

# 곡면가공시 경사위치각 변화에 따른 공구변형과 형상정밀도

왕덕현\*, 박희철\*\*

## Tool Deflection and Geometric Accuracy to the Change of Inclination Position Angle during Machining Sculptured Surface

Duck Hyun Wang\* and Hee Chul Park\*\*

### Abstract

In this study, hemisphere and cylindrical shapes were machined for different tool paths and machining conditions with ball endmill cutters. Tool deflection, cutting forces and shape accuracy were measured according to the inclination position of the sculptured surface. As the decreasing of inclination position angle, the tool deflection was increased due to the decreased cutting speed when the cutting edge is approaching toward the center. Tool deflection when upward cutting is obtained less than that of downward cutting and down-milling in upward cutting showed the least tool deflection for the sculptured surface. Roundness values were found in the least roundness error when down-milling in upward cutting. It is obtained the very little difference between 90° and 45° of inclination position angle. The best surface roughness value was obtained in upward up-milling and showed different tendency with tool deflection and cutting force. For down-milling, the cutting resistance of the side wall direction is larger than that of feed direction. Therefore, this phenomenon which is received over cutting resistance can be caused of chatter.

**Key Words :** Ball endmilling(볼엔드밀가공), Inclination position angle(경사위치각), Tool deflection(공구변형), Machining sculptured surface(곡면가공)

### 1. 서 론

곡면형상의 금형가공은 대부분 볼엔드밀 공구에 의한 가공으로 이루어지며 점점 고정도화 및 고속화되는 추세이다. 볼엔드밀 가공은 곡면의 형상, 크기 및 정밀도에 따

른 적합한 가공조건이 요구되며 공구의 선단부분이 반구 형태로 효과적인 가공조건 선정이 어렵다. 이러한 가공상의 복잡성에 기인하여 정확한 절삭조건 예측이 어렵게 되며 결국 공정 설계자의 시행착오적인 경험에 의존하게 된다. 또한 곡면 형상에 따른 적절한 가공조건 선정의

\* 경남대학교 기계자동화공학부  
(dhwang@kyungnam.ac.kr)  
\*\* 경남대학교 대학원 기계공학과

어려움은 가공 중에 공구파손, 휨 및 과부하 등의 요인으로 가공물의 표면거칠기, 형상정밀도 저하를 가져오게 된다<sup>(1)</sup>.

양민양 등<sup>(2)</sup> Meng 등<sup>(3,4)</sup> 및 Kline 등<sup>(5)</sup>은 볼엔드밀의 절삭날을 미소하게 나눈 미소절삭날로 정의하여 절삭력을 해석하였다. 주중남 등<sup>(6)</sup>은 Z-map으로 절삭영역을 구하고 이를 실제 자유곡면에서 빈번하게 나타나는 측벽가공에 적용할 수 있는 모델로 응용 해석하였다. 가공조건의 최적화에 관한 연구로서는 앞서 기술된 절삭력 예측모델을 바탕으로 절삭속도와 가공경로의 최적화에 의해 가공속도와 가공된 공작물의 오차를 줄이는 것을 목적으로 하고 있다<sup>(7,8)</sup>. 최근에는 고속가공용 머시닝센터의 개발로 주축과 이송속도의 고속화와 가공시간의 단축과 고정밀 가공을 위한 새로운 방법에 관한 연구가 시행되고 있다<sup>(9)</sup>.

본 논문에서는 볼엔드밀 공구를 사용하여 반구형상과 실린더형상의 피삭재를 여러 가지 절삭형태와 가공방법으로 곡면 경사위치각의 변화에 따른 공구변형, 절삭력 및 형상정밀도의 특성을 파악하였다. 본 연구에서는 이와 같은 방법으로 곡면가공에 적합한 볼엔드밀을 사용하는 경우가 대부분인 금형가공에서 곡면 경사위치각 변화에 따른 공구변형 특성, 절삭력 특성, 표면형상 특성을 파악하여 실제 가공 중에 나타나는 문제점을 감소시키고 가공오차를 보정하여 경제적인 고정밀 가공을 가능하게 하고자 한다.

## 2. 공구변형모델

볼엔드밀 공구는 절삭날에 존재하는 절삭날 홈(flute)에 의하여 매우 복잡한 형상을 나타내나, 볼엔드밀의 간단한 공구변형 모델은 공구홀더를 강체로서 변형이 일어나지

않는다고 가정하고 공구를 외팔보(cantilever beam)로 간주하여 Fig. 1(a)와 같이 나타낼 수 있다. Kline 등<sup>(5)</sup>은 Fig. 1(b)와 같이 절삭력의 작용점을 공구끝단으로 제한하지 않고, 공구 끝에서 어느 위치만큼 떨어진 위치에 존재하는 경우의 공구변형모델로, 공구의 끝단에서 z만큼 떨어진 점 C에 나타나는 수평변형량  $\delta(z)$ 를 다음과 같이 근사적으로 나타내었다.

$$\delta(z) = \frac{F}{2ER^4} [ <z_F - z>^3 - (L-z)^3 + 3(L-z)^2(L-z_F) ] \quad (1)$$

여기서  $<z_F - z>^3$ 은 z의 특성함수이다. 또한  $z_F$ 는 공구 끝단에서 절삭력 F가 작용하는 점까지의 거리이고, 공구 길이는 L이다.

Feng<sup>(7)</sup>은 Fig. 2와 같이 볼엔드밀의 공구변형모델을 가정하여, 볼엔드밀의 절삭계(Cutting system)변형을 완전단일체로 생각하여 그 변형을 고려한 공구변형량을 식(2)와 같이 구하였다.

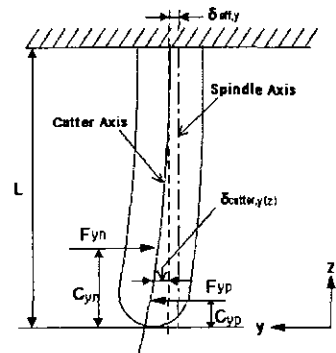


Fig. 2 A deflected ball end mill in the y direction

$$\delta_y(z) = \delta_{cutter,y}(z) + \delta_{eff,y} \quad (2)$$

여기서  $\delta_{cutter,y}(z)$ 는 z에서의 y방향 공구변형을 나타내고 식(1)과 동일하며,  $\delta_{eff,y}$ 는 완전단일체의 y방향 변형량을 나타낸다. 콜렛, 스피들 베어링, 공작기계구조의 완전단일체,  $\delta_{eff,y}$ 는 완전단일체의 유효강성으로 다음에 의해 결정된다.  $K_{eff}$  값은 커터에 하중을 가하여 변형량을 측정하여 얻을 수 있는 값이다.

$$\delta_{eff,y} = (F_{yp} + F_{yn}) / K_{eff} \quad (3)$$

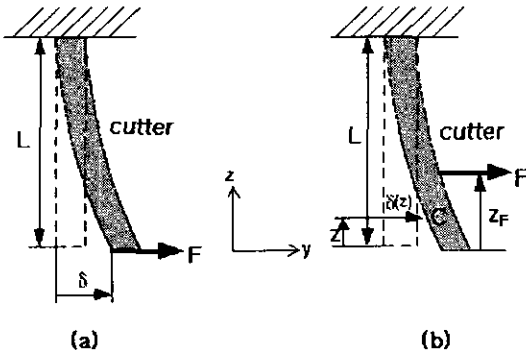


Fig. 1 Simplest tool deflection models

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치

볼엔드밀에 의한 곡면가공시 경사위치가각 변화에 따른 공구변형과 절삭력을 측정하기 위한 실험장치를 Fig. 3에 나타내었다. 가공 중에 공구변형을 수직인 x, y축으로 동시에 측정하기 위한 와전류센서의 고정장치를 제작하여 머시닝 센터 주축부에 센서와 함께 설치하였다. 절삭력 측정은 공구동력계를 베드 위에 설치하고 공작물을 중심점에 고정하도록 치구를 제작하여 공작물을 설치하였다. 가공 후 곡면 경사위치가에 따른 공구변형특성을 비교하기 위한 형상정밀도 측정은 진원도측정장치와 표면거칠기 측정장치를 사용하였다.

공구변형은 Fig. 4의 사진에 나타난 것처럼 2개의 와전류센서를 이용하여 실시간으로 측정하였다. 또한 본 실험에 사용한 실험기기 제원들을 Table 1에 나타내었다.

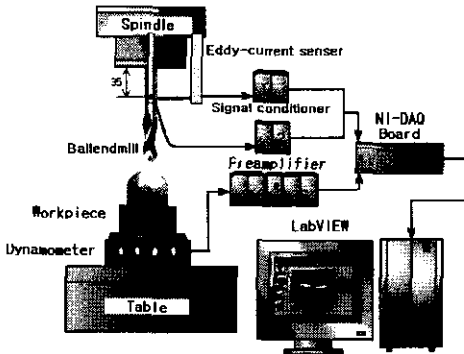


Fig. 3 Schematic view of experimental setup



Fig. 4 Tool deflection measuring setup

Table 1 Specification of experimental equipments

Equipment	Specification
Machining center	TNV-40V (Tongil Heavy Ind., Korea)
Eddy-current sensor	EX-008 (Keyence, Japan)
Controller	EX-502 (Keyence, Japan)
A/D converter	AT-MIO-16E-1 (NI, USA)
Ball endmill	Powder HSS 10 $\phi$ (OSG, Korea)
Roundness	RA-116D (Mitutoyo, Japan)
Roughness tester	Surftest-501 (Mitutoyo, Japan)
Strain preamplifier	DPM-612 (Kyowa, Japan)
Tool dynamometer	SATO AST-MM (Kyowa, Japan)

#### 3.2 절삭공구 및 피삭재

본 실험에 사용된 절삭공구는 공구마멸에 인한 가공오차를 최소화하기 위하여 내마멸성이 뛰어난 직경 10mm 분말 HSS 2날 볼엔드밀을 사용하였다. 보통의 HSS 공구는 절삭열에 대하여 효과가 있는 코발트(Co)가 포함되어 있지 않는 고속도공구강이 사용되고 있지만, 엔드밀은 절삭속도가 빠르거나, 난삭재 등에 대응하고, 내열성, 내마멸성에 뛰어난 코발트 HSS가 주로 사용되고 있다. 본 실험에 사용된 절삭공구의 화학적 성분을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Chemical composition(%) of CPM-T15

Chemical compositions(%)					
C	Cr	W	Mo	V	Co
1.50	4.0	12.3	-	5.0	5.0

시편으로 사용된 재료는 플라스틱 금형재료로 사용되는 SCM440으로, 값이 저렴하고 절삭성이 양호한 기계구조 용강으로 제품의 균질한 조건인 불림(normalizing)열처리를 하였다. 본 실험에 사용된 시편의 가공은 기하학적으로



(a) hemispherical form



(b) cylindrical form

Fig. 5 Shape of workpiece for machining

응용이 편리한 반구형상과 실린더형상으로 먼저 정면밀링 커터로 44×44×75mm의 시편 크기로 가공한 후 머시닝 센터에서 Fig. 5와 같은 직경 40mm 반구와 실린더 형상을 각각 제작하였다. Table 3은 본 실험에 사용된 소재의 기계적 성질을 나타내고 있다.

Table 3 Mechanical properties of SCM440 workpiece

Mechanical property	Value
Yield point [kgf/mm <sup>2</sup> ]	85
Tensile strength [kgf/mm <sup>2</sup> ]	100
Hardness [HB]	300
Elongation [%]	12
Area reduction [%]	45

### 3.3 실험방법

실제적으로 금형가공에서 곡면을 가공할 때 다양한 절삭형태가 일어난다. 따라서, 각각의 시편에서 상방향가공(upward cutting)일 때 상향절삭(up milling)과 하향절삭(down milling), 하방향가공(downward cutting)일 때 상향절삭과 하향절삭이 이루어질 수 있도록 경로방향을 지정하여 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 밀링가공의 최적 절삭조건표를 기준으로 회전수 1000rpm, 이송속도 120mm/min로 고정시켜 경로간격 2mm, 가공깊이 1mm로 절삭유를 충분히 주어 실험을 하였다. 경사면을 가공할 때, 실제적으로는 공구가 공작물에 접하는 점이 경사면이 달라짐에 따라 절삭속도가 변화한다.

본 실험연구를 위하여 CAD/CAM 소프트웨어를 이용하여 도형을 기준시편 반경 20mm 반구와 실린더에서 가공깊이 1mm가 될 수 있도록 모델링하였고, 공구진입방향을 가공이 시작될 때와 끝날 때의 과부하를 줄일 수 있도록 공작물의 절선방향으로 택하여 NC 코드를 생성하여 DNC mode로 머시닝 센터에 전송시켜 실험을 수행하였다.

본 실험에서는 공작물 하부 90°에서부터 상부 9°까지의 영역에서 4가지의 절삭형태에 따라 2개의 변형데이터(x방향, y방향)와 3개의 절삭력(수평가로분력  $F_x$ , 수평세로분력  $F_y$ , 수직분력  $F_z$ )을 5채널로 동시에 획득하였다. 절삭력 성분의 고찰을 위해 Fig. 6에 나타난 것과 같이 수평가로분력( $F_x$ )성분은 공작물의 접촉점에서 공작물의 x방향이고, 수평세로분력( $F_y$ )성분은  $F_x$  방향과 90°를 이루는 성분이며,  $F_z$  성분과 90°인 주축방향성분을 수직분력( $F_z$ )성분이다. x방향의 변형데이터는 수평가로분력과 같은 방향에

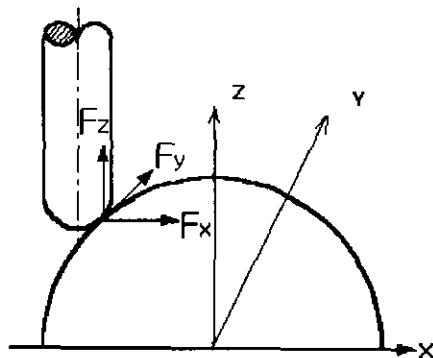
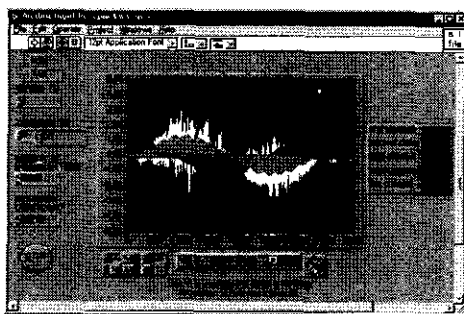


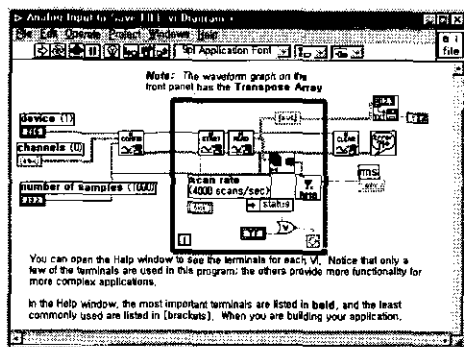
Fig. 6 Schematic diagram of cutting force component

서, y방향의 변형데이터는 수평세로분력과 같은 방향에서의 변형량이다.

공구변형 데이터는 컨트롤러를 거치고 절삭력은 증폭기로 증폭되어 NI-DAQ Board에서 A/D변환을 한 후, 가상계측 LabVIEW프로그램을 이용하여 1초당 200개의 데



(a) Front panel



(b) Block diagram

Fig. 7 Online data of tool deflection and cutting force by LabVIEW

이터를 경사위치각으로 나누어진 가공경로를 따라서 전체적으로 받아들이는 방법과 공구날이 받는 절삭력을 볼 수 있도록 0.25초당 1000개의 데이터를 획득하는 방법으로 컴퓨터에 저장하였다. Fig. 7은 실험데이터를 저장한 LabVIEW프로그램의 Front panel과 Block diagram을 나타낸 것이다.

가공후 형상측정은 진원도측정장치와 표면거칠기측정장치로써 시행하였다. 측정실에 설치된 표면거칠기장치의 정반위에 가공된 시험편을 올려놓고 다이얼 테스트 인디케이터(dial test indicator)로 수평을 확인한 후, 공구이송방향의 표면거칠기로서 컷오프(Cut-off)를 0.8mm, 측정범위를 80 $\mu$ m으로 하고 이송길이를 컷오프의 3배로 세팅한 후 11지점을 경사별로 측정하여 최대높이거칠기 값의 평균치를 추출하였다.

진원도측정은 4개의 가공방식으로 가공된 반구형 시험편을 각각 회전테이블에 올려놓고 공작물의 수평과 높이의 오차를 2/1000mm 이내로 될 때까지 센터링작업과 레벨링작업을 반복하여 세팅하였고, 각각의 시험편을 위치경사별로 18°에서 90°까지 최소자승(LSC)방식을 사용하여 진원도를 측정하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 곡면 경사위치각 변화에 따른 공구변형특성

Fig. 8은 등고선방향가공으로 반구형시험편을 가공할 때 얻어진 일반적인 공구변형 신호이다. 공구는 이송방향과 측벽에서 힘을 받게 되며, Fig. 8(a)는 상향절삭일 때 시험편의 중심을 기준으로 -x방향을 가공 시작점으로 하여 반시

계 방향으로 공구가 이송하면서 수직하게 설치된 2개의 변위센서로부터 얻어진 일반적인 공구변형 모습이다. 가공시작점 0°와 180°에서는 x방향 공구변형은 거의 일어나지 않고 90°와 270°지점에서는 공구변형이 최대를 나타내고 있다. 공구와 공작물이 접하는 접선방향을 이송방향으로 볼 때 측벽에서 힘을 받아 공구가 변형되는 것 보다 이송방향에서 보다 큰 공구변형이 일어남을 알 수 있다. Fig. 8(b)는 하향절삭일 때 공구변형을 나타내고 있는데 Fig. 8(a)와는 반대의 경향이 나타난다.

Fig. 9(a)와 9(b)는 상방향가공일 때 경로간격 2mm로 각각 상향절삭과 하향절삭인 경우 곡면 경사별 각도에 따라 공구변형량을 RMS값으로 나타낸다. 한편 Fig. 10(a)와 10(b)는 하방향가공일 때 각각 동일 조건의 상향절삭과 하향절삭인 경우 공구변형량을 RMS값으로 반구형시험편을 등고선방향가공으로 한 결과들이다. 시험편의 측면하부를 경사위치각 90°로 보았을 때, 곡면 경사위치각이 완만할 수록 공구변형이 증가하는 경향을 나타낸다. 공구와 접하는 공작물의 경사위치각이 작을수록 공구의 안쪽날 부분에서 절삭이 이루어져 절삭속도의 변화에 대한 절삭력 감소와 외팔보 이론에서 나타난 바와 같이 공구가 받는 절삭력 위치  $L$ 이 증가함으로써 공구변형이 증가하는 것으로 생각된다.

상방향가공과 하방향가공의 측정결과들을 비교해 보면 하방향가공일 때 공구변형이 크게 나타나고 있다. 상방향가공에서는 접촉점이 블랜드밀의 중심점에서 멀어짐에 따라 절삭속도가 높고 절삭성이 양호함을 나타내고 있어 경사위치각이 증가함에 따라 공구변형이 완만하게 감소하며, 하방향가공에서는 공구의 강성부족과 절삭성 저하

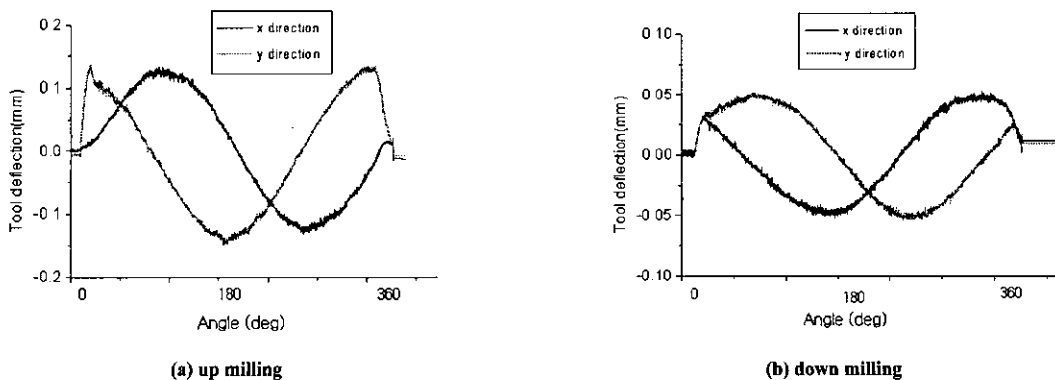


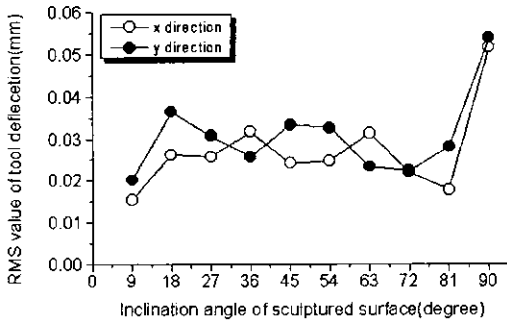
Fig. 8 Tool deflection when cutting hemisphere shape measured by eddy current system

로 상대적으로 큰 공구변형을 나타낸다. 특히 경사위치가 45°와 18° 사이에서는 많은 공구변형을 볼 수 있다. 그러나 곡면 경사위치가 90°지점과 9°지점에서는 다른 경향이 나타나고 있는데, 90°지점에서는 CAM프로그램에서 생성되는 시작경로지점이므로 절삭량이 많을 수밖에 없다. 곡면 경사위치가 9°에서는 공구경로가 거의 평면에 가까워져 x축 방향과 y축 방향으로 받는 절삭력보다 z축 방향으로의 절삭력이 커서 세가지의 합력힘이 감소되거나 일정한 형태의 공구변형이 일어나지 않는 것으로 생각되어진다. 상향절삭과 하향절삭의 차이는 거의 같으나 미소하게 하향절삭이 공구변형이 작음을 볼 수 있다.

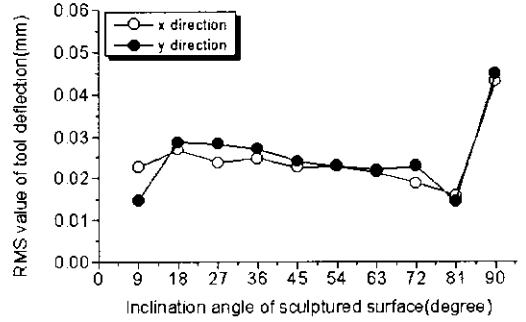
상향절삭은 초기에 공구 절입량이 작은 상태에서 깊이가 점점 커짐에 따라 절삭력은 끝부분에서 가장 크게 된다. 따라서 공구의 변형은 절입되는 방향으로 나타나고 과절삭 형태가 나타난다. 이에 반해 하향절삭은 초기에 공구 절입량을 많이 받게되어 밀어 올려지는 방향으로 변형이

발생하게 때문에 미절삭 형태가 나타난다.

Fig. 11(a), 11(b) 및 11(c)은 상방향 상향절삭에서 곡면 경사위치가 각각 9°, 54° 및 81°인 경우 x축 방향과 y축 방향의 공구변형을 나타내고 있다. 공구진입방향이 시편의 중심을 기준으로 (-)y, (+)x방향에서 (+)y방향에서 이송경로이다. 공구 변형량을 실시간으로 측정할 와전류센서들은 공구의 (+)x축 방향과 (-)y축 방향에 위치하도록 하였다. Fig. 11(a)는 곡면 경사위치가 9°인 경우로 x방향의 공구변형은 (+)값을 나타내 과절삭 형태를 보여주고 있고, y방향의 공구변형은 (-)값으로 미절삭 형태를 나타내고 있다. y방향의 미절삭 형태는 공구의 이송방향에 대한 밀리는 힘으로 가공물의 형상정밀도 측면에서 볼 때 x축 방향의 공구변형보다 그다지 중요하지 않는 것으로 생각된다. 그러나 x방향의 과절삭 현상은 정삭과정에서 치수오차의 원인으로 공구의 강성부족과 절삭이 이루어지는 공구날부가 넓게 분포되어지는 현상 때문에 공구변형이 크

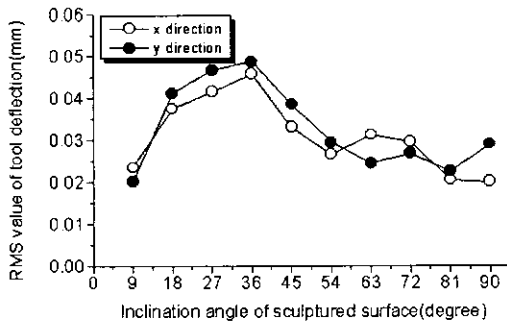


(a) up milling

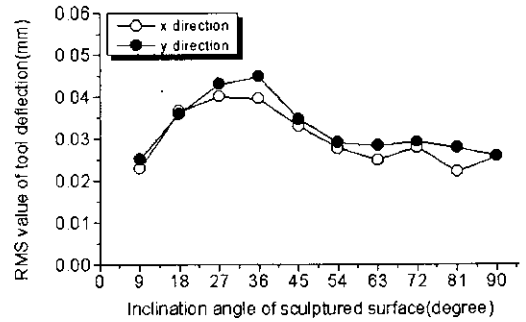


(b) down milling

Fig. 9 Tool deflection for upward cutting in hemisphere shape



(a) up milling



(b) down milling

Fig. 10 Tool deflection for downward cutting in hemisphere shape

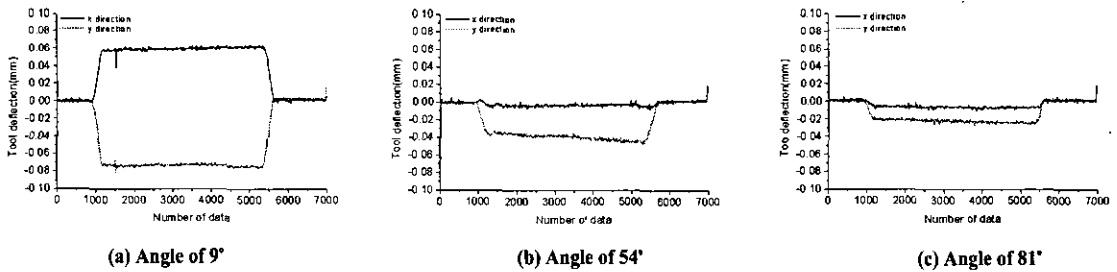


Fig. 11 Tool deflection of up milling when experimental condition is upward cutting for cylindrical shape

게 나타남을 알 수 있다. Fig. 11(b)는 곡면 경사위치가 54°로서 Fig. 11(a)에 비하여 상대적으로 공구변형이 줄어들고 있었다. 이것은 곡면 경사위치가 클수록 공구변형은 오히려 감소하기 때문이며 곡면 경사위치가 측면절삭에 가까운 Fig. 11(c)에 나타난 81°인 경우는 더욱 두드러진다. Fig. 11(b)와 11(c)는 x방향에 대한 공구변형이 거의 일어나지 않고, 오히려 미소한 미절삭 현상을 나타내는데, 절삭날이 파고드는 힘보다 절삭되어지는 옆날이 길게 분포되어 측면에서 받는 힘이 증가하여 이러한 현상이 발생하는 것으로 생각되어진다.

Fig. 12(a), 12(b) 및 12(c)는 상방향 하향절삭일 때 곡면 경사위치가 각각 9°, 54° 및 81°인 경우 x축 방향과 y축 방향의 공구변형을 나타내고 있다. 하향절삭이 이루어질 수 있도록 공구진입방향을 (-)y, (-)x 방향으로 하였다. Fig. 12는 Fig. 11인 경우 상향절삭과는 달리 과절삭일 때 x축 방향으로의 공구변형은 (-)값을, 미절삭일 때 공구변형은 (+)값으로 나타내고 있다.

Fig. 12는 이송방향에 대한 공구변형, 즉 y축 방향의 공구변형은 경사별로 변화가 거의 없다. 그러나 측면에서 받는 x축 방향의 공구변형은 상향절삭과는 달리 미절삭 현상이 곡면 경사위각별로 나타나고 있다. 하향절삭은 초기 절삭량이 과다하기 때문에 공구변형은 밀리는 쪽으로

발생하게 되어 미절삭 현상이 나타나게 된다. 곡면 경사위치가 작을수록 절삭되어지는 공구날이 중심부에 가깝게 위치하기 때문에 변형이 많이 일어나고 경사위각이 클수록 안정된 모습을 보여준다. 상방향가공일 때, 상향절삭과 하향절삭의 비교로 볼 때 공구변형측면에서는 하향절삭이 전체적으로 미절삭 현상이 이루어지는 안정된 절삭을 보여주고 있고, 경사 위치각에 따른 공구변형특성은 측면에서의 공구변형이 거의 없는 경사 위치각 54°인 경우 효과적인 가공방법이라 생각한다.

서로 다른 4가지의 가공경로의 곡면 경사위치각 변화에 대한 공구변형특성을 비교해볼 때 상방향 하향절삭이 가장 양호한 공구변형을 나타내고 있으며 각각의 가공방식에서 곡면 경사위치가 54°부근에서 공구변형이 감소하는 경향을 나타내고 있었다. 하향절삭에서 대체적으로 양호한 공구변형을 볼 수 있는데 상방향과 하방향에서 모두 x축 방향 공구변형과 y축 방향공구변형이 일치하는 것을 볼 수 있다. 이것은 이송방향으로 받는 힘과 측면에서 받는 힘이 비슷하여 일정한 공구변형을 이루면서 절삭되어짐을 생각할 수 있을 것 같다. 곡면 경사위치각 변화에 대한 일정한 공구변형을 알 수 있다면 절삭조건선정이나 자동 NC 프로그램을 작성할 때 좋은 조건을 제시할 수 있을 것이다.

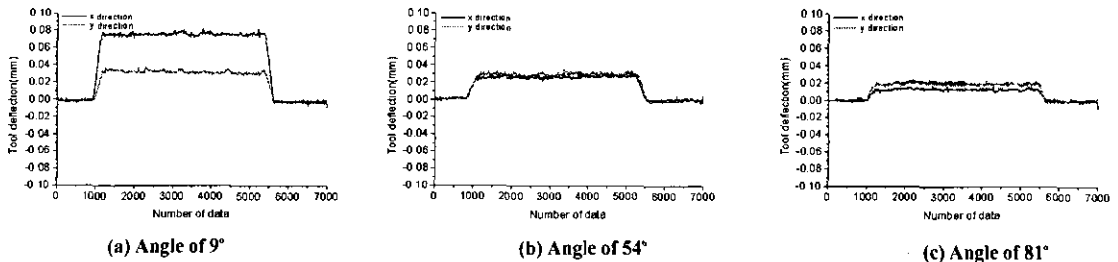


Fig. 12 Tool deflection of down milling when experimental condition is upward cutting for cylindrical shape

### 4.2 곡면 경사위치가 변화에 따른 절삭력 특성

Fig. 13과 Fig. 14는 실린더형 시편을 가공할 때 절삭력 성분을 나타낸 것으로 0.125초 동안의 샘플링 개수를 500개 획득한 절삭데이터들이다. 일정시간에 공구가 2회 전하는 것을 볼 수 있는데, 절삭력이 처음에는 크고, 다음 성분이 작게 나타난 것은 공구의 절삭날이 두날 중 하나는 크고 하나는 작음을 의미한다. 중심(zero)점을 기준으로 절삭력이 위아래로 생기는 것은 절삭방식에 따라 절삭력이 작용하는 위치가 다른 것으로 생각되어진다. 모든 절삭력 파형이 중심선에 가깝고 파형이 명확하게 나오면 절삭력을 작게 받아 공구변형이 작음을 의미할 수 있으나 오히려 파형을 이루지 못하는 선이 길수록 표면거칠기를 악화시키는 것으로 생각되어진다. 그럼에서 곡면 경사위치가 큰 경우에는 절삭력이 주기적으로 얇게 나타나고 있으며 곡면 경사위치가 작을수록 넓은 폭의 절삭 저항이 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이것은 절삭날과 공작물의 접촉시간이 길어 절삭량이 많아짐을 의미한다.

Fig. 13은 상방향 상향절삭일 때 측정된 절삭력 성분들을 나타내고 있다.  $F_x$  성분보다  $F_y$  성분이 크게 나타나고 있는데, 이것은 측벽에 받는 절삭저항보다 이송방향에 대한 절삭저항이 크기 때문이다. Fig. 13(a)는 경사위치가 9°일

때의 절삭성분을 나타내고 있는데  $F_z$  성분의 변화가 크게 나타나고 있다. 평면에 가까워질수록 절삭공구의 가공부위가 날 중심에 가까기 때문에 절삭속도가 줄어들고 이것으로 기인하여 과도한 절삭부하가 발생하게되어 강성이 부족한 볼엔밀 공구의 변형을 일으키게 된다. 이러한 과도한 절삭부하는 경사위치가 클수록 작아지며, 이러한 경향은 Fig. 13(b)와 13(c)에서 볼 수 있다.

Fig. 14는 상방향 하향절삭일 때 측정된 절삭력 성분들을 보여주고 있다.  $F_x$  성분과  $F_y$  성분의 크기가 비슷하게 나타나고 있다. 이러한 모습은 공구변형특성에서도 볼 수 있었는데, 하향절삭은 이송에 대한 절삭저항과 측벽에서 받는 저항이 비슷함을 볼 수 있다.  $F_z$  성분은 상방향 상향 절삭과 비슷한 경향을 나타내고 있으며 경사위치가 클수록 안정된 절삭을 보여주고 있다.

### 4.3 형상정밀도 특성

#### 4.3.1 진원도 특성

Fig. 15(a)는 상방향가공일 때 상향절삭과 하향절삭에 대한 진원도를 곡면 경사위치가 대하여 나타내고 있는데 대체적으로 경사위치가 45° 지점부터는 양호한 진원도 특성을 보이고 있다 곡면 경사위치가 완만할수록 진원

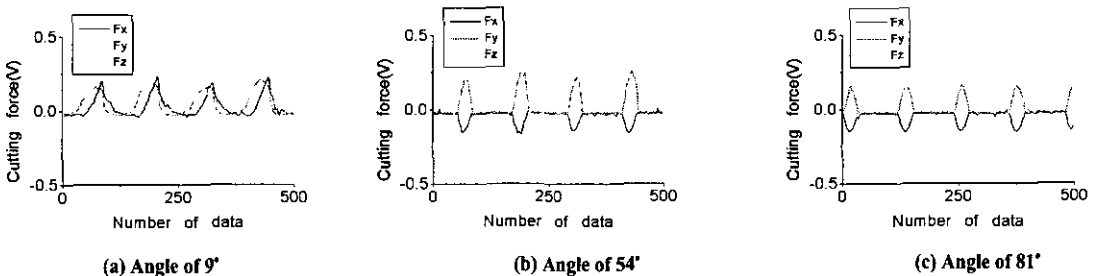


Fig. 13 Measured cutting force of up milling when experimental condition is upward for cylinder form

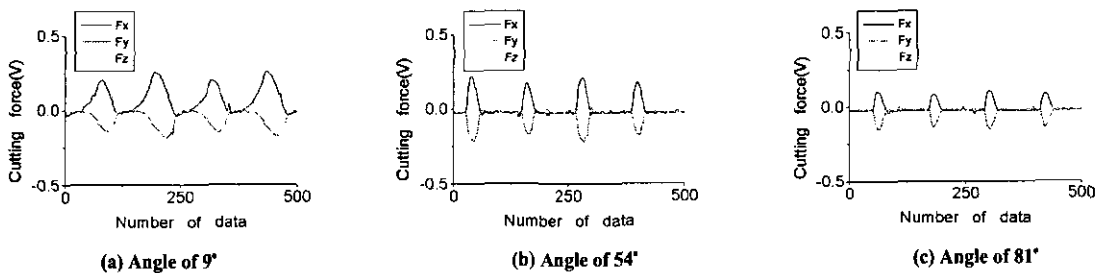


Fig. 14 Measured cutting force of down milling when experimental condition is upward for cylindrical shape



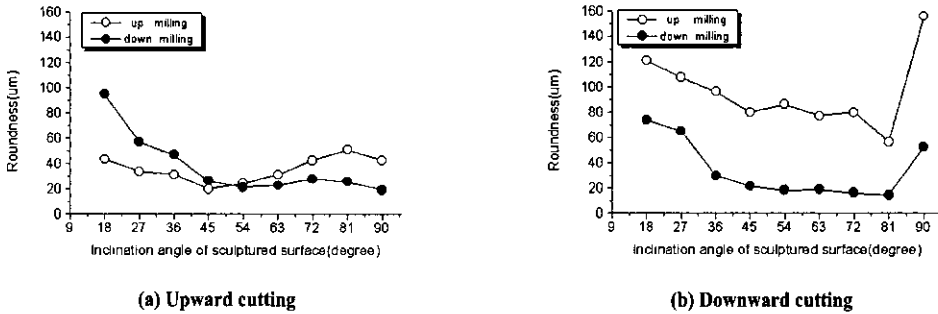


Fig. 15 Roundness due to the change of inclination angle for hemisphere shape

도가 크게 나타나고 있고 경사위치가 클수록 진원의 오차가 작게 나타나고 있는데, 이것은 경사위치가 작을수록 절삭성이 저하되는 것으로 생각된다. 이러한 결과는 앞서 고찰해본 것과 같이 공구변형특성에 기인한 것으로 생각된다. Fig. 15(b)는 하방향가공일 때 상향절삭과 하향절삭의 진원도 관계를 곡면 경사위치가 따라 나타내고 있다. 상향절삭일 때는 전체적으로 진원의 오차가 크게 나타나고 있음을 보여주고 있다.

4.3.2 표면거칠기 특성

곡면 경사위치가 변화에 대한 표면거칠기값을 가공방식에 따라 Fig. 16(a)와 16(b)에 나타내었다. 일반적으로 표면거칠기는 중심선 평균거칠로서 나타내지만 표면거칠기 값이 클 경우 최대표면거칠기 값으로 표현한다. 측정방법에 있어서 이송방향에 대한 표면거칠기와 경로방향에 대한 표면거칠기를 살펴볼 수 있는데 본 연구에서는 이송방향에 대한 표면거칠기  $R_{max}$  (최대표면거칠기)값으로 나타내었다. Fig. 16(a)은 상방향가공에 대한  $R_{max}$  값으로 경사

위치가 작은 부분에서 양호한 표면을 얻을 수 있었고 경사위치가 클수록 표면이 매끄럽지 못함을 볼 수 있다. 이러한 경향은 공구변형특성과 상반되는 현상이다. 또한 공구변형측면에서 양호한 절삭방식이 하향절삭인데 반해, 표면거칠기 측면으로 본다면 상향절삭이 양호함을 알 수 있다. 하방향가공에 대한 표면거칠기를 Fig. 16(b)에서 나타내고 있는데 하방향가공 또한 곡면 경사위치가 작을수록 양호한 표면을 얻을 수 있으며 상향절삭이 효과적임을 알 수 있다.

절삭력변화에서 공구의 바깥날로 절삭이 이루어질 때 절삭속도가 최대가 되고 이러한 과도한 절삭속도는 공구의 미세한 떨림이나 채터링현상을 일으키는 원인이 될 수 있다. 공구떨림이나 채터링은 표면거칠기에 악영향을 미칠 수 중요한 요소로 생각되어진다. 상향절삭일때 이송방향에 대한 절삭저항이 크게 나타났음을 앞서 살펴보았다. 반대로 하향절삭일때는 이송방향에 대한 절삭저항보다 측벽에 대한 절삭저항이 크게 형성되었다. 측벽에서 과도한 절삭저항을 받는 이러한 현상은 채터링을 야기할 수

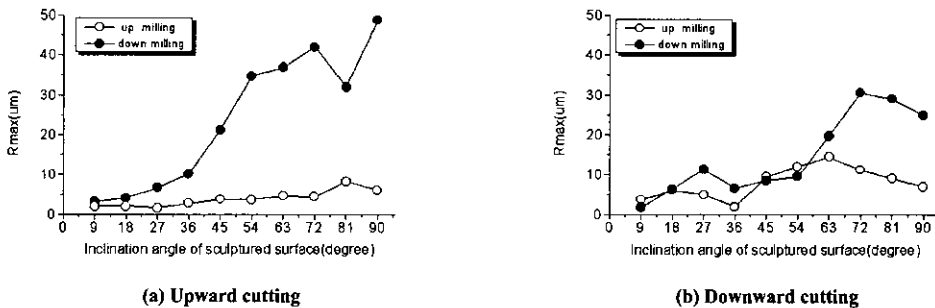


Fig. 16 Roughness due to the change of inclination angle for cylindrical shape

있는 원인으로 생각된다.

## 5. 결론

곡면가공시 공작물과 접촉하는 공구의 접촉 경사위치가 변화에 따른 공구변형특성, 절삭력특성 및 형상정밀도를 절삭방식에 따라 실시간 얻은 데이터를 해석하여 다음과 같은 결론들을 얻었다.

- (1) 경사위치가 작을수록 공구변형이 증가하는 경향을 나타내는데, 이 현상은 평면에 가까워질수록 절삭하는 날부가 중심점에 접근함으로써 절삭속도가 저하되어 공구변형을 일으키게 되고, 상향절삭에서는 과절삭 현상을 하향절삭에서는 미절삭 현상이 나타난다.
- (2) 곡면가공에서 하방향으로 가공할 때보다 상방향으로 가공할 때 공구변형이 적었으며, 상방향 하향절삭은 곡면 경사위치가 변화에 따른 공구변형이 가장 양호한 절삭을 보였다.
- (3) 진원도 특성은 상방향 하향절삭일 때 가장 양호한 진원도 값을 나타내고 있으며, 경사위치가 90°에서 45°사이에서는 진원도 값의 변화가 미소하다.
- (4) 곡면 경사위치가 변화에 따른 표면거칠기는 공구변형과 절삭력 관계와 다른 경향으로 상방향 상향절삭일 때 가장 양호한 최대표면거칠기값이 나왔다. 하향절삭일 때는 이송방향에 대한 절삭저항보다 측벽에 대한 절삭저항이 크게 형성된다. 따라서 측벽에서 과도한 절삭저항을 받는 현상은 채터현상을 발생할 수 있는 원인이 된다.

## 참고문헌

- (1) 박희덕, 양민양, "볼엔드밀에 의한 곡면가공의 절삭력 예측에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제 13권, 제 3호, pp. 433~442, 1989.
- (2) M. Y. Yang and C. G. Sim, "The Prediction of the Cutting Force in Ball-end Milling with a Flexible Cutter", *Int. J. of Mach. Tools & Manufact.*, Vol. 33, No. 2, pp. 267~284, 1993.
- (3) E. M. Lim, H. S. Feng, C. H. Menq, "The Prediction of Dimensional Error for Sculptured Surface Productions using the Ball-End Milling Process - Part 1 :

- Chip Geometry Analysis and Cutting Force Prediction", *Int. J. of Mach. Tools & Manufact.* Vol. 35, No. 8, pp. 1149~1169, 1995.
- (4) E. M. Lim and C. H. Menq "The Prediction of Dimensional Error for Sculptured Surface Productions using the Ball-end Milling Process - Part 2 : Surface Generation Model and Experimental Verification", *Int. J. of Mach. Tools & Manufact.*, Vol. 35, No. 8, pp. 1171~1185, 1995.
  - (5) W. A. Kline, R. E. DeVor and J. R. Lindberg, "The Prediction of Cutting Force in End Milling with Application to Cornering Cuts", *Int. J. of Mach. Tool Des. and Res.* Vol. 22, pp. 7~22, 1982.
  - (6) 김규만, 조필주, 김병희, 주중남, "Z map을 이용한 임의의 절삭영역에서 볼엔드밀의 절삭력예측", 한국정밀공학회지, 제 14권, 제 3호, pp. 57~65, 1997.
  - (7) H. Y. Feng, C. H. Menq, "A Flexible Ball-End Milling System Model for Cutting Force and Machining Error Prediction", *Trans. of ASME, J. of Manufact. Science and Engineering*, Vol. 118, pp. 461~469, 1996.
  - (8) Sehyung Park, Yong-Tae Jun, Chong-Won Lee, Min-Yang Yang, "Determining the Cutting Conditions for Sculptured Surface Machining", *Int. J. of Adv. Manuf. & Technol.* 61, pp. 61~70, 1993.
  - (9) H. Schulz, St. Hock, "High-Speed Milling of Dies and Moulds-Cutting Conditions and Technology", *Annals of CIRP*, Vol. 44, pp. 35~38, 1995