

# CAD 모델에 기초한 모사절삭을 통한 가상절삭시스템 개발

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

배 대 위(영남대 대학원), 고 태 조(영남대 공대), 김 회 슌(영남대 공대)  
Dae Wi Bae( Yeungnam Graduate School, Yeungnam Univ),  
Tae Jo Ko(Yeungnam Univ), Hee Sool Kim(Yeungnam Univ)

### ABSTRACT

In this research, we suggest a virtual machining system that can simulate cutting forces at the stage of design. Cutting forces, here, are modeled from the machanistic model of the ball end milling. 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 contact point and the workpiece at arbitrary position. The tool contact point is referred from the cutter location. From the experimental verification, we can simulate machining process effectively to the slot and the side cutting of ball end mill.

Key words : virtual machining(가상절삭), cutting force simulation(절삭력 예측), ball end milling(볼 엔드 밀링), free formed surface(자유곡면), z-map data(z-맵 데이터)

### 1. 서 론

컴퓨터 및 전자산업의 급속한 발전은 일상생활에서 가상현실(Virtual reality)라는 말을 생소하지 않는 단어로 만들면서 제조업에서도 이 개념이 도입되기 시작했다. CIM의 발전과 함께 가상현실과는 다소의 차이가 있는 가상제작(Virtual Manufacturing)이 1990년대 초에 들어서면서 개념이 정착되기 시작하였다[1]. 이는 제품의 생산라인을 설치하기 전에 제품생산의 전 공정을 사전에 모사 제작하여 봄으로써, 생산중에 발생할 문제점을 사전에 제거하고 최적의 생산방식과 물류유동 등을 결정하게 되는 모사 생산법이다. 따라서 제조설비의 구축에 있어서 혹시라도 발생할 위험요소를 사전에 제거하고 가장 최적의 생산라인을 구축하는데 필수적인 도구로 인식된다.

CAM에서 통상 체크되어지는 것은 기하학적 데이터로부터 가공이 제대로 되어지는 지에 관한 기하학적 체크만 이루어지기 때문에 실제의 가공이 이루어 지는 현상을 모사하지못한다. 즉 단순하게 정적인 데이터에 불과한 기하학적 데이터만 얻어지고, 실제 가공되어지는 상황에 해당하는 각종 정보를 얻지 못하기 때문에 최적의 절삭 조건을 선정하기 위한 정보로서의 활용이 불가능하다.

이런 관점에서 만약 CAD와 CAM 데이터로부터 사전에 실제 가공하는 것과 똑같이 가상절삭시스템(Virtual Machining System : VMS)을 구현하게 되면 절삭 가공의

Trial & Error를 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[2][3].

본 연구에서는 볼 엔드밀링 공정에서 슬로팅 가공 및 자유곡면 가공에서의 상향, 하향, 상방향 그리고 하방향 절삭에서의 절삭력을 예측하는 모델을 구축하고 CAD 모델링에서 얻을 수 있는 Z-map 데이터로써 절삭 부위를 해석하여 그 부위에서 절삭력을 계산하는 방법을 채택하고 있다. 그후 화면에 절삭되는 과정 및 절삭력을 표출하고자 한다.

### 2. 이론 해석

#### 2.1 CAD 모델링

수요자들의 다양한 요구에 기인한 제품수명의 단축경향은 제품의 설계분야와 가공 분야에 컴퓨터 응용 기술을 적극적으로 활용하게 된 계기를 만들어 주었다. 이에 따라 그 동안 수많은 CAD/CAM 시스템들이 개발되어 왔고, 그와 더불어 3차원 제품의 형상을 효과적으로 표현하기 위한 방법으로 곡면모델러(surface modeler) 및 솔리드모

델러(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), 분해모델(decomposition model) 등과 같은 형상 모델러들을 사용하고 있다. Surface 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.

본 연구에서는 곡면모델러인 micro DUCT를 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 Z좌표값들을 저장하는 형태의 자료 구조를 가지고 있다. 따라서 Z-map의 자료 구조는 기본적으로 2차원 배열로 주어진다. 이러한 Z-map 모델을 이용하여 원하는 정밀도를 얻기 위해서 많은 기억 용량과 계산 시간이 요구되지만, 자료구조가 단순하면서 실제 입체형상을 매우 효과적으로 표현할 수 있기 때문에 많이 이용되고 있다.

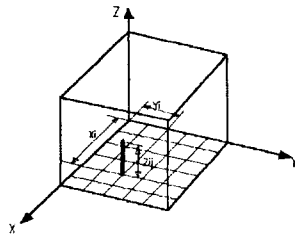


Fig.1 Concept of Z-Map model

이러한 Z-map 데이터는 micro DUCT에서 구현한 도형 데이터로부터 기하학적인 정보를 이용하여 표현할 수 있다.

## 2.3 절삭력 예측 모델링

기존의 밀링 가공의 절삭력 예측을 위한 연구를 보면 Budak 등은 orthogonal cutting data를 이용하여 세 직교 좌표에서 밀링의 절삭력 계수를 예측하였으며[5], Armarego는 헬릭스 밀링 과정을 위한 절삭력 예측 모델 및 CAD/CAM 소프트웨어를 개발하였으며[6], Altintas는 CAD 시스템을 위한 앤드밀링의 절삭력 알고리즘을 개발하였고[7], Feng 등은 미소 절삭날 개념으로 절삭력을 예측했으며[8], 국내의 박 등은 2차원 절삭 데이터를 이용하여 볼 앤드밀의 기하학적 형상 및 절삭 조건이 주어졌을

때 모든 볼 앤드밀 가공에서의 절삭 기구를 해석하고 절삭력 모델을 구현하고자 하였으며[9], 박 등이 3차원 절삭 이론과 실험계수를 이용하여 원추톱 볼앤드밀에 대한 절삭력 해석을 하였으며[10], 김 등은 Feng의 이론을 도입하여 Z-map을 이용하여 임의의 절삭영역에서 볼 앤드밀의 절삭력을 예측하였다[11].

절삭력 예측 모델은 Feng의 논문과 김 등에 기재된 절삭력 예측 알고리즘을 응용하였는데, 이는 절삭날을 여러 개의 미소절삭날로 나누고 각각의 미소절삭날에서의 절삭 기구를 2차원으로 근사하여 각각의 미소절삭날에서의 미소절삭력을 구한 후에 이들을 절삭날을 따라 적분함으로써 임의의 공구회전각에서의 절삭력을 예측하는 방법을 제시하였다.

미변형칩 두께에 의한 치수효과를 고려한 절삭력 예측의 간단한 식은 다음과 같다.

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

여기서 F는 주절삭력이고, b는 절삭 넓이이며, t는 미변형 칩두께이고, K는 비례상수로서 절삭폭과 미절삭 칩 두께 이외의 변수들의 영향을 포함하므로 미소절삭날의 위치의 함수로 표현할 수 있으며, 그리고 m은 치수효과 특성을 나타내는 지수로 공작물에 따라 결정되는 상수로 가정한다.

미소절삭날의 위치를 나타내기 위하여 축방향으로의 회전위치각은  $\theta$ 이고, 공구선단에서의 미소절삭날의 위치각은  $\phi$ 로 나타내었다.

절삭날을  $\phi$  방향의 미소절삭날로 나누어 미소 절삭날들에서의 절삭력을 합하여 계산한다. 결과적으로 n개의 절삭날이 있는 공구날의 i 번째 미소절삭날의 축방향회전 위치각은 다음과 같다.

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

$\beta$ ; helix angle

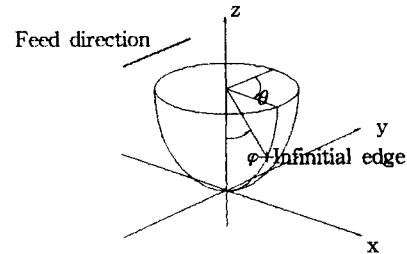


Fig.2 Coordinate used in model

미소절삭날에 작용하는 접선방향 미소절삭력과 반경방향 미소절삭력은 다음과 같이 표현된다.

$$dF_T = K_T(\phi)[f \sin\theta_i(\theta, \phi)]^{m_T} R \cos\phi d\phi \quad (3)$$

$$dF_R = K_R(\phi)[f \sin\theta_i(\theta, \phi)]^{m_R} R \cos\phi d\phi$$

여기서 R은 볼 앤드밀의 반경을 의미한다. 또한 치수효과와 특성을 나타내는 지수  $m_T$ ,  $m_R$ 는 공작물에 따라 결정되는 상수로 가정한다.  $K_T$ ,  $K_R$ 는 절삭폭과 미절

삭집 두께 이외의 절삭기구 변수들의 영향을 포함하므로 미소절삭날 위치의 함수로 표현할 수 있다.

$$K_T(\varphi) = a_0 + a_1\varphi + a_2\varphi^2 + a_3\varphi^3 \quad (4)$$

$$K_R(\varphi) = b_0 + b_1\varphi + b_2\varphi^2 + b_3\varphi^3$$

따라서 임의 순간의 절삭력의 합을 구하기 위해 미소 접선방향·반경방향의 힘을 xy 좌표계로 환산한 후, 절삭에 참여하는 미소 절삭날에 걸리는 절삭력들을 합하여 절삭력의 합을 구할 수 있다.

$$F_T(\theta) = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} [-K_T(\varphi)[f \sin \theta_i]^{m_T} \cos \theta_i - K_R(\varphi)[f \sin \theta_i]^{m_R} \sin \theta_i] R \cos \varphi d\varphi \quad (5)$$

$$F_R(\theta) = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} [K_T(\varphi)[f \sin \theta_i]^{m_T} \sin \theta_i - K_R(\varphi)[f \sin \theta_i]^{m_R} \cos \theta_i] R \cos \varphi d\varphi$$

위 식(5)에서 공구의 run out을 고려하는 parameter 를 넣어 절삭력을 계산하였다.

### 2.4 절삭영역 해석

가공이 진행됨에 따른 각각의 위치 (x,y)에서의 공구의 높이와 공작물의 높이를 비교하여 공구와 공작물의 접촉 위치를 얻을 수 있으며 이를 공구 중심을 원점으로 하고 이송방향을 y축으로 하는 xy평면에서의 위치 데이터로 변환함으로써 절삭중의 절삭 영역을 쉽게 표현할 수 있다.

곡면 모델러인 micro DUCT에서 주어진 Z-map 데이터에 대해서 볼 엔드밀의 축방향의 증가에 따른 미소절삭날의 절삭 참여여부를 결정하는 과정이 필요하다.

Fig.3 에서 보는 바와 같이 곡면상의 한 점에서 절삭공구의 바닥면상의 점의 중첩높이 dZ(i,j)는 다음과 같이 표현할 수 있다[4].

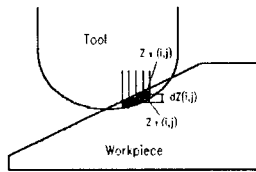


Fig.3 Determination of Cutting Area from Z-map data

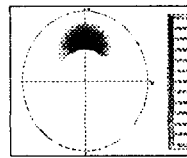
$$dZ(i,j) = Z_S(i,j) - Z_T(i,j) \quad (6)$$

여기서  $Z_S(i,j)$ ,  $Z_T(i,j)$ 는 각각 공작물과 공구의 어떤 한점들의 끝점의 Z좌표값들을 의미한다. 이렇게 공작물과 공구간의 중첩된 값으로 절삭되는 영역을 파악할 수 있다. 이들의 중첩된 값을 절삭력 예측 모델에 대입하여 그때의 절삭력을 예측할 수 있게된다.

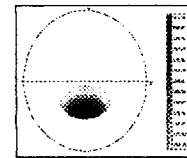
여기에서, 구하여진 식(5)에서  $R \cos \varphi d\varphi$ 는 z-map 데이터에서의 값을 이용하여 절삭력을 예측하는데 사용한다. 또한 Fig.3 에서 부터

$dZ(i,j) = Z_S(i,j) - Z_T(i-1,j-1)$  을 이용하여 절삭력 계산에서 중첩된 구간을 제거하는 알고리즘의 삽입이 중요하다.

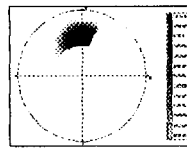
다음의 그림들은 각각의 절삭방향에서의 절삭영역을 xy 평면에 표현하였으며, 절삭깊이에 따라 진하기를 달리하였다.



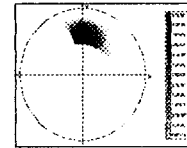
(a) Upward cutting



(b) Downward cutting



(c) Up milling



(d) Down milling

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

### 3. 실험

모델에 사용되는 실험적 절삭기구 파라미터  $K_T$ ,  $K_R$ ,  $m_T$ ,  $m_R$ 를 구하기 위하여 다양한 축방향 절삭깊이에서의 슬로팅 절삭을 수행하였으며, 구하여진 모델의 검증을 위해서 다양한 각도에서 상향 밀링(up milling), 하향 밀링(down milling)과 상방향 절삭(upward cutting), 하방향 절삭(downward cutting)을 실험하였다.

실험에 사용한 공구는 직경12mm 2날 볼엔드밀을 사용하였으며, 재질은 초경이고 helix angle은 30° 이다. 공작물의 재질은 금형 제작시 많이 사용하는 SKD11을 사용하였다. 공구의 절삭 속도는 600rpm으로 가공하였다. 공작기계는 대우중공업에서 제작한 vertical CNC machining center ACE-V45를 사용하였으며, 절삭력은 KISTLER사의 공구동력계 5019A type을 사용 하였으며, DT2833 A/D board를 통해 pc에서 1kHz로 이산화하여 저장하였다.

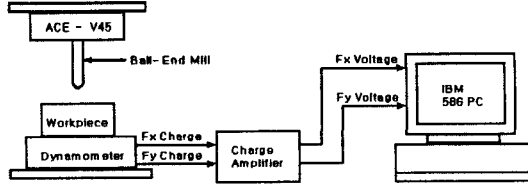


Fig.5 Experimental set up

3.1 실험에 의해 구해진 결과

$K_T$ ,  $K_R$ 을 구하기 위하여 Table. 1의 여러 가지 축방향 절삭깊이에의 슬로팅 절삭 실험을 수행하였다.

Table. 1 슬로팅 가공시 절삭조건

Test number	Axial depth of cut[mm]	Feed rate [mm/min]	Feed per tooth [mm/tooth]
sl_01~18	0.3, 0.6, 1, 1.5, 2, 3	12,25,45	0.01,0.0208, 0.0375
sl_19~36	0.3, 0.6, 1, 1.5, 2, 3	60,72,90	0.05,0.06, 0.075

모든 조건에서의 평균절삭력을 계산하고 이를 계산된 값에 근사하도록 curve fitting을 이용하여 계수들을 계산하였다. 구하여진 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 m_T &= 0.9312 \\
 m_R &= 0.8654 \\
 K_T(\varphi) &= -1441\varphi^3 - 20720\varphi^2 + 34010\varphi - 9032 \\
 K_R(\varphi) &= 8503\varphi^3 - 38440\varphi^2 + 43890\varphi - 10530
 \end{aligned} \quad (11)$$

절삭날의 위치각  $\varphi$ 에 따른  $K_T$ 와  $K_R$ 의 변화는 다음 그림과 같다.

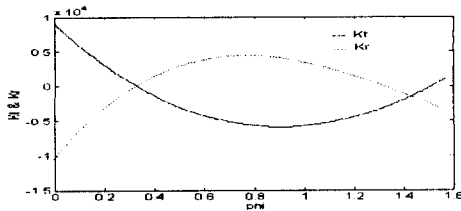


Fig.6  $K_T$ ,  $K_R$  corresponding to position angle  $\varphi$

볼앤드밀 절삭력 예측모델을 평가하기 위하여 다양한 축방향 절삭깊이에서의 슬로팅 절삭시 실험값과 예측된 절삭력을 비교하였다. Fig.7 에서 실제 절삭력과 예측된 절삭력이 거의 일치됨을 보여준다.

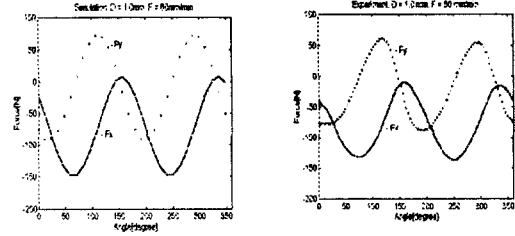


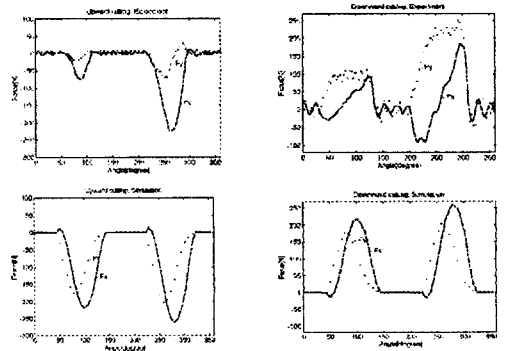
Fig.7 슬로팅 절삭시 예측된 절삭력과 실제 절삭력의 비교  
축방향 절삭깊이 1mm 이송량 60mm/min  
주축회전 속도 600rpm

3.2 측벽가공에서의 검증

일반적으로 3차원 자유곡면의 가공에서는 슬로팅 절삭보다는 측벽가공(side cutting), 즉 상·하향 밀링과 상·하방향 절삭 공정이 더 많이 이루어지고 있다. 또한 이 과정에서 발생하는 공구의 변형이 공작물의 형상오차를 크게 발생시키기 때문에 절삭력 예측이 필요불가결하다. 모델의 검증을 위해서 아래의 Table 2.과 같은 실험을 하였으며, 그 때의 실험값과 예측된 결과를 비교하였다.

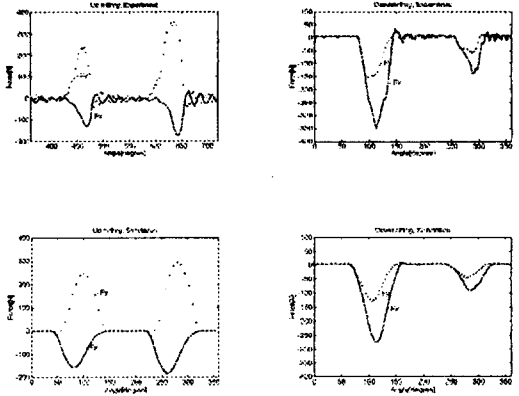
Table 2. 측벽 가공시 절삭조건(coolant off, surface normal depth of cut : 0.5mm)

Test number	Type of cutting	Surface inclination angle[degree]	Feed per tooth [mm/tooth]
si_01~09	up milling	15, 30, 45	0.05, 0.083, 0.125
si_10~18	down milling	15, 30, 60	0.05, 0.083, 0.125
si_19~27	upward cutting	15, 30, 45	0.05, 0.083, 0.125
si_28~36	downward cutting	15, 30, 45	0.05, 0.083, 0.125



(a) Upward cutting

(b) Downward cutting



(c) Up milling (d) Down milling

Fig.8 측벽 절삭시 예측된 절삭력과 실제 절삭력의 비교  
측방향 절삭깊이 0.5mm 이송량 60mm/min  
주축회전 속도 600rpm

4. 결론

본 연구에서는 CAD data로 부터 얻어진 z-map data를 이용하여 절삭영역을 해석하는 알고리즘을 구축하였으며, 다양한 측방향 깊이의 슬로팅 절삭실험을 통해 비절삭 저항 계수인  $K_T$ ,  $K_R$ 을 curve fitting을 통해 구했으며, 치수효과를 나타내는  $m_T$ ,  $m_R$ 은 수치적으로 계산하여 구하였다. 그 절삭영역에서의 절삭력 예측 모델을 통해 다양한 측방향 깊이의 슬로팅 가공과 다양한 측벽가공의 절삭력을 예측하였으며, 실험에 의해 구하여진 결과와 비교하였다.

본 연구의 지속적인 개발로 인해 다품종 소형화 되어가고 무인 자동화 되어 가는 생산 환경에서 제품의 설계에서 부터 생산까지 소요되는 리드 타임을 최소화 하여 생산성을 향상 시킬 수 있을 뿐 아니라, 제품의 제작에서 빈번히 발생하는 시작 가공 및 수정가공을 통한 비용의 손실을 최소화 할 수가 있다. 또한 제품 제작과정의 절삭력 등을 미리 예측 가능하기 때문에 최적의 절삭조건으로 공작기계를 운용할 수 있기 때문에 다가오는 정보화 시대의 기계가공 기술로서 가장 각광 받는 기술이 될 것이다. 이 기술은 기존 CAM 소프트웨어의 모듈로써 제공됨에 의해 현재 선진국에 비하여 많이 뒤져 있는 CAM 분야의 기술을 동시에 한 단계 승화시키는데 결정적인 역할을 할 것으로 기대된다.

후기

본 연구는 과학재단 “96 핵심전문연구비” 지원에 의하여 수행하고 있습니다.

1. F. Kimura, 1993, "Product and Process Modelling as a Kernel for virtual Manufacturing Environment", CIRP annals, Vol 42, 147-150.
2. S. Takata, M. D. Tsai, 1989, "A Cutting Simulation System for Machinability Evaluation Using a Workpiece Model", CIRP annals, Vol 38, 417-420.
3. S. Takata, 1992, "Model - Based Cutting Simulation System, Memoirs of the Science & Engineering", No 56, 87-107.
4. 송수용, 김석일, 1996, "Z-map 모델을 이용한 3차원 CNC 가공계획 및 절삭 시뮬레이션에 관한 연구", 한국정밀공학회 추계논문집, 683-688.
5. E. Budak, Y. Altintas, 1996, "Prediction of Milling Force Coefficients from Orthogonal Cutting Data.", Trans ASME, Vol 118, 216-224.
6. E. J. A. Armarego, N. P. Deshpande, 1993, "Force prediction models and CAD/CAM software for helical tooth milling processes", Int. J. Prod. Res., Vol 31 No 8, 1991-2009.
7. Y. Altintas, A. Spence, 1991, "End Milling Force Algorithm for CAD System", CIRP annals, Vol 40, 31-34.
8. H. Y. Feng, C. H. Menq, 1994, "The Prediction of Cutting Forces in the Ball-End Milling Process - I. Model Formulation and Model Building Procedure". Int. J. Mach. Tools Manufact, Vol 34 No 5, 697-710.
9. 박희덕, 양민양, 1989, "볼 엔드밀에 의한 곡면 가공의 절삭력 예측에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 13권 3호, 433-442.
10. 김규만, 주종남, 1996, "Z-map을 이용한 임의의 절삭영역에서의 볼 엔드밀의 절삭력 예측에 관한 연구", 한국정밀학회 춘계논문집, 125-129.
11. 박천경, 맹희영, 1985, "원추팁 Ball Endmill의 3차원 곡면 절삭력제에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, Vol 9 No 4, 440-451.