

곡면의 볼 엔드밀 가공에서 가공오차 특성에 관한 연구

심기중[#], 유종선*, 유기현*, 정진용**

A Study on the Machining Error Characteristics in Ball-End Milling of Surface

KI-Joung Sim[#], Jong-Sun Yu*, Ki-Hyun Yu*, Chin-Yong Cheong**

ABSTRACT

Machining error is defined the normal distance between designed surface and actual tool path with tool deflection. This is inevitably caused by the tool deflection, tool wear, thermal effect and machine tool errors and so on. Among these factors, tool deflection is usually known as the most significant factor of machining error. Tool deflection problem is analyzed using instantaneous horizontal cutting forces. The high quality and precision of machining products are required in finishing. In order to achieve these purposes, it is necessary work that decrease the machining error.

This paper presents a study on the machining error caused by the tool deflection in ball end milling of 2 dimensional surface. Tool deflection model and simple machining error prediction model are described. This model is checked the validity with machining experiments of 2 dimensional surface. These results may be used to decrease machining error and tool path decision.

Key Words : Machining Error(가공오차), Designed surface(설계곡면), Tool Deflection(공구변형), Instantaneous Horizontal Cutting Force(순간수평절삭력), Finishing(정삭), 2 Dimensional Surface (2차원곡면)

1. 서 론

최근 자동차, 항공기, 선박, 가전 및 컴퓨터 산업 등 제조현장에서는 생산되는 제품은 기능적인 사양의 만족, 고품질, 아름답고 부드러운 형상을 선호하는 경향으로 3차원 자유곡면 가공 수요가 증가하고

그 중요성이 커지고 있다. 또한 규모가 큰 회사뿐만 아니라 사출 및 프레스 금형을 생산하는 소규모의 가공 현장에서도 자유곡면 가공의 요구가 증가하고 있다. 자유곡면 형상의 가공은 볼 엔드밀을 이용하는 방법이 주로 사용되고 있다. 이는 곡면 가공을 위한 공구경로 생성이 간단하고 짧게 할 수 있는 장점이 있기 때문이다. 절삭작업에서 생산제품의 고품질과 생산성은 항상 중요한 요소로 취급된다. 고정밀 제품을 단 시간에 많이 생산하기 위해서는 적절한 절삭조건 선정이 매우 중요하다. 따라서 곡면 가공을 위한 절삭조건 선정 시 실제 절삭 전에 시뮬

교신저자 전북대학교 대학원 기계공학과
E-mail cadcam10@hanmail.net

* 전북대학교 대학원 기계공학과

** 군장대학 자동차기계계열

레이션을 통하여 절삭특성을 예측하고 주어진 절삭 조건의 적절성 여부를 검토할 필요가 있다. 가공물, 공구 및 절삭조건에 대한 지식과 정보의 활용 없이 답습적인 방법에 의한 가공조건 선정은 가공시간의 증가로 생산성을 저하시키거나 또는 가혹한 조건 선정에 의한 공구변형 및 파손에 의한 품질저하와 생산비의 증가를 가져온다

금속절삭에서 가공오차에 관한 연구는 지속적인 관심 분야였다. 일반적인 절삭작업에서 발생하는 가공오차에 관한 연구는 많이 이루어지고 있으나, 불 엔드밀을 이용한 가공에서의 연구는 몇몇 연구자들에 의하여 절삭력 예측모델 개발 연구의 일부로 연구되어지고 있다. 불 엔드밀 가공에서 고품질의 가공제품을 얻기 위해서는 가공오차를 줄이기 위한 좀 더 많은 연구가 필요할 것으로 판단된다. 이 분야의 연구방법은 절삭력 모델을 개발하고 그 계산 결과를 바탕으로 공구변형과 가공오차를 예측하고 실험가공을 통하여 제시된 모델의 유효성을 검증하게 된다.

본 연구에서는 불 엔드밀을 이용한 곡면가공에서 가공오차의 발생요인과 특정 곡면형상을 공구경로 및 가공조건을 달리한 실험을 통하여 공구변형과 가공오차의 관계를 분석하였다. 실험가공에서 측정된 절삭력 중 최대값 성분을 이용하여 공구변형, 치수 오차 모델을 만들고 실험가공에서 측정된 오차와 비교하여 공구변형 모델의 유효성을 검증하였다. 연구 결과를 토대로 곡면가공에서 제한적이지만 공구변형에 의한 가공오차를 줄이는 적절한 공구경로와 절삭 조건 선정 방법을 제시하고자 한다.

2. 관련이론

2.1 연구동향

절삭가공에서 가공오차 발생요인은 공구의 런아웃(run-out)과 변형(deflection), 공작기계 오차, 공구마모 및 가공 시 발생하는 열 영향 등으로 특히 공구의 변형은 가공오차 발생의 가장 큰 요인^[1]으로 취급되고 있다. 공구 런아웃은 불 엔드밀 공구의 설치 오차로 주축과 공구 축의 오프셋(offset) 및 경사(tilt)에 의해서 발생^[2]하게 된다. 런아웃을 줄이기 위해서는 공구 설치 시 주의가 요구된다. 공구변형은 공구의

이송과 회전운동에 의해서 절삭작업 중 발생하는 절삭력에 의한 날의 휨으로 적절한 절삭조건 및 경로 선택으로 변형을 줄일 수 있다. 엔드밀 가공에서 공구 변형에 의한 가공오차 연구는 초기 Kline 등^[3]은 평 엔드밀에서 공구변형과 런아웃이 가공정밀도에 미치는 영향과 가공오차 예측모델이 개발되어졌다. 위 연구에서는 평 엔드밀을 이용한 측벽 절삭 시 가공오차 예측에 이송에 수직인 Y축 방향의 절삭력과 공구변형을 이용하였다. Sutherland 등^[4]은 공구변형을 고려한 절삭력, 가공오차 예측을 위한 방법을 제시하였다. Lim 등^[11]의 연구에서는 불 엔드밀을 이용한 곡면가공에서 순간적인 수평 절삭력을 고려하여 공구변형에 의한 가공오차를 예측할 수 있는 모델이 개발되었다. 국내에서는 양민양 등^[5]은 곡면 가공의 가공오차에 대하여 공구의 처짐 벡터와 곡면의 공구 접촉점의 법선벡터로 표현되는 가공오차 예측 계산식을 유도하여 가공오차 제어에 사용된 바 있다. 왕덕현 등^[6]은 코너의 펜슬 가공에서 공구 변형에 특성에 대하여, 두승 등^[7]은 경사면 가공에서 가공방향에 따른 공구변형 특성 과 가공오차에 대한 연구를 수행하였다.

2.2 공구변형모델

절삭가공 시 발생하는 절삭력은 공구의 가공물의 변형을 유발한다. 공구 및 가공물의 변형에 의한 가공오차의 해석은 절삭력이 중요한 요소로 고려되고 공구변형은 공구에 작용하는 순간적인 절삭력의 즉각적인 반응으로 취급하여 해석하고 있다. 엔드밀 가공에서 공구변형 문제는 공구홀더 부분을 강체로 공구를 외팔보(Cantilever beam)로 단순화하여 공구의 변형을 계산하였다^[3]. 불 엔드밀의 절삭기구가 매우 복잡하고 매순간 변하기 때문에 공구의 변형을 정밀하게 계산하기는 매우 어렵다. 초기 평 엔드밀의 공구변형 연구에서 사용했던 공구변형 모델은 식 (1)과 같다.

$$\delta = \frac{F L^3}{3E I} \tag{1}$$

여기서 F 수평절삭력, L 공구길이
E 탄성계수, I 공구 관성모멘트

Klme 등^[3]이 사용한 좀더 복잡한 공구변형 모델은 다음과 같다

$$\delta_y(z) = \frac{F_y}{2ER^4} [C_y - z]^3 - (L - z)^3 + 3(L - z)^2(L - C_y)] \quad (2)$$

F_y 수평절삭력, E 공구의 탄성계수, L 공구 길이
 C_y · 절삭력의 직용점, R · 공구의 유효반경

Fig 1은 위의 공구변형 모델을 y방향으로 변형된 볼 엔드밀에 적용하여 보여주고 있다 x방향의 공구 변형도 같은 방법으로 나타낼 수 있다 볼 엔드밀 자유단으로부터 높이 z에서 공구의 변형은 $\delta_y(z)$ 로 나타냈으며 Y방향의 순간절삭력(F_y)과 절삭력의 작용점(C_y)에 의하여 공구 변형을 계산하였다

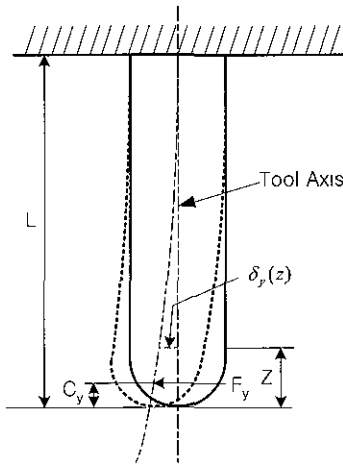


Fig. 1 Tool deflection model

Fenq 등^[8]의 연구에서는 Fig 1의 공구변형 모델에 공구 런아웃을 추가하여 전체 공구변형으로 사용하였다. 그러나 이들은 개발된 모델을 평면의 Slot 가공실험으로 검증하였다

볼 엔드밀을 이용한 곡면의 정삭 가공은 대부분의 절삭이 볼 부분에서 이루어지고 절삭에 참여하고 있는 절인에 접선방향, 공구 축 방향 및 경사면에 수직인 방향의 절삭력이 발생하며 공구동력계에 의하여 x, y, z축의 3방향으로 측정된다 Fig 2는 공구

동력계로 측정된 절삭력의 형태를 보여주고 있다 짧은 시간에 단속절삭이 이루어짐을 확인할 수 있으며 x, y축 방향의 절삭력에 비하여 z축 방향의 절삭력이 상대적으로 적게 발생함을 알 수 있다 일반적으로 볼 엔드밀 공구의 변형은 순간 수평절삭력을 이용하여 분석하며 본 연구에서도 가공 형상에 의해 가공오차에 지배적으로 작용하는 y축 방향의 순간 최대 절삭력을 고려하여 공구변형을 계산하였다 또한 가공오차의 주된 요인을 공구변형으로 가정하였다

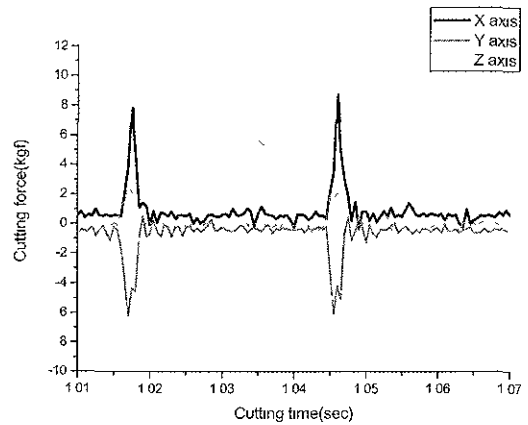


Fig. 2 Measured cutting forces

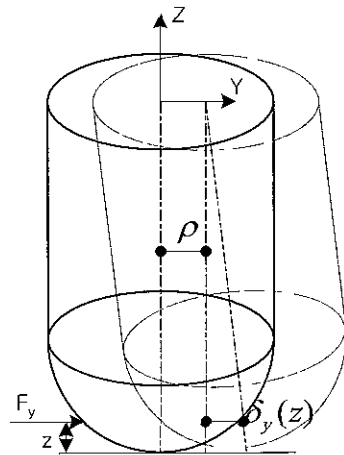


Fig. 3 Actual tool deflection model

공구변형 모델은 Fenq 등^[8]의 연구에서 사용한 변형 모델을 참고하여 볼 엔드밀을 이용한 곡면의 정

삭가공에 적용하였다. 불 엔드밀의 런아웃에 절삭력에 의한 변형을 더하여 전체 공구변형으로 판단하고 식(3)에 의해서 계산하였다

$$\delta(z) = \delta_y(z) + \rho \quad (3)$$

여기서, ρ 는 공구의 런아웃 값이다. $\delta_y(z)$ 는 절삭력에 의한 공구변형으로 식 (2)를 이용하였다. Fig 3은 공구변형 모델을 도식화하여 보여주고 있다

2.3 가공오차

불 엔드밀 가공에서 공구의 변형은 원래 경로를 절삭하지 못하여 상방향 절삭 시 미절삭(undercut)을 하방향 절삭 시 과절삭(overcut)으로 나타나게 된다. 최근의 CAM 소프트웨어들은 공구경로의 시뮬레이션을 통하여 미절삭/과절삭 부위를 경로상에서 검증하고 설계된 형상을 얻을 수 있도록 공구경로를 생성하는데 도움을 주고 있다. 그러나 이런 공구경로 데이터는 가공중 발생하는 공구변형, 마모, 열 등의 상황을 고려하지 않은 이상적인 경로 시뮬레이션이다. 따라서 실제 절삭에서 공구의 변형에 의한 가공오차를 계산하여 예측할 수 있는 시스템의 개발은 가공오차를 줄여 보다 정밀한 제품을 생산하는데 매우 유용할 것이다. 가공오차에 대한 양민양 등^[5]의 연구에서 가공오차(e)는 절삭에 참여하는 미소 절인이 그리는 궤적과 (공구변형에 따른 변경된 공구경로) 설계된 가공곡면 위의 한점(P)에서 접평면 사이의 최소 거리로 정의하였다. Lim 등^[11]은 가공오차 예측시스템 개발 연구에서 가공될 곡면의 특정위치(P)에서 곡면에 법선 방향으로 절인까지 거리를 가공오차로 정의하고 공구의 변형과 가공 곡면의 곡률반경을 이용하였다

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

δ : 공구변형, ρ 곡면의 곡률반경

식 (4)에 변형 민감도를 추가하여 가공오차를 분석하였다. 변형민감도는 식 (4)의 공구변형(δ)에 대한 편미분으로 근사적으로 \sin 가 사용된다. 각 n 는 공구 축과 절인이 접촉하는 위치에서 가공면에 수직

한 벡터 사이 각으로 정의된다

Fig 4는 공구의 변형에 의한 가공오차 모델을 도식화하여 보여주고 있다. 불 엔드밀 공구의 절인은 변형에 의하여 가공물과의 접촉점이 P 로부터 P'으로 이동되며 계획된 공구경로를 따르지 못하게 된다. 가공물과 공구의 접촉점에서 수평방향의 런아웃과 변형을 전체 공구변형으로 판단하고 P위치에서 가공면에 수직거리로 가공오차(e)를 정의했다. 가공오차는 근사적으로 공구변형에 비례한다고 가정하고 곡면 형상에 따른 변형 민감도를 곱하여 식 (5)로 계산하였다.

$$e \approx \delta_y(z) \sin\phi \quad (5)$$

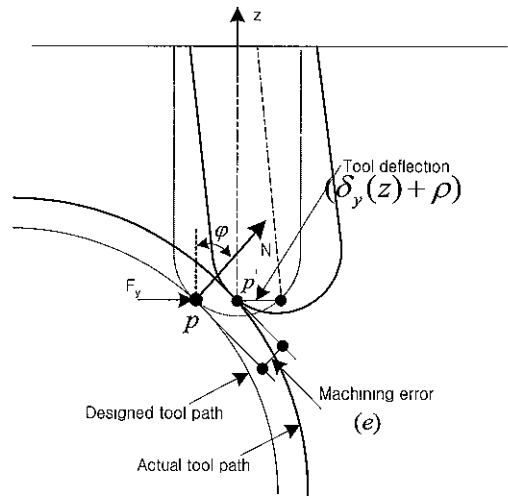


Fig. 4 Definition of machining error

본 연구에서 사용한 가공오차 계산식은 식 (4)와 비교하여 약간 큰 값을 보이지만 비교적 잘 일치하였다

3. 실험방법 및 결과고찰

3.1 실험방법

불 엔드밀을 이용한 곡면가공의 가공오차를 고찰하고자 다음과 같이 실험을 수행하였다. 실험은 화

친기계 Hi-Super 4 수직형 밀링머신을 이용하였으며, 절삭 시 발생하는 절삭력은 압전형(Piezoelectric type) 공구동력계 (Kistler 9257A)를 이용하여 절삭력의 3축 방향 성분을 측정하였다 측정된 절삭력 신호는 차지앰프(Charge amplifier, Kistler 5001)를 통해 증폭시키고 A/D 변환기를 이용하여 2khz로 샘플링하여 PC에 저장된다 가공 재료는 사출 및 프레스 금형제작에서 일반적으로 많이 사용하는 열처리 STD11제품을 사용하였으며 실험가공 형상은 Fig 5와 같다 Fig 5에서 일련번호는 절삭력 측정위치를 6 부분으로 구분하였음을 나타내고 있다 절삭실험은 건식으로 수행되었으며, 절삭공구는 직경 10mm의 2날 초경 볼 엔드밀 Helix Angle 30°을 사용했다 공구의 설치길이는 척으로부터 60mm로 하였다

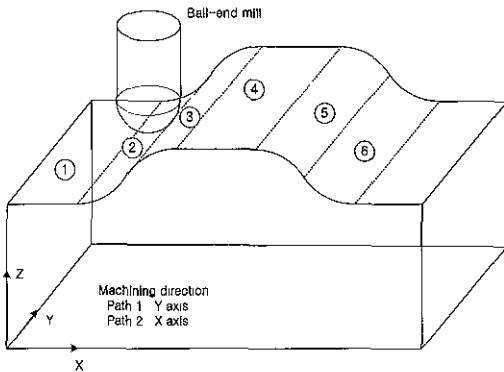


Fig. 5 Machining surface and directions

볼 엔드밀 가공은 곡면형상과 공구경로에 따라 공구와 가공물의 접촉 위치가 연속적으로 변한다 실험가공을 위하여 사용된 형상은 가공 후 가공오차 측정의 편의를 위하여 2차원 곡면을 선택하였고 Fig 5에 도시한 것처럼 x축, y축 2방향의 경로를 채택하였다. Table 1은 실험에 사용한 절삭조건을 보여주고 있다

Table 1 Cutting conditions for machining error

feed (mm/min)	60, 105, 150, 195
spindle speed(RPM)	1450, 2030, 2900
depth of cut(mm)	0.8
peek feed(mm)	0.3

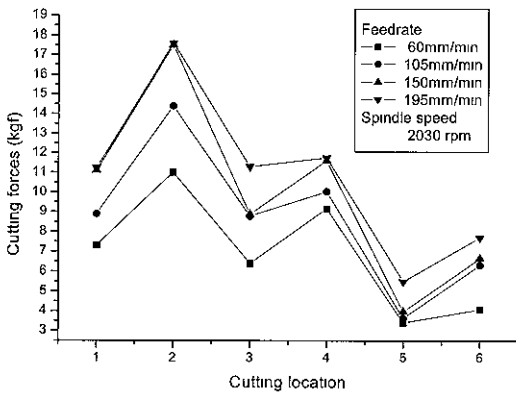
곡면 형상과 가공방법에 따라 형상을 6부분으로 구분하여 각 위치에서 절삭력을 측정하였고 각 위치에서 12회씩 절삭력을 측정하고 비교 분석하여 연구에 이용된 절삭력의 신뢰성을 높였다 또한 측정된 절삭력에서 최대절삭력이 공구변형과 결과적인 가공오차 해석에 부합된다고 판단하여 측정 절삭력의 최대값을 공구변형 해석에 이용하였다 가공 후 가공된 면의 가공오차 측정을 위하여 3차원 좌표측정기(CMM)로 가공 전 후에 측정하여 가공오차 값을 얻었다

3.2 실험결과 고찰

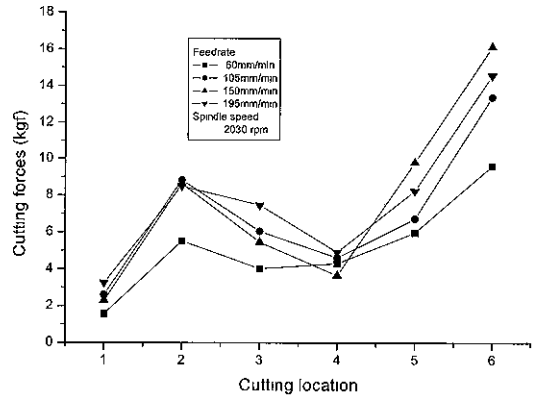
실험 가공 후 가공위치에 따른 최대 절삭력 특성을 분석하여 절삭력에 의한 공구변형과 가공오차를 계산하였다

3.2.1 절삭력과 공구변형

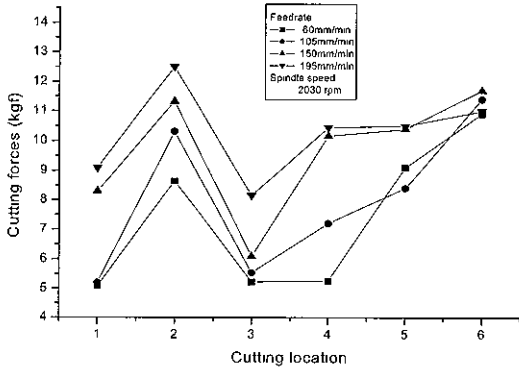
공구변형 성분 중 런아웃은 척에 공구가 정밀하게 설치된 경우를 가정하여 5로 하였다 절삭력에 의한 공구변형은 공구의 이송과 회전운동에 영향을 받는다 일반적으로 절삭력은 이송의 증가와 절삭속도의 감소에 따라 증가하게 되며 본 실험에서도 같은 경향을 보였다 Fig. 6은 경로 1, 2로 실험가공에서 측정된 가공물 위치별 절삭력 중 공구변형과 관련된 x 축 방향 성분을 이송의 변화에 따라 보여주고 있다 볼 엔드밀 공구는 순간적으로 발생하는 절삭력의 영향으로 매순간 방향과 크기가 다르게 변형하게 된다. 그림 (a), (b)는 경로 1에 의한 가공실험 측정된 최대 절삭력 특성으로 이송의 증가와 함께 모든 위치에서 절삭력이 증가함을 알 수 있다 특히 평면에서 곡면에 접근할 때 상대적으로 큰 절삭력이 발생하고 있음을 확인할 수 있다 이것은 평면에서 곡면으로 접근하는 부분에서 가공물과 공구의 접촉 길이가 길어져 절삭면적이 증가되기 때문으로 판단된다 상방향 절삭 시 (+)방향 절삭력이 하방향 절삭 시 (-)방향 절삭력이 크게 측정되었다 이것은 곡면형상에 따른 공구와 가공물의 접촉위치 변화와 하향 밀링에서 상향밀링으로 가공방법의 변화 때문으로 판단된다.



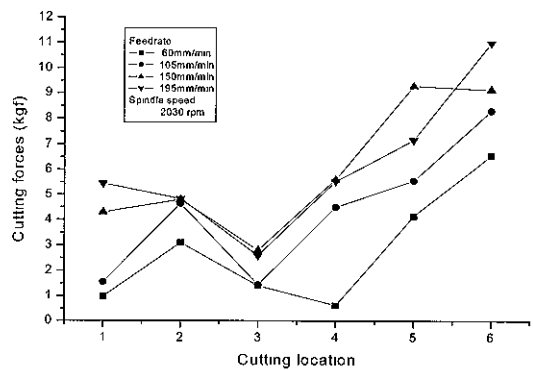
(a) Positive direction cutting forces with Path 1



(b) Negative direction cutting forces with Path 1



(c) Positive direction cutting forces with Path 2



(d) Negative direction cutting forces with Path 2

Fig. 6 Characteristics of cutting forces

그림 (c), (d)는 경로 2에 의한 가공실험에서 측정된 절삭력 특성으로 경로 1에서와 마찬가지로 가공물의 각 위치에서 이송의 증가와 함께 절삭력이 증가함을 보여주고 있다. 경로 1과 비교하여 차이점은 곡면의 하방향 절삭 위치(5, 6)에서 (+)방향 절삭력이 크게 측정되었다. 이것은 (+)방향 절삭력이 공구를 가공물 방향으로 변형하게 하여 하방향 절삭에서 과절삭이 발생하는 원인으로 판단된다. 따라서 순간수평 최대절삭력에 의한 공구변형은 (+)방향과 (-)방향의 절삭력을 모두 고려해야 될 것으로 판단된다. 특정 절삭조건에서 가공 위치별 공구변형을 알아보기 위하여 측정된 절삭력 중 최대 절삭력을 취하여 식 (3)에 대입하여 계산하였다. 경로 1에서는 이송과

직각방향의 변형이, 경로 2에서는 이송 방향의 변형이 가공오차를 발생시키는 절삭력이 된다. Table 2는 각 위치에서 측정된 절삭력을 이용하여 계산한 공구 변형의 한 예이다.

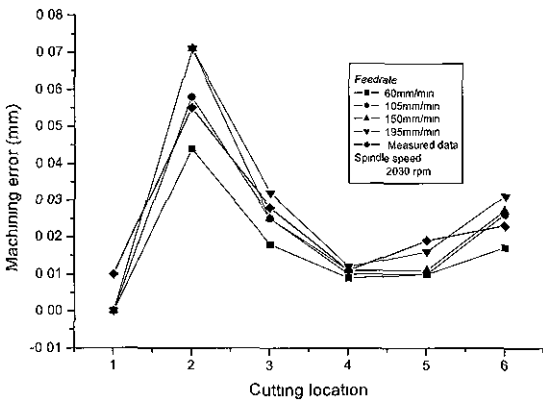
Table 2 Evaluation of tool deflection(unit : mm)
Spindle speed : 2030rpm, Feedrate : 105mm/min

Direction		①	②	③	④	⑤	⑥
Path1	(+)	0.051	0.082	0.050	0.057	0.021	0.036
	(-)	0.015	0.050	0.034	0.026	0.038	0.076
Path2	(+)	0.030	0.059	0.032	0.041	0.048	0.065
	(-)	0.009	0.026	0.008	0.026	0.032	0.047

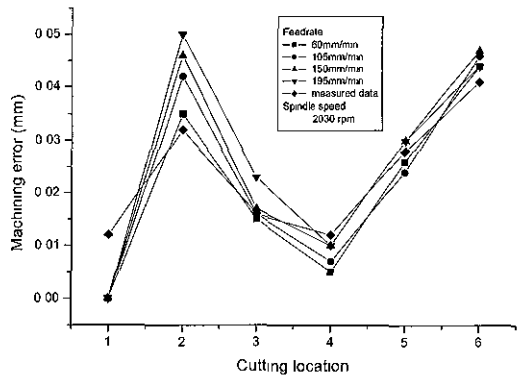
(+)방향 절삭력을 이용한 분석에서 공구변형은 경로 1에서는 ⑤, ⑥ 가공위치 즉 상향밀링 방법에서 경로 2에서는 ②, ③ 가공위치 즉 하향밀링 방법에서 작은 변형함을 알 수 있다 (-)방향 절삭력을 이용한 분석에서 공구변형은 ②, ③가공위치 즉 하향밀링에서 경로 2에서는 ⑤, ⑥가공위치 즉 상향밀링에서 작게 변형함을 알 수 있다 절삭력의 방향을 고려한 공구변형의 분석결과는 서로 상반된 결과를 보여주고 있다 이는 가공물과 공구의 접촉위치의 변화와 가공 위치에 따른 가공방법의 차이로 분석된다 만약 (+) 방향 절삭력만을 고려하여 공구변형을 분석한다면 경로 1의 ⑤, ⑥ 가공위치에서의 가공방법이 가장 적은 변형이 발생하는 것으로 판단할 수 있다

3.2.2 가공오차

볼 앤드밀을 이용한 곡면가공에서 공구변형에 의하여 발생하는 가공오차를 식(5)를 이용하여 계산한 결과가 Fig 7에 도시되었다 가공오차는 공구변형에 비례하여 그 크기도 증가한다 그림 (a)는 이송속도 105mm/min으로 경로 1에 의한 가공실험에서 측정된 가공오차와 각 이송별 계산된 가공오차를 비교한 그래프이다. 측정 및 계산된 데이터 모두 곡면을 상 방향으로 가공할 때보다 하 방향으로 가공할 때 적은 가공오차가 발생함을 알 수 있다. 대략적인 가공 오차 값은 상 방향 가공에서 0.060mm, 하 방향 가공에서 0.025mm가 발생한다 그림 (b)는 이송속도 105 mm/min으로 경로 2에 의한 가공실험에서 측정된 가공오차와 각 이송에서 계산된 가공오차를 비교한 그



(a) Path 1



(b) Path 2

Fig. 7 Calculated and measured machining error

래프이다 곡면을 상 방향, 하 방향 가공 모두에서 비슷한 크기의 가공오차를 보여주고 있다. 대략적인 가공오차 값은 상 방향 가공에서 0.043mm, 하 방향 가공에서 0.045mm가 발생한다 공구변형 분석결과에서 보여주었듯이 가공오차 또한 같은 경향을 보인다 경로 1의 하 방향 가공 즉 상향절삭에서 가장 적은 가공오차가 발생하였다

4. 결 론

본 연구에서는 볼 앤드밀을 이용한 곡면 가공에서 가공방향과 가공위치에 따른 절삭력 특성과 절삭력에 의한 공구변형 및 가공오차를 분석하여 다음의 결과를 얻었다.

- 1 공구변형을 고려한 가공오차 계산모델이 개발되었다.
- 2 개발된 가공오차 계산 모델은 곡면 가공실험에서 측정된 수평방향 최대절삭력을 이용하여 검증되었으며 측정된 가공오차와 잘 일치하였다.
- 3 경로 1에 의한 가공에서는 곡면을 하 방향으로 경로 2에 의한 가공에서는 상 방향이 가공오차를 줄이는데 좀더 바람직한 경로이다
- 4 곡면 가공에서 축 방향 변화가 없는 경로 1의 방법과 곡면과 가공물의 접촉 위치에 관계없이 항

상 상향밀링이 될 수 있도록 경로를 선정하는 것이 가공오차를 줄이는 좋은 방법으로 판단되었다

참고문헌

- 1 EE Meng Lim and Chia-Hsiang Menq, "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
- 2 Hsi-Yung Feng and Chia-Hsiang Menq, "The Prediction of Cutting Forces in the Ball-End Milling Process", Int. J Mach Tools Manufact, Vol 34, pp 697-710, 1993
- 3 W A Kline and R E DeVor, I A Shareef, "The Prediction of Surface Accuracy in End Milling", ASME J of Engineering for Industry, Vol. 104, pp 272-278, 1982
- 4 J W Sutherland and R E DeVor, "An Improved Method for Cutting Force and Surface Error Prediction in Flexible End Milling Systems", ASME J of Engineering for Industry, Vol 108, pp 269-279, 1986
- 5 Min-Yang Yang and Choong-Gun Sim, "A Study on the Precision Machining in Ball End Milling System", Journal of KSPE, Vol 11, No 2, pp 50-64, 1994
- 6 Duck-Hyun Wang and Kyung-Suk Yun, "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
- 7 Seung Doo, Joo-Won Hong and Nam-Sub Suh, "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
- 8 Hsi-Yung Feng and Chia-Hsiang Menq, "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