

# 볼 엔드밀 가공에서 치수오차에 관한 실험적 연구

심기중#, 유종선\*, 정진용\*\*, 서남섭\*\*\*

## An Experimental Study on the Dimensional Error in Ball End Milling

Ki-Joung Sim#, Jong-Sun Yu\*, Chin-Yong Cheong\*\* and Nam-Sub Suh\*\*\*

### ABSTRACT

This paper presents an experimental study on the dimensional error in ball-end milling. In the 3D free-formed surface machining using ball-end milling, while machining conditions are varied due to the Z component of the feed and existing hemisphere part of the ball-end mill, the mechanics of ball-end milling are complicated. In the finishing, most of cutting is performed the ball part of the cutter and the machined surface are required the high quality. But the dimensional errors in the ball-end milling are inevitably caused by tool deflection, tool wear, thermal effect and machine tool errors and so on. Among these factors, the most significant one of dimensional error is usually known as tool deflection. Tool deflection is related to the instantaneous horizontal cutting force and varied the finishing cutting path. It lead to decrease cutting area, thus resulting cutting forces but the dimensional precision surface could not be obtained. So the machining experiments are conducted for dimensional error investigation and these results may be used for decrease dimensional errors in practice.

**Key Words** : Tool deflection (공구변형), Dimensional error (치수오차), Instantaneous horizontal cutting force (순간 수평 절삭력), Finishing (정삭), Cutting force (절삭력)

### 1. 서론

최근 자동차, 항공기, 선박, 가전, 컴퓨터 산업 등 제조현장에서 생산되는 제품은 기능적인 사양 만족과 좋은 품질 뿐만 아니라 아름답고 부드러운 외형을 선호하는 경향으로 3D 자유곡면 가공에 대한 수요가 많고 그 중요성이 커지고 있다. 또한 규모 큰 회사뿐만 아니라 프레스, 사출 급형을 생산하는 소규모의 가공회사에서도 곡면가공이 중요하게 되었다.

3D 자유곡면의 볼 엔드밀 가공은 일반적으로 널리 사용되는 가공방법으로서 곡면상에서 공구 경로 생성이 간단하고 가공시간을 짧게하는 장점을 가지고 있다. 가공작업에서 제품의 높은 치수정밀도, 표면정도 및 생산성은 항상 중요한 요소이다. 위의 목적을 위하여는 실제 가공전에 가공조건에 대한 시뮬레이션과 이론적 해석을 통하여 결과를 예측하고 주어진 가공조건에 타당성 여부를 검토할 필요가 있다. 주어진 가공물 형상과 가공조건에서 생산된 제품의 치수오

접수일: 2003년 7월 10일 접수; 게재승인일: 2004년 4월 9일  
# 전북대학교 대학원 기계공학과  
Email cadcam10@hanmail.net Tel. (063) 270-2371  
\* 전북대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 군장대학 자동차기계열  
\*\*\* 전북대학교 기계공학부

차에 영향을 주는 중요 요인의 해석과 실험을 통하여 치수오차를 줄일 수 있는 가공방법의 개발이 요구된다. 그러나 가공현장은 가공작업자의 일반적인 경험과 공구 카다로그를 기준으로 가공조건을 선정하고 있는 실정이다. 이러한 답습적인 방법은 비효율적인 가공조건과 공구경로 생성으로 갑작스런 공구파손, 가공시간 및 치수 오차의 증가를 가져온다.

치수오차에 대한 국외의 연구는 일반적인 가공에서 발생하는 치수오차의 예측에 관한 연구<sup>1-3</sup>는 많이 이루어지고 있으나 볼 엔드밀 가공에서의 연구는 아직 미진한 상태이며 몇몇 연구자들이 절삭력 해석모델 개발을 위한 선행연구로서 공구변형과 공구변형에 의한 치수오차 연구<sup>4-6</sup>를 수행하고 있다. 국내에서도 볼엔드밀 가공에서 치수오차에 대한 연구<sup>7-9</sup>가 몇몇 연구자들에 의해서 이루어지고 있지만 좀더 많은 연구가 필요한 분야이다.

본 연구에서는 볼 엔드밀을 이용한 곡면가공에서 치수오차가 발생하는 요인에 대하여 서술하였고, 가공물 형상, 공구경로 및 가공조건을 달리한 실험가공을 통하여 공구변형과 이에 따르는 치수오차의 특성을 분석하였다. 분석한 결과를 토대로 곡면가공에서 제한적이지만 치수오차를 줄일 수 있는 적절한 경로 및 가공조건 선택 방법을 제시하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 연구동향

곡면가공에서 치수오차를 발생시키는 요인으로서는 절삭공구 변형, 공작기계 오차, 공구마모, 가공시 발생하는 열영향 등이며, 특히 공구변형은 치수오차 발생의 가장 큰 요인으로 취급되고 있다.<sup>4,9</sup> 공구변형은 치수정밀도에 영향을 미치며 두 가지 요인으로 설명되어진다. 첫째는 공구 설치오차이다. 스피들(Spindle) 회전축과 공구축의 오프셋(Offset) 및 경사(Tilt)에 의한 런아웃(Run-out)<sup>5</sup>으로 정밀한 공구설치가 필요하다. 둘째는 공구의 이송과 회전운동에 의한 가공 작업중 발생하는 순간적인 수평 절삭력에 의한 공구의 변형이다. 적절한 공구경로 및 가공조건 선택이 필요하다. 볼 엔드밀 공구의 직경에 비하여 길이가 긴 공구 및 척

에서 공구가 길게 설치된 경우에는 공구변형에 의한 치수오차는 커지게 된다.

이 분야에서 연구는 초기 Kline<sup>1,2</sup> 등에 의한 평 엔드밀에서 공구변형을 고려한 치수오차 예측 시스템의 개발이었다. 이들의 연구는 평 엔드밀을 이용한 측벽가공에서 가공오차 예측에 이송에 수직인 y 축 성분을 이용하였다. Lim<sup>4</sup> 등의 연구에서는 볼엔드밀 공구의 변형 모델이 개발되었으며 개발된 모델에 의하여 치수오차를 예측하였고 예측값과 실험값 사이에 근접한 일치율을 보였다. 위의 연구에서는 공구변형의 해석에 순간적인 수평절삭력을 고려하였다. 국내에서는 Yang<sup>7</sup> 등이 곡면의 치수오차에 대하여 공구의 처짐벡터와 곡면의 공구접촉점의 법선벡터로 표현되는 치수오차 예측 모델을 개발하여 이송속도 제어에 의한 치수정밀도를 향상시키는 방법을 제시하였다. Wang<sup>8</sup> 등은 코너의 펜슬가공에서 절삭력과 연관된 공구변형 특성에 대하여 연구하였다.

### 2.2 공구변형

가공 중 발생하는 절삭력은 절삭공구의 변형과 두께가 얇은 측벽을 가공할 경우 가공물을 변형시킨다. 따라서 공구와 가공물의 변형에 의한 치수오차를 해석하는데 절삭력이 중요하게 고려되고 공구변형은 공구에 작용하는 순간적인 절삭력의 즉각적인 반응으로 설명하고 있다.<sup>4</sup> 주로 정삭에 이용되는 볼 엔드밀은 공구의 반구부에서 모든 가공이 이루어지고 매순간 가공물과 공구의 접촉 위치가 변하기 때문에 절삭기구가 복잡하고 공구 변형을 정량적으로 계산하기는 매우 어렵다. 일반적으로 엔드밀 공구의 변형은 홀더 부분을 강체로 공구를 외팔보(Cantilever beam)로 가정하여 공구 변형을 단순하게 계산한다. 초기 평엔드밀의 공구 변형의 연구에 사용했던 공구변형 모델은 다음과 같다.

$$\delta = \frac{F \cdot L^3}{3E \cdot I} \quad (1)$$

여기서 F: 수평절삭력, L: 공구길이  
E: 탄성계수, I: 공구 관성모멘트  
Kline<sup>1</sup> 등이 사용한 좀더 복잡한 공구변형 모델은 다음과 같다.

$$\delta_y(z) = \frac{F_y}{2ER^2} [ < C_y - z >^3 - (L - z)^3 + 3(L - z)^2(L - C_y) ] \quad (2)$$

$F_y$ : 수평절삭력,  $E$ : 공구 탄성계수  
 $R$ : 공구유효반경,  $L$ : 공구길이,  $C_y$ : 절삭력 작용점

Fig.1 은 위의 공구 변형모델을 도식화하여 나타내고 있다. 자유단으로부터 거리  $z$  에서 공구 변형은  $\delta_y(z)$  로 나타내며 수평절삭력( $F_y$ )과 절삭력 작용점( $C_y$ )에 의하여 공구 변형이 결정된다.

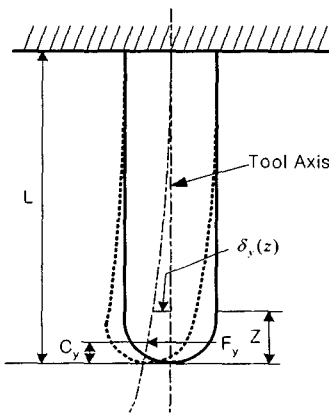
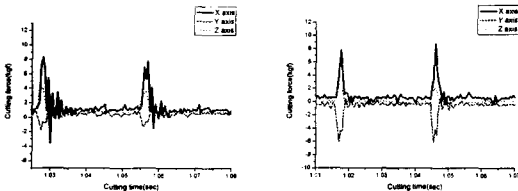


Fig.1 Existing tool deflection model

Feng<sup>6</sup> 등의 연구에서는 절삭력에 의한 공구 변형에 런아웃을 추가하여 전체 공구 변형으로 계산하였다. 곡면의 정삭가공시 볼 부분에서 가공이 이루어지고 절인의 접선, 공구축 및 경사면에 수직한 방향의 절삭력이 발생한다. 이 절삭력들이 직각좌표계의  $x, y, z$  축 3 방향으로 조합되어 공구 동력계로 측정된다. Fig.2 는 실험가공에서 측정된 절삭력의 형태를 보여주고 있다.



(a) Machining direction 1 (b) Machining direction 2

Fig.2 Measured cutting forces

짧은 시간에 단속절삭이 이루어지고  $z$  축 방향의 절삭력이 상대적으로 적게 발생함을 알 수 있다. 절삭력에 의한 공구 변형은 일반적으로 공구 변형에 지배적인 1 방향의 수평절삭력 성분을 이용하여 해석하고 있다. 본 연구에서는 공구 변형에 대한 런아웃의 영향은 적다고 가정하였으며 식(2)에 의하여 계산된  $x$  축 방향의 공구 변형과  $y$  축 방향의 공구 변형을 정규화하여 전체 공구 변형으로 사용하였다. Fig.3 에 이를 도식화하여 나타냈으며 전체 공구 변형 계산 모델은 다음과 같다.

$$\delta(z) = \sqrt{\delta_x(z)^2 + \delta_y(z)^2} \quad (3)$$

펜드밀을 이용한 평면 또는 경사진 면의 슬롯(Slot) 가공에서는 공구 변형을 한 방향만을 고려하였지만 곡면가공에서는 2 축 방향의 변형을 동시에 고려하는 것이 좀더 타당할 것으로 분석된다.

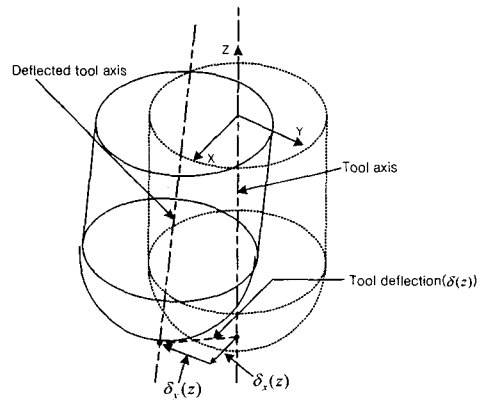


Fig.3 Actual tool deflection model

### 2.3 치수오차

볼 엔드밀을 이용한 3D 곡면가공에서 순간절삭력에 의한 공구 변형 결과는 원래 경로를 절삭하지 못하여 하방향 절삭 시 과절삭(Overcut)과 상방향 절삭 시 미절삭(Undercut)으로 나타나게 된다. 정상적인 공구 경로에서 설계된 형상을 가공할 수 있으나 공구 변형에 의하여 설계된 형상을 가공하지 못하고 과절삭이나 미절삭이 발생하여 치수오차가 원인이 된다. 최근의 CAM 소프트웨어는 공구 경로의 시뮬레이션을 통하여 과절삭이나 미절삭 부위를 경로상에서 검증하고 설계된 형상을 얻을 수 있도록 공구 경로를 생성하는데 도움을 주고 있

다. 그러나 이런 공구경로 데이터는 가공 중 발생하는 공구변형, 마모, 열발생 등의 상황을 고려하지 않은 이상적인 경로 시뮬레이션이다. 따라서 주어진 조건에 의한 실제 가공에서 공구 변형에 의한 치수오차를 계산하여 예측할 수 있는 시스템의 개발은 치수오차를 줄여 보다 정밀한 제품을 생산하는데 도움을 줄 것이다. Yang<sup>7</sup> 등의 연구에서 치수오차( $e$ )는 절삭에 참여하는 미소절삭날이 그리는 궤적과 (공구변형에 따른 변경된 공구경로) 설계된 가공곡면 위의 한점(P)에서 접평면 사이의 최소거리로 정의하였다. Lim<sup>4</sup> 등은 치수오차 예측 시스템 개발 연구에서 가공될 곡면의 특정위치(P)에서 곡면에 법선 방향으로 절삭날까지의 윅셋거리를 치수오차로 정의하였으며 다음과 같다.

$$e \approx \sqrt{\delta^2 + \rho^2 + 2\delta\rho \sin \varphi} - \rho \quad (4)$$

식(4)에 공구변형 민감도를 추가하여 치수오차를 분석하였다. 변형민감도는 식(4)를 공구변형에 대한 편미분으로 근사적으로  $\sin \varphi$  가 사용된다. 각  $\varphi$  는 공구축과 절인이 접촉하는 위치에서 곡면에 수직한 벡터 사이의 각으로 정의된다.

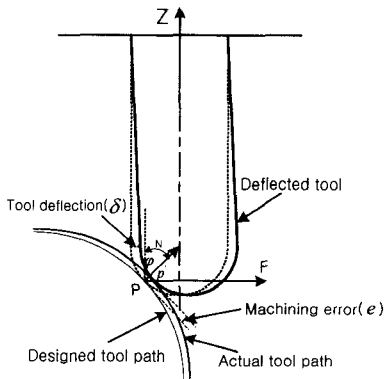


Fig. 4 Definition of machining error

Fig.4 는 위에서 설명한 내용을 도식화하여 보여주고 있다. 가공물과 접촉하는 절인상의 한점 P 가 공구변형에 의하여 P'으로 이동되며 설계된 가공면을 절삭하지 못하게 된다. 여기서 수평방향의 이동량은 공구변형( $\delta$ )으로 P'위치에서 가공면에 수직한 길이를 공구의 변형에 의한 치수오차( $e$ )로 정의하였다. 본 연구에서는 치수오

차가 근사적으로 공구변형에 비례한다고 가정하고 곡면 형상에 따른 변형민감도를 곱하여 계산하였다.

$$e \approx \delta \sin \varphi \quad (5)$$

절삭력에 의한 공구변형을 고려한 치수오차는 근사적으로 공구변형과 변형민감도를 곱하여 얻을 수 있다. 식(5)의 계산결과는 식(4)와 비교하여 약간 큰 경향을 보이지만 10% 미만의 오차를 보였다.

### 3. 실험방법 및 결과

#### 3.1 실험장치 및 방법

볼 엔드밀을 이용한 곡면가공의 치수오차를 고찰하고자 다음과 같은 실험을 수행하였다. 실험가공은 수직형 CNC 밀링머신(모델 : 화천기계 Hi-Super 4)에서 수행되었으며, 절삭시 발생하는 절삭력은 압전형(Piezoelectric type) 공구동력계 (Kistler 9257A)를 이용하여 3 축 방향의 절삭력을 측정하였다. 측정된 절삭력 신호는 차지앰프(Charge amplifier, Kistler 5001)를 통해 증폭시키고 A/D 변환기를 이용하여 2khz 로 샘플링하여 저장하였다. 가공재료는 플라스틱 사출, 프레스 금형제작에서 일반적으로 많이 사용하는 HrC65 의 열처리 STD11 제품을 사용하였으며 실험가공 형상은 Fig. 5 와 같다. 그림에서 일련번호는 절삭력 및 치수오차 측정 위치를 6 부분으로 구분하였음을 나타내고 있다. 시험절삭은 건식으로 수행되었으며, 절삭공구는 직경 10mm 의 2 날 초경 볼엔드밀로 Helix Angle 30<sup>0</sup> 을 사용했다. 공구설치는 척으로부터 60mm 이다.

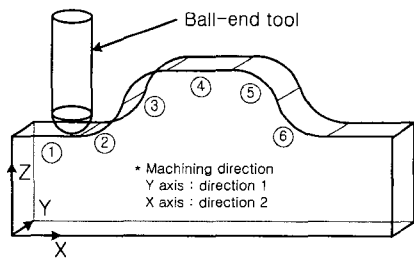


Fig. 5 Machining shape and directions

볼 엔드밀 가공은 가공형상과 경로에 따라 공구와 가공물의 접촉 위치가 일정하거나 연속으로 변하게 된다. 예를 들어 등고선 경로는 공구가 가공물과 항상 같은 높이에서 접촉되도록 경로를 생성하며 측벽가공에 주로 이용된다. 보통은 공구축 방향의 이송을(Up and down)를 포함하게 된다. 실험가공에 사용된 형상은 가공 후 치수오차 측정의 편의를 위하여 2D 단면을 갖도록 선택하였으며, 동일한 형상을 Fig. 5 에 도시한 것처럼 2 방향의 경로를 채택하였다. Table 1 은 실험가공에 사용된 가공조건을 보여주고 있다.

Table 1 Cutting conditions for machining error

Feed (mm/min)	150
Spindle speed (RPM)	1900
Depth of cut (mm)	0.3
Pick feed (mm)	0.3

가공 형상을 6 부분으로 구분하여 각각의 위치에서 12 개의 절삭력을 측정하여 이들을 평균하여 분석에 이용하였다. 측정된 절삭력의 평균절삭력과 최대절삭력(+, -) 특성을 분석하여 평균절삭력보다는 최대절삭력이 공구변형과 결과적인 치수오차 해석에 부합된다고 판단하여 최대절삭력을 이용하였다. 실험 가공 후 가공면의 치수오차 측정을 위하여 3 차원 좌표측정기(CMM)를 이용하여 2 차원 단면방향으로 가공 전후에 측정하여 치수오차 값을 얻었다. 측정오차는 0.01mm 이내이다.

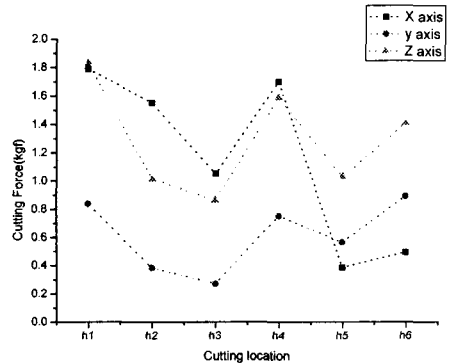
**3.2 실험결과 및 고찰**

볼 엔드밀을 이용한 곡면가공에서 가공방향과 위치에 따른 최대절삭력을 이용하여 공구변형과 치수오차를 분석하였다.

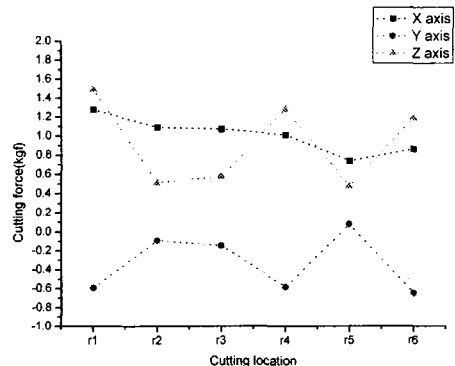
**3.2.1 절삭력이 공구변형에 미치는 영향**

볼 엔드밀 공구의 변형은 공구 런아웃을 작다고 가정하면 가공중 발생하는 최대절삭력의 영향이 크다. 특히 정삭은 축 방향, 반경방향 절삭깊이가 적어 볼 부분에서 모든 절삭이 이루어지며 날당 절삭면적이 적고 짧은 시간에 단속절삭이 이루어진다. Fig.6 은 가공방향 1, 2로 실험가공에서 측정된 가공물 위치별 절삭력 중 평균절삭력의 변화를 보여주고 있다. 측정된 절삭력은 각각 x, y, z 축

방향으로 (+, -) 절삭력이 불규칙적으로 발생하여 평균을 계산하면 가공방향 1 은 대략 x 축 1.10kgf, y 축 0.62kgf, z 축 1.3kgf 이고 가공방향 2 는 대략 x 축 1.0kgf, y 축 -0.33kgf, z 축 0.92kgf 이다. 가공방향 1 에서는 평면가공에서 곡면보다 절삭력이 크다. 이것은 절삭성이 나쁜 공구 정점부가 가공에 참여하기 때문으로 여겨진다. 가공방향 2 도 측정된 절삭력이 같은 경향을 보인다. 단지 y 축은 (-)의 평균절삭력을 나타내며 곡면가공에서 더 큰 절삭력이 발생한다. 이것은 공구와 가공물의 접촉 위치가 날의 외각으로 이동하면서 상대적으로 (-) 방향 절삭력이 커진 것으로 판단된다.



(a) Machining direction 1

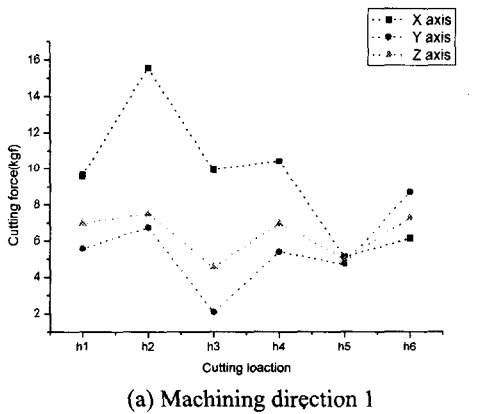


(b) Machining direction 2

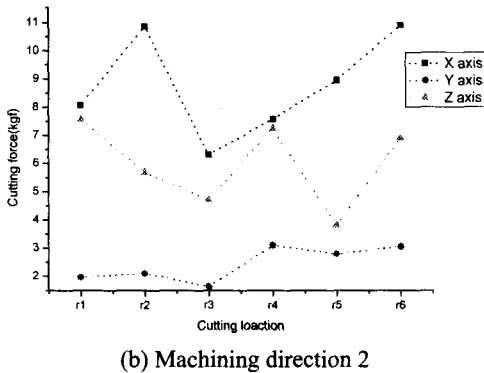
Fig. 6 Characteristic of average cutting forces

Fig.7 은 가공방향 1, 2로 실험가공에서 측정된 최대절삭력의 변화를 보여주고 있다. 가공방향 1 은 x 축 9.48kgf, y 축 5.06kgf, z 축 6.27kgf 이고 가

공방향 2는 x 축 8.78kgf, y 축 2.44kgf, z 축 5.99kgf 이다. 가공방향 1에서는 y, z 축과 비교하여 상대적으로 x 축 방향의 절삭력이 크고 특히 코너부에서 큰 절삭력이 얻어졌다. 이송 방향인 y 축 방향의 절삭력은 (+)보다 (-) 방향의 절삭력이 크고 x 축과 같은 경향을 보였다. 가공방향 2에서도 가공방향 1과 같은 경향을 보이며 가공방향 1과 비교하여 모든 가공 위치에서 작은 절삭력이 발생하였다. 또한 하방향 절삭시 상대적으로 큰 절삭력이 얻어졌다. 2 가공방향 모두에서 상방향 절삭시 x, y 축 방향의 (+)방향 절삭력이 크게 측정되고 하방향 절삭시 (-) 방향이 크게 측정되었다. 이것은 공구와 가공물의 접촉위치의 변화로 분석된다



(a) Machining direction 1

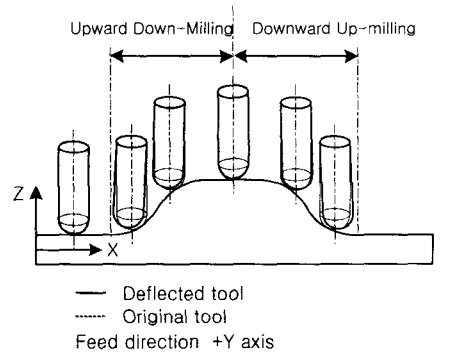


(b) Machining direction 2

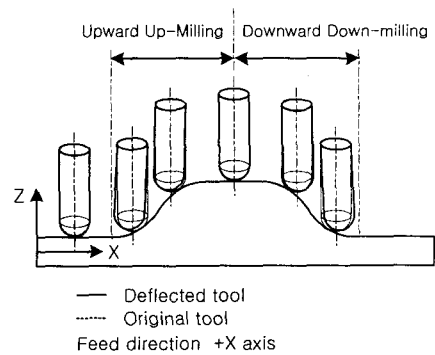
Fig. 7 Characteristic of maximum cutting forces

가공중 공구는 변형의 방향과 크기가 매순간 변한다. 따라서 본 연구에서는 매순간 변하는 공구변형 중 가장 큰 변형이 치수오차로 남을 것으

로 판단하여 최대절삭력으로 공구변형을 계산하고 치수오차를 분석하였다. 평면 가공은 공구 정점에서 가공면이 생성되며 절삭력에 의한 계산된 공구 변형은 대략 90  $\mu\text{m}$  였다. 그러나 평면 가공에서의 공구변형은 가공오차에 미치는 영향이 미미할 것으로 판단된다. 코너 부분에서는 엔드밀의 절삭성이 나쁜 공구 정점부가 절삭에 참여하고 절삭면적의 증가로 공구변형이 큰 위치로 대략 상방향 절삭시 130  $\mu\text{m}$ , 하방향 절삭시 135  $\mu\text{m}$  로 계산되었다. 볼록곡면 부분의 가공은 절삭성이 좋은 공구 외각날의 절삭으로 대략 상방향 절삭시 75  $\mu\text{m}$ , 하방향 절삭시 100  $\mu\text{m}$  정도의 공구변형이 발생한 것으로 계산된다. 가공방법 1, 2 모두에서 곡면을 상방향으로 가공할 경우 적은 공구변형을 보이며 실험가공에서 얻어진 공구변형 패턴은 Fig. 8 과 같다.



(a) Machining direction 1

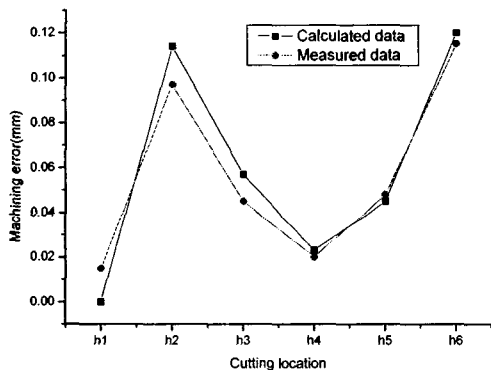


(b) Machining direction 2

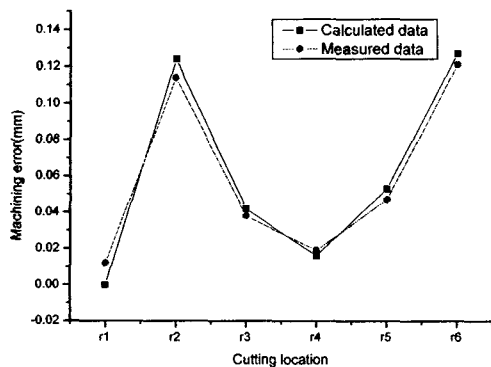
Fig. 8 Tool deflection pattern according to machining directions

### 3.2.2 가공면의 치수오차

볼 엔드밀에 의한 곡면 가공에서 공구변형에 의한 치수오차를 분석한 결과가 Fig.9 에 보여진다. 수평 절삭력에 의한 공구변형을 이용하여 계산한 오차가 측정된 오차와 비교되어 있다. 측정된 치수오차는 가공방향 1 에서 코너를 상방향으로 가공할 때 0.097mm, 하방향으로 가공할 때 0.115mm 로 하방향 가공에서 치수오차가 큼을 알 수 있다. 가공방향 2 에서도 같은 경향을 보였다. 상방향 가공 시 0.114mm, 하방향 가공 시 0.121mm 로 가공방향 1 에 비하여 다소 큰 측정오차를 보였다. 제시된 오차 계산식에 의해서 계산된 치수오차도 측정된 오차와 같은 경향을 보이며 전반적으로 큰 경향을 보이지만  $\pm 15\%$  이내에서 잘 일치하고 있다.



(a) Machining direction 1



(b) Machining direction 2

Fig. 9 Calculated and measured machining error

### 4. 결론

본 연구에서는 볼 엔드밀을 이용한 곡면가공에서 가공방향과 가공위치에 따른 절삭력 특성과 절삭력에 의한 공구변형 및 치수오차에 미치는 영향을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 볼엔드밀을 이용한 곡면가공에서 x, y 축 방향의 최대절삭력의 조합을 이용한 공구변형 모델과 공구변형과 곡면형상에 따른 변형민감도를 이용한 치수오차 계산모델이 제시되었다.
2. 공구변형에 의한 치수오차 계산모델을 이용하여 계산된 오차는 측정된 치수오차와 비교하여 다소 큰 경향을 보이지만  $\pm 15\%$  이내에서 잘 일치하였다.
3. 곡면가공 시 오차를 줄여주는 경로는 절삭이송 중 축방향 이송이 없는 가공방향 1 로 상방향 가공에서 가장 적은 오차를 보였으며 가장 적절한 경로로 판단 되었다.

### 참고문헌

1. Kline, W. A., DeVor, R. E. and Shareef, I. A., "The Prediction of Surface Accuracy in End Milling," Transactions of the ASME., Vol. 104, pp. 272-278, 1982.
2. Kline, W. A., DeVor, R. E. and Lindberg, J. R., "The Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts," Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 22, pp. 7-22, 1982.
3. Sutherland, J. W. and DeVor, R. E., "An Improved Method for Cutting Force and Surface Error Prediction in Flexible End Milling Systems," Transactions of the ASME., Vol. 108, pp. 269-279, 1986.
4. Lim, E. M. and Menq, C. H., "The Prediction of Dimensional Error for Sculptured Surface Productions Using the Ball-End Milling Process PART2," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 35, pp. 1171-1185, 1994.
5. Feng, H. Y. and Menq, C. H., "The Prediction of Cutting Forces in the Ball-End Milling Process," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 34, pp. 697-710, 1993.
6. Feng, H. Y. and Menq, C. H., "A Flexible Ball-end Milling System Model for Cutting Force and

- Machining Error Prediction," ASME J. of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 118, pp.461-469, 1996.
7. Yang, M. Y. and Sim, C. G., "A Study on the Precision machining in Ball End Milling System," Journal of KSPE, Vol. 11, No. 2, pp. 50-64, 1994.
  8. Wang, D. H. and Yun, K. S., "Characteristics of Tool Deflection of Ball-end Mill Cutter in Pencil Cutting of the Corner," Journal of KSPE, Vol. 16, No. 2, pp.123-129, 1999.
  9. Doo, S., Hong, J. W. and Suh, N. S., "A Study on the Cutting Force and Machining Error on the Inclined Plane in Ball-End Milling," Journal of KSPE, Vol. 18, No. 7, pp.112-119, 2001.