

## 가상 밀링에서 이송속도를 고려한 가공 검증 모델

백대균\*, 고태조\*\*, 김희술\*\*

### Machining Verification Model Considering Feed Rate for Virtual Milling

Dae Kyun Baek\*, Tae Jo Ko\*\* and Hee Sool Kim\*\*

#### ABSTRACT

This paper presents a new model of NC verification in NC milling using z-map. The model can describe the motion of machine tool like a real machine effectively. The model uses x, y, and z directional feed rate as well as cutting data for modeling Z-map of workpiece. The model verifies the over-cut, the under-cut and the surface topography using NC codes and cutting conditions. To investigate the performance of the model, simulation study was carried out. As the results, the model gave the geometry accuracy of workpiece, the surface topography, and the chip loads.

Key Words : Virtual Milling (가상 밀링가공), Verification(검증), Z-map, Over-cut(과절삭), Under-cut(미절삭), Surface topography(표면형상)

#### 1. 서론

CAD/CAM 기술의 발달에 따라 가상공작기계 (Virtual machine tools)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>[1]</sup> 이 연구는 실제로 작업하기 전에 공작기계에서 발생할 수 있는 상황들을 시뮬레이션하여 오차 없이 생산성을 높이는 것이 목적이다. 즉, 절삭력, 표면조도, 칩핑, 열변형 그리고 공구처짐 등을 미리 예측하여 최상의 조건에서 가공하는 것이다. 그 중에서 CNC 밀링머신은 금형가공 뿐만 아니라 각종 부품가공 등 생산현장에 광범위하게 사용되고 있다. CNC밀링머신을 이용하여 자유곡면을 가공할 때 먼저 공구의 직경, 절삭조건 등을 고려

하여 CAM시스템에서 NC데이터를 생성하고, 이 NC데이터를 이용하여 공작물을 가공한다. 그러나 CAM에서 모델링된 형상과 실제로 가공된 공작물을 정확하게 일치하지 않는 경우가 있다. 그 이유는 공구직경에 따라 공작물의 모서리 부분에 간섭이 발생하고, 공구의 경로에 따라 표면거칠기가 다르게 나타나기 때문이다. 또한 절삭력에 의한 공구 처짐과 강제진동으로 미절삭(Under-cut)과 과절삭(Over-cut)이 발생한다.

따라서, 본 연구에서는 CAD/CAM에서 생성된 NC 코드를 이용하여 가상 밀링을 위한 이송속도를 고려한 가공 검증모델을 개발하고자 한다. 현재 CAD/CAM 가공에서 NC 공구경로의 검증은 Z-map

2002년 4월 8일 접수

\* Visiting scholar in Louisiana State University

\*\* 영남대학교 기계공학부

모델을 이용하고 있다. Z-map 모델<sup>2,3)</sup>은 NC 공구경로의 검증<sup>4-8)</sup>, CAPP(Computer Aided Process Planning), 금형가공 그리고 공구경로 생성 등의 다양한 분야에 적용되고 있다. Z-map 모델은 간단한 데이터 구조로 인하여 옵션팅, 블렌딩 등과 같은 곡면조작이 편리하고, 계산이 강건한 장점이 있으나, 정밀도 향상을 위해서는 기억용량이 과다하고, 계산시간이 긴 단점이 있다. 그러나 최근의 컴퓨터 기술의 발전 추세로 보아 이러한 문제는 별로 심각하지 않을 것으로 예상된다.

이제까지의 검증모델은 실제로 공작기계에서 일어나는 절삭현상과는 다르게 단지 x, y, z의 좌표값을 이용하여 절삭후의 기하학적 형상만을 검증하였다. 즉, 이송속도를 고려하지 못하고 단지 좌표값으로부터 절삭되는 체적을 구한 후 공작물의 Z-map으로부터 구한 체적을 소거하였다<sup>4-8)</sup>. 이러한 방법은 NC데이터의 한 블록에서 절삭되는 총체적을 구하여 체적소거법에 적용하므로 낱당 칩부하를 구하기 어렵고 칩핑을 예측하기도 어렵다. 그러나 밀링가공에서 낱당 과도한 절삭은 절삭력의 증가로 공구휨이 발생하여 미절삭과 과절삭의 원인이 된다. 또한 아주 심한 낱당 절삭은 칩핑의 원인이 되어 심각한 문제를 야기한다.

이러한 점에 반하여 본 연구에서는 Z-map 모델을 이용하여 이송속도를 고려하여 낱당 절삭체적을 구하여 체적소거법을 적용하고자 한다. 따라서 낱당 절삭체적을 구하여 실제 밀링공정과 유사한 방법으로 검증을 하게 된다.

## 2. 가공 검증 모델링

가상 CNC밀링가공의 모델링을 위해서 본 연구에서는 Z-map을 사용하였다. Z-map은 비매개변수형 곡면의 특수한 형태로서, xy 평면(Domain)에 정의된 격자점(Grid-point)에서 높이값을 2차원 배열  $z(i, j)$  형식으로 저장한다. 본 연구에서는 가공을 검증하기 위해 식 (1)과 같이  $z(i, j)$ 를 정의하였다.

$$z(i, j) \text{ with } x(i) = \Delta x \cdot i \text{ and } y(j) = \Delta y \cdot j \quad (1)$$

여기서  $i = 0, 1 \dots m, j = 0, 1 \dots n$

생성하려는 x 방향의 데이터 수에 관련된 m과, y 방향의 데이터 수에 관련된 n은 다음과 같다.

$$\Delta x = \frac{l_x}{m}, \quad \Delta y = \frac{l_y}{n} \quad (2)$$

여기서,  $l_x, l_y$ 는 각각 x, y 방향의 공작물의 길이,  $\Delta x, \Delta y$ 는 각각 x, y 방향의 격자간격(Grid-interval)을 나타낸다.

3차원 형상의 공작물을 가공하기 위하여 CAM에서 NC데이터를 생성하는데, 이 가공 데이터는 직선가공 데이터(G코드에서는 G01)로 이루어져 있다. CAM에서 생성된 NC데이터의 임의의 한 블록을 직경 D(mm)의 엔드밀로 직선 절삭하는 경우는 Fig. 1과 같이 표현할 수 있다. 가공은 임의의 시작점  $(x_0, y_0, z_0)$ 에서 종점  $(x_1, y_1, z_1)$ 으로 절삭한다. 한 블록의 절삭경로에서 공구 끝부분의 중심점  $(x(i_p), y(j_p), z(i_p, j_p))$ 에서 공구형상의 Z-map을 구하면 다음과 같다.

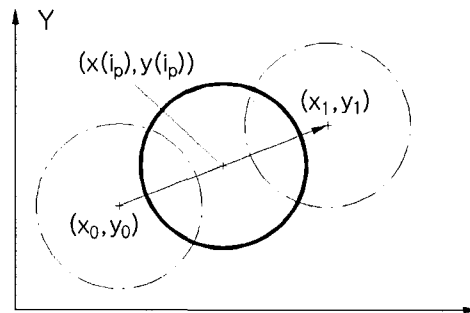


Fig. 1 Plane view of an end mill during cutting one block(x-y plane)

먼저 점  $(x_0, y_0, z_0)$ 에서  $(x_1, y_1, z_1)$ 까지 이송 속도  $F(mm/min)$ 로 절삭할 때, 두 점간의 이동거리  $ds(mm)$ 는 다음과 같다.

$$ds = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2} \quad (3)$$

이 블록에서 공구의 x 방향의 속도  $v_x(mm/sec)$ , y 방향의 속도  $v_y(mm/sec)$ , 그리고 z 방향의 속도

$v_z$ (mm/sec)는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{(x_1 - x_0)F}{ds \cdot 60}, & v_y &= \frac{(y_1 - y_0)F}{ds \cdot 60} \\ v_z &= \frac{(z_1 - z_0)F}{ds \cdot 60} \end{aligned} \quad (4)$$

그림에서 보는 것과 같이 한 블록의 절삭경로 중에서 임의의 위치에서 절삭하고 있는 공구의 중심좌표  $(x(i_p), y(j_p), z(i_p, j_p))$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x(i_p) &= v_x \cdot dt \cdot i_k + x_0, & i_k &= 1 \cdot \dots \cdot id, \\ y(j_p) &= v_y \cdot dt \cdot i_k + y_0, & i_k &= 1 \cdot \dots \cdot id, \\ z(i_p, j_p) &= v_z \cdot dt \cdot i_k + z_0, & i_k &= 1 \cdot \dots \cdot id \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,  $id = \frac{ds \cdot 60}{dt \cdot F}$ ,

$$i_p = \frac{m \cdot (v_x \cdot dt \cdot i_k + x_0)}{l_x},$$

$$j_p = \frac{n \cdot (v_y \cdot dt \cdot i_k + y_0)}{l_y},$$

$dt$ 는 샘플링시간이다.

식 (5)에서 살펴보면 한 블록의 가공에서 출발점  $(x_0, y_0, z_0)$ 에서는 인덱스  $i_k$ 가 1이고 종점에서 인덱스  $i_k$ 는  $id$ 이다. 즉, 한 블록을 가공할 때  $id$  값만큼 공구표면의 Z-map을 시뮬레이션하여 체적소거법에 적용한다. 각 위치에서 구한 Z-map은 체적소거법을 적용하여 공작물의 Z-map을 구한다. 샘플링 시간  $dt$ 는 시뮬레이션 간격을 결정하는데 짧으면 계산시간이 길어지고 크게 하면 정확도가 떨어진다. 기존의 연구에서는 이송속도를 이용하지 않고 출발점과 종점으로부터 공구궤적을 구하여 모델링하였으나, 본 연구에서는 이송속도를 이용하여 모델링하였다. 만약 샘플링시간  $dt$ 로 공작물과 공구의 상대변위를 구하면 동적인 검증모델로 확장이 가능하다. 또한,  $dt$ 를 한 날이 절삭하는 동안의 시간과 동일하게 하면 날당 절삭해야할 칩부하(Chip load)를 예측할 수 있다.

공구의 중심좌표  $(x(i_p), y(j_p), z(i_p, j_p))$ 에서 공구의 표면은 공구의 직경내에서 정의되는데 Fig. 2에 나타난 엔드밀의 종류에 따라 다음과 같다.

### 2.1 평엔드밀(Flat end mill)

평엔드밀은 바닥이 평평하기 때문에 공구의 반경만으로 공구를 정의할 수 있다. 공구의 반경을  $g$ 라 할 때 공구의 중심점  $(x(i_p), y(j_p), z(i_p, j_p))$ 에서 공구의 Z-map은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} z(i, j) &= z(i_p, j_p), \\ \text{for } h &\leq g, i_1 < i < i_2, j_1 < j < j_2 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,  $h = \sqrt{x(i)^2 + y(j)^2}$ ,

$$i_1 = i_p - \frac{g}{\Delta x}, \quad i_2 = i_p + \frac{g}{\Delta x},$$

$$j_1 = j_p - \frac{g}{\Delta y}, \quad j_2 = j_p + \frac{g}{\Delta y}$$

식 (6)에서  $i_1, i_2, j_1, j_2$ 는 공구의 직경내에서 공구의 표면을 모델링하기 위한 인덱스변수이다. 식 (6)에서 보는 것과 같이 평엔드밀의 Z-map은 공구직경내에서 절삭공구의 z좌표와 같다.

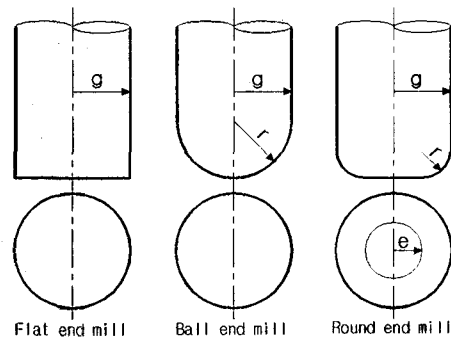


Fig. 2 The types of end mills

### 2.2 볼엔드밀(Ball end mill)

볼엔드밀은 구의 형상이다. 공구의 반경을  $r$ 이라 할 때 공구직경내에서 공구의 표면은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} z(i, j) &= r - \sqrt{r^2 - h^2} + z(i_p, j_p) \\ \text{for } h &\leq g, i_1 < i < i_2, j_1 < j < j_2 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,  $h = \sqrt{x(i)^2 + y(j)^2}$ ,

$$i_1 = i_p - \frac{g}{\Delta x}, \quad i_2 = i_p + \frac{g}{\Delta x},$$

$$j_1 = j_p - \frac{g}{\Delta y}, \quad j_2 = j_p + \frac{g}{\Delta y}$$

### 2.3 라운드 엔드밀(Round end mill)

라운드 엔드밀은 평엔드밀의 가장자리를 일정한 반경으로 라운드한 공구다. 공구의 라운드 반경을  $r$ 이라 하고,  $r$ 과 바닥의 평평한 부분의 반경을  $e$ 라 할 때 공구의 곡면은 다음과 같다.

$$z(i, j) = z(i_p, j_p) \quad \text{for } h \leq e, i_1 < i < i_2, j_1 < j < j_2 \quad (8)$$

$$z(i, j) = r - \sqrt{r^2 - (h - e)^2} + z(i_p, j_p) \quad \text{for } e < h \leq e + r, i_1 < i < i_2, j_1 < j < j_2 \quad (9)$$

여기서,  $h = \sqrt{x(i)^2 + y(j)^2}$ ,

$$i_1 = i_p - \frac{g}{\Delta x}, \quad i_2 = i_p + \frac{g}{\Delta x},$$

$$j_1 = j_p - \frac{g}{\Delta y}, \quad j_2 = j_p + \frac{g}{\Delta y}$$

### 3. 가공물 형상의 시뮬레이션

2장과 같은 모델링 절차로 CAM에서 생성된 NC데이터로부터 가공물 형상을 시뮬레이션할 수 있다. Fig. 3과 같이 CAM에서 NC 데이터를 생성할 때의 공구형상 정보와 공작물의 치수를 검증 모델에 입력하고, CAM에서 생성된 NC파일에서 직선보간(G01)의  $x, y, z$  좌표값과 이송속도를 입력한다.

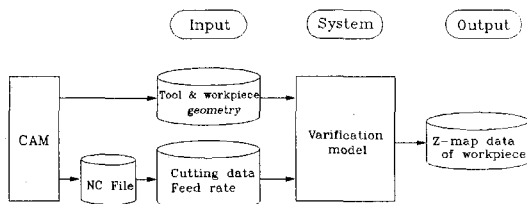


Fig. 3 Schematic diagram of overall configuration

이 입력 데이터로부터 2장의 식 (1)에서 식 (9)로 구성된 본 연구에서 제안한 검증모델을 이용하여 가공물의 형상을 시뮬레이션 한다.

검증모델을 적용하기 위하여 CAD시스템을 이용하여 전자손목시계를 Fig. 4와 같이 모델링하였다. Fig. 4의 자유곡면을 CAM에 입력하여 황삭, 정삭의 NC코드를 생성하여 파일에 저장하였다. NC 데이터와 절삭조건으로부터 정삭의 가공물 형상을 Fig. 3과 같이 Z-map 데이터를 구하여 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 보는 것과 같이 NC파일을 이용하여 본 모델에서 구한 공작물의 Z-map 형상과 본래의 CAD형상은 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나 경우에 따라 곡면에 존재하는 최소 곡률보다 반경이 더 큰 공구를 선택하거나 CAM에서 생성된 NC 데이터의 오류 등으로 오차가 발생할 수 있다. 본 연구의 시뮬레이션에서는 오차에 대한 결과를 그림으로 잘 나타내기 위해 실제 작업보다 과도한 조건으로 시뮬레이션을 하였다. Fig. 4에서 보는 것과 같이 시계모델은 바닥면과 직각을 이루고 있으므로 이 부분은 평엔드밀로 가공해야 하지만 오차를 살펴보기 위해 직경 6 mm 볼엔드밀로 시뮬레이션하였다. 또한, 패스간격도 실제 작업보다 더 크게 2mm로 설정하였다. Fig. 6(a)는 시뮬레이션을 위한 절삭조건과 미절삭 오차의 원인을 나타내었다. Fig. 6(b)는 Fig. 4의 본래 자유곡면의 Z-map과 Fig. 5의 최종 정삭 공작물 Z-map과의 오차를 나타내는 에러맵(Error map)이다. Z-map의 (+)영역은 미절삭 부분이고 (-)부분은 과절삭하여 발생한 오차이기 때문에 가공 정밀도를 검증할 수가 있다. Fig. 6(a)에서 보는 것과 같이 직각면의 이론적인 최대오차는 3(mm)이고, 패스간격이 2 (mm)일 때 평면가공에서 커브(Cusp)의 높이는 0.17 (mm)이다. Fig. 4에서 직각을 이루는 곡면 A가 패스간격 사이에 존재하게 되면 오차가 이론값 3mm 이상 발생하여 Fig. 6(b)에서 보는 것처럼 불규칙적인 오차가 나타난다.

Fig. 7은 또 다른 예로서 반구형상의 Convex 모델에 대해 볼엔드밀 가공의 검증결과를 나타낸다. Convex모델의 시뮬레이션 조건은 Table 1과 같다. 시뮬레이션 결과를 그림으로 보기 쉽게 하기 위하여 Table 1에서 보는 것처럼 정삭에서 경로간격(Path interval)을 크게 하였다. 황삭의 Z-map과 정삭의 Z-map의 차이값은 정삭에서 절삭해야 할 부분이므로, Fig. 8에 Convex모델에서 정삭과정에서 절삭해야 할 절삭량을 구하여 도시하였다. Fig. 8에서 보는 것과 같이 모서리부분은 정삭에서 절삭부하가 증가하여 칩핑이 발생할 수 있다. 따라서 본 모델을 이용하여 자유곡면의 가공에서 모서리부분 가공

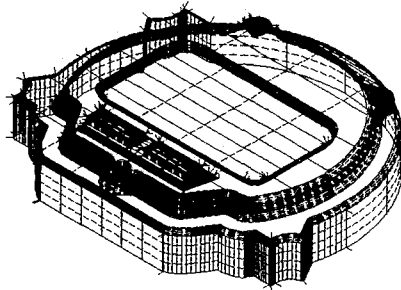
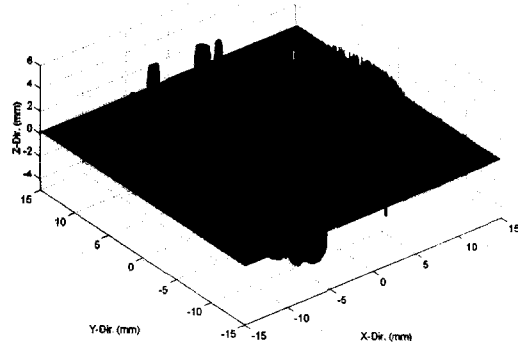


Fig. 4 CAD surface of a watch



(b) error map of the surface

Fig. 6 Error of the surface by tool geometry and path interval

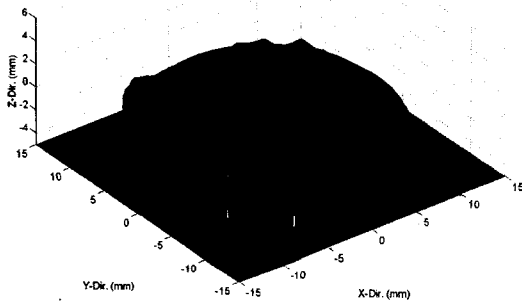
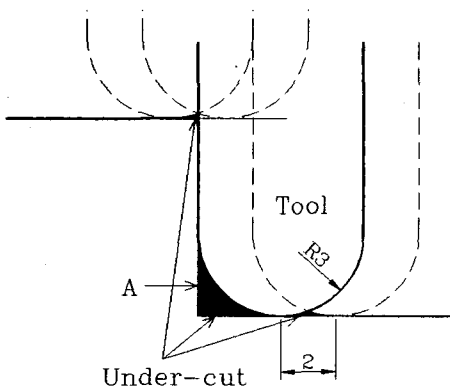


Fig. 5 Verification of the surface in finish cutting

Table 1 Cutting condition of a convex model

	Roughing	Finishing
Tool Diameter (mm)	12	6
Path Interval (mm)	4	1.5
Allowance (mm)	1	0
Feed Rate (mm/min)	2400	1200



(a) cutting condition and under-cut error

과 그전 패스의 가공의 영향에 의한 칩핑을 예측할 수도 있다. 또한 과도한 날당 절삭은 절삭력에 의해 공구휨을 발생시킴으로써 과절삭과 미절삭의 원인이 되는데 이를 방지할 목적으로도 사용이 가능할 것이다. 칩핑과 공구의 휨은 날당 절삭부하량, 절삭조건, 공구 및 공작물의 재질 그리고 공작기계의 강성에 영향을 받는다. 본 연구에서 제안한 모델로 날당 절삭량을 구할 수 있으므로 칩핑에 대한 변수들의 영향 및 칩핑조건을 결정하는 연구가 가능하다. 또한 절삭력을 예측하고 공구와 공작물에 대한 진동계 모델링으로부터 진동에 의한 가공오차에 대한 연구가 가능할 것으로 생각한다.

Fig. 9는 에러맵(Error map)으로서, Convex모델의 가공에서 문제가 될 수 있는 표면형상과 미절삭

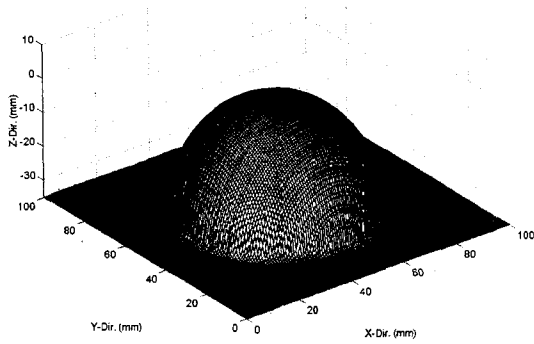


Fig. 7 Verification of the convex model in finishing cutting

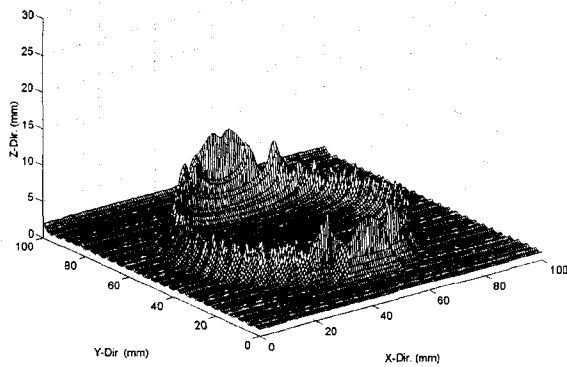


Fig. 8 Z-map of finish cutting

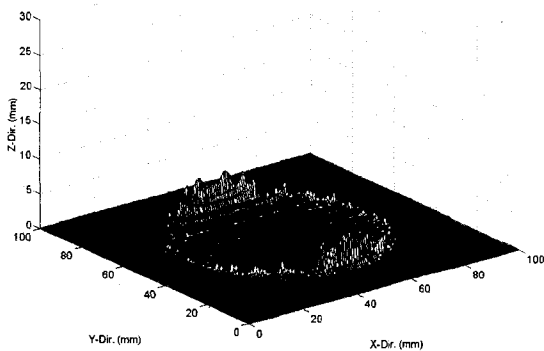


Fig. 9 Error map of the convex model

을 검증할 수 있는 예이다. 즉, 그림에서 보는 것과 같이 절삭방향에 따라서 미절삭의 양이 차이가 나

며 표면형상도 다양하게 변하는 것을 알 수 있다. x 방향으로 절삭할 때 절삭방향과 평행한 곡면에서 미절삭 부분이 발생하고 절삭부하가 증가하는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 Z-map을 이용하여 가공물을 검증할 수 있는 사이버 밀링가공을 위한 새로운 모델을 제안한다. 기존의 모델에서는 NC 가공 데이터만 이용하여 수학적 방법으로 공작물을 검증하였으나 본 모델에서는 공구의 이송속도와 가공데이터를 이용하여 실제 절삭과 동일하게 가공하는 방법을 채택하였다. 따라서 본 모델을 이용하여 날 당 칩부하를 예측할 수 있어 가상 밀링가공에 있어서 가공해석에 유용하게 이용될 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구센터와 대우종합기계(주)의 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. 윤원수, 고정훈, 조동우, "가상 공작기계의 연구 개발," 한국정밀공학회지, 제18권, 제11호, pp. 74-79, 2001.
2. Choi, B. K., *Surface modeling for CAD/CAM*, Elsevier, New York, 1991.
3. 박정환, 정연찬, 최병규, "Z-map 모델을 이용한 정밀형상 모델링," 한국정밀공학회지, 제15권, 제11호, pp. 180-188, 1998.
4. Jerard, R. B., Drysdale, R. L. and Hauck, K., "Geometric Simulation of Numerically Control Machining," Proc. ASME Int. Computer in Engineering Conf., ASME, New York, pp. 129-136, 1988.
5. Oliver, J. H., "Efficient Intersection of Surface Normals with Milling Tool Swept Volumes for Discrete Three-Axis NC Verification," Journal of Mechanical Design, Vol. 114, pp. 283-287, 1992.
6. Hsu, P. L. and Yang, W. T. "Realtime 3D Simulation of 3-axis Milling Using Isometric

Projection," *Computer-Aided Design*, Vol. 25, No. 4, pp.215-224, 1993.

7. 김찬봉, 박세형, 양민양, "NC파트프로그램의 검증 및 오류 수정에 관한 연구," *대한기계학회지*, 제17권, 제5호, pp. 1074-1083, 1993.
8. 정연찬, 최병규, "모의가공을 위한 공구 이동 궤적면의 비매개변수형 모델링," *한국CAD/CAM학회지*, 제1권, 제1호, pp. 45-55, 1996.