

# 복합곡면 가공시 공구간섭의 탐지와 공구경로 수정에 관한 연구

서태일\* , 조명우\*\* , 조재형\*\*\*

## A Study on the Tool Interference Detection and Tool Path Correction in Compound Surface Machining

Tae-Il Seo\*, Myeong-Woo Cho\*\* and Jae-Hyung Cho\*\*\*

### Abstract

In this paper we deal with tool interference problem in the case of compound surface machining. A new tool interference detection and correction method based on the envelope of the tool path is suggested to identify and correct the tool interference - not only within the local path of tool movement, but also outside of the tool path. Therefore, the developed strategy can be used to check the possible interference in any region of the surface. In order to analyze quantitatively the milled surface errors produced by the tool interference, improved surface prediction model is also suggested in cutting process by general cutters. The effectiveness of the proposed method is demonstrated through simulation study.

**Key Words :** CAD/CAM, 자유곡면(Sculptured surface), Tool interference(공구간섭), Tool path correction(공구궤적 보상), Milled surface prediction(절삭표면 예측)

### 1. 서론

CAD/CAM 시스템과 함께 CNC공작기계의 역할의 중요성은 날로 더해가고 있다. 특히 복합곡면(Compound surface)을 포함한 금형가공의 수요는 많은 분야에서 요구되고 있다. 이러한 자유곡면을 얻기 위한 CNC절삭가공에서 공구간섭(Tool interference)의 문제는 가장 중요

한 문제중의 하나이다. 공구간섭은 공구가 주어진 경로를 따라 가공중일 때 가공을 원하지 않은 절삭재와 만남으로써 생긴다. 일반적으로 자유곡면의 곡률이 크고 공구의 직경이 클 경우 공구간섭이 일어날 가능성이 높아진다. 또한 복합곡면의 경우 곡면들이 만나는 경계지역에서 급격한 형상변화로 인하여 공구간섭에 의한 표면오차의 발생 위험률이 높아진다. 이때 직경이 작은 공구를 사용하여 공구

\* 인하대학교 기계기술공동연구소  
\*\* 인하대학교 기계공학과  
\*\*\* 단국대학교 산업공학과

간섭을 피할 수 있으나 공정시간이 증가하여 전체 가공의 생산성을 현저히 저하시키게 된다. 따라서 절삭가공의 전체영역에서 공구간섭이 일어나는 구역을 탐지하고, 국부적으로 경로를 수정하면 생산성저하를 피하면서 효율적으로 절삭가공을 성공적으로 수행할 수 있게 된다.

공구간섭에 의해 발생하는 표면오차는 일반적으로 두 가지로 요약할 수 있다. 표면의 형상에 따라 과도절삭오차(Undercut error)나 미절삭오차(Overcut error)의 문제가 발생하는데 이들 모두 절삭가공물의 질을 저하시키는 결과를 초래한다. 만일 미절삭이 발생할 경우 공구의 경로를 수정하고, 작은 직경의 공구를 이용하여 국부적으로 2차 절삭가공을 수행할 수 있으나, 과도절삭이 발생할 경우 이전에 수행되었던 모든 절삭가공이 실패로 돌아간다. 따라서 공구간섭의 문제에 있어서는 어떻게 과도절삭을 피하는가에 초점이 맞추어져야 한다.

사실 다수의 연구들이 공구간섭의 문제를 다룬바 있다. 예를 들면, 다면체 가공(Polyhedral machining)에서 공구간섭의 탐지와 수정의 방법론이 제시된 바 있고<sup>1),2),3)</sup>, 다른 연구에서는 두 쌍의 공구위치를 이용하여 공구위치점(CL-point)과 공구접촉점(CC-point)을 비교함으로써 공구간섭을 탐지하는 알고리즘이 제시된바 있다.<sup>4)</sup> 그러나 대부분의 기존연구에서는 지역적 구간만을 고려하여 공구간섭의 문제를 다루었다. 다시 말하면, 단지 공구의 경로를 따라 공구위치와 공구접촉점만을 비교함으로써 공구간섭의 문제를 다루었다.

사실 연속적인 공구경로를 따라 공구가 움직일 경우 경로 진행방향 이외에 다른 쪽의 표면에서도 공구간섭이 일어난다. 또한 Z-map개념을 이용한 공구간섭탐지에 관한 절삭시뮬레이션 연구<sup>5)</sup>도 제시된 바 있다. 이 연구에서는 자유곡면의 Z-map분할을 통하여 공구의 Z-map모델과 비교함으로써 공구간섭을 탐지하였다. 본 연구에서는 3축가공기를 대상시스템으로 다룬다. 이는 현재 5축가공기와 같은 다축가공기를 다룬 연구가 진행되고 있으나, 일반산업현장에서는 고가의 절삭가공비용을 줄이기 위하여 3축가공기가 널리 이용되고 있다는 선호하는 사실에 기인한다. 따라서 3축가공기를 위하여 구현된 공칭공구경로를 따라 공구가 움직일 경우 공구경로방향과는 다른 방향에서도 공구간섭이 일어날 수 있다는 사실을 상기하고 새로운 공구간섭 탐지법을 제시한다. 제시할 방법은 기존의 Z-map개념을 통한 공구간섭탐지법<sup>6)</sup>과 비교하여 보다 효율적인 탐지법이 되도록 한다. 자유곡면의 Z-map분할은 결국 모든 분할된 격자들을 공구의 Z-map모델과 비교하

여야 하지만, 본 연구에서는 단지 연속적인 두 개의 공구 위치점부근에 설정된 탐지구역 존재 가능한 공구접촉점만을 검사함으로써 효율적이고 빠른 방법을 제시한다.

또한 본 연구에서는 탐지된 공구간섭을 피하기 위한 공구경로 수정의 방법론을 제시한다. 제시된 공구간섭 탐지법을 통한 간섭의 정량적 해석을 바탕으로 공구경로 수정을 위한 알고리즘을 제시한다. 또한 표면오차의 정량적 해석을 위하여 절삭표면 예측 모델링을 제시한다. 이 모델링은 공구의 형상과 관계없이 절삭체적에 포함된 부분을 검색하는 방법으로 상이한 세 가지 절삭공구에 이용될 수 있도록 일반화한다. 본 연구에서 제시된 접근방법을 검증하기 위하여 복합곡면을 포함한 예제를 다룬다.

## 2. 공구 간섭의 탐지와 경로 수정

설계된 형상을 가공하기 위한 공구경로는 일반적으로 허용공차를 고려하여 선형보간(Linear interpolation)을 위한 공구위치점의 값들로 구성된다. 이때 선형보간으로 발생하는 표면오차가 허용공차내에 존재하도록 공구위치점의 개수가 결정된다. 공구경로의 간격(Tool path interval)에 따라 발생하는 Cusp의 크기도 역시 허용공차와 비교하여 공구경로의 간격을 조절할 수 있다.

일반적으로 선형보간에 의한 표면오차는 볼록한 표면(Convex surface)에서 과도절삭이 발생하고 오목한 표면(Concave surface)에서 미절삭이 발생한다. 이는 공구 경로를 따라 움직이는 공구의 진행방향만을 고려하였을 때의 경우이다. 하지만 복합곡면을 포함한 일반적인 금형 가공의 경우 공구진행방향 이외에서도 간섭이 일어날 가능성이 항상 존재한다. 전술한 바와 같이 공구간섭에 의해

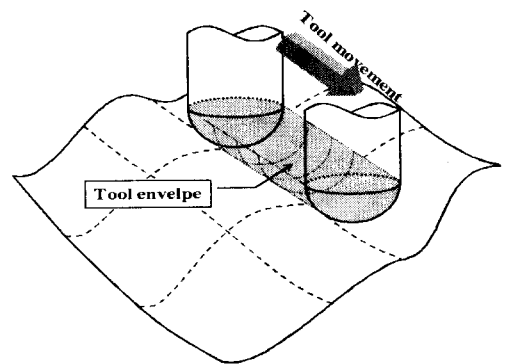


Fig. 1 Tool interference detection range

과도한 과도절삭오차가 발생할 가능성이 있는 영역을 미리 탐지할 필요가 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 공구 간섭 탐지구역을 설정하고 공구접촉점을 검토하여 간섭을 검출하는 방법론을 제시한다.

### 2.1 공구간섭의 탐지

경로를 따라 움직이는 공구의 운동은 Ball-end mill일 경우 두개의 공구위치점들 사이에서 공구의 진행방향으로 원통형태의 절삭체적(Tool envelope)을 형성한다(참조 Fig. 1). 공구의 운동에 의하여 제거된 절삭재료의 부피와 동일하게 생기는 이 공구의 절삭체적내부에 임의의 공구접촉점이 포함될 경우 공구간섭이 일어난다. 따라서 공구간섭의 탐지는 절삭체적 내에 임의의 공구접촉점이 존재하는지 여부를 검사하여 수행될 수 있다.

공구의 종류에 따라 절삭체적의 형태가 변화하지만 본 연구에서는 벡터를 이용한 해석적인 방법론을 통하여 공구의 종류와 상관없이 공구간섭을 탐지할 수 있는 알고리즘을 제시한다. 본 논문에서는 Ball-end mill의 경우를 예로 들어 설명한다.

절삭체적과 모든 공구접촉점을 비교할 경우 불필요한 계산이 수행되어지므로, 이를 피하기 위하여 확인할 공구 경로 부근에 임의의 탐지구역(Detecting range)을 정의하고, 이 구역의 공구접촉점만을 검토한다.

첫 번째 단계에서, 탐지구역내의 모든 공구접촉점들이 XY평면에 정의된 탐지구역내에 존재하는지 검사한다. (참조 Fig. 2) 공구가 공구위치  $p^m$  에서  $p^{m+1}$  로 이동할 경우 XY평면에 투영된 탐지구역은 다음과 같이 표현된다.

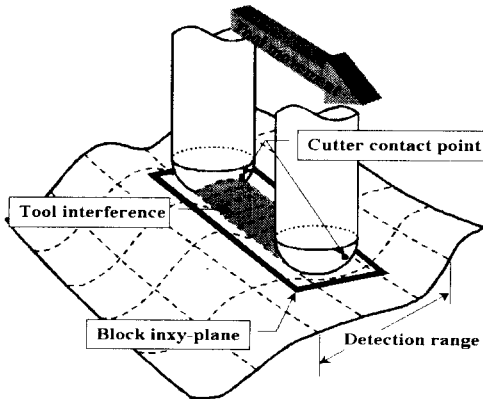


Fig. 2 Detection range for single path

$$\begin{aligned}
 & p^m - R \langle t \langle p^{m+1} + R, \text{ if } p^m \langle p^{m+1} \\
 & p^{m+1} - R \langle t \langle p^m + R, \text{ if } p^{m+1} \langle p^m
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서  $t$ 는  $x$  혹은  $y$ 의 좌표값이고  $R$ 은 공구반경이다. 두 공구위치점들 사이에 공구의 운동방향을 나타내는 방향벡터(Directional vector)  $v_1$ 는 다음과 같이 표현된다(참조 Fig. 3).

$$v_1 = \begin{bmatrix} (p_x^{m+1} - p_x^m) \\ (p_y^{m+1} - p_y^m) \\ (p_z^{m+1} - p_z^m) \end{bmatrix} \tag{2}$$

여기서  $p^m$ 과  $p^{m+1}$ 는 연속되는 한 쌍의 공구위치점이다. 탐지구역내에 있는 첫 번째 공구위치점  $p^m$ 로부터 임의의 공구접촉점  $q$ 를 가리키는 방향벡터  $v_2$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$v_2 = \begin{bmatrix} (q_x - p_x^m) \\ (q_y - p_y^m) \\ (q_z - p_z^m) \end{bmatrix} \tag{3}$$

식(2)과 식(3)으로부터 두 벡터  $v_1$ 과  $v_2$  사이의 각도를  $\theta$ . 공구접촉점  $q$ 와 벡터  $v_1$  사이의 거리를  $d$ 라고 하면  $\theta$ 와  $d$ 는 다음과 같은 관계를 유도해낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \theta &= \cos^{-1} \frac{v_1 \cdot v_2}{\|v_1\| \|v_2\|} \\
 d &= \|v_2\| \sin \theta
 \end{aligned} \tag{4}$$

Fig. 3는 식(4)의 기하학적 관계를 보여준다. 본 연구에서는 두 가지 경우의 공구간섭을 다룬다.

첫 번째 경우는 연속적인 CL-point  $p^m$ 와  $p^{m+1}$ 가 Fig. 3-(a)에 도식화된 것과 같은 기하학적 관계를 가질 경우이다. 이런 형태의 공구간섭은  $\|v_1\|$ 이  $\|v_2\|$ 보다 크고 거리  $d$ 가 공구반경  $R$ 보다 작을 때 발생한다. 이 경우 CC-point  $q$ 에서  $(R-d)$ 만큼 공구간섭이 일어난다.

두 번째 경우는 Fig. 3-(b)에 나타나 있는 것과 같이 공구경로 외부에서 공구간섭이 일어나는 경우이다. 이런 형태의 공구간섭은  $\|v_1\|$ 이  $\|v_2\|$ 보다 작거나 같고  $p^{m+1}$ 과  $q$ 사이의 거리  $d$ 가 공구반경  $R$ 보다 작을 때 발생한다. 이 경우 공구경로 외부의 CC-point  $q$ 에서  $(R-d)$ 만큼 공구간섭이 일어난다.  $p^{m+1}$ 과  $q$ 사이의 거리  $d$ 는 다음과 같이 얻어진다.

$$d = \left\{ (q_x^n - p_x^{m+1}) + (q_y^n - p_y^{m+1})(q_z^n - p_z^{m+1})^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

본 논문에서 제시된 공구간섭의 탐지방법은 공구경로 방향을 따라 발생하는 간섭뿐만 아니라 공구경로 방향 축

면에 존재하는 CC-point까지 비교함으로써 공구간섭을 거시적 관점으로 탐지할 수 있게 한다. 다음은 공구간섭이 일어날 경우 간섭을 피하기 위한 경로 수정방법이 제시된다.

### 2.2 공구경로의 수정

공구간섭이 일어날 경우, 간섭에 의한 표면오차를 최소화하기 위하여 CL-point를 수정하여야 한다. 앞서 제시된 바와 같이 CC-point  $q$ 에서 일어나는 공구간섭을 피할 수 있도록 새로운 CL-point를 정의하여야 한다.

공구간섭을 피하기 위해 새로 정의된 CL-point  $c^m$ 은 CL-point  $p^m$ 와  $p^{m+1}$ 사이 존재하며, 공구가  $p^m$ 과  $p^{m+1}$ 이 이루는 경로를 수직으로 지나가며, 공구접촉점  $qn$ 에서 간섭이 발생하지 않고 접하도록 정의된다. 새로운 공구위치점  $c^m$ 은 다음의 수직으로 얻어진다(참조 Fig. 4-(a)).

$$c^m = v_1 \frac{\|v_2\|}{\|v_1\|} \cos\theta + p^m \quad (6)$$

여기서  $c^m = (c_x^m, c_y^m, c_z^m)$ .

따라서 새로운 공구위치점  $c^m$ 은 공구간섭을 피할 수 있도록 다음의 수식에 따라 Z방향으로 이동된다.

$$\begin{aligned} c_x^m &= c_x^{m'} \\ c_y^m &= c_y^{m'} \\ c_z^m &= \sqrt{R^2 - (c_x^m - q_x^n)^2 - (c_y^m - q_y^n)^2} + q_z^n \end{aligned} \quad (7)$$

만일  $\|v_1\|$ 이  $\|v_2\|$ 보다 작거나 같다면 수정된 새로운 공구위치점  $c^m$ 은 공구진행의 역 방향으로  $\|v_1\| - \|c^m\|$ 만큼 이동함으로써 결정된다(참조 Fig. 4-(b)). 이것을 수식으로 나타내면 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} c^m &= v_1 \frac{\|c^m\|}{\|v_1\|} v_1 + p^m \\ \|c^m\| &= \|v_1\| - \sqrt{R^2 - d^2} \end{aligned} \quad (8)$$

공구간섭을 피하기 위한 새로운 공구위치점들이 결정되면 CL-file이 생성된다. Fig. 5는 앞서 제시된 공구간섭의 탐지와 경로수정전략을 도식화하여 보여준다.

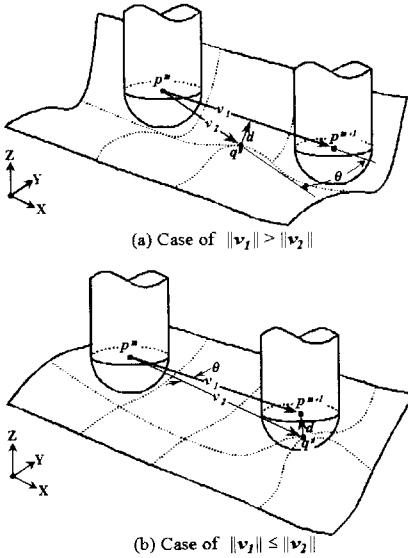


Fig. 3 Geometric relation between CL and CC-point

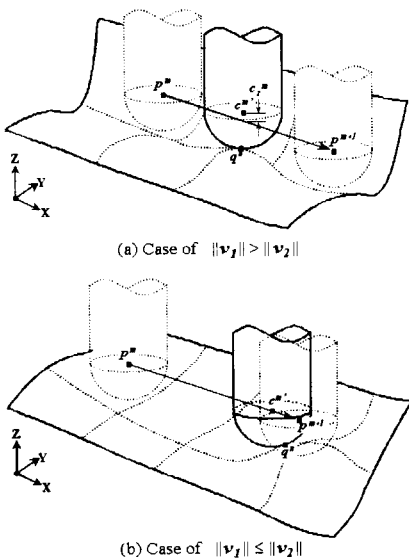


Fig. 4 Tool path correction

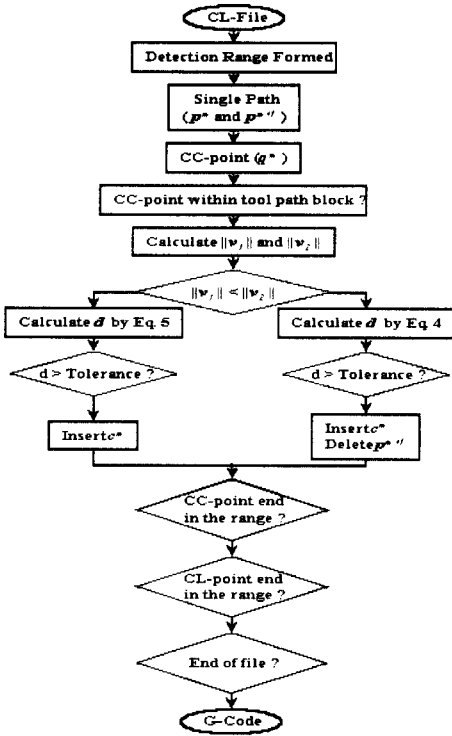


Fig. 5 X-axis pitch error

### 3. 표면에측을 통한 공구간섭 오차 분석

절삭표면의 예측은 공구간섭에 의한 과도한 오차의 발생의 정량적 분석을 가능하게 한다. 본 연구에서 절삭표면 오차를 예측하기 위하여 제시한 방법은 Jerard<sup>(5, 6)</sup>와 Kim<sup>(7)</sup>의 연구에 기초하고 있으며 Fig. 6은 본 연구에 적용된 방법을 나타내고 있다.

사용된 시뮬레이션 방법은 판별점(Check point)과 방향벡터를 설정하고, 공구의 이동 궤적과 판별점의 방향 벡터와 만나는 점을 구하여 가공면의 형상이 계산되는 방법으로, 공구반지름, 가공경로 등 주어진 가공조건에 따라 가공된 표면의 좌표를 계산할 수 있다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 공구의 이동 궤적은 두 개의 공구위치점 a, b의 좌표와 공구반경 R에 의해 정의되며, 이때, XY평면에 투영된 공구궤적 영역이 정의된다. 공구의 이동궤적은 공구의 형태에 따라 변한다. Fig. 6은 Ball-end mill의 경우를 도식화하고 있다. 가공된 표면의 계산을 위하여 먼저 미리 설정된 판별점이 이 영역 내에 존재하는가를 판단하

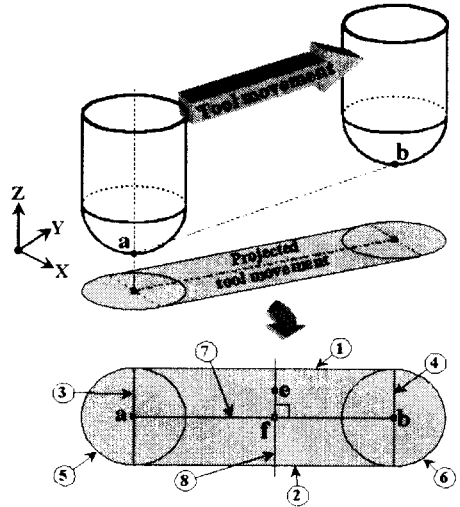


Fig. 6 Tool movement and projected boundary lines in XY-plane

고, 존재하고 있다면 z 방향의 포인트 벡터와 공구이동 궤적의 교점을 구하여 가공된 표면의 좌표를 구할 수 있다.

판별점 e가 직사각형 ①②③④내에 존재할 때, 판별점의 Z 좌표  $z_e$ 를 구하기 위해 보조점 f가 사용되었으며, 이 점 f는 선분 ⑦과 ⑧의 교점이다. 판별점 e가 선분 ⑧위에 있으므로 점 f에서의 Z 좌표  $z_f$ 는 별점 e가 직사각형 내에 존재할 때, 판별점의 Z 좌표는 다음식에 의해 계산된다.

$$z_f = z_a + (z_b - z_a) \frac{(z_f - x_a)}{(x_b - x_a)} \quad (9)$$

여기에서  $x_a$ ,  $z_a$ ,  $x_b$ ,  $z_b$ 는 공구위치 a와 b의 x좌표와 z 좌표를 각각 나타낸다. 따라서  $z_e$ 는 Ball-end mill의 경우 다음 식으로 구해진다.

$$z_e = z_f + R - \sqrt{R^2 - r_c^2}$$

$$r_c^2 = \sqrt{(x_f - x_e)^2 + (y_f - y_e)^2} \quad (10)$$

판별점 e가 원 ⑤와 ⑥원 안에 있을 경우에는 Z좌표를 구하기 위해서는 식(10)에서  $x_f$ 와  $y_f$ 를  $x_a$ ,  $y_a$  또는  $x_b$ ,  $y_b$ 로 대체하면 된다.

Flat-end mill과 Fillet-end mill의 경우에는 공구의 기하학적 형상의 정의가 다르나 앞서 제시한 방법이 계속

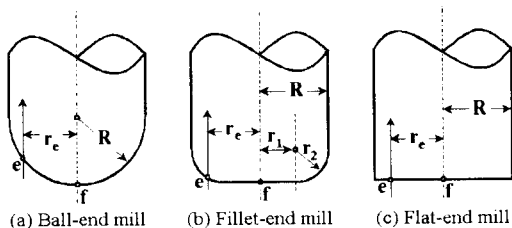


Fig. 7. Geometry of end mill

해서 적용될 수 있다. Flat-end mill의 경우에는 Z 좌표는 판별점 e의 Z 좌표가 점 f의 Z 좌표와 같게 되고, Fillet-end mill의 경우의 Z 좌표는 다음 식에 의해 계산되어 진다(참조 Fig. 7).

$$\begin{aligned} \text{if } r_c > r_1, z_e &= z_f + r_2 - \sqrt{r_c^2 - (r_c - r_1)^2} \\ \text{if } r_c \leq r_1, z_e &= z_f \end{aligned} \quad (11)$$

마지막으로, 계산된 가공면의 좌표와 요구되는 자유곡면 형상을 비교하여 판별점에서의 가공오차를 예측할 수 있다.  $(x_m, y_m, z_m)$ 를 앞의 과정을 통하여 계산된 판별점에서의 가공면 좌표이고,  $(x_s, y_s, z_s)$ 를 가공면 좌표로부터 최단 거리에 있는 요구되는 곡면상의 좌표라 하면, 자유곡면의 형상오차 E는 다음과 같이 계산되어 진다.

$$E = \sqrt{(x_m - x_s)^2 + (y_m - y_s)^2 + (z_m - z_s)^2} \quad (12)$$

제시된 표면예측 방법은 공구의 기하학적 형상을 고려하여 절삭표면을 예측함으로써 Cusp의 형상까지 정확히 예측할 수 있다. 따라서 표면예측에 의해 추정된 표면오차의 분포를 고찰하여 허용공차와 상대적으로 과도한 오차의 발생구역을 알아낼 수 있다. 다음은 표면예측방법을 통하여 앞서 제시한 공구간섭의 탐지법의 적용과 그 결과를 고찰한다.

#### 4. 예 제

앞서 제시된 공구간섭 탐지법과 이를 피하기 위한 공구경로 수정법의 검증을 위하여 복합곡면의 한 예제를 다룬다.

Fig. 8은 본 논문에서 다룬 예제의 기하학적 형상을 보여준다. 볼록한 곡면이 오목한 곡면에 중양에 위치한 형상으로 복합곡면을 이루고 있다. 이 복합곡면을 가공하기 위하여 반경 10mm의 Ball-end mill을 이용하였다. 표면

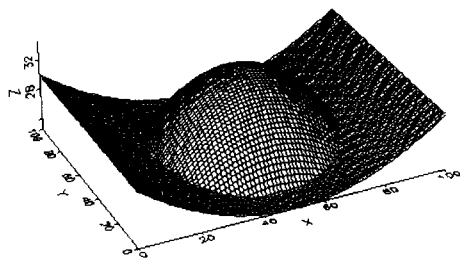


Fig. 8 Geometrical form of illustrative example

의 허용공차는 0.05mm로 주어졌다. 이때 생성된 공구의 경로는 Fig. 9에 나타나 있다.

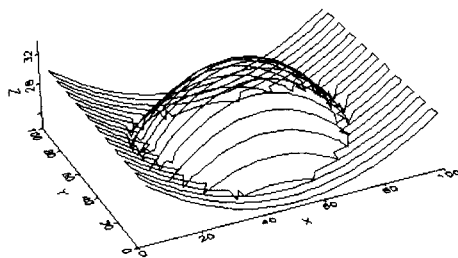


Fig. 9 Tool path containing interference

Fig. 9에 나타나 있는 것처럼 두 곡면이 만나는 교차부분에서 공구경로가 꼬여있음을 알 수 있다. 급격한 형상의 변화로 인하여 공구간섭이 일어난다는 것을 알 수 있다.

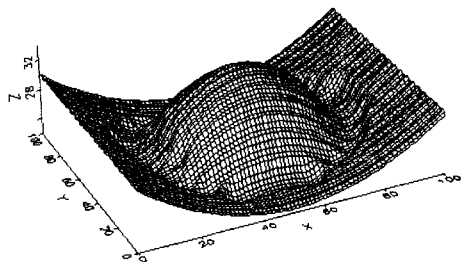


Fig. 10 Milled surface with overcut error

Fig. 10은 앞서 제시된 방법 통하여 절삭표면의 형상이 어떤 형태로 나타나지를 보여준다. Fig. 9에 나타나 있는 공구간섭이 일어나는 두 곡면의 교차부분에서 과도절삭오차가 발생함을 알 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 이러한 오차가 발생할 경우 실행된 가공전체가 실패로 돌아

가게 된다. 또한 공구의 진행방향을 따라 공구간섭이 발생할 뿐만 아니라 임의의 공구진행방향의 측면에도 간섭에 의한 과도절삭오차의 발생을 볼 수 있다. Fig. 11은 전체 절삭표면에 분포되어 있는 과도절삭오차와 공구진행방향의 측면에서 발생하는 표면오차를 보여준다.

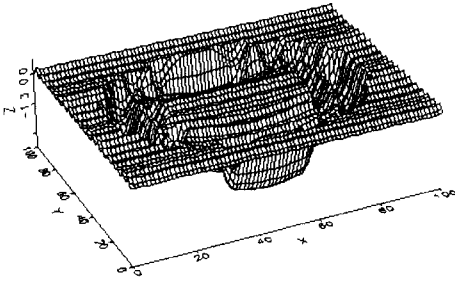


Fig. 11 Error distribution of milled surface

따라서 공구간섭에 의해 발생하는 과도절삭오차를 피하기 위하여 앞서 제시된 공구경로 수정법을 적용하였다.

Fig. 12는 수정된 공구경로를 보여준다. Fig. 9에 나타나 있는 공구경로와 달리 Fig. 12에서의 공구경로는 두 곡면이 만나면 교차부분에서 경로가 꼬여있지 않음을 알 수 있다. 이는 제시된 방법에 의하여 새로운 공구위치점을 추가함으로써 공구간섭을 피할 수 있음을 보여준다.

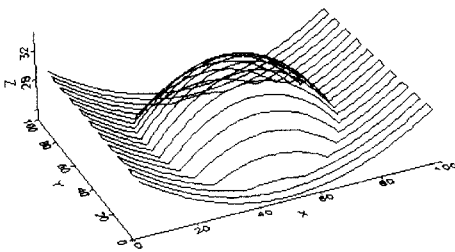


Fig. 12 Corrected tool path

Fig. 13은 수정된 공구경로에 의하여 가공된 절삭표면의 형상을 보여준다. Fig. 10에서 보여준 절삭표면과는 달리 초기에 설계된 복합곡면의 형상과 매우 유사함을 알 수 있다.

Fig. 14는 표면오차의 분포를 보여주는데 곡면의 교차부분에서 미절삭오차가 발생함을 보여준다. 과도절삭오차와 달리 미절삭오차는 2차 정삭가공을 통하여 허용공차를

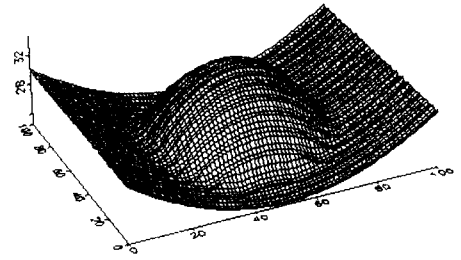


Fig. 13 Milled surface without overcut error

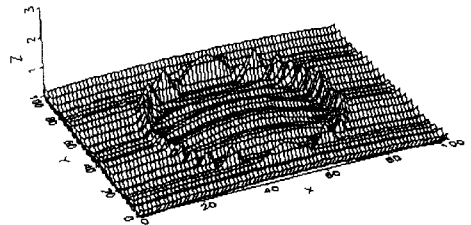


Fig. 14 Error distribution of milled surface

만족하는 표면을 얻어낼 수 있다. 따라서 본 논문에서 제시된 방법을 통하여 성공적으로 과도절삭오차를 피할 수 있음을 보여준다.

## 5. 결 론

본 연구의 목적은 3축가공기상에서 복합곡면 가공의 경우 공구간섭을 탐지하고 공구경로를 수정하여 이를 피하는 방법론을 제시하는데 있다. 기존의 Z-map모델을 이용한 방법에서 자유곡면을 일정한 크기의 격자로 분할하고 공구의 Z-map모델과 비교하여야 했던 방법을 피하기 위하여 공구접촉점의 검사를 제시하였다. 각각의 공구위치점 쌍들의 탐지구역을 설정하고, 그 구역에 존재할 수 있는 공구접촉점만을 절삭체적과 비교하여 공구간섭을 탐지하는 접근방법을 제시하였다. 이 방법은 모든 Z-map격자를 비교한데 비하여 상대적으로 빠른 계산 결과를 도출할 수 있도록 하였다. 또한 공구진행방향 이외의 다른 방향에서 발생할 수 있는 공구간섭도 공구접촉점만의 검사로 가능함을 보였다. 제시된 방법으로 공구간섭의 정량적 분석이 이루어져 공구간섭을 회피하는 새로운 공구위치점 결정이 가능하였다.

공구의 간섭이 발생할 경우 간섭을 피하기 위해 새로운 공구위치점을 생성하여 공구경로를 수정하는 알고리즘을

제시하였다. 또한 공구의 형태에 따라 Cusp의 형상까지 정확히 예측하는 표면예측 모델링을 소개하였다. 이를 통하여 공구간섭에 의해 발생하는 표면오차의 정량적 분석이 가능하였다. 또한 복합곡면의 가공예제에 본 논문에서 제시된 접근방법들을 적용하여 검증하였다.

## 참 고 문 헌

- (1) Choi, B.K., Lee, C.S., Hwang, J.S. and Jun, C.S., "Compound Surface Modeling and Machining", Computer-Aided Design, Vol.20, No.3, pp.127~136, April, 1988.
- (2) Choi, B.K. and Srinivasan, K., "An Investigation of the End Milling Process Under Varying Machining Conditions", Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol.111, pp.27~36, 1989.
- (3) Hwang, J.S., "Interference free Tool Path Generation in the NC Machining of Parametric Compound Surfaces", Computer-Aided Design, Vol.24, No.12, pp.667~676, Dec., 1992.
- (4) Oliver, J.H., Wysocki, D.A. and Goodman, E.D., "Gouging Detection Algorithms for Sculptured Surface NC Generation", Journal of Engineering for Industry, Vol.115, pp.139~144, Feb., 1993.
- (5) Jerard, R.B. and Drysdale, R.L., "Geometric Simulation of NC Machining", Pro. of the ASME International Computers in Engineering Conference, Vol. 2, pp. 129~136, 1988.
- (6) Jerard, R.B. and Drysdale, R.L., "Methods for Detecting Errors in Numerically Controlled Machining of Sculptured Surfaces", IEEE Computer Graphics & Applications, pp. 26~39, 1989.
- (7) Kim, K.I., "Integrated Computer Aided Manufacturing System for Sculptured Surfaces", Ph.D. Dissertation, University of Illinois at Chicago, 1993.
- (8) 송수용, 김석일, "Z-map 모델을 이용한 3차원 CNC 가공계획 및 절삭시뮬레이션에 관한 연구", 한국정밀공학회지 제13권 제5호, pp. 115~121, 1996년 5월.