

# 볼엔드밀 가공에서 런아웃 측정을 통한 가공성 평가에 관한 연구

김병국\*, 박희범\*, 이득우\*\*, 김정석\*\*, 정용호\*\*

## A Study on Evaluation of Machinability using Cutter Runout in Ball-end Milling

Byoung-Kook Kim\*, Hee-Bum Park\*, Deug-Woo Lee\*\*, Jeong-Suk Kim\*\* and Yoong-Ho Jung\*\*

### ABSTRACT

The performance of interrupted cutting operations like milling is considerably affected by cutter runout. In this study, cutter runout is selected as an important machining parameter for evaluation of machinability in ball-end milling and caused from misalignments of tool and holder, unbalanced mass of parts and tool deflection under machining. To evaluate the machinability due to cutter runout, the rotating accuracy of spindle, cutting force and surface roughness are measured. The rotating characteristics of spindle in each revolution speed were investigated by cutter runout in freeload. The predicted surface form of workpiece by measuring cutter runout data was compared with real surfaces. The results show that measuring runout with high response gap sensor is useful for studying the phenomenon of high-speed machining and the monitor surface form using in-process runout measurements in ball-end milling is possible.

**Key Words** : Ball-end milling (볼엔드밀 가공), Runout (런아웃), Cutting force (절삭력), Tool deflection (공구 휨), Surface form (표면 형상)

### 1. 서론

최근의 CNC 머시닝 센터의 발달과 기계 부품들의 형상의 복잡성과 고정밀화의 추세에 따라 볼엔드밀 가공은 절삭가공에서 큰 부분을 차지하고 있다. 그리고 가공의 고효율, 고정밀의 요구에 따라 볼엔드밀 가공에서 고속화가 급속히 확산되고 있다. 이와 같은 요구에 충족시키기 위해서는 볼엔드밀 가공의 절삭 메커니즘의 분석과 고속가공의 환경에 맞는 감시 시스템의 개발이 필요한 실정이다.

일반적으로 공구가 회전하여 공작물을 제거하

는 밀링과 같은 가공에서는 회전하는 공구의 런아웃의 문제가 가공정밀도 향상에 큰 영향을 미친다. 볼엔드밀 가공에서의 런아웃은 공구의 축 중심으로부터의 비정상적인 이탈현상이다.<sup>(1)</sup>

볼엔드밀 가공에서의 공구의 런아웃에 대한 연구는 절삭력 예측의 문제로부터 제기되었으며, 런아웃을 고려한 볼엔드밀 가공의 절삭력 예측을 통한 가공성 평가가 주류를 이루어왔다. 볼엔드밀 공구의 기하학적인 형상으로부터 칩 형상을 도출하여 절삭력을 예측하였으며,<sup>(2),(3)</sup> 여기에 절삭력에 의한 공구의 휨을 포함한 공구의 절삭력을 예측하

\* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

\*\* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소

있다.<sup>14)</sup> 그러나 실제 절삭시 공구의 런아웃 변화가 표면 형상에 미치는 영향에 대한 연구는 부족해 보인다.

본 연구에서는 볼엔드밀 공구의 런아웃을 통해 공작기계의 회전특성과 가공 특성, 그리고 표면형상을 파악할 수 있는 연구를 수행하였다. 공회전에서 런아웃 변화량을 통해 회전 정밀도와 FFT 분석을 통한 회전 특성 평가를 실험하였으며, 실제 경사면 가공을 저, 고속 영역에서 실시하여 절삭력에 의한 공구의 휨량을 통해 절삭성을 평가하였다. 최종적으로 공구의 형상과 런아웃의 변화량을 통해 표면의 형상을 예측하여 실제 표면과 비교해봄으로써 3차원 형상가공에서 표면 예측의 가능성을 제시하였다.

## 2. 볼엔드밀 가공에서의 런아웃

일반적으로 엔드밀 가공에서의 런아웃은 주축에 장착된 공구가 축 중심에서 벗어나는 정도라고 말할 수 있다. 본 연구에서 표현하는 공구의 런아웃은 설치상의 오차뿐만 아니라 가공중의 절삭저항에 의한 공구의 휨으로 생기는 오차를 포함하는 개념이다. 런아웃의 원인은 주축과 공구의 축정렬 불량(misalignment)문제가 가장 크게 작용하며, 공구의 불평형 질량이나 공구 홀더의 문제에 의해 발생되고, 다인 공구인 엔드밀의 절삭 과정 중에 칩 제거에 드는 절삭저항에 의한 공구 휨에 의해서 야기된다. 이렇듯 런아웃은 공구의 비정상적인 회전 운동의 총체적인 결과라 볼 수 있다.

그러므로 볼엔드밀의 런아웃은 공작기계의 회전 정밀도 및 특성 평가, 가공중 공구나 피삭재의 절삭 특성을 파악할 수 있는 중요한 측정인자가 될 수 있다. 그리고 공구의 런아웃으로 인하여 가공 표면은 직접적인 영향을 받아 가공정밀도에 미치는 영향이 지배적이므로 공구의 런아웃에 대한 평가는 반드시 필요하다.

## 3. 공작기계의 회전 특성 평가

본 연구에서는 고속 머시닝 센터의 회전 정밀도를 파악하기 위하여 공구의 공회전에서 런아웃을 측정하여 공작기계의 회전 정밀도를 평가하였다. 여기서는 마스터 볼을 설치하지 않고 공구의 생크 부분에 변위센서를 근접시켜, 가공을 하기 전에 간

단히 정밀도를 파악할 수 있는 방법을 채택하였다. 다른 측정법<sup>15)</sup>에 비하여 고정밀의 정밀도 측정은 어렵지만 공구의 설치오차를 최소화하여 측정한다면 주축의 회전 특성에 대한 유용한 데이터를 획득할 수 있다. 그리고 이와 더불어 획득한 데이터를 FFT(Fast Fourier Transform) 분석을 하여 각 회전수에서의 회전특성을 파악하였다. FFT를 통한 주파수 분석은 회전체의 진동을 통해 베어링, 볼트, 너트 등 주축에 포함된 부품들의 상태를 간접적으로 진단할 수 있으므로 공작기계 이상 상태 감시에 유용하게 쓰인다.

## 3.1 실험 장치 및 방법

공회전에서 런아웃 측정을 통한 회전특성 평가를 위한 실험장치는 Table 1과 같다.

Table 1 Experimental equipments

Machining center	MAKINO-V55 Spindle speed(max.) : 20,000rpm Feed speed(max.) : 50m/min Location resolution : 2 $\mu$ m
Gap sensor	AEC-5505, PU-05 Resolution : 0.5 $\mu$ m Range : 0~2.0mm Frequency response : DC-20kHz
Tool	Ball-end mill (R8)

볼엔드밀 가공 전, 홀더에 부착된 공구의 생크 부위에 변위 센서를 근접시켜 공회전에서 공구의 런아웃을 측정한다. 런아웃을 측정하기 전에 공구의 설치오차는 5 $\mu$ m 이내로 하였다. 변위 센서의 위치는 생크의 X, Y 방향으로 직각이 되도록 설치하였고, 공구 선단에서 50mm가 되는 지점이다.

Fig. 1은 공회전에서 런아웃을 측정할 개략도이다. 여기서 이용된 공구는 직경이 16mm인 초경 엔드밀이며, 공구의 돌출길이는 지름의 5배인 80mm로 하였다. 변위 센서를 통해 들어오는 신호는 A/D Converter를 통하여 신호를 변환하여 필요한 데이터를 획득하였고, 샘플링 주파수는 10kHz로 하였다. 이 때의 주축의 회전수는 각각의 속도에서 회전 특성을 파악하기 위하여 1,000rpm에서 18,000rpm까지 1,000rpm의 간격으로 하여 런아웃을 측정하였다.

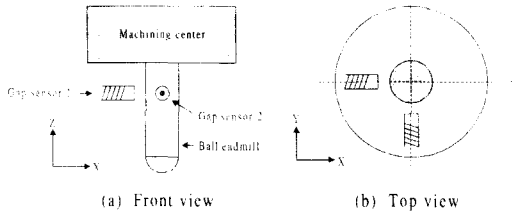


Fig. 1 Measurement set-up

### 3.2 공회전에서 런아웃 파형 분석

주축의 회전 정밀도를 파악하기 위하여 런아웃 파형을 1,000~18,000 rpm 중에서 그 중 몇몇을 선택하여 Fig. 2에 도시하였다.

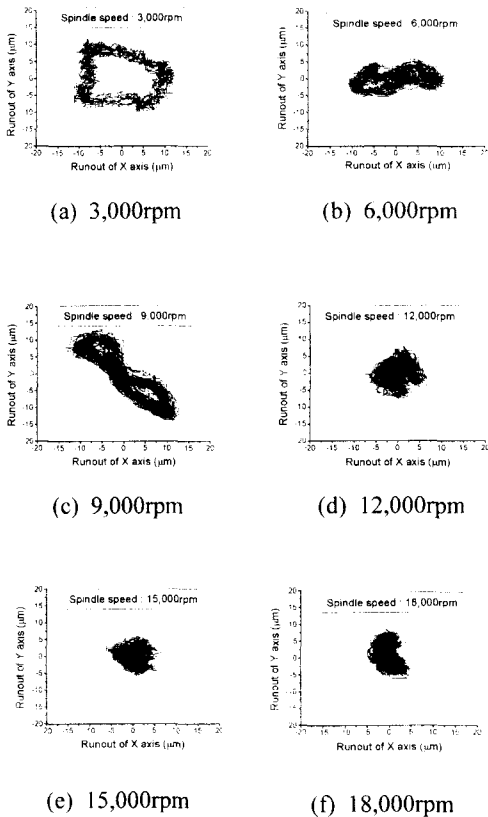


Fig. 2 Runout profiles of X and Y axis

Fig. 2에 도시한 런아웃 파형은 X-Y 방향의 런아웃 파형을 동시에 표현한 것으로 진폭의 크기로

각 회전수에서의 회전 정밀도를 파악할 수 있다.

Fig. 3은 1,000rpm에서 18,000rpm까지 런아웃 진폭의 변화를 도시한 것이다. 저속 영역에서는 다소 진폭이 크지만 고속인 영역에서는 회전이 안정을 되찾아 진폭이 상당히 줄었다. 이것은 본 실험에서 이용한 고속 머시닝 센터의 회전 특성을 나타내는 것으로 주축의 베어링 시스템의 예압이 고속 회전에 맞도록 설계되어 있어 저속에서는 다소 회전의 진폭이 커진 것으로 생각된다.

중속 영역의 7,000~10,000rpm에서 진폭이 상승하는 것과 고속의 16,000rpm에서 진폭이 상승하는 것은 머시닝센터의 1차 고유 진동수가 중속 영역에 존재하고, 그것의 약 두 배에 해당하는 고속 영역에서 2차 고유 진동수가 존재하기 때문인 것으로 생각된다. 이것은 위험속도라 불리는 영역으로 회전속도가 고유 진동수와 만났을 때 다른 회전수에 비하여 큰 진폭의 진동이 발생하므로 피해야 할 속도이다.

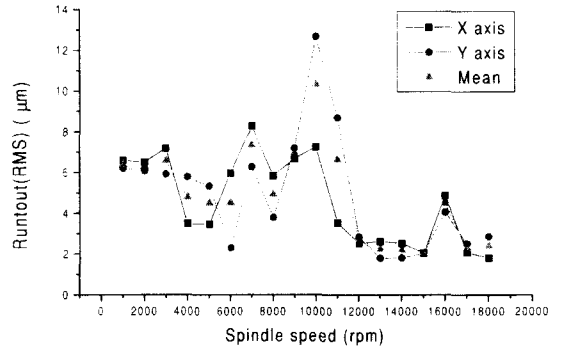


Fig. 3 Runout(RMS) variations in 1,000 to 18,000rpm

### 3.3 공회전에서 런아웃 주파수 분석

주파수 분석은 진동하는 기계의 상태 진단 방법의 하나로 FFT(Fast Fourier Transform)를 이용한 주파수 분석은 널리 이용되고 있다.<sup>(7)</sup> 본 연구에서는 각 회전수에서 획득한 런아웃 데이터를 주파수 분석하여 주축의 회전 특성을 파악하였다.

Fig. 4는 1,000~18,000rpm에서의 주파수 분석을 나타낸 것이며, 그 중 몇몇을 선택하여 먼저 각 회전수에서 그 회전수에 일치하는 동기 주파수의 성분이 최고 피크값을 보이고 있다. 그리고 각 동기 주파수의 정수 배인 조화성분의 주파수에서도 피크

값이 존재함을 볼 수 있다. 이것은 주축과 공구의 축 정렬 불량으로 서로 다른 재질의 물체가 완전한 축 정렬을 이루지 못할 때 발생하는 진동 성분이다.

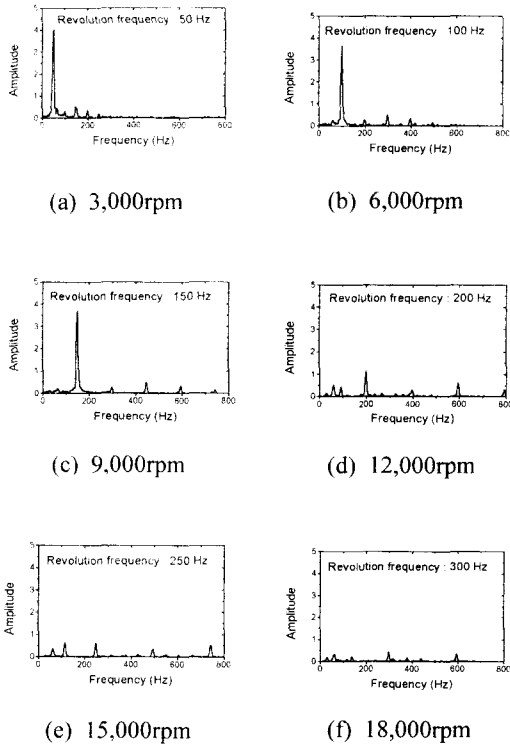


Fig. 4 Frequency analysis by FFT

고속 영역의 주파수 성분에서 동기 주파수의 1/2에 해당하는 성분의 진동이 존재하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 주축 베어링의 윤활 방식이 저어널 베어링의 윤활방식과 유사한 언더 레이스(Under race) 방식을 채택하고 있어 저어널 베어링 타입에서 고속일 때 발생하는 오일 휠(Oil whirl) 현상이 발생하는 것으로 추정된다.<sup>(6)</sup>

#### 4. 볼엔드밀 가공의 절삭특성 평가

일반적으로 절삭가공에서 절삭 상태는 공구가 재료를 제거하는데 드는 힘, 즉 절삭력(또는 절삭저항)으로서 그것을 판단할 수가 있다. 공구가 회전을 하면서 절삭을 하는 엔드밀 가공에서는 공구에 걸리는 절삭 저항으로 인하여 공구 휨

(Tool deflection)이 생기게 된다. 본 연구에서는 볼엔드밀 가공 중, 절삭 저항에 의한 공구의 휨을 공구의 런아웃으로 포함하여 절삭특성 평가를 할 수 있는 측정 인자로 채택하여 실제 절삭에서 각종 조건을 변화시켜 절삭 특성을 파악하였다.

#### 4.1 실험장치 및 방법

Fig. 5는 절삭 실험의 장치도를 도시한 것이다. 절삭 가공 중 칩에 의해 센서의 신호 획득의 방해를 방지하기 위해 공구의 샙크 부분, 공구의 선단에서 35mm가 되는 지점에 변위 센서를 근접 설치하였다.

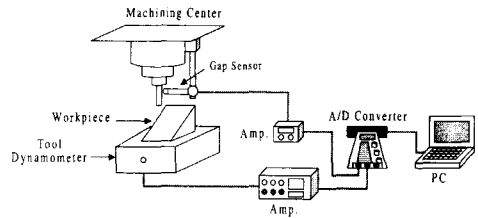


Fig. 5 Experimental set-up

변위 센서의 측정범위는 0~2mm로 1mm에 5V의 전압 변화가 생긴다. 분해능은 0.5 $\mu$ m이고, DC-20kHz의 응답성을 갖고 있다. 절삭력 측정을 위하여 공작물을 공구 동력계 위에 설치하였다. 공구의 런아웃 데이터와 절삭력 데이터는 각각의 증폭기를 통해 증폭되어 A/D 변환기를 통하여 PC에 수집되었다. 이때의 샘플링 주파수는 10kHz이다.

볼엔드밀 가공의 절삭특성 평가 실험 조건은 Table 2과 같으며, Table 3은 본 실험에서 이용된 장치를 설명한 것이다.

Table 2 Cutting conditions

Spindle speed (rpm)	Feed per Rev. (mm)	Pick-feed (mm)	Depth of cut (mm)
2,000	0.2~0.5	0.2~0.5	0.3
10,000			
14,000			
18,000			

Table 3 Experimental equipments

Machining Center	MAKINO-V55 Spindle speed(max.) : 20,000rpm Feed speed(max.) : 50m/min Location resolution : 2 $\mu$ m
Dynamometer	Kistler 9257B Range : -2.5 ~ 2.5 (kN) Rigidity : 240 N/ $\mu$ m
Gap sensor	AEC-5505, PU-05 Resolution : 0.5 $\mu$ m Range : 0 ~ 2.0mm Frequency response : DC-20kHz
Tool	Ball endmill ( $\phi$ 10, 2 edges, coated carbide )
Workpiece	STD11
Cutting Environment	Dry

#### 4.2 런아웃과 절삭력의 비교

볼엔드밀 가공은 밀링 가공의 특성과 같이 공구가 회전을 하면서 단속적인 절삭으로 재료를 제거하는 가공이기 때문에 회전에 의한 런아웃 성분을 포함한 채로 재료를 절삭한다. 그리고 재료의 제거에서 오는 절삭저항으로 인해 공구의 휨도 발생한다.

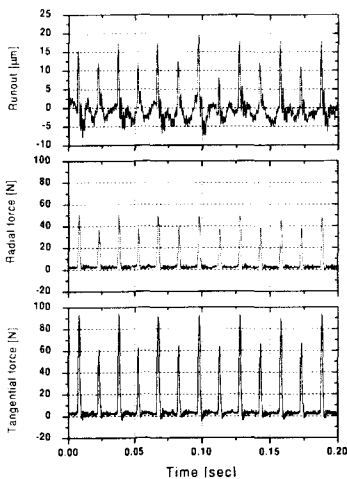


Fig. 6 Profiles of runout and cutting forces in 2,000rpm

Fig. 6은 2,000rpm에서 회전 당 이송량 0.3mm, 피크피드 0.3mm일 때 절삭 과정 중에 획득한 런아웃과 절삭력의 파형을 도시한 것이다. 런아웃과 절삭력 파형에서 모두 단속적인 절삭이 이루어짐을 볼 수 있다. 여기서 사용한 공구의 날 수는 2개인데, 파형에서도 그것을 확인할 수 있고, 한 날에 좀더 크게 절삭력이 작용함을 볼 수 있다. 이것은 런아웃 파형에서도 동일하다. 런아웃 파형의 특징은 공구의 회전 성분 위에 절삭저항에 의한 힘이 작용하여 피크 값이 생기고 있음을 알 수 있다. 파형에서도 볼 수 있듯이 가공중의 런아웃은 공구의 회전과 절삭력에 의한 휨을 모두 관찰할 수 있어 유용하다.

#### 4.3 런아웃을 통한 고속가공 특성 평가

엔드밀 가공에서의 고속화는 고정밀, 고능률 가공에서는 필수적인 기술이다. 주축의 회전수와 이송속도의 고속화는 같은 가공 조건에서 좀 더 정밀한 표면과 가공시간 단축이라는 이점을 갖고 있다.

본 연구에서는 고속의 회전수로 가공하는 볼엔드밀 가공에서 공구 동력계로는 측정하기 힘든 절삭저항의 변화와 고속 가공의 특성을 볼엔드밀 공구의 런아웃을 통해서 파악하고자 한다.

Fig. 7은 각각 2,000rpm과 10,000rpm에서 위와 같은 조건으로 가공한 시편의 표면이다. 이들 사진에서도 알 수 있듯이 2,000rpm에서 가공한 표면은 절삭 저항이 크고, 또 그 만큼의 공구의 런아웃이 커져서 그 영향으로 표면의 상태가 불규칙한 것을 볼 수 있다. 그러나 10,000rpm에서 가공한 표면은 가공면의 커스프(cusp)가 일정하게 배열되어 있어 안정된 상태에서 절삭이 이루어졌음을 알 수 있다. 표면 형상이 일정하게 깨끗이 가공된 표면은 마무리 연마작업에서의 시간과 비용을 줄여준다.



(a) 2,000rpm

(b) 10,000rpm

Fig. 7 Surface of cutting

고속영역에서 절삭조건의 변화에 따른 런아웃량의 변화를 알아보았다. 본 실험에서는 절입깊이는 0.3mm로 고정시키고 회전당 이송량과 피크피드

(pickfeed)를 0.2mm에서 0.5mm까지 0.1mm간격으로 변화시켰다. 그리고, 주축의 회전수는 10,000rpm, 14,000rpm, 18,000rpm으로 하여 각각의 회전수에 대하여 실험을 수행하였다.

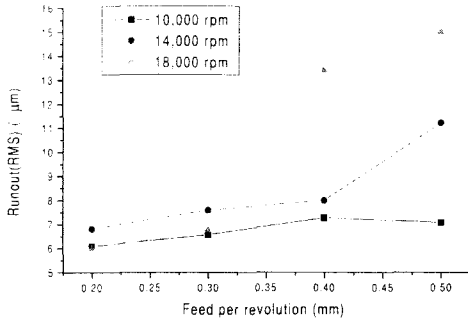


Fig. 8 Changes of runout according to feed per revolution

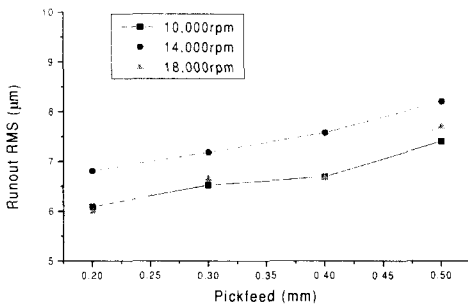


Fig. 9 Changes of runout according to pickfeed

Fig. 8는 각 회전수에서 회전당 이송량을 변화시키면서 획득한 런아웃의 진폭의 변화를 나타낸 것으로 칩 제거량이 증가할수록 런아웃은 증가하며 고속에서 모멘텀 효과에 의해 모멘텀력이 속도의 제곱에 비례하므로 급격하게 증가함을 알 수 있다. Fig. 9은 같은 방법으로 피크피드를 변화시키면서 런아웃의 진폭의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 나타낸 런아웃의 진폭은 RMS(Root Mean Square)값으로 나타낸 것이다. 회전당 이송량을 증가시킨 경우와 피크피드량을 증가시킨 경우 모두 런아웃의 진폭의 증가를 보여주고 있다. 이것은 이송량과 피크피드의 변화가 칩 제거량의 증가시켜 절삭저항으로 인한 런아웃의 진폭이 커졌기 때

문이고, 회전수의 변화에 따른 런아웃량의 변화는 각 회전수마다 회전 특성이 다르기 때문이다. 그러므로 가공에 앞서, 절삭조건을 선택함에 있어 회전수와 다른 절삭조건이 런아웃량을 최소로 할 수 있는 상호 보완적인 조건을 찾도록 노력하여야 할 것이다.

## 5. 런아웃을 통한 표면 형상 예측

### 5.1 볼엔드밀의 기하학적 형상과 표면 거칠기 모델

엔드밀을 이용하여 절삭 가공된 최종 표면의 형상은 공구의 편심, 주축의 편심, 공구형상의 복잡성과 다양한 공구 형태의 변화, 이송량의 변화에 따른 복잡한 공구경로 선정, 절삭력에 의한 공작기계와 공구 그리고 피삭재의 변형, 공구 마멸 등 여러 가지 요인들의 복합적인 작용으로 결정된다.<sup>(9)</sup> 본 연구에서는 볼엔드밀의 기하학적인 형상에서 비롯된 이론 거칠기에 런아웃에 의한 오차량을 대입하여 최종적인 표면 형상을 예측하고자 한다.

볼엔드밀 공구의 형상은 볼 부분과 엔드밀 부분으로 나뉘어져있고, 절삭과정에서 재료와 닿는 부분은 반구 형태로 되어있다. 볼 부분의 날 끝이 절삭을 하면서 볼엔드밀의 형상이 전사(轉寫)되어 표면 형상도 반구의 연속적인 형태로 나타나게 된다.

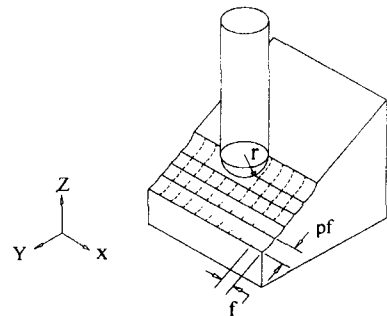


Fig. 10 Illustration of cutting test

Fig. 10은 본 실험에서 수행했던 가공실험에서 머시닝 센터 베이스의 흔들림이 없고, 공구의 처짐량이 선형적이라고 가정하였을 때의 공구가 공작물을 절삭하는 모습을 이상적인 형태로 도시한 것이다. 여기서  $f$ 는 날당 이송량을 나타내고  $pf$ 는 피크피드의 양을,  $r$ 은 공구의 반지름을 나타

낸다. 이송방향으로의 표면형상은 반원의 연속적인 형태로 커스프를 형성하고 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$z(x) = r - \sqrt{r^2 - (x - (i-1)f)^2} \quad (1)$$

여기서,

$z(x)$  : 이송방향  $x$ 에 대한  $z$ 방향의 높이

$r$  : 공구의 반경

$x$  : 이송방향의 임의의 위치

$i$  : 이송방향의 날 순서

$f$  : 날당 이송량

공구가 이송방향으로 한 구간의 절삭을 한 후 피크피드당 만큼  $Y$ 축 방향으로 이송을 한 후 다음 구간의 절삭을 하게 된다. 이러한 과정으로 원하는 구간을 절삭을 하게 되면 하나의 평면 가공이 이루어지는 것이다. 평면에서의 표면형상은 이송방향과 피크피드 방향 커스프의 조합으로 이루어지게 된다. 그러므로 불엔드밀 가공의 후의 표면형상은 식(1)과 피크피드 방향의 거칠기의 합으로 나타낼 수 있다. 식(2)는  $X$ - $Y$  평면 위에서의  $Z$  방향으로의 높이의 변화를 나타내는 식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$z(x, y) = 2r - \left( \sqrt{r^2 - (x - (i-1)f)^2} + \sqrt{r^2 - (y - (j-1)pf)^2} \right) \quad (2)$$

여기서,

$z(x, y)$  :  $X$ - $Y$  평면상에서의  $Z$ 축 방향의 높이

$y$  : 피크피드 방향의 임의의 위치

$j$  : 피크피드 방향의 날의 순서

$pf$  : 피크피드

식(2)을 이용하여 절삭조건에 따른 불엔드밀 가공에서의 이론적인 표면 형상을 구현할 수 있다.

Fig. 11는 식(2)를 이용하여 이론적으로 구현한 표면 형상이다. 이 때의 절삭조건으로는 공구의 반경은 8mm,  $X$ 축 방향의 날당 이송량은 0.15mm,  $Y$ 축 방향의 피크피드는 0.3mm으로 한 것이다. 이론적인 표면형상이기 때문에 두 날 가공이 일정하게 이루어진 커스프를 볼 수 있는 깨끗한 표면임을 알 수 있다.

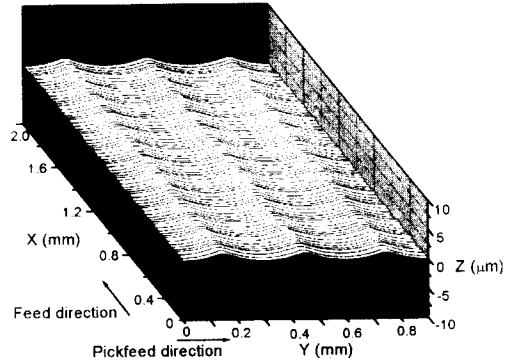


Fig. 11 Simulated 3D surface by theory

## 5.2 런아웃을 포함한 표면형상 예측

실제 가공에서는 앞서도 언급한 바와 같이 무수한 가공인자들에 의해 표면 형상은 불규칙한 면을 가지게 된다. 본 연구에서는 런아웃의 변화를  $X$ ,  $Y$  방향에서 측정하여 오차량으로 취급하여 식(2)에 대입, 실제 가공면의 표면 형상을 구현하였다. 그리고 실제 가공면을 표면 거칠기 측정기로 측정하여 실제 표면 형상과 비교해 보았다.

본 연구에서 실험한 공작물은 경사면이기 때문에 경사각의 고려가 필요하다. Fig. 12(a)에서 경사면에 대한 고려를 위한 그림을 도시하였다. 여기서  $\phi$ 는 공작물의 경사각으로, 공구의  $Z$ 축 방향의 중심선과 공구 반경의 원점에서 공작물과 맞닿는 점까지의 선분과 이루는 각과 일치하게 된다. 따라서, 공구의 선단( $P_0$ )을 경사면과 맞닿는 점( $P_\phi$ )으로 이동을 시켜주어야 한다.

따라서, 다음과 같이 식으로 표현 수 있다.

$$P_{\phi, y} = r \cdot \sin \phi \quad (3)$$

$$P_{\phi, z} = r \cdot (1 - \cos \phi) \quad (4)$$

여기서,

$r$  : 공구의 반경

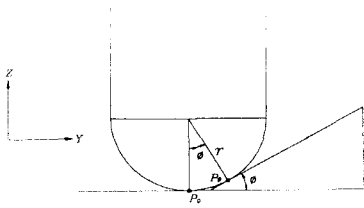
$\phi$  : 시편의 경사각

$P_0$  : 시편의 경사각이  $0^\circ$  일 때의 공구 선단

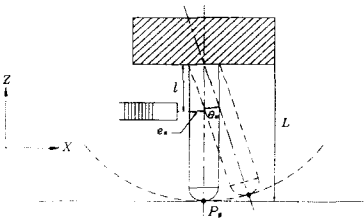
$P_\phi$  : 시편의 경사각이  $\phi$ 일 때의 공구 선단

$P_{\phi, y}$  : 시편의 경사각이  $\phi$ 일 때  $Y$  방향의 선단까지의 거리

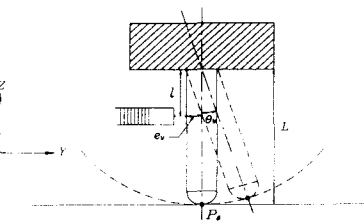
$P_{\phi, z}$  : 시편의 경사각이  $\phi$ 일 때 X 방향의 선단까지의 거리



(a) Geometry of Ball endmill



(b) Illustration of a ball endmill with deflection in X-Z plane



(c) Illustration of a ball endmill with deflection in Y-Z plane

Fig. 12 Geometry of a ball endmill with deflection in X-Y-Z

실제 공구의 런아웃 변화를 측정하여 공구 선단의 오차를 표현하기 위하여 다음과 같이 수식화하였다. Fig. 12(b)는 X-Z 평면에서의 공구의 런아웃을 도시한 것이고, Fig. 12(c)는 Y-Z 평면에서의 공구의 런아웃을 도시한 것이다.

\* X-Z 평면에서의 공구의 런아웃

$$\theta_x = \tan^{-1}\left(-\frac{e_x}{l}\right) \quad (5)$$

$$P_{exx} = L \cdot \sin(\theta_x) \quad (6)$$

$$P_{exz} = r(1 - \cos \phi) \cdot L(1 - \cos \theta_x) \quad (7)$$

여기서,

$L$  : 공구의 돌출 길이

$l$  : 공구 홀더에서 변위센서의 측정점까지 거리

$e_x$  : X축 방향의 공구 오차량

$\theta_x$  : X축 방향의 공구의 휨 각

$P_{exx}$  : X방향의 공구 선단 오차량

$P_{exz}$  : Z방향의 공구 선단 오차량

\* Y-Z 평면에서의 공구의 런아웃

$$\theta_y = \tan^{-1}\left(-\frac{e_y}{l}\right) \quad (8)$$

$$P_{eyy} = r \sin \phi \cdot L \sin(\theta_y) \quad (9)$$

$$P_{eyz} = r(1 - \cos \phi) \cdot L(1 - \cos \theta_y) \quad (10)$$

여기서,

$e_y$  : Y축 방향의 공구 오차량

$\theta_y$  : Y축 방향의 공구의 휨 각

$P_{eyy}$  : Y방향의 공구 선단 오차량

$P_{eyz}$  : Z방향의 공구 선단 오차량

최종적으로 식(6), (7), (9), (10)은 세 축 방향으로의 공구 선단 부위의 오차량이 되는 것이다. 이 오차량은 이론 거칠기 식인 식(2)에 대입되어 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$z(x, y) = 2r - \left( \sqrt{r^2 - ((x + P_{exx}) - (i-1)f)^2} + \sqrt{r^2 - ((y + P_{eyy}) - (j-1)pf)^2} \right) + P_{exz} + P_{eyz} \quad (11)$$

위의 식(11)은 이론 거칠기 식에 변위 센서로 측정한 런아웃을 공구의 선단의 런아웃으로 변환하여 대입한 것이다. 이 식을 실제 적용하기 위한 실험을 수행하였다.

본 실험에서는 공구는 반지름이 8mm인 초경 볼엔드밀을 사용하였고, 주축의 회전수는 3,000rpm으로, 회전 당 이송량을 0.3mm, 피크피드를 0.3mm, 절삭깊이를 0.3mm, 가공환경은 건식으로



로 하였다. 공구의 돌출 길이는 십파 센서의 중첩을 방지하기 위해 직경의 5배인 80mm로 하였고 변위 센서가 측정하는 부분은 공구의 선단에서 50mm가 되는 지점이다. 변위 센서는 X-Y 방향으로 균질시켜 측정하였다. 런아웃 데이터의 획득은 샘플링 주파수를 15kHz로 하여 하나의 데이터가 1 $\mu$ m에 해당하도록 설정하였다.

먼저, 위의 조건으로 절삭 실험을 하여 획득한 데이터를 이용하여 표면 거칠기 파형을 구현하였다. Fig. 13는 실제 표면과 시뮬레이션한 표면 거칠기의 파형을 도시한 것이다.

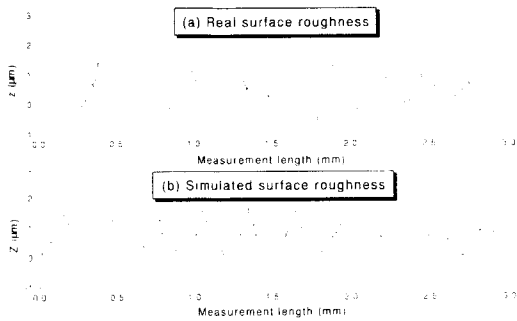


Fig. 13 Surface roughness profiles

이 실험에서는 절삭조건 및 공구의 설치오차에 의하여 런아웃이 발생하지 않았을 때 한 날 당 0.15mm의 이송량으로 가공된 표면이어야 하지만 실제 가공되어진 표면은 한 날 가공이 이루어져 이송방향의 파형의 간격이 0.3mm임을 볼 수가 있고, 실제 값과 예측 값의 크기에서는 Rmax 값으로 1.5 $\mu$ m~2.0 $\mu$ m의 범위를 가지고 있음을 알 수 있다. 따라서 실제 표면 거칠기와 예측되어진 표면 거칠기가 거의 유사함을 볼 수 있으며, 이러한 표면 거칠기의 파형을 피크피드 방향으로 조합하면 3차원의 표면 형상을 획득할 수 있다.

이러한 점들을 감안하여 조건을 정하고 런아웃 데이터의 오차량을 대입하여 만든 표면 형상이 Fig. 14에 도시한 예측한 표면 형상이다.

Fig. 15은 실제 가공한 면을 표면 측정기로 획득한 데이터를 3차원 표면 형상으로 나타낸 것이다. 예측한 표면 형상과 실제 표면 형상을 비교해 볼 때, 이송 방향과 피크피드 방향의 굴곡이 뚜렷이 나타나고 있음을 볼 수 있다. 그리고 예측한 표면 형상에서 전체적인 파형의 간격이나 크기가

실제와 유사한 것을 볼 수가 있다. 이렇듯 런아웃 데이터를 이용한 표면 형상 예측은 실제 표면 형상의 정확한 예측은 불가능하지만, 본 연구의 예측 방법이 3차원 형상 가공 중에서 시간과 비용을 단축할 수 있는 표면 상태 감시를 위한 하나의 방법으로 채택될 수 있음을 확인하였다.

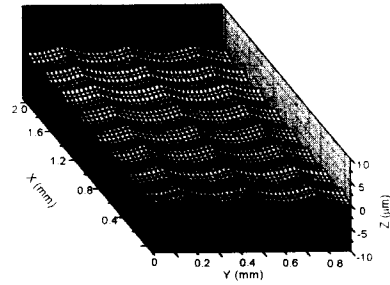


Fig. 14 Simulated 3D surface form

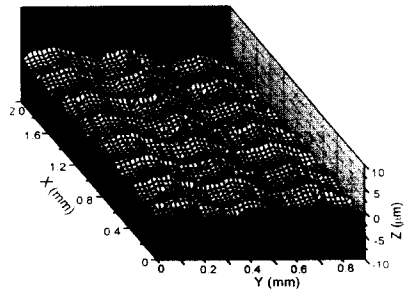


Fig. 15 Measured 3D surface form

## 6. 결론

복엔드밀 가공에서 런아웃 측정을 통한 회전 특성 및 가공 특성의 평가 그리고 표면 형상 예측을 수행한 결과 다음의 결과를 얻었다.

- (1) 복엔드밀 가공에서 공구의 런아웃은 공작기계의 회전 특성과 가공 중의 절삭 특성 그리고 공작물의 표면 형상의 상태를 파악할 수 있는 중요한 측정인자임을 확인하였고, 런아웃을 통한 가공성 평가 방법을 제시하였다.
- (2) 고속 가공에서 고응답성 변위 센서를 이용하여 절삭 조건에 따른 절삭 특성 파악이 가능하였다.

(3) 런아웃 데이터를 이용한 표면 예측에서는, 공구의 런아웃이 표면 형상에 직접적인 영향을 미치므로 고속가공에서 고온납성 변위센서에서 측정된 런아웃을 이용하여 표면 형상을 예측하는 방법으로 활용될 수 있음을 확인하였다.

9. H. Schulz, "High-speed Milling of Dies and Moulds-Cutting Conditions and Technology," Annals of the CIRP Vol.44/1/1995.

### 후기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

### 참고문헌

1. W.A. Kline and R.E. Devor, "The Effect of Runout on Cutting Geometry and Forces in End Milling," Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol.23, No.2/3, pp.123-140, 1983.
2. Minyang Yang and Heeduck Park, "The Prediction of Cutting Force in Ball-End Milling," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol.31, No.1, pp.45-54, 1991.
3. Hsi-Yung Feng and Chia-Hsiang Menq, "The Prediction of Cutting Forces in the Ball-End Milling Process-II. Cut Geometry Analysis and Model Verification," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol.34, No.5, pp.711-719, 1994.
4. Ching-Chia Tai and Kuang-Hua Fuh, "A Predictive Force Model in Ball-End Millin including Eccentricity Effects," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol.34, No.7, pp.959-979, 1994.
5. 朴俊浩, "정밀측정시스템공학," pp.243-256, 야정문화사, 1993.
6. 曾田範宗, "軸受," pp.267-281, 岩波全書 257, 1967.
7. Julius S. Bendat and Allen G. Piersol, "Random Data, Analysis and Measurement Procedures," 2nd Edition, pp.370-377, John Wiley & Sons, 1991.
8. M. A. Elbestawi, F. Ismail and K. M. Yuen, "Surface Topography Characterization in Finish Milling," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 34 No. 2, pp.245-255, 1994.