

이 연구는 '96년도 한국과학재단 연구비 지원에 의한 결과임.  
(과제번호 : 961-1007-147-2)

## CAD 모델에 기초한 모사절삭을 통한 가상절삭 시스템 개발

배 대 위\*, 고 태 조\*\*, 김 희 슬\*\*

### Development of a Virtual Machining System by a CAD Model Based Cutting Simulation

Dae-Wi Bae\*, Tae-Jo Ko\*\*, Hee-Sool Kim\*\*

#### Abstract

In this paper, we suggest a virtual machining system that can simulate cutting forces of ball end milling at the stage of part design. Cutting forces, here, are estimated from the machanistic model that uses the concept of specific cutting force coefficient. To this end, we need undeformed chip thickness which is used for calculating chip load. It is derived from the Z-map data of a CAD model. That is, chip load is the height difference between the cutting tool and the workpiece at an arbitrary position. The tool contact point is referred from the cutter location data. On the other hand, the workpiece height is acquired from the Z-map model of a CAD data. From the experimental verification, we can simulate machining process effectively to the slot and the side cutting of ball end mill.

Keywords : Virtual Machining(가상절삭), Cutting Force Estimation(절삭력 예측), Ball End Milling(볼 엔드밀링), Free Formed Surface(자유곡면), Z-map Data(z-맵 데이터)

#### 1. 서론

컴퓨터 및 전자산업의 급속한 발전은 일상생활에서도 가상현실(Virtual reality)이라는 말을 생소하지 않는 단어로 만들면서 제조업에서도 이 개념이 도입되기 시작했

다. CIM의 발전과 함께 가상현실과는 다소의 차이가 있는 가상제작(Virtual Manufacturing)이 1990년대 초에 들어서면서 개념이 정착되기 시작하였다<sup>[1]</sup>. 이는 제품 생산라인을 설치하기 전에 제품생산의 전 공정을 사전에 모사 제작하여 봄으로써, 생산중에 발생할 문제점을 사전에

\* 영남대학교 대학원 기계공학부

\*\* 영남대학교 기계공학부

제거하고 최적의 생산방식과 물류유동 등을 결정하게 되는 모사 생산법이다. 따라서 제조설비의 구축에 있어서 혹은 시라도 발생할 위험요소를 사전에 제거하고 가장 최적의 생산라인을 구축하는데 필수적인 도구로 이 기법들이 인식되어지고 있다.

이러한 가상제작이 절삭가공 분야에도 도입이 되고 있는데, 가장 일반적인 것이 NC 가공의 공구경로를 확인하고 가공품의 최종형상을 도형으로 처리해보는 것이다. 그러나 CAM 소프트웨어에서는 통상 NC 데이터로부터 가공이 제대로 되어지는지에 관한 기하학적 검사만 이루어지기 때문에 실제 가공이 이루어지고 있는 절삭점에서의 물리적 현상을 모사하지는 못한다. 즉, 단순하게 정적인 데이터에 불과한 기하학적 데이터만 얻어지고, 실제 가공되어지는 상황에 해당하는 각종 정보인 절삭력, 표면거칠기 등에 대한 정보를 얻지 못하기 때문에 최적의 절삭 조건 등을 선정하기 위한 데이터로서 활용이 불가능하다.

이런 관점에서 만약 CAD와 CAM 데이터로부터 설계 단계에서 사전에 실제 가공하는 것과 똑같이 가상절삭시스템(Virtual Machining System : VMS)을 구현하게 되면 절삭 가공의 시행착오를 최소화 할 수 있게 된다. 또한 제품이 가져야 하는 품질의 특성에 맞추어서 최적의 절삭조건 하에서 최대의 생산률을 낼 수 있는 경제적 절삭조건 등을 구해낼 수 있다<sup>(2)(3)</sup>.

한편, 세련된 제품의 디자인에 대한 욕구의 증가와 더불어 3차원 자유곡면의 가공이 늘어나고, 이에 따라 자유곡면 가공에 주로 사용되는 공구로서 볼 엔드밀을 많이 사용하게 된다. 따라서 가공의 정밀도 및 가공능률을 높이기 위하여 공구재료와 절삭날의 형태가 다양한 여러 종류의 볼 엔드밀이 개발, 제작 되고 있다. 또한, 최적의 공구 설계나 절삭역학 해석, 그리고 가공시 발생하는 공구변형 등을 연구하기 위하여 절삭력에 대한 정확한 예측을 요구하고 있다.

밀링가공에 있어서 절삭력 예측을 위한 기존의 연구를 살펴보면 Budak 등은 직교절삭 데이터를 이용하여 3차원 밀링절삭의 절삭력 계수를 모델링 하였으며<sup>(4)</sup>, Armarego는 헬릭스 절삭날을 가지고 있는 공구로 절삭시에 절삭력 예측 모델 및 CAD/CAM 소프트웨어를 개발하였다<sup>(5)</sup>. 또한, Altintas는 CAD 시스템을 위한 엔드밀링의 절삭력 예측 알고리즘을 개발하였고<sup>(6)</sup>, Feng 등은 미소 절삭날 개념으로 미소 절삭력을 합함에 의해 절삭력을 예측했다<sup>(7)</sup>. 한편, 국내의 박 등은 2차원 절삭 데이터

를 이용하여 볼 엔드밀의 기하학적 형상과 절삭 조건이 주어졌을 때 모든 볼 엔드밀 가공에서의 절삭 기구를 해석하고 절삭력 모델을 구현하고자 하였으며<sup>(8)</sup>, 박 등이 3차원 절삭이론과 실험계수를 이용하여 원추팁 볼엔드밀에 대한 절삭력 해석을 하였다<sup>(9)</sup>. 또한 김 등은 Feng의 이론을 도입하여 Z-map을 이용하여 임의의 절삭영역에서 볼 엔드밀의 절삭력을 예측하였다<sup>(10)</sup>.

이상의 연구들을 기초로 하여 본 연구에서는 CAD 모델에서 얻을 수 있는 Z-map 데이터와 CAM 소프트웨어에서 얻어지는 공구위치 데이터를 이용하여 볼 엔드밀링 절삭에서 절삭력을 예측할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 또한, 개발된 절삭력 예측모델을 슬로팅 가공 및 자유곡면 가공에 있어서의 상향, 하향, 상방향 그리고 하방향 절삭에서 적용하여 검증함으로써 본 모델을 통해 가상절삭시스템 구축이 가능함을 보이고자 한다.

## 2. CAD 모델과 Z-map 데이터

### 2.1 CAD 모델링

수요자들의 다양한 요구에 기인한 제품수명의 단축경향은 제품의 설계분야와 가공분야에 컴퓨터 응용기술을 적극적으로 활용하게 된 계기를 만들어 주었다. 이에 따라 그동안 수많은 CAD/CAM 시스템들이 개발되어 왔고, 그와 더불어 3차원 제품의 형상을 효과적으로 표현하기 위한 방법으로 곡면 모델러(surface modeler) 및 솔리드 모델러(solide modeler)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

솔리드 모델에 기반을 두고 있는 CAD/CAM 시스템들은 B-Rep모델(Boundary Representation Model), CSG모델(Constructive Solid Geometry Model), 분해 모델(Decomposition Model) 등과 같은 형상 모델링 방법들을 사용하고 있다. 솔리드 모델은 물체의 내부 정보를 모두 파악할 수 있기 때문에 오늘날 CAD/CAM/CAE 통합 소프트웨어에서 널리 채택되고 있는 모델링 방법이다. 한편, 곡면 모델링은 Wire frame 모델링에서 모서리로 둘러싸인 면에 대한 정보를 추가로 입력하여 정의하는 모델링이다. 즉, 면은 면을 구성하기 위해 연결하는 선과 그것으로 둘러싸인 면의 종류를 입력함으로써 정의될 수 있다. 곡면 모델링은 NC 가공을 하기 위해서 꼭 필요한 모델이다.

본 연구에서는 NC 가공을 위한 공구경로의 계산 및 연구의 간편성을 위해 곡면 모델러를 이용하여 원하는 제품의 형상을 기하학적으로 표현한 다음 그 표면 데이터를 이용하여 Z-map 데이터를 얻었다.

## 2.2 Z-map 데이터

Z-map 모델은 Fig. 1 에서와 같이 3차원 입체형상을 xy 평면상에서 일정한 크기의 격자들로 분할하고, 그 격자들에 대한 높이인 Z 좌표값들을 저장하는 형태의 자료 구조를 가지고 있다. 따라서 Z-map의 자료 구조는 기본적으로 2차원 배열로 주어진다. 이러한 Z-map 모델을 이용하여 원하는 정밀도를 얻기 위해서는 많은 기억용량과 계산시간이 요구되지만, 자료구조가 단순하면서도 실제 입체형상을 매우 효과적으로 표현할 수 있기 때문에 많이 이용되고 있다.

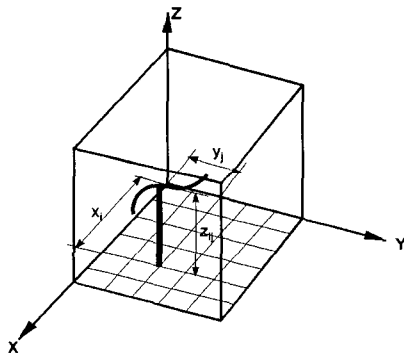


Fig. 1 Concept of Z-map model

이러한 Z-map 데이터는 CAD 모델러(상용 패키지 : micro DUCT)에서 구현한 도형 데이터로부터 기하학적인 정보를 이용하여 만들 수 있다.

## 3. 절삭력 예측 모델링

절삭력 예측 모델은 Feng의 연구결과<sup>(7)</sup>와 김 등에 기재된 절삭력 예측 알고리즘<sup>(9)</sup>을 응용하였는데, 이는 절삭날을 여러개의 미소절삭날로 나누고 각각의 미소절삭날에서의 절삭기구를 2차원으로 근사하여 각각의 미소절삭날에서의 미소절삭력을 구한 후에 이들을 절삭날을 따라 적분함으로써 임의의 공구회전각에서의 절삭력을 예측하는 방법이다.

Martellotti에 의해 제시된 엔드밀링 공정에서의 역학적(Mechanistic) 절삭력 예측모델은 평균 절삭력과 평균 미변형 칩두께와의 관계를 제시한 것이고<sup>(12)</sup>, 이 관계는

Koenigsberger 등에 의해 순간 칩두께와 접선력 사이에는 상관관계가 있음이 규명되었다<sup>(13)</sup>. 한편, 볼 엔드밀링과 같이 공구의 축방향에 대해 기하학적인 형상이 틀린 경우에는 미변형칩 두께에 의한 치수효과를 고려한 식(1)과 같은 절삭력 예측식을 사용하고 있다<sup>(7)</sup>

$$F = Kbt^m \quad (1)$$

여기서  $F$ 는 주절삭력이고,  $b$ 는 절삭 넓이이며,  $t$ 는 미변형 칩두께이고,  $K$ 는 비례상수로서 절삭폭과 미절삭 칩 두께 이외의 변수들이 절삭력에 미치는 영향을 포함하고 있다. 따라서 절삭력은 미소절삭날의 위치의 함수로 표현될 수 있다. 그리고  $m$ 은 치수효과 특성을 나타내는 지수로서 공작물에 따라 결정되는 상수로 가정한다.

Fig. 2와 같이 볼 엔드밀에서 미소절삭날의 위치를 나타내기 위하여 축방향으로의 회전위치각을  $\theta$ 라고 하고, 공구선단에서의 미소절삭날의 위치각을  $\phi$ 라고 하면, 절삭날을  $\phi$ 방향의 미소절삭날로 나누어 미소 절삭날들에서의 절삭력을 합하여 절삭합력을 구한다.

Fig. 2에서  $n$ 개의 절삭날이 있는 공구에서  $i$ 번째 절삭날이  $\phi$  각도 위치에 있을 때, 미소절삭날의 축방향 회전 위치각은 비틀림 각도  $\beta$  때문에 식(2)와 같이 쓸 수가 있다.

$$\theta_i(\theta, \phi) = -\theta - \sin \phi \tan \beta + (i-1) \frac{2\pi}{n} \quad (2)$$

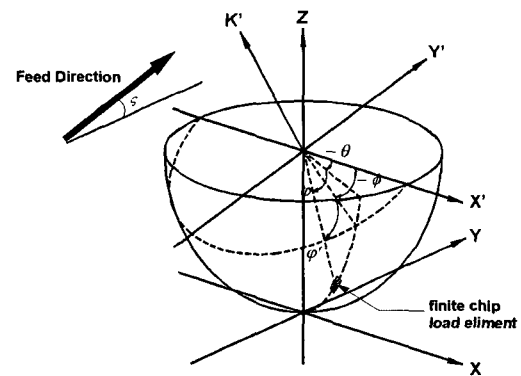


Fig. 2 Coordinate used in model

여기서  $\beta$ 는 비틀림 각도이다. 이때, 미소절삭날에 작용하는 접선방향 미소절삭력과 반경방향 미소절삭력은 식

(1)을 이용하여 다음과 같이 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} dF_T &= K_T(\varphi)[f \sin \theta_i(\theta, \varphi)]^{m_T} R \cos \varphi d\varphi \\ dF_R &= K_R(\varphi)[f \sin \theta_i(\theta, \varphi)]^{m_R} R \cos \varphi d\varphi \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $R$ 은 볼 엔드밀의 반경이다. 또한, 치수효과의 특성을 나타내는 지수  $m_T$ ,  $m_R$ 은 공작물에 따라 결정되는 상수로 가정한다. 한편,  $K_T$ ,  $K_R$ 은 절삭폭과 미절삭 칩 두께 이외의 절삭기구 변수들의 영향을 포함하므로 미소 절삭날 위치의 함수로서 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} K_T(\varphi) &= a_0 + a_1 \varphi + a_2 \varphi^2 + a_3 \varphi^3 \\ K_R(\varphi) &= b_0 + b_1 \varphi + b_2 \varphi^2 + b_3 \varphi^3 \end{aligned} \quad (4)$$

따라서 임의의 회전순간  $\theta$ 에 있어서 절삭력의 합을 구하기 위해서는 미소 점선방향과 반경방향의 힘을  $xy$  좌표계로 환산하여 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_x(\theta) &= \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} [-K_T(\varphi)[f \sin \theta_i + \delta_i(\varphi)]^{m_T} \\ &\quad \cos \theta_i - K_R(\varphi)[f \sin \theta_i]^{m_R} \sin \theta_i] R \cos \varphi d\varphi \\ F_y(\theta) &= \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} [K_T(\varphi)[f \sin \theta_i + \delta_i(\varphi)]^{m_T} \\ &\quad \sin \theta_i - K_R(\varphi)[f \sin \theta_i]^{m_R} \cos \theta_i] R \cos \varphi d\varphi \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $\delta_i(\varphi)$ 는  $i$ 번째 절삭날이  $\varphi$  위치에 있을 때의 공구의 run-out으로서,  $\varphi$  위치에서  $i$ 번째와  $i-1$ 번째 날의 반경치수 차이이다.

#### 4. 절삭영역 해석

절삭력을 모델링하기 위해서는 절삭 칩 하중인 절삭면적을 알아야 한다. 이를 위해 곡면 모델러로부터 주어지는 Z-map 데이터에 대해서 볼 엔드밀의 축방향 위치에 따른 미소절삭날의 절삭 참여여부를 결정하는 과정이 필요하다. 가공이 진행됨에 따라 임의 위치  $(x, y)$ 에서의 공구 높이와 공작물의 높이를 비교함으로써 공구와 공작물 사이의 간섭에 관한 정보를 얻을 수 있다. 이 데이터를 공구 중심을 원점으로 하고 이송방향을  $y$ 축으로 하는  $xy$  평면에서의 위치 데이터로 변환함으로써 절삭중에 절삭이 일어나는 절삭영역과 칩 하중을 표현할 수 있다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 곡면상의 한 점에 있어서 절삭공구의 바닥면상의 점과의 중첩높이  $dZ(i, j)$ 는 식 (6)과 같이 표현할 수 있다<sup>(11)</sup>.

$$dZ(i, j) = Z_S(i, j) - Z_T(i, j) \quad (6)$$

여기서  $Z_S(i, j)$ ,  $Z_T(i, j)$ 는 각각 공작물과 공구의 임의의 한 끝점의 Z 좌표값들이다. 이렇게 공작물과 공구 사이의 중첩값을 계산함에 의해 절삭되는 영역을 파악할 수 있다. 즉, 중첩값이 양의 값이 되면 절삭이 일어나는 부분이며, 음이 되면 절삭이 일어나지 않는 부분이다. 또한, 그 값은 절삭부하를 결정하는 절삭폭을 나타냄으로 이들의 중첩된 값을 절삭력 예측 모델에 대입하여 그때의 절삭력을 예측할 수 있게 된다.

또한, 식(5)에서  $R \cos \varphi d\varphi$ 는 중첩값으로 대체하여 사용함으로써 직접 적분을 하지 않고 바로 이산적인 값으로 계산을 할 수가 있다. 이 경우  $R \cos \varphi d\varphi$ 는 식 (7)과 같이 쓸 수가 있다.

$$R \cos \varphi d\varphi = dZ(i, j) + Z_T(i, j) - Z_T(i-1, j-1) \quad (7)$$

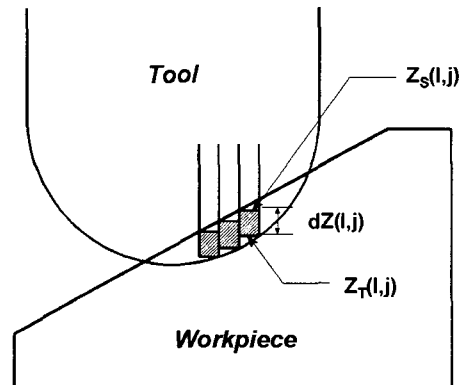


Fig. 3 Determination of cutting area from Z-map data

Fig. 4는 볼 엔드밀을 이용하여 30° 경사진 면을 가공할 때 가공의 방향에 따른 절삭영역을  $xy$  평면에 표현한 것이다. 그림에서 보이듯이 진하기가 다른 것은 절삭 깊이에 따라서 가공부하가 많이 걸리는 것을 표현하고 있다. 이 결과에서 보듯이 Z-map을 이용하여 중첩값을 검사함으로써 효과적으로 칩부하를 결정할 수 있고, 이 값을

이용하여 절삭력을 예측할 수가 있다.

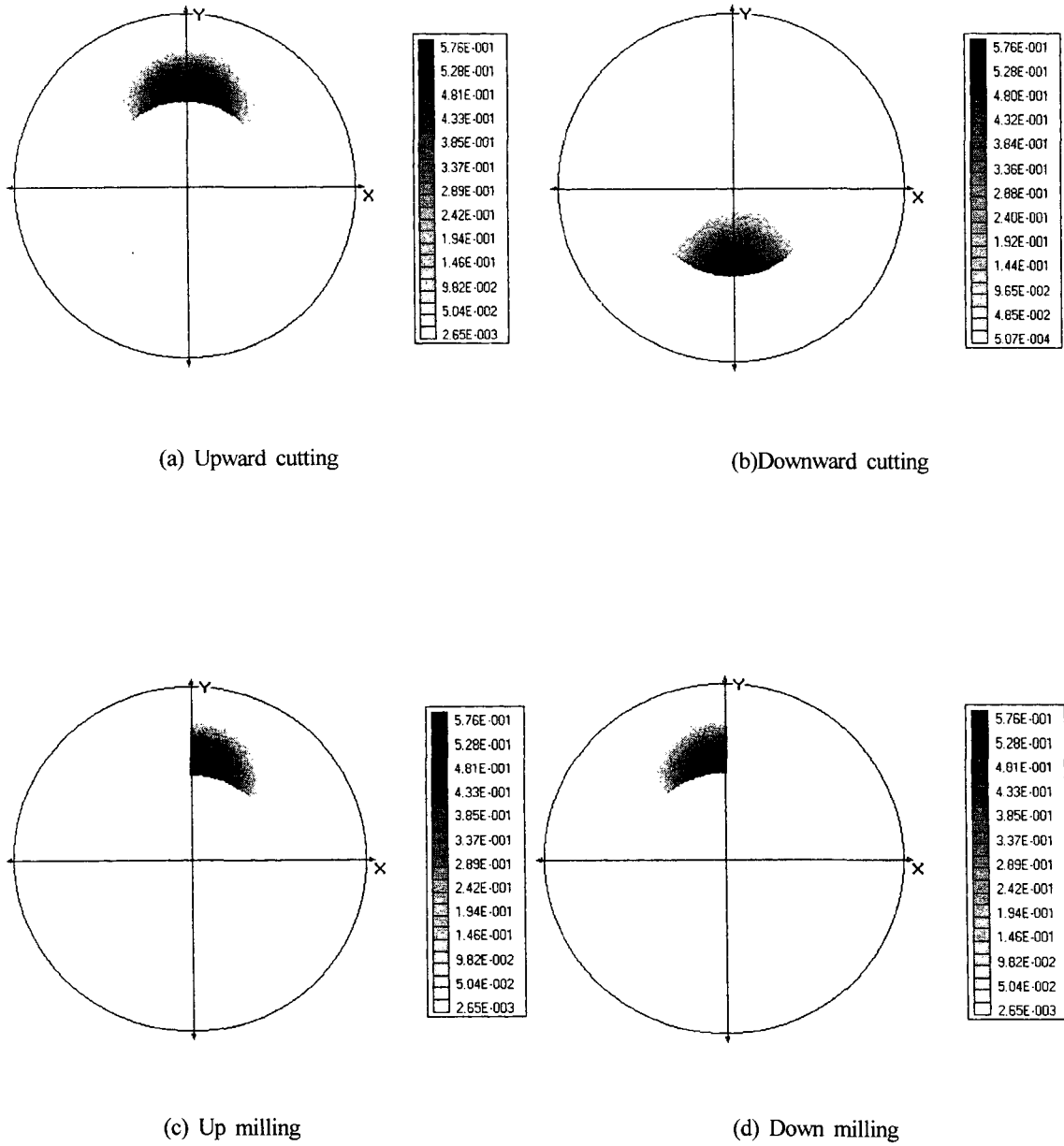


Fig. 4 Cutting area at tilting angle 30°, surface normal depth of cut 0.5mm

## 5. 실험 및 모델링 결과

### 5.1 실험방법

절삭력을 예측하는 모델을 구축하기 위해서는 먼저 모델에 사용되는 실험적 절삭기구 파라메터인  $K_T$ ,  $K_R$ ,  $m_T$ ,  $m_R$ 을 구하여야 한다. 이를 위해서 축방향 절삭깊이를 여러 값으로 변경하면서 슬로팅 절삭을 수행하였으며, 구하여진 모델의 검증은 위해서는 여러가지 각도의 경사 절삭에 대해서 상향 밀링(up milling), 하향 밀링(down milling)과 상방향 절삭(upward cutting), 하방향 절삭(downward cutting) 실험을 하였다.

실험에 사용한 공구는 직경 12mm의 2날 초경으로 된 볼 엔드밀이며, 비틀림 각도는  $30^\circ$  이다. 공작물의 재질은 금형 제작시 많이 사용하는 STD11을 사용하였다. 공구의 회전속도는 600rpm으로 가공하였다. 공작기계는 수직형 CNC 머시닝 센터(대우중공업(주) ACE-V45)를 사용하였고, 이때 발생하는 절삭력은 공구동력계(KISTLER 5019A)를 이용하여 측정하였다. 이 값은 A/D 보드를 통해서 PC에서 1kHz로 이산화하여 저장하였다.

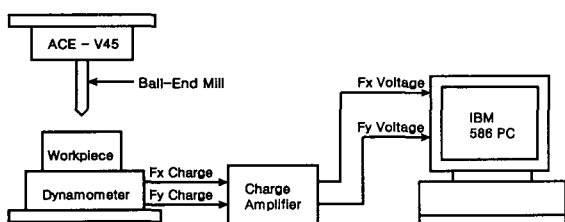


Fig. 5 Schematic diagram of the experimental system

### 5.2 실험결과

$K_T$ ,  $K_R$ 을 구하기 위하여 Table 1과 같이 여러 가지 축방향 절삭깊이에 대해서 이송속도를 변경하면서 슬로팅 절삭실험을 수행하였다. 이때 측정한 모든 절삭력에 대해 평균절삭력을 계산하고, 이 값들을 수치적으로 근사하도록 curve fitting을 하여 계수들을 모델링하였다. 식 (8)은 모델링된 계수들의 결과이다.

$$\begin{aligned} m_T &= 0.8264 \\ m_R &= 0.9256 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_T(\varphi) &= 30.6\varphi^3 - 930\varphi^2 + 290.8\varphi - 1442 \\ K_R(\varphi) &= -146.7\varphi^3 + 1087\varphi^2 - 7794\varphi + 3230 \end{aligned} \quad (8)$$

Table 1 Cutting conditions used in the model building

Test number	Axial depth of cut [mm]	Feed rate [mm/min]	Spindle speed(rpm)
1~6	0.3, 0.6, 1, 1.5, 2, 3	12	600
7~12	0.3, 0.6, 1, 1.5, 2, 3	25	600
13~18	0.3, 0.6, 1, 1.5, 2, 3	45	600
19~24	0.3, 0.6, 1, 1.5, 2, 3	60	600
25~30	0.3, 0.6, 1, 1.5, 2, 3	72	600
31~36	0.3, 0.6, 1, 1.5, 2, 3	90	600

$K_T$ 와  $K_R$  값을 절삭날의 위치각  $\varphi$ 에 따라 그림을 그려보면 Fig. 6과 같다.

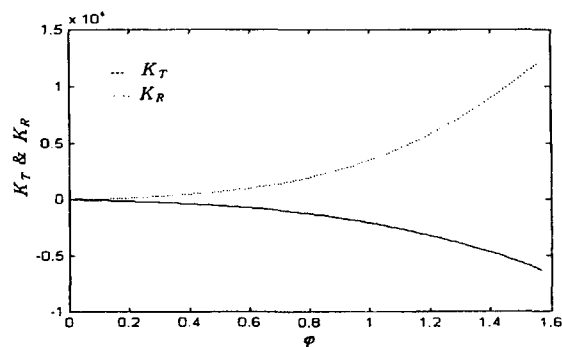


Fig.6  $K_T$ ,  $K_R$  corresponding to position angle  $\varphi$

볼 엔드밀링 가공에서 만들어진 절삭력 예측모델의 정확성을 평가하기 위하여 슬로팅 절삭을 할 때의 실험값과 예측된 절삭력을 비교한 것이 Fig. 7이다. 그림에서 알 수 있듯이 만들어진 예측 모델이 실제 절삭력을 잘 예측하고 있음을 볼 수가 있다.

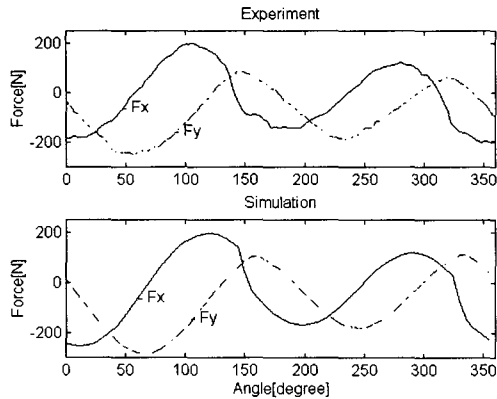


Fig. 7 Simulation result of slot cutting(Depth of cut : 1mm, Feed rate : 60mm/min, Spindle speed : 600rpm)

5.3 측벽가공에서의 검증

일반적으로 3차원 자유곡면의 가공에서는 슬로팅 절삭보다는 측벽가공(side cutting), 즉 상·하향 밀링과 상·하방향 절삭공정이 더 많이 이루어지고 있다. 모델의 검증을 위해서 아래의 Table 2와 같은 실험을 하였으며, 그 때의 실험값과 예측된 결과를 비교하여 나타낸 것이 Fig. 8이다.

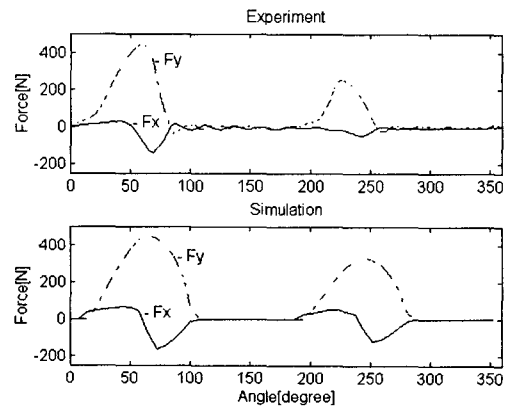
Table 2 Cutting conditions used in model test (coolant off, surface normal depth of cut : 0.5mm)

Test number	Type of cutting	Surface inclination angle[degree]	Feed rate [mm]
1~9	up milling	15, 30, 45	60, 100, 150
10~18	down milling	15, 30, 60	60, 100, 150
19~27	upward cutting	15, 30, 45	60, 100, 150
28~36	downward cutting	15, 30, 45	60, 100, 150

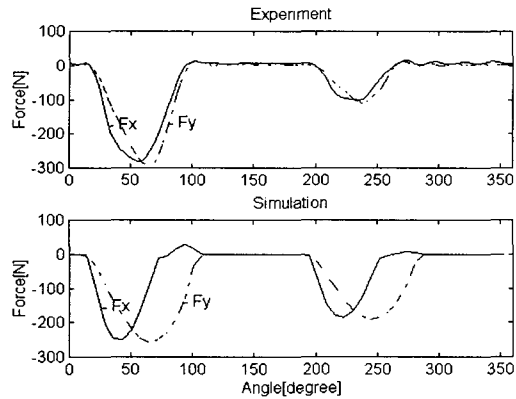
Fig. 8은 공작물의 측벽각도가 30°일 때의 절삭력

예측 결과를 나타내며, 이때 절삭깊이는 표면 법선방향으로 0.5mm이고, 날당 이송량은 0.05mm/tooth, 주축회전 속도는 600rpm으로 하여 실험하였다.

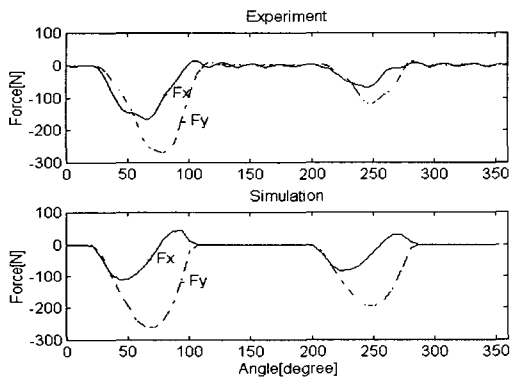
Fig. 8(a)는 상향밀링 가공때의 절삭력으로서, 공구의 한 회전당 절삭력을 실험값과 예측값으로 비교하고 있다. 그림에서 약 90°에서 180°사이, 그리고 270°에서 360°사이에서는 절삭이 일어나지 않고 있다. 이것은 가공물이 기울어져 있기 때문에 공구가 절삭하는 부분이 그 구간에서는 없기 때문이다. 그러나, 절삭되는 구간에서는 예측값이 약간 넓게 나타나 있는 것을 알 수 있다. 이것은 공구에 휨이 발생함에 따라서 실제 공작물을 파고 들어가는 량이 작기 때문이다. 또한 공구의 런아웃도 이론값보다 실험값이 더 많이 발생하였는데, 이는 가공중에 발생하는 공구의 런아웃을 정확하게 측정하지 못한데서 기인된 것으로 생각된다. Fig. 8(b)는 하향밀링을 보여주고 있는데, x, y방향의 절삭력은 모두 음의 값을 가지고 있고 그 크기도 비슷하다. Fig. 8(c)는 상방향 절삭을 보여주는데 실험값과 이론값은 거의 잘 일치하고 있으나, 역시 공구의 런아웃에서 어느 정도의 오차가 있는데 이는 런아웃 측정시 정적인 상태에서 하였고, 가공중에는 더 많은 공구의 런아웃과 처짐이 발생하기 때문에 오차가 발생한다. Fig. 8(d)는 하방향 절삭에서의 결과로서, y방향의 절삭력이 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이는 하방향 절삭시 공구의 절삭 영역이 공구의 중심에 가까이 있기 때문에 공구의 절삭 속도가 거의 0에 가까워진다. 따라서 공구에 걸리는 부하가 커지고 절삭력이 증가하게 된다. 이론 해석에서는 이러한 요소를 설명하기 어렵기 때문에 다소 절삭력 신호가 차이가 나게 된다.



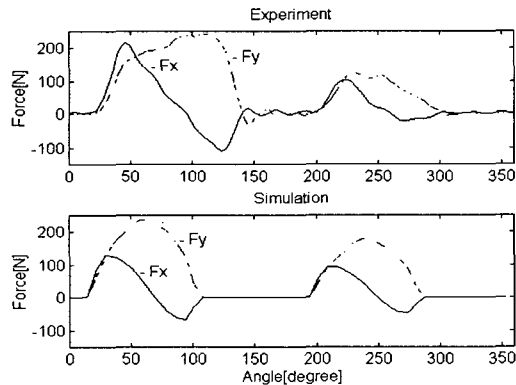
(a) Up milling



(b) Down milling



(c) Upward milling



(d) Downward milling

Fig. 8 Simulation results of side milling (Tilting angle : 30°, Depth of cut : 0.5mm, Feedrate 60mm/min, Spindle speed 600rpm)

## 6. 결론

본 연구에서는 CAD/CAM의 정보를 이용하여 절삭력을 미리 설계단계에서 예측할 수 있는 가상 절삭 시스템 (Virtual Machining System : VMS)의 절삭력 예측 모듈을 제안하였다. 이 방법은 볼 엔드밀링 과정에서 공구와 공작물의 접촉 부위의 높이의 차이를 이용하여 절삭 영역을 해석하는 것으로서, 이 절삭깊이를 공구와 공작물의 Z-map 데이터를 통해 얻을 수 있었다. 이것을 이용하여 절삭력을 계산하는데 필요한 미변형 칩 두께를 구해내었다. 이 값과 함께 실험을 통해 비절삭 저항 계수와 미변형 칩 두께에 의한 치수 효과를 고려하는 계수를 구하여 절삭력을 예측하는 역학모델을 구축할 수 있었다. 그리고 실험을 통해 절삭력 모델이 실제 절삭력을 모델링할 수 있음을 보였다. 그러나 공구의 휨, 공구 런아웃 측정의 오차, 하방향 절삭시 공구중심에서 절삭속도가 떨어지는 현상 등을 고려하지 못한 점 때문에 예측한 절삭력은 실제 절삭력과 절삭방향에 따라서 다소 차이가 발생하고 있다. 이런 문제점은 향후 공구의 휨에 의한 처짐량을 모델에 고려하고, 또한 공구의 Run-out 측정에 대한 신뢰성 등을 개선한다면 표면조도 모델과 함께 가상절삭시스템을 구성하는 모듈로서 이용이 가능할 것이다.

## 참고 문헌

1. F. Kimura, "Product and process modelling as a kernel for virtual manufacturing environment", Annals of the CIRP, Vol. 42, pp. 147-150, 1993.
2. S. Takata, M. D. Tsai, "A cutting simulation system for machinability evaluation using a workpiece model", Annals of the CIRP, Vol. 38, pp. 417-420, 1989.
3. S. Takata, "Model - based cutting simulation system", Memoirs of the School of Science & Engineering, No. 56, pp. 87-107, 1992.
4. E. Budak, Y. Altintas, "Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data.", ASME Journal of Manufacturing



- Science and Engineering, Vol. 118, No. 3, pp. 216-224, 1996.
5. E. J. A. Armarego, N. P. Deshpande, "Force prediction models and CAD/CAM software for helical tooth milling processes", International Journal of Production Reserach, Vol. 31, No. 8, pp. 1991-2009, 1993.
  6. Y. Altinas, A. Spence, "End milling force algorithm for CAD system", Annals of the CIRP, Vol. 40, pp. 31-34, 1991.
  7. H. Y. Feng, C. H. Menq, "The prediction of cutting forces in the ball-end milling process - I. Model formulation and model building procedure", Int. J. Mach. Tools Manufac., Vol. 34, No. 5, pp. 697-710, 1994.
  8. 박희덕, 양민양, "볼 엔드밀에 의한 곡면 가공의 절삭력 예측에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 13권, 3호, pp. 433-442, 1989.
  9. 김규만, 주종남, "Z-map을 이용한 임의의 절삭영역에서의 볼 엔드밀의 절삭력 예측에 관한 연구", 한국정밀학회 춘계논문집, pp. 125-129, 1996.
  10. 박천경, 맹희영, "원추팁 Ball Endmill의 3차원 곡면 절삭력계에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 9권, 4호, pp. 440-451, 1985.
  11. 송수용, 김석일, "Z-map 모델을 이용한 3차원 CNC 가공계획 및 절삭 시뮬레이션에 관한 연구", 한국정밀공학회 추계논문집, pp. 683-688, 1996.
  12. M. E. Martelloti, "An analysis of the milling process," Transactions of the ASME, Vol. 63, pp. 677-700, 1941.
  13. F. Koenigsberger, A. J. P. Sabberwal, "Chip section and cutting force during the milling operations," Annals of the CIRP, Vol. 10, 1960.