

볼 엔드밀 공정에서 공구변형 예측에 관한 연구

박성준*, 이교승⁺, 남궁재관⁺⁺
(논문접수일 2005. 2. 24, 심사완료일 2005 4. 11)

Prediction of Tool Deflection in Ball-end Milling Process

Sung-Jun Park*, Kyo-Seung Lee⁺, Jae-Kwan Namgung⁺⁺

Abstract

A new measuring method for tool deflection has been developed when sculptured surface is processed in ball-end milling. Since the vibration due to cutting forces has low frequencies, an electromagnetic sensor is used for measuring the exact vibration displacement. The amplitude and direction of vibration displacement during the cutting process is presented as orbital plot. In this study, it assumes that the vibration displacement is proportional to the length of cutting chip. Therefore, tool deflection is calculated by summing up the vibration displacement of unit chip length for engaged chip length. In addition, computer programs has been developed to predict the deflection of tools when machining sculptured surface. This developed program predicts the tool deflection per block of NC data, so that it can easily identify the parts which have the possibility of machining errors.

Key Words : Sculptured surface(자유곡면), Milling(밀링), Tool deflection(공구 변형), Orbital plot(궤도 선도), Finite cutting edge (미소 절삭날), Z-map(Z맵)

1. 서 론

산업용 기계가 자동화됨에 따라 정밀한 제어와 동작을 위한 정밀 부품의 필요성이 더욱 높아지고 있다. 국내의 기계 가공 업체에서는 가공오차에 대한 문제점을 인식하고 있으나 제조사에서 제시한 일괄적인 대책만을 가지고 있으며 대

부분 보유한 장비의 성능을 충분히 발휘하지 못하고 있는 실정이다. 과거에는 공작기계에 대한 진단 시스템⁽¹⁾에 관한 연구가 진행되었으나 일반적인 적용방법을 찾는데 어려움을 겪었다. 여기에는 공구의 변형으로 인한 영향이 가장 크며, 이것은 절삭조건과 공구종류에 따라 일정하지 않기 때문에 경험적으로 예측하기 어렵다⁽²⁻³⁾.

* 삼성전기 중앙연구소 (sung-jun.park@samsung.com)

주소: 443-743 경기도 수원시 영통구 매탄3동 314

+ 경기공업대학 자동차학과

++ 서울산업대학교 기계설계자동화공학부

절삭가공 시 공구 변형의 주 원인은 절삭력에 의한 탄성 변형이므로 절삭력을 발생시키는 메커니즘을 모델화하는 연구^(4,5)와 절삭력의 검출에 대한 연구⁽⁶⁾가 주로 공구 동력계를 이용하여 진행되어 왔다. 가공 오차를 발생하는 주요 원인은 절삭력에 의한 공구 변형이지만 공구 변형만으로 오차의 크기를 예측한다는 것은 기계의 특성이 모두 다르므로 현장에 있는 모든 기계에 똑같은 방법으로 적용될 수 없다. 따라서 진동 변위로 나타나는 기계의 강성을 고려하여 공구의 변형을 예측하는 것이 더 유용하다. 본 실험에서 사용된 진동 변위를 이용하는 방법은 밀링공정에서 공구파괴를 검출하는데 주로 사용되었던 방법이며 발생 진동수가 고유 진동수에서 멀리 떨어져 있을 때 정확한 판별력을 가지게 된다⁽⁷⁾.

본 논문에서는 볼엔드밀 공정에서 발생하는 공구변형을 진동변위를 이용하여 측정하는 방법을 제안하였으며, 공구 변형 해석을 통하여 공구변형 예측프로그램을 개발하였다.

2. 동전형 픽업

본 연구에서 주로 사용한 변위 측정용 기기는 동전형 진동 픽업이다. 기존의 절삭력을 이용한 공구변형 예측에서 사용되던 공구 동력계(tool dynamometer)는 설치가 어렵고 사용하는데 전문적인 기술이 필요하며 고가인 반면 동전형 픽업은 고정시킬 필요가 없으며 사용이 간편하다. Fig. 1에 동전형 진동 픽업의 외부모습을 나타내었다. 이 장치를 이용하여 절삭 가공 시 발생하는 진동 변위를 측정함으로써 실제 가공중의 공구 변형량을 정확히 예측할 수 있었다.

동전형 진동 픽업은 기본적으로 자석과 스프링 그리고 기전력을 발생하는 코일로 구성되어 있으며, 패러데이(Faraday)의 전자유도법칙을 이용한 장치이다. 기본적인 내부구조의 모습은 Fig. 2에 표시되어 있다. 프로브에 진동이 전달되면 프로브와 스프링으로 연결된 영구자석이 움직이게 되며 이러한 운동에 의해 기전력이 발생하게 된다.

기전력과 물체의 속도 간에는 다음 식 (1)과 같은 비례관

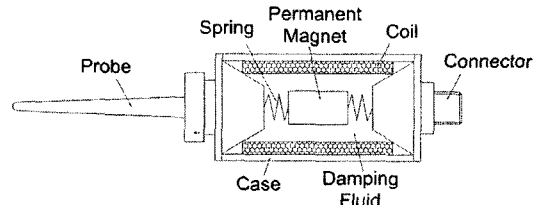


Fig. 2 Schematic diagram of vibration pickup

계를 가지게 된다.

$$e \propto B \times V \quad (1)$$

여기서, e 는 기전력이며 B 는 자속밀도, V 는 도체의 속도이다. 위의 관계식을 적분하여 변위 D 를 다음 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$D(t) = \int V(t)dt \quad (2)$$

3. 공구 변형 해석

3.1 측정위치 선정

회전하는 볼 엔드밀의 진동 변위를 직접 측정하는 것은 별도의 장치가 제작되어야 하므로 현장에서 적용하기는 쉽지 않다. 따라서 볼 엔드밀의 변위와 일정한 진동비를 가진 바이스의 임의의 부위를 진동 변위의 측정 위치로 하였다.

공구변형을 측정하기 위하여 지름 12mm, 날부 길이 30mm 인 2날 고속도강(SKH) 볼 엔드밀을 공구길이 50mm가 되도록 장착하고 슬롯 가공을 한 결과 절삭 깊이가 1mm에서 6mm까지 증가하는 동안 볼 엔드밀과 바이스간의 진동비가 절삭 깊이에 관계없이 그 비율이 Fig. 4와 같이 약 107 : 17 이었다. 90°의 위상차가 발생하는 이유는 공구와 바이스 간의 진동방향이 서로 반대이기 때문이다.



Fig. 1 Electromagnetic vibration pickup(VP-3004, IMV)

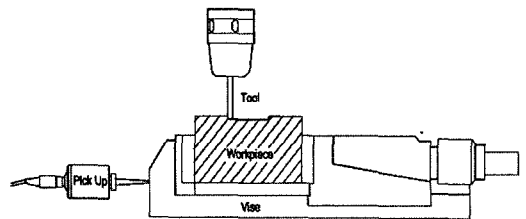


Fig. 3 Selection of measuring point

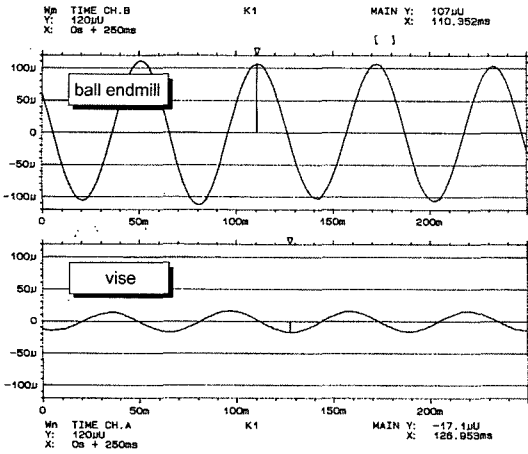


Fig. 4 Relations of vibration displacements between ball-end mill and vise

3.2 미변형 칩 두께의 영향

미변형 칩 두께는 절삭날이 공작물에 삽입되는 깊이를 말하며 린아웃과 같은 외란이 없는 경우는 날당 이송량과 동일하다. 칩 두께와 절삭력에 의한 진동의 관계를 알아보기 위해 슬롯가공 예비실험을 하였다. Fig. 5는 다양한 칩 두께에 대한 데이터를 얻기 위해 날당 이송량을 변경하며 진동 변위를 측정할 결과이다.

날당 이송량이 증가함에 따라서 진동 변위가 비례적으로 증가하는 것을 알 수 있는데 그 이유는 이송량 증가에 따른 절삭력의 증가가 공구 변형량을 크게 하였기 때문이다.

3.3 칩 폭의 영향

절삭 칩은 절삭날 모선의 법선 방향으로 성장하므로 그 폭

은 절삭에 참여하는 절삭날의 길이와 같다. 볼 엔드밀의 경우 절삭날은 비틀림각(helix angle)을 갖고 있으며 또한 공구의 끝 부분은 반구형으로 되어 있어 칩 폭을 계산하기가 어렵다. 그러나 절삭 시 공구와 공작물의 변형을 일으키는 절삭력은 칩 제거량과 관련이 있으므로 칩의 두께를 날당 이송량으로 하고 폭을 축 방향 절삭 깊이로 가정하면 Fig. 6과 같이 실제 절삭 칩의 단면에 상당하는 직사각형 단면을 얻을 수 있다.

또한 이 실험에서는 축 방향 절삭 깊이를 1mm씩 일정하게 증가시키며 측정함으로써 절삭 칩 폭과 관계없이 볼 엔드밀의 반구형 부분의 각 위치에서의 절삭 특성을 알 수 있었다.

축 방향 절삭 깊이에 따른 진동 변위는 Fig. 7에 나타내었으며 비례관계를 가지고 있음을 확인할 수 있다.

앞의 실험 결과에서 치수효과의 영향에 주목해야 한다. 치수효과는 절삭날의 경사면과 여유면의 교차부분에 압축응력을 받는 작은 곡면이 마찰에 의해 절삭 저항을 증가시키는 현상이다. 이 때문에 날당 이송량이나 축방향 절삭깊이가 작아져도 진동 변위가 더 이상 감소하지 않는 것이다. 특히 이 효과는 강성이 약한 공작기계에서 진동 발생에 큰 영향을 준다. 노화되거나 구조적으로 약한 공작 기계 또는 설치가 잘못된 공작 기계는 절삭력이 적은 경우에도 진동이 심하게

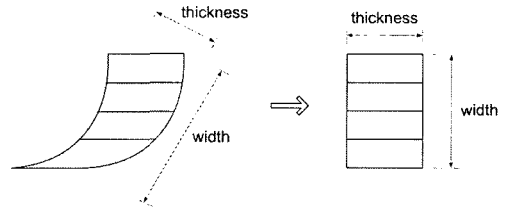


Fig. 6 Equivalent chip thickness and width

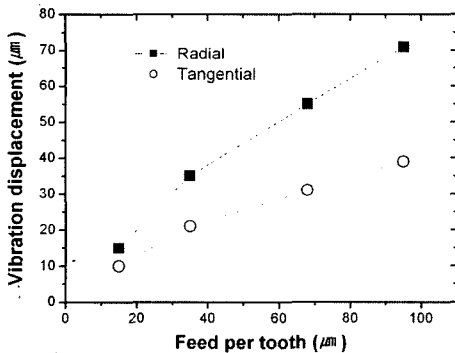


Fig. 5 Vibration displacement according to feedrate

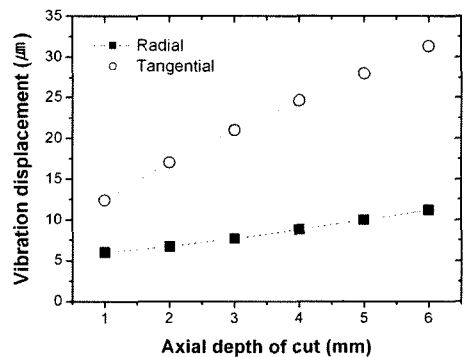


Fig. 7 Vibration displacement according to axial depth of cut

나타나며 더 큰 기계적 오차를 발생시킨다. 따라서 공구동력계에 의한 절삭력 측정만으로는 가공 오차를 예측하기 위한 유용한 정보를 얻을 수 없으며 기계의 상태에 대한 정보를 얻을 수 있는 진동계의 사용이 적절하다.

3.4 반경방향 절삭깊이의 영향

진동 발생의 원인은 볼 엔드밀의 접선방향의 절삭력과 반지름방향의 절삭력의 합력에 의한 것이므로 이송 방향이 일정하더라도 공구 평면에서 공구접촉 영역의 위치에 따라 각 절삭분력의 방향이 변하므로 Fig. 8과 같이 진동 형태의 변화를 볼 수 있다.

위의 실험 결과는 절삭시 나타나는 진동의 변위를 X축과 Y축 방향으로 측정된 것이다. 공구 반경방향 절삭깊이는 각각 (a) 2mm, (b) 3mm, (c) 4mm, (d) 5mm, (e) 6mm이며, 위의 실험에서 공구 표면의 영역 2에 의해 절삭하였을 때

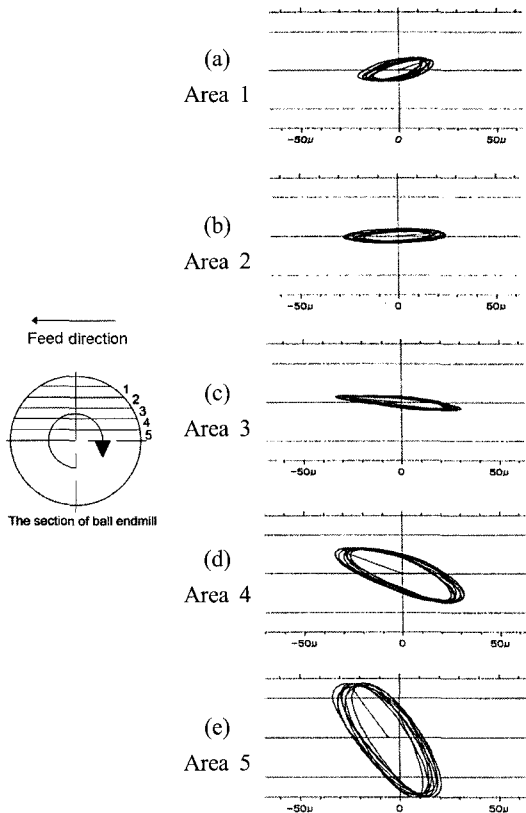


Fig. 8 The amplitude and direction of the vibration according to cutter contact area

Y방향의 정밀도가 매우 높을 것으로 기대할 수 있다. 따라서, 영역2와 같은 반경방향 절삭깊이로 가공을 진행하게 되면 공구변형이 주로 X방향으로 발생하기 때문에 가공오차를 최소화 할 수 있다.

좀더 바깥쪽인 영역1에서는 Y방향의 진동이 증가하는 것을 볼 수 있다. 위와 같은 결과를 통해 공구변형을 예측하기 위해서는 공구 평면상에서의 공구 접촉 영역의 위치가 고려되어야 한다.

3.5 절삭 칩 길이의 영향

절삭 칩의 길이는 한 개의 절삭날이 절삭 영역 내에 들어와서 절삭을 시작한 후 빠져나갈 때까지 절삭된 칩의 길이이다. 절삭 칩의 길이와 진동 변위와의 관계를 알아보기 위해 두 개의 센서를 이용하여 Fig. 9와 같이 측정하였다.

Fig. 10에서 한 사이클은 59.15ms이며 실험에 사용된 볼 엔드밀이 2날이므로 공구의 180°회전을 의미한다. 반지름 방향 절입량을 6mm로 하여 절삭 영역의 각이 90°가 되게 하고 절삭하였을 때 절삭 시작부터 접선 방향의 진동이 최대가 되는 시간인 29.297ms까지의 공구 회전각은 다음과 같이 계산 할 수 있다.

$$\text{CASE \#1 : } 180^\circ \times \frac{29.297}{59.15} = 89.2^\circ \quad (3)$$

이 계산 결과의 89.2°는 절입량이 6mm일 때 절삭날이 진입하여 빠져나갈 때까지의 회전각 90°와 거의 같으므로 절삭 진동이 최대가 되는 시점은 절삭날이 절삭 영역을 빠져나가는 시점과 같다고 볼 수 있다.

공구 접촉각 71°와 60°에 대해서도 각각 아래와 같이 검증될 수 있다.

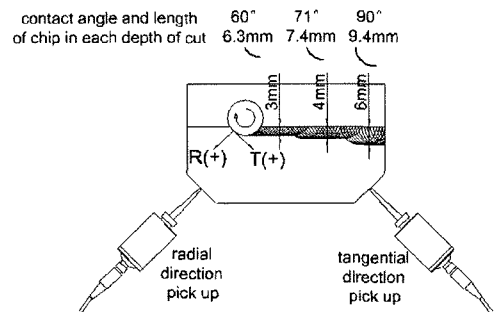


Fig. 9 Measuring of displacement in ball-end milling (tool diameter 12mm, 2 flutes)

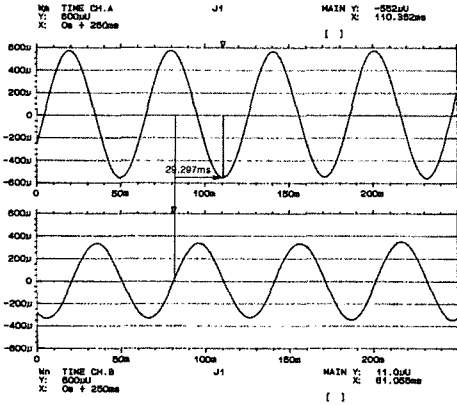
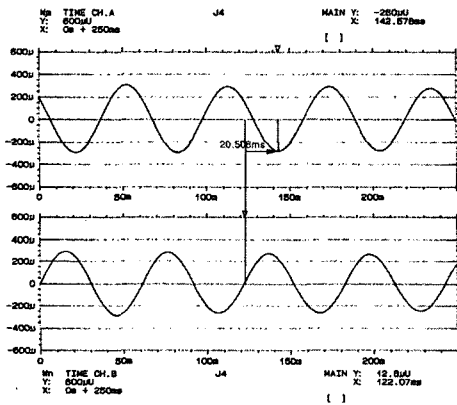
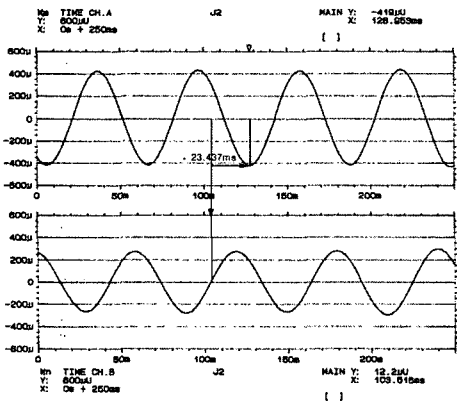


Fig. 10 The phase shift between tangential and radial vibration displacement(tool contact angle 90°)



(a) Tool contact angle 60°



(b) Tool contact angle 71°

Fig. 11 The phase shift between tangential and radial vibration displacement

$$\text{CASE \#2 : } 180^\circ \times \frac{23.437}{59.15} = 71.3^\circ \quad (4)$$

$$\text{CASE \#3 : } 180^\circ \times \frac{20.508}{59.15} = 62.4^\circ \quad (5)$$

4. 공구변형 예측 프로그램 개발

4.1 미소절삭날에 의한 진동 변위

절삭 가공 시 발생하는 진동 변위는 절삭 칩의 두께와 폭, 길이 및 기계 상태의 영향을 받는다. 이러한 조건들을 고려하여 지름 12mm, 2날 볼 엔드밀을 500rpm으로 회전시키며 SM20C 공작물을 이송속도와 절삭깊이를 변경하여 가공하였다.

실험을 통해 날당 이송량 f 와 절삭날 방향각 ϕ 에 대한 측정결과를 수집하고 실험으로 구한 데이터의 회귀분석을 통해 다음과 같은 실험식을 유도하였다.

$$\Delta D_T = 0.00835(f \sin \theta)^{0.6} \phi^{1.8} + 3.3 \quad (6.1)$$

$$\Delta D_R = 0.0000014(f \sin \theta)^{0.3} \phi^{3.5} + 1.2 \quad (6.2)$$

실험으로 구한 식 (6.1)과 식 (6.2)는 공구의 접선 방향과 반지름 방향에 대한 것이므로 가공 중의 공구 변형을 예측하기 위한 모델로는 적합하지 않다. 따라서 고정된 좌표계인 X, Y 두 축 방향에 대한 식으로 변경해야 한다.

Fig. 12와 Fig. 13의 실험결과에서 상향 절삭일 때는 Y축 방향의 진동이 상쇄되며, 하향 절삭일 때는 X축 방향의 진동이 상쇄되는 것을 알 수 있다. 이것은 공구의 접선 방향과 반지름 방향의 측정값의 벡터적 합성을 통해 X, Y 두 축 방향의 진동 변위가 계산될 수 있음을 보여준다.

X축과 Y축 방향의 진동 변위는 Fig. 14에서 나타난 관계

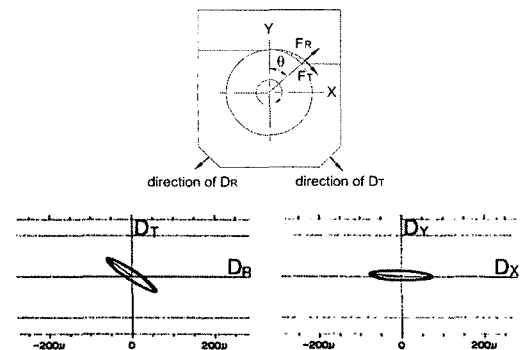


Fig. 12 Tool deflection in up milling

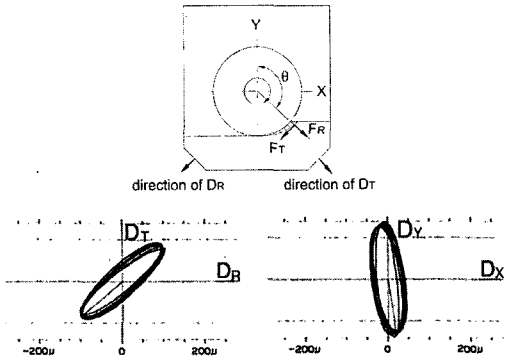


Fig. 13 Tool deflection in down milling

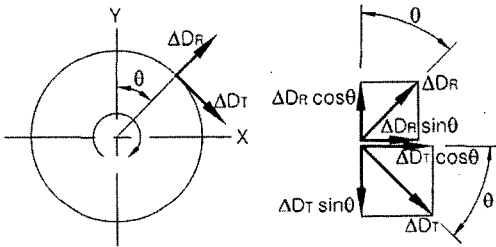


Fig. 14 Tool deflection in down milling

를 통하여 식 (7)과 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta D_X = \Delta D_R \sin \theta + \Delta D_T \cos \theta \quad (7)$$

$$\Delta D_Y = \Delta D_R \cos \theta - \Delta D_T \sin \theta \quad (8)$$

따라서, 절삭날의 1회전 한 사이클 동안의 진동 변위는 다음 식과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$D_X = \sum_{\theta} \sum_w (\Delta D_R \sin \theta + \Delta D_T \cos \theta) dwd\theta \quad (9)$$

$$D_Y = \sum_{\theta} \sum_w (\Delta D_R \cos \theta - \Delta D_T \sin \theta) dwd\theta \quad (10)$$

4.2 공구평면에서의 미소 진동 변위

공구 평면을 일정한 크기의 미소 영역으로 나누고 각각의 미소 영역에서 공구의 절삭날이 회전하며 발생시킬 수 있는 진동 변위를 미리 계산해 놓으면 Z-map을 이용해 절삭 영역을 구하고, 절삭 영역에 포함된 미소 절삭 진동을 모두 합하여 절삭날이 이 영역들을 통과할 때의 최대 진동 변위를 예측할 수 있다. 계산을 위해 먼저 구형으로 된 공구 표면상의 미소 절삭 영역을 공구 평면상의 영역으로 변환한다.

Fig. 15에 나타낸 기하학적인 관계를 이용하여 좌표 변환하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} dx &= dr = R d\phi \sin \phi \\ dy &= rd\theta \end{aligned} \quad (11)$$

$$dw = R \cos \phi d\phi = \frac{\cos \phi}{\sin \phi} dx$$

따라서, 미소절삭영역과 공구 평면상의 영역 사이에는 식 (12)와 같은 관계가 성립한다.

$$dwd\theta = \frac{\cos \phi}{r \sin \phi} dx dy \quad (12)$$

하지만, 이것을 그대로 적용할 수 없다. 왜냐하면 데이터 수집을 위해 실험할 때 축 방향 절삭 깊이를 1mm씩 일정하게 함으로써 dw 는 1mm가 되었으나 절삭 깊이를 1mm로 하고 공구 반경이 6mm이었으므로 $d\theta$ 는 1/6rad이 되었기 때문이다. 따라서, 식 (12)는 다음과 같이 변경된다.

$$dwd\theta = \frac{R \cos \phi}{r \sin \phi} dx dy \quad (13)$$

여기서, 6은 공구 반경이다. 그러므로 진동 변위 계산식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_X = \sum_y \sum_x \delta (\Delta D_R \sin \theta + \Delta D_T \cos \theta) \frac{R \cos \phi}{r \sin \phi} dx dy \quad (14)$$

$$D_Y = \sum_y \sum_x \delta (\Delta D_R \cos \theta - \Delta D_T \sin \theta) \frac{R \cos \phi}{r \sin \phi} dx dy \quad (15)$$

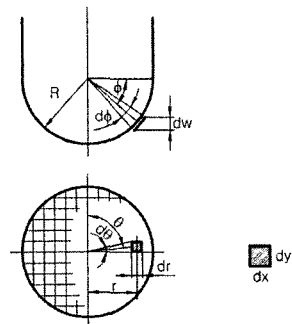


Fig. 15 Grids on the tool plane to calculate tool contact area

여기서,

$$\delta = \begin{cases} 1 & (\text{절삭날이 절삭영역 안에 있음}) \\ 0 & (\text{절삭날이 절삭영역 밖에 있음}) \end{cases}$$

절삭날 영역 $dxdy$ 의 중심위치와 θ , ϕ 및 r 은 다음과 같은 방법으로 구한다.

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{y}{r}\right), \phi = \cos^{-1}\left(\frac{r}{R}\right), r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (16)$$

식 (14)와 식 (15)를 이용하여 미소 절삭력에 의한 바이스의 진동 변위를 계산하고, 이 결과에 볼 앤드밀과 바이스의 강성비를 곱한 뒤 방향을 반대로 하면 공구의 변형을 예측하는데 사용될 Z-map을 계산할 수 있다.

4.3 시뮬레이션

공구 변형 예측 프로그램을 Visual C++를 사용하여 개발하였으며 앞 절에서 제시한 공구 평면에서의 진동 변위 계산식 식 (14)와 식 (15)를 적용하였다. 이 컴퓨터 프로그램은 리스트 박스로 NC데이터를 불러와서 블록별로 모의 가공이 가능하므로 NC데이터를 처음 다루는 초보자도 G코드의 의미와 기계적인 작동을 쉽게 이해할 수 있으며 또한 공구 변형 시뮬레이션 결과도 블록별 모의 가공과 동시에 보여주므로 가공 오차가 가장 많이 발생할 가능성이 있는 부분을 쉽게 찾을 수 있도록 개발하였다. 개발된 프로그램의 플로우 차트는 Fig. 16에 나타내었으며, Fig. 17은 작업 화면이다.

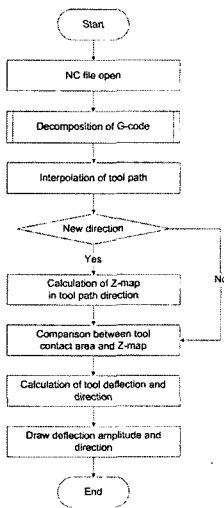


Fig. 16 Flowchart of simulation

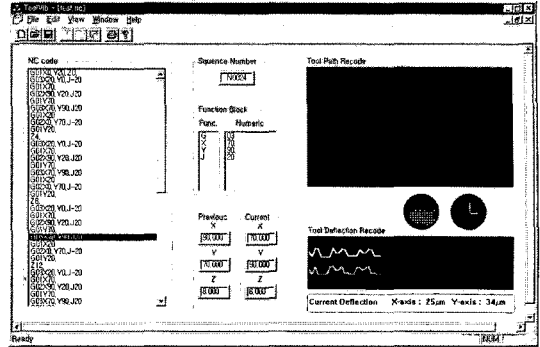


Fig. 17 Graphical display of developed program for predicting the tool deflection

화면의 우측 중간에는 현재 표시되고 있는 G코드의 가공시 공구가 공작물과 접촉하는 영역과 공구변형 방향과 크기를 표시해 주고, 우측 하단에는 공구 변형량과 변형 방향을 그 래프로 나타내고 있다.

볼 앤드밀 작업을 위해 준비된 NC코드를 위의 컴퓨터 프로그램에서 불러 시뮬레이션하고 실험 측정값과 비교한 것을 Fig. 18에 나타냈다. 실험 측정값과의 오차가 약 10%이 내로 예측되었다. 축방향 절삭깊이가 4mm, 5mm 일 때 시뮬레이션에 의한 진동 변위가 변하지 않는 문제점은 프로그램에서 Z-map을 더 미세하게 하여 해결할 수 있으나 시간이 많이 소요되는 단점이 있다

5. 결론

본 논문에서는 자유 곡면을 가공하기 위한 볼 앤드밀 작업

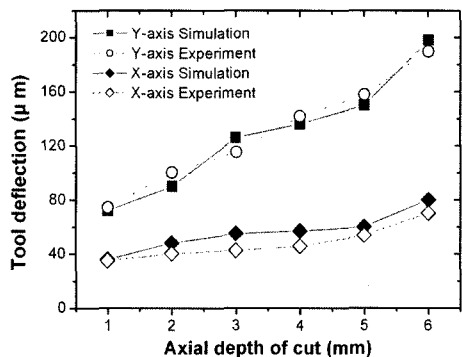


Fig. 18 Comparison between predicted tool deflection and experimentally measured value

에서의 공구 변형을 예측하는 연구를 수행하였다. 볼 엔드밀의 변형은 절삭가공 시 크기와 방향이 연속적으로 변하므로 진동 센서를 통해 변위를 측정하는 것이 가능하였으며 이 방법으로 절삭조건과 관련된 인자들의 공구 변형에 미치는 영향에 대해 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 절삭 시 공구변형은 미변형 칩 두께와 칩폭의 영향을 받으며, 볼 엔드밀의 경우는 반구형 부분에서의 절삭날의 위치에 의해서도 영향을 받는다. 공구 변형 방향은 공구의 접촉 영역에 따라 결정되며, X축과 Y축 방향 변형은 접선 방향과 반지름방향변형의 벡터적 합성에 의해 결정된다.
- (2) 상향절삭과 하향절삭의 경우 각각의 영역에서 반경방향 또는 축방향 절삭깊이를 조절하여 X축 또는 Y축 방향의 진동을 최소한으로 줄이는 것이 가능하다. 절삭 가공의 공정을 시뮬레이션하고 생성된 NC데이터를 수정함으로써 절입량을 조절하여 가공 정밀도를 높일 수 있다.
- (3) 절삭력에 의한 진동은 절삭 길이에 따라 선형적으로 증가하므로 미소 절삭날에 의한 한 사이클 당 진동 발생량은 단위 길이에 대한 진동을 전체 길이에 대해서 모두 합하여 구할 수 있다. 따라서 공구 변형을 예측하는데 Z-map을 이용하여 절삭 영역에 해당하는 양의 총합을 더하는 방법으로 정확한 값을 예측할 수 있다.
- (4) 볼 엔드밀의 미소 절삭날에 의한 절삭 진동을 미리 계산하고 Z-map을 이용하여 절삭 영역을 계산한 후 절삭 영역에 의한 절삭 진동의 방향과 크기를 구하는 컴퓨터 프로그램을 제작하였다. 이 프로그램에 의해 시뮬레이션한 결과 절삭력에 의한 진동을 약 오차 10% 이내로 예측하였다.

참 고 문 헌

- (1) Spiewak, S., 1991, "A Predictive Monitoring and Diagnosis System for Manufacturing," *Annals of the CIRP*, Vol. 40, pp. 401~404.
- (2) Kim, G. M., Cho, P. J., Kim, B. H., and Chu, J. N., 1997, "The Study on the Cutting Force Prediction in the Ball-end Milling Process at the Random Cutting Area using Z-map," *Journal of the KSPE*, Vol. 14, No. 3, pp. 57~65.
- (3) Wang, D. H., and Park, H. C., 2001, "Tool Deflection and Geometric Accuracy to the Change of Inclination Position Angle during Machining Sculptured Surfaces," *Journal of the KSMTE*, Vol. 10, No. 4, pp. 55~64.
- (4) Jaume, D., and Verge, M., 1990, "A Model-Based Diagnosis in Machine Tools : Application to the Milling Cutting Process," *Annals of the CIRP*, Vol. 39, pp. 443~446.
- (5) Choi, J. K., Kang, Y. G., and Lee, J. J., 2003, "A Study on the Flexible Cutting Force Model in the Ball-end Milling Process," *Journal of the KSMTE*, Vol. 12, No. 2, pp. 44~52.
- (6) Lan, M. S., and Naerheim, Y., 1996, "In-Process Detection of Tool Breakage in Milling," *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 108, pp. 191~197.
- (7) Tlustý, J., and Tarný, Y. S., 1988, "Sensing Cutter Breakage in Milling," *Annals of the CIRP*, Vol. 37, pp. 45~50.