon)를 사용하여 측정하였다. 머신 비전 시스템에서 최대 약 $0.1\mu\text{m}$ 의 해상도를 확보하였고, 영상의 대비를 향상시켜 영상을 개선시키는 히스토그램 균등화(histogram equalization) 및 수정(modification)과 물체 영상을 분할하기 위해 경계를 검출하는 에지 검출(edge detection)과 같은 기법들을 사용하였다. 또한 Fig. 8 과 같이 여러 개의 분할 점으로부터 공구의 기울어짐을 확인하기 위한 방법으로 단순선형회귀분석(simple linear regression analysis)을 사용하여 공구 표면 모서리를 직선화시켜 공구 셋업 오차를 추정하였다.

Fig. 9 와 같이 공작물의 x, y 축 회전 오차는 공작물의 윗면을 레이저 변위 센서를 사용하여 측정하였고, z 축 회전 오차는 공작물 옆면을 갭 센서를 사용하여 측정하였다.

4.3 실험 결과

먼저 condition 1 은 100mm/min, 300mm/min, 500mm/min 의 세 가지 절삭 속도 변화에 대한 실험이다. 이 때 가공 깊이는 $70\mu\text{m}$ 다. 보정 전, 후의 미세형상 프로파일 측정에는 Keyence LT-9010 을 사용하였다.

측정 간격은 $5000\mu\text{m}$ 씩 No. 1, No. 2, No. 3 세 번에 걸쳐 측정하였다. Fig. 10 은 셋업 오차를 보정하지 않은 상태로 가공하여 각 조건에 대한 프로파일을 측정한 것으로서 셋업 오차가 점차 누적되어 나타 난 것을 확인할 수 있고, Fig. 11 은 셋업 오차를 보정 후 가공하여 각 조건에 대한 프로파일을 측정한 것으로서 측정 결과값이 대부분 잘 일치하였음을 알 수 있다. Fig. 12 는 condition 1 에서 절삭 속도가

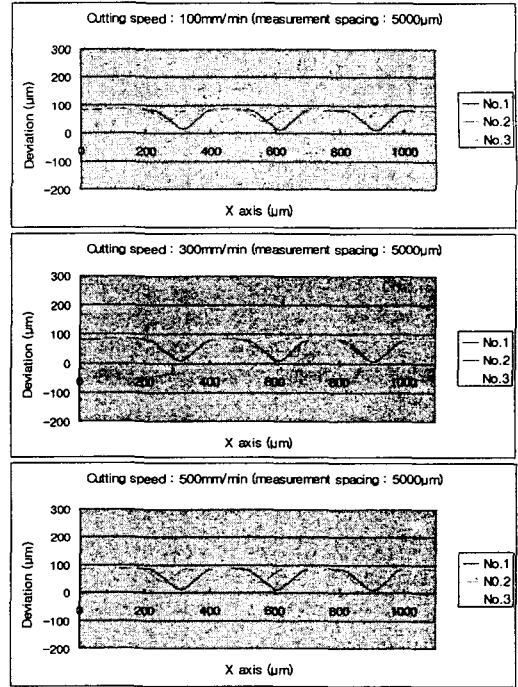


Fig. 10 Profile of v-groove before setup error compensation (condition 1)

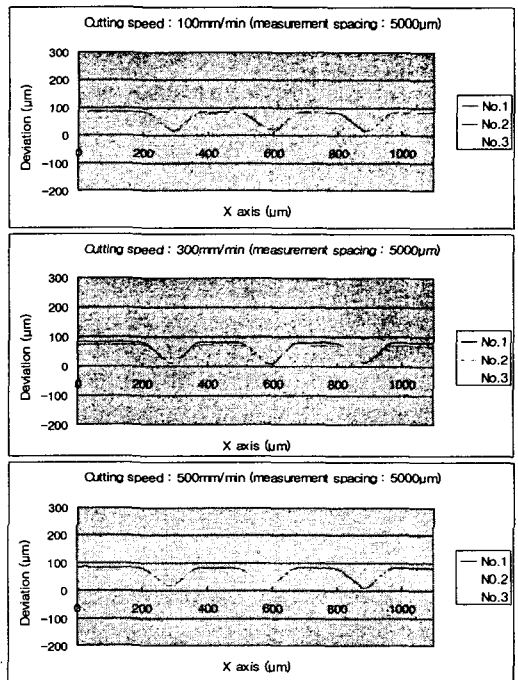


Fig. 11 Profile of v-groove after setup error compensation (condition 1)

300mm/min 일 때 셋업 오차 보정 전 실제 가공 결과물과 이상적인 결과물의 차이로부터 모든 오차의

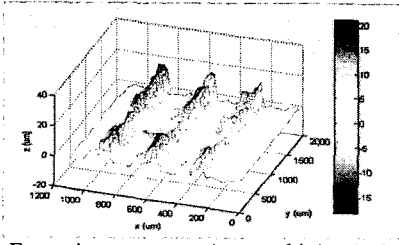


Fig. 12 Errors in v-groove micromachining before setup error compensation in condition 1

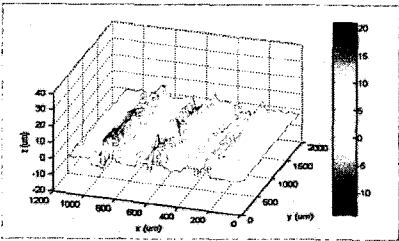


Fig. 13 Errors in v-groove micromachining after setup error compensation in condition 1

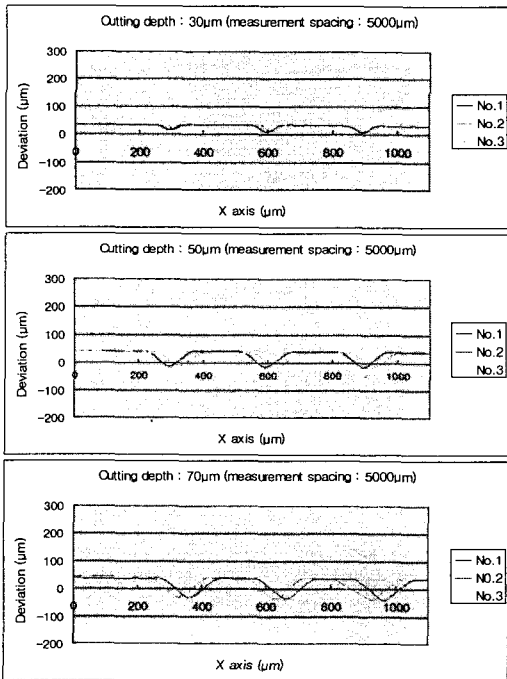


Fig. 14 Profile of v-groove before setup error compensation (condition 2)

포함 정도를, Fig. 13은 condition 1에서 절삭 속도가 300mm/min 일 때 셋업 오차 보정 후 실제 가공 결과물과 이상적인 결과물의 차이로부터 셋업 오차가 제외된 나머지 기타 오차의 포함 정도를 나타낸 것이다. 이 때 측정 간격은 100 μm 이고, 총 20 번에 걸쳐 측정하였다.

Condition 2는 30 μm , 50 μm , 70 μm 의 세 가지 절삭

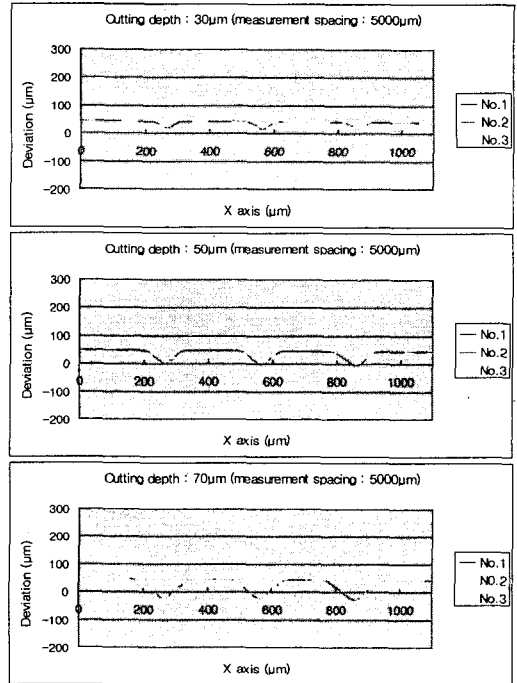


Fig. 15 Profile of v-groove after setup error compensation (condition 2)

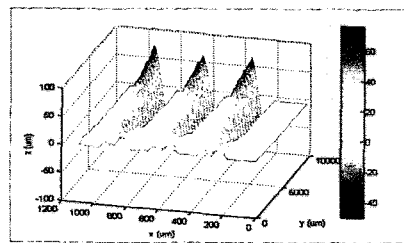


Fig. 16 Errors in v-groove micromachining before setup error compensation in condition 2

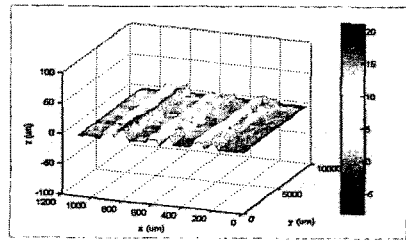


Fig. 17 Errors in v-groove micromachining after setup error compensation in condition 2

깊이 변화에 대한 실험이다. 이 때 절삭 속도는 300mm/min 이다. Fig. 14는 셋업 오차를 보정하지 않은 상태로 가공하여 각 조건에 대한 프로파일을 측정함으로써 셋업 오차가 점차 누적되어 나타난 것을 확인할 수 있고, Fig. 15는 셋업 오차를 보정 후 가공하여 각 조건에 대한 프로파일을 측정한 것으로서 측정 결과값이 대부분 잘 일치하였

Table 1 Parameters for setup condition

L (Length of workpiece)	400000 μm
p (Pitch)	40 μm
d (Cutting depth)	20 μm
P_f (Precision of micro-features)	0.5 μm
n (Number of v-groove)	10000
D (Distance between B axis and end of tool)	50000 μm

Table 2 Condition of setup errors (unit : $^\circ$)

Setup error	Component	Value
Workpiece (θ_{wx})	δz_1 $= \delta x_1 = \delta x_2$	$-7.162 \times 10^{-5} \leq \theta_{wx} \leq 7.162 \times 10^{-5}$
Workpiece (θ_{wy})	δz_2	$-7.162 \times 10^{-5} \leq \theta_{wy} \leq 7.162 \times 10^{-5}$
Workpiece (θ_{wz})	δx_8	$-7.162 \times 10^{-5} \leq \theta_{wz} \leq 7.162 \times 10^{-5}$
Tool (θ_{ty})	δx_{10}	$-5.723 \times 10^{-4} \leq \theta_{ty} \leq 5.723 \times 10^{-4}$

$$(-\pi/4 \leq \theta_{wx} = \theta_{wy} = \theta_{wz} = \theta_{ty} \leq \pi/4)$$

음을 알 수 있다. 측정 간격은 5000 μm 씩 No. 1, No. 2, No. 3 세 번에 걸쳐 측정하였다. Fig. 16 은 condition 2 에서 절삭 깊이가 70 μm 일 때 셋업 오차 보정 전 실제 가공 결과물과 이상적인 결과물의 차이로부터 모든 오차의 포함 정도를, Fig. 17 은 condition 2 에서 절삭 속도가 70 μm 일 때 셋업 오차 보정 후 실제 가공 결과물과 이상적인 결과물의 차이로부터 셋업 오차가 제외된 나머지 기타 오차의 포함 정도를 나타낸 것이다. 이 때 측정 간격은 500 μm 이고 총 20 번에 걸쳐 측정하였다.

본 연구의 실험 결과, 공구 및 공작물의 합성 모델링으로부터 가공 중 발생하는 모든 오차들 중에서 셋업 오차의 정도를 확인하고 분류함으로써 v-그루브 미세 가공에서의 셋업 오차가 미세 형상에 많은 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 따라서 셋업 오차 범위를 결정 짓기 위해 필요한 요소를 Table 1 과 같은 조건에서 최대 셋업 오차 범위를 Table 2 와 같이 제시될 수 있다.

5. 결론

본 연구는 v-groove 미세 가공에서 공구 셋업 오차와 공작물 셋업 오차를 규명하고, 해석 및 복합적으로 모델링하여 셋업 오차가 미세 형상에 미치는 영향을 분석하였다. 이는 다양한 가공 조건에서의 실험을 통해 검증하였고, 셋업 오차가 가공 중 발생하는 전체 오차 중 차지하는 정도로부터 셋업 오차가 v-그루브 미세 형상에 상당한 영향을 미침을 확인하였다. 정밀도 개선과

관련해서는 셋업 오차에 의한 미세 형상의 기하학적인 변화를 해석하여 원하는 형상 정밀도를 만족하는 공구 및 공작물의 최대 셋업 조건을 제시하였다. 이로 인해 공구 및 공작물 셋업 오차로부터 미세 형상의 변화와 셋업 오차의 포함 정도를 예측할 수 있고, 측정 오차와 최대 셋업 오차 범위를 비교함으로써 가공 후 불량 제품을 따로 확인해야 하는 불필요한 공정을 줄일 수 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부 핵심연구개발사업 “대면적 미세형상 제조 공정의 지능화 기술 개발” 과제 수행의 일환으로 이루어진 것임을 밝히며, 지원 기관에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Ramesh, R., Mannan, M.A. and Poo, A.N., 2000, "Error Compensation in Machine Tools -a Review Part I: Geometric, Cutting-Force Induced and Fixture-Dependent Errors," *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, Vol. 40, No. 9, pp. 1235~1256.
- (2) Ramesh, R., Mannan, M.A. and Poo, A.N., 2000, "Error Compensation in Machine Tools -a Review Part II: Thermal Errors," *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, Vol. 40, No. 9, pp. 1257~1284.
- (3) Srivastava, A.K., Veldhuis, S.C. and Elbestawit, M.A., 1995, "Modeling Geometric and Thermal Errors in a Five-Axis CNC Machine Tool," *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, Vol. 35, No. 9, pp. 1321~1337.
- (4) Okafor, A.C. and Ertekin, Yalcin M., 2000, "Derivation of Machine Tool Error Models and Error Compensation Procedure for Three Axes Vertical Machining Center Using Rigid Body Kinematics," *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, Vol. 40, No. 8, pp. 1199~1213.
- (5) Mir, Y.A., Mayer, J.R.R. and Fortin, C., 2002, "Tool Path Error Prediction of a Five-Axis Machine Tool with Geometric Errors," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B, Journal of engineering manufacture*, Vol. 216, No. 5, pp. 697~712.
- (6) Raksiri, C. and Parnichkun, M., "Geometric and Force Errors Compensation in a 3-Axis CNC Milling Machine," *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, Vol. 44, No. 12/13, pp. 1283~1291.
- (7) Park, K.T., Shin, Y.J. and Kang, B.S., 2004, "Tool-Setup Measurement Technology of High Speed Precision Machining Tool," *Journal of Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 2004, pp. 1066~1069.
- (8) Shreyes N.Melkote, 2005, "Modeling of Workpiece Location Error Due to Fixture Geometric Error and Fixture-Workpiece Compliance," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 127.