

〈논 문〉

분할가공법에 의한 자유곡면가공

이 태 휘* · 이 상 조**

(1997년 5월 30일 접수)

Machining of Sculptured Surfaces Using Partition Machining Method

Tae-Whi Lee and Sang-Joe Lee

Key Words : Partition Machining Method(분할가공법), Flat End Cutter(평-엔드밀), Tool Path Generation(가공경로 생성), Interference(간섭)

Abstract

This paper presents precision machining of sculptured surfaces with a flat end cutter as follows; tool path generation using partition machining method and elimination interference. These days many researchers are getting interested in flat end cutter having a good cutting performance as machine tool for machining sculptured surfaces. It can get low curvature surfaces and have a much better material removal rates and longer tool life. Partition machining method is the first submitted in this paper. It is a new method of tool path generation, which means the way to map surfaces under the normal vector and then to cut them partially.

1. 서 론

근래에 들어 자유곡면을 자동으로 가공하기 위한 연구가 활발히 진행되어 왔다. CAD/CAM 시스템의 도입을 통하여 좀더 복잡한 형상을 가공할 수 있게 되었으며, 가공시간을 단축하고 생산성, 가격 경쟁력, 가공정밀도 등의 향상을 얻게 되었다.

초창기의 자유곡면가공은 카피 밀링머신(copy milling machine)을 이용한 모방밀링에서 출발하였기 때문에 공구의 형상은 프로브와 유사한 볼엔드밀(이하 볼밀)을 이용해 왔다. 그러나 볼엔드밀은 플랫폼엔드밀(이하 엔드밀)에 비해 제작이 어렵고 가격이 비싸며, 절삭성도 떨어져 근래에는 플랫폼엔드밀이나 볼 노우즈 엔드밀에 대한 연구가 진행중에 있다.

엔드밀을 이용할 경우 문제점은 볼밀에 비해 공

구경로의 산출과 간섭제거가 어렵다는데 있다. 이런 이유로 아직까지도 볼밀을 이용한 자유곡면가공이 일반화되어 있으나 새로운 알고리즘의 도입을 통하여 엔드밀을 이용한 자유곡면가공을 실용화시키려하고 있다. 엔드밀을 이용한 자유곡면가공에 관한 연구로는 맹희영⁽¹⁾이 최대 경사방향 트리를 이용한 삼각형요소화 곡면 모델의 NC 엔드밀링가공에 관한 연구를 하였고, Susan X, Li⁽²⁾와 Daoyuan Yu⁽³⁾는 비구면 공구를 이용한 5축 가공시 발생하는 간섭문제를 곡면의 다면체근사법을 이용하여 검사하였다.

본 논문에서는 곡면을 법선벡터를 이용하여 분할하고 각 분할된 모드에 따라 가공방향을 달리하는 분할가공법을 제시하였다. 또한 분할가공법에 따라 모의실험을 실시하고, 스튜어트 플랫폼형 동작기계에 적용하여 실제 가공실험을 하였다.

*현대자동차(주) 선행연구실

**회원, 연세대학교 기계공학과

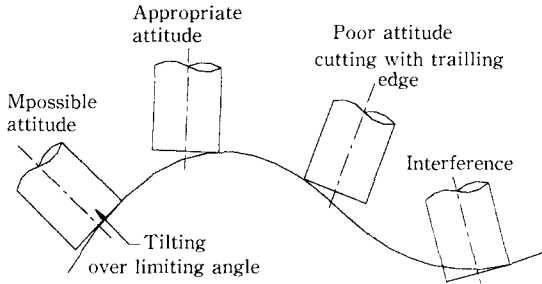


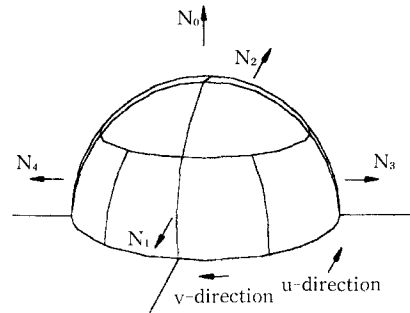
Fig. 1 Example of machining with end mill

2. 엔드밀 밀링가공시 문제점

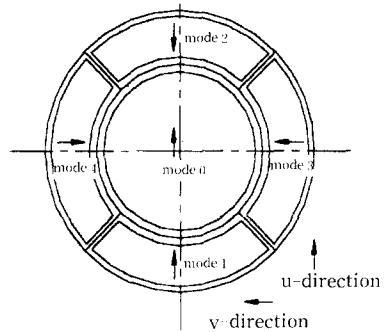
엔드밀은 볼밀보다 절삭성이나 생산성 측면에서 여러 가지 이점이 있다. 그러나 5축 이상 밀링가공시 가공경로 생성이 어렵고, 간섭 및 충돌을 회피하기 위한 공구축 방향의 결정이 난해한 문제점이 있다. 다음 Fig. 1은 엔드밀을 이용한 자유곡면가공시 발생할 수 있는 문제점을 보여준다.

엔드밀을 이용하여 곡면을 가공할 때, Fig. 1의 두번째 경우처럼 공구축 방향벡터는 곡면의 법선에 대하여 약간 앞으로 기울이거나 법선벡터에 준하여 위치하게 된다. 그러나 일정한 기울임각(tilting angle or sturz angle)을 주며 가공경로를 생성할 때, Fig. 1의 첫번째 경우처럼 기계적인 한계로 기울일 수 없는 자세가 만들어지기도 한다. 이런 문제가 발생했을 때 공구축을 기울일 수 있는 한계각 이내에 가공할 수 있는 처리가 필요하다.

Fig. 1에서 세번째 경우는 Vickers⁽⁴⁾에 의해서 제안되었던 G-surf 방법이다. 극점부근에서 경로가 아래방향으로 향할 때 자세를 바꿔서 공구의 밀면으로 곡면을 가공하도록 한 것이다. 그러나 밀면을 통하여 절삭을 할 경우 공구의 마모가 촉진되고 채터문제도 더 심각해져 결국은 공구의 수명이 단축된다. 따라서 공구의 밀면으로 가공하는 것은 피해야 한다. 공구의 밀면으로 가공하는 것을 피하고 옆면을 이용한 정상적인 가공을 하기 위해서는 가공경로의 진행방향을 아래서 위로 향하도록 하면 된다. 마지막으로, 오목면(concave form)을 가공할 때 공구의 접촉점을 기준으로 경로를 산출하다 보면 공구의 뒷부분에 의해 간섭(interference)이 발생할 수 있다. 따라서 공구 밀면의 모서리 뒷부분과 공작물과의 간섭을 제거하도록 공구를 더 앞으로 기울여서 가공해야 한다.



(a) Side view



(b) Top view

Fig. 2 Partition mapping

이와 같이 엔드밀을 이용한 곡면의 가공시 여러 가지 문제점이 있다. 다음 절에서는 이런 문제를 해결하기 위하여 곡면을 분할하여 가공하는 방법을 제시한다.

3. 가공경로계획

3.1 곡면의 분할법

엔드밀을 이용한 곡면가공시 공구축을 곡면의 법선벡터와 가깝게 유지하며 가공할수록 커슥(cusp)은 작아진다. 따라서 기계적 한계값 내에서 곡면의 법선벡터와 공구축이 서로 가깝도록 유지하며 가공하는 것이 좋다. 또한 공구의 밀면으로 가공하는 것을 회피하기 위해서는 공구의 진행방향을 아래에서 위쪽을 향하도록 하는 것이 좋다. 이러한 요구조건을 만족시키기 위해서 곡면의 법선벡터에 따라 곡면을 분할하고 분할된 모드(mode0~4)에 따라 절삭방향을 달리하며 가공하는 분할가공법(partition machining method)을 제안한다.

Fig. 2(a)에서 $N_x(x=0,1,2,3,4)$ 는 각각 기준좌표축을 나타내는 단위벡터이다. 이 기준벡터들과

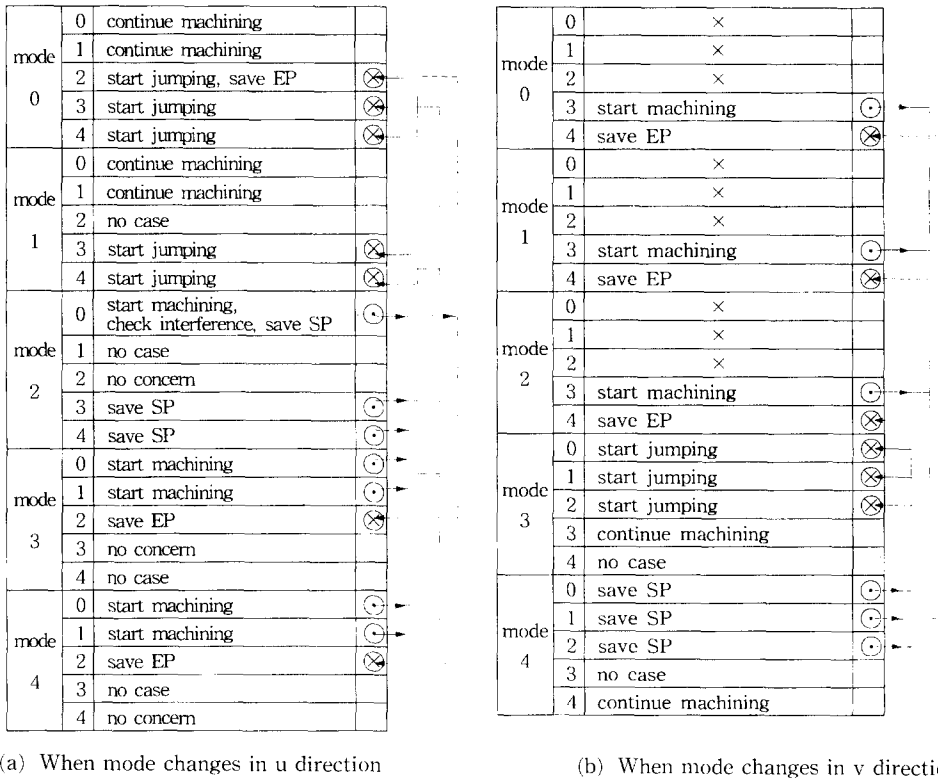


Fig. 3 Partition machining method when mode changes (solid line means machining in forward direction and dashed line means machining in backward direction)

곡면의 법선벡터를 내적하여 곡면을 그 법선이 향하는 방향에 따라 다음과 같이 분할한다.

곡면의 법선벡터를 크기 1인 벡터로 표시하고 이를 $n = (n_x, n_y, n_z)$ 이라 할 때 각 모드에 대한 집합은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \{\text{Mode0}\} &= \{(n_x, n_y, n_z) \cdot N_0 \geq \cos(m_{limit})\} \\
 \{\text{Mode1}\} &= \{(n'_x, n'_y, 0) \cdot N_1 \geq \cos 45^\circ\} \cap \{\text{Mode0}\}^c \\
 \{\text{Mode3}\} &= \{(n'_x, n'_y, 0) \cdot N_3 \geq \cos 45^\circ\} \cap \{\text{Mode0}\}^c \\
 \{\text{Mode2}\} &= \{(n'_x, n'_y, 0) \cdot N_2 \geq \cos 45^\circ\} \cap \{\text{Mode0}\}^c \\
 \{\text{Mode4}\} &= \{(n'_x, n'_y, 0) \cdot N_4 > \cos 45^\circ\} \cap \{\text{Mode0}\}^c
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서, m_{limit} 는 공구를 기울일 수 있는 기계적 한계각도를 말한다. n'_x 와 n'_y 는 다음과 같다.

$$n'_x = \frac{n_x}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2}} \quad n'_y = \frac{n_y}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2}}$$

모드0은 공구축을 법선벡터와 일치시킬 수 있는 면이고, 모드1에서 모드4까지는 가공경로를 아래에

서 위쪽으로 향하며 가공하도록 나누어진 곡면이다. 여기서는 공구축이 기계적 한계값 이상을 넘지 않도록 기울임각을 구한다. Fig. 2(b)에서 화살표는 공구의 진행방향을 나타낸다.

3.2 가공경로

가공경로 진행은 iso-parametric 방법을 이용하였다. 먼저 u방향으로 가공한 후 v방향을 가공한다. u방향으로는 우선 u값이 증가하는 순방향으로 모드1과 모드0 부분을 가공한 후에 u값이 감소하는 역방향으로 되돌아 오면서 나머지 모드2부분을 가공한다. 이것은 공구의 밑면으로 가공하는 것을 피하기 위하여 공구의 진행방향을 아래에서 위쪽을 향하게 하기 위한 것이다. 그 후 v방향으로 모드3을 가공하고 경로를 되돌아 오면서 모드4를 가공한다. 이처럼 모두 네 방향으로 절삭을 진행한다. 정리하면 다음과 같다.

- ① u값이 증가하는 방향으로 mode0, mode1 부

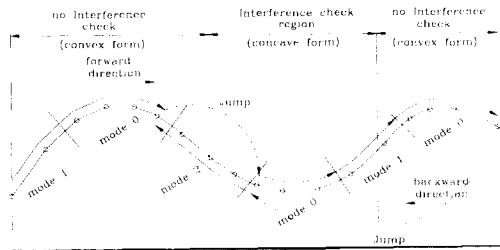


Fig. 4 Example of partition machining in u direction

분을 가공한다.

② u값이 감소하는 방향으로 mode2 부분을 가공한다.

③ v값이 증가하는 방향으로 mode3 부분을 가공한다.

④ v값이 감소하는 방향으로 mode4 부분을 가공한다.

이와 같이 곡면을 모드별로 분할하여 가공하게 되면 가공경로 간의 간격을 넓게 할 수 있기 때문에 가공시간을 단축시킬 수 있으며, 엔드밀의 밑면으로 가공하는 것을 회피할 수 있기 때문에 공구의 수명을 연장시킬 수 있다. 또한 진동의 억제효과도 기대할 수 있다.

여기서 한가지 고려해야 할 사항은 앞의 3.1절에서 제시한 방법으로 곡면을 분할할 때 모드가 바뀌는 부분을 정확하게 찾는 것은 매우 어려운 일이며 계산상으로도 효율적이지 않다는 것이다. 따라서 경로를 허용공차 이내로 직선보간한 뒤, 각 점마다 모드를 계산한다. 미리 계산된 점과 모드를 가지고 분할가공경로를 산출한다.

또한 분할가공시 모드가 바뀌는 부분에서는 세밀한 주의가 필요하다. 각 상황에 따라 가공법을 정리하면 Fig. 3과 같다. Fig. 3에서는 모드가 바뀌는 부분과 매개변수에 따르는 가공방향이 바뀌는 경우에 경계에서 가공경로를 설정하는 방법을 설명하고 있다. 한가지 유의할 점은 경계부근에서 u방향에 대한 가공과 v방향에 대한 가공시 경계부근에서 가공오차를 만족시키기 위해서 가공경로 산출시 서로 한 단계씩(질점 하나) 중첩되도록 설계되었다.

매개변수 값이 증가하는 방향을 순방향(forward direction)으로 정하고, 감소하는 방향을 역방향(backward direction)이라 정한다.

Fig. 3에서 첫번째 칸(column)은 이전 모드(previous mode)를 나타내고 두번째 칸의 숫자는 현재

모드(current mode)를 나타낸다. 세번째 칸의 내용은 순방향으로 가공할 때 모드변화에 따른 각 상태를 정리한 것이다. 순방향 가공시 역방향의 가공 시작점과 끝점을 저장했다가, 순방향 절삭을 모두 마친 후 역방향 가공을 시작한다. SP(start point)는 역방향 가공시 가공시작점을 의미하고, EP(end point)는 역방향 가공시 가공끝점을 의미한다. 화살표는 가공시작점과 가공끝점을 이은 것이다. 실선은 순방향으로 이동할 때 절삭하는 경로를 보여주고, 점선은 역방향으로 이동할 때 절삭하는 경로를 나타내고 있다.

Fig. 3(a), (b)에서 문자 ⊙는 가공이 시작되는 점을 의미하고, ⊗는 가공이 끝나는 부분을 의미한다.

Fig. 4는 u방향에 대한 절삭과정의 예를 보여준다. 우선 모드0과 모드1 부분은 서로 이어서 가공한다. 모드1에서는 공구 방향축을 기계적 한계값으로 기울여 가공하고, 모드0에서는 곡면의 법선벡터와 일치하도록 유지하면서 가공한다. 모드2 영역을 만났을 때는 그 점을 저장한 후에 공구를 다음 모드0 또는 모드1 부분으로 이동시켜 가공한다. 경로의 끝까지 간 다음에는 미절삭부분 모드2 영역을 가공한다.

한 경로에 대해서 가공한 후에 일정한 커슘을 갖도록 경로간의 간격을 구하고, 경로간 간격(path interval)이 v방향으로 마지막점에 도달할 때까지 이 과정을 반복한다.

4. 간섭

4.1 간섭의 정의

분할가공법을 적용할 경우 곡면이 볼록형상(convex form)에서는 간섭이 발생하지 않으며, 오목한 형상(concave form)을 하고 있을 때 생긴다. 엔드밀을 이용한 자유곡면가공시 발생하는 간섭은 다음과 같이 두 가지로 정의한다.

4.1.1 곡률간섭(curvature interference)

곡면의 곡률반경과 공구의 유효반경의 차이에서 생기는 간섭으로 다음과 같은 조건에서 간섭이 발생한다.

$$r_e > \frac{1}{\chi} \tag{2}$$

여기서, r_e 는 유효공구반경, χ 는 곡면에서 이송에 수직한 방향곡률을 나타낸다. 유효공구반경은 공구의 밑면 모서리중 곡작물과의 접촉점과 이송방향으

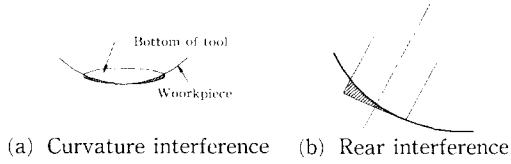


Fig. 5 Kinds of interference

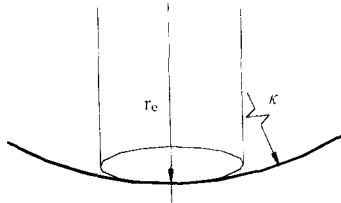


Fig. 6 Elimination of curvature interference

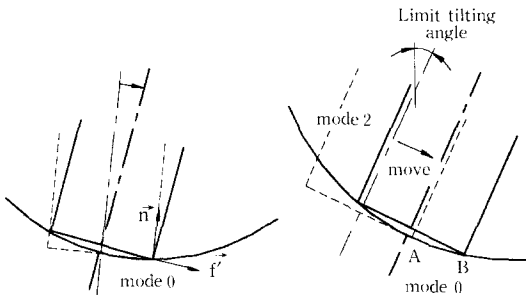


Fig. 7 Elimination of rear interference

로 정사영된 타원의 좌우측 양끝점을 지나는 원의 반경으로 정한다.

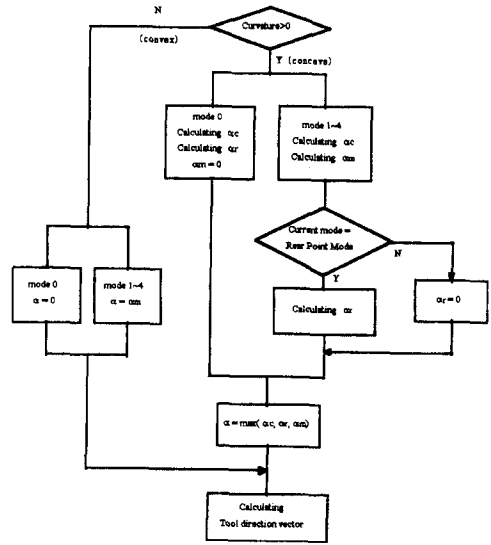
4.1.2 뒤간섭

CC-point를 중심으로 공구축 방향을 설정하다보면 이송방향 반대편으로 공구의 밑면과 곡면이 서로 충돌하는 부분이 생길 수 있다. 이를 뒤간섭(rear interference)이라 정의한다. 그림으로 나타내면 각각 Fig. 5의 (a), (b)와 같다.

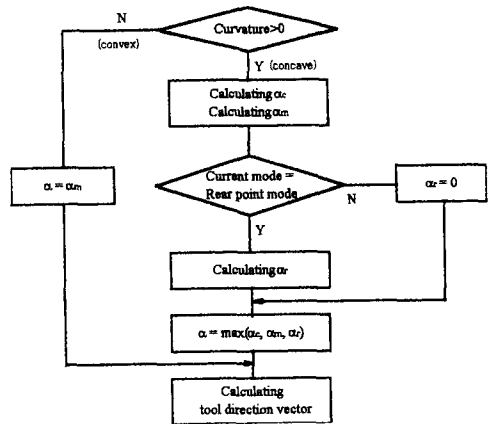
4.2 간섭의 제거

일반적으로 공구축 방향은 기울임각(tilting angle or sturz angle)과 회전각(rotation angle)으로 정의하여 구한다. 본 논문에서는 곡면을 형상에 따라 분할하여 가공하기 때문에 회전각을 주지 않아도 경로를 산출하는데 크게 문제가 되지 않는다. 따라서 회전각을 0으로 주고 기울임각(alpha)을 정하여 공구축을 계산한다.

간섭이 발생하지 않도록 기울임각을 결정할 때는 다음과 같은 세가지 사항을 고려해야 한다.



(a) In u-direction



(b) In v-direction

Fig. 8 Elimination of interference

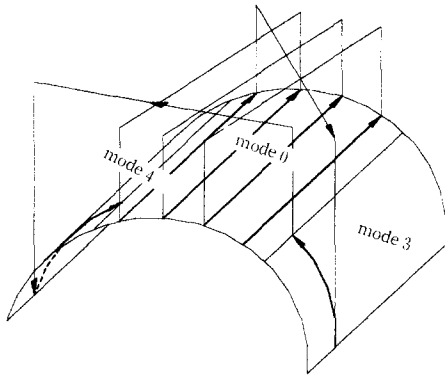
4.2.1 곡률간섭제거

곡률에 의해서 생기는 간섭을 제거하기 위해서는 공구를 이송방향으로 더 기울여야 한다.

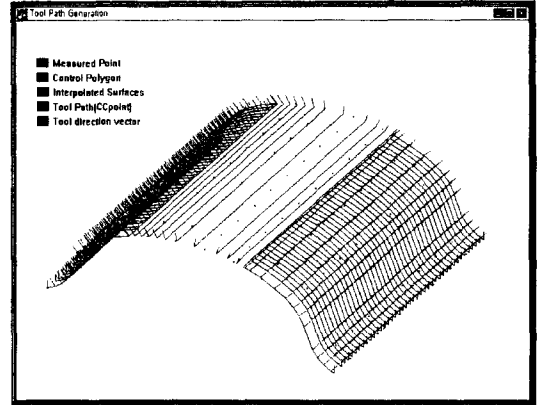
Fig. 6에서 곡면의 곡률반경과 유효공구반경이 같아지는 임계 기울임각은 다음과 같은 식으로 구한다.

$$\alpha_c = \sin^{-1} \left(\frac{\rho - \sqrt{\rho^2 - R^2}}{R} \right) \quad (3)$$

여기서, rho는 곡면의 곡률반경(1/x), R은 공구의 반경을 나타낸다.



(a) Partition machining in the cases of being mixed various modes



(b) Tool path and tool direction vector

Fig. 9 Example of generating of tool path using partition machining method

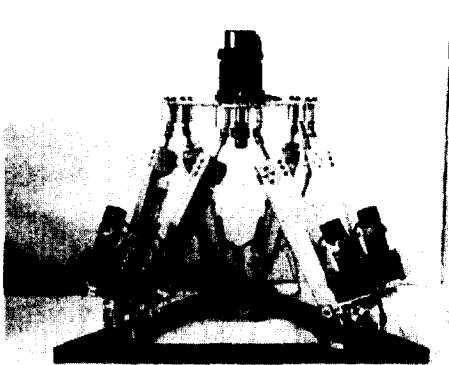


Fig. 10 Stewart platform



Fig. 11 Example of machining

4.2.2 뒤간섭제거

뒤간섭(rear interference)은 경우에 따라 두 가지 방법으로 대처해야 한다.

첫번째는 공구를 이송방향으로 더 기울여줌으로써 간섭이 제거될 수 있는 경우이고, 두번째는 다축가공기의 기계적 한계값 때문에 더 이상 기울일 수 없는 경우이다. 이때는 가공시작점을 옮겨야 한다. 각각의 경우는 Fig. 7(a), (b)에 나타나 있다.

Fig. 7(a)와 같은 경우는 우선 현재의 CC-point에서 공구의 직경만큼 뒤에 있는 점을 찾아 공구의 밑면의 이송방향으로 이루는 벡터 f^2 를 구한다. 기울임각은 다음과 같이 계산한다.

$$\alpha_r = 90^\circ - \angle(n, -f^2) \tag{4}$$

Fig. 7(b)의 경우는 가공시작점을 A에서 B로 옮

기는 과정을 분할가공법의 경로생성시 추가하여 간섭을 제거한다.

4.2.3 기계적 한계값

모드0 부분을 제외한 나머지 부분을 가공할 때는 기계적 한계값으로 기울여 가공한다. 그러나 기울임각은 곡면의 법선벡터를 기준으로 한 값이기 때문에 다음과 같은 계산과정을 통하여 기울임각을 구한다.

$$\alpha_m = \angle(n, N_0) - m_{limit} \tag{5}$$

여기서, n 은 곡면의 법선벡터, N_0 는 (0, 0, 1), m_{limit} 는 공구축을 기울일 수 있는 한계각을 나타낸다.

기울임각은 앞에서 구한 세가지 값 중 가장 큰 값으로 결정된다.

$$\alpha = \text{MAX}(a_c, a_r, a_m) \quad (6)$$

α 값을 정할 때 모든 순간에 a_c , a_r , a_m 를 계산할 필요는 없다. 경우에 따라서 고려하지 않아도 되는 α 값이 존재하기 때문이다. a_c , a_r , a_m 값은 분할가공의 상황에 따라 계산하는데 간섭을 제거한 공구축 방향벡터를 구하는 전체과정은 Fig. 8(a), (b)에 나타나 있다. Fig. 8(a)는 u방향으로 가공시 공구축 방향벡터를 계산하는 과정을 나타내고 있으며, Fig. 8(b)는 v방향으로 가공시 공구축 방향벡터를 계산하는 과정을 나타내고 있다.

5. 실험 및 고찰

분할가공법을 실린더 형상에 적용하여 가공경로를 산출하였다. Fig. 9(a)는 실린더 형상을 가공할 때 예상되는 가공경로를 보여주고 있다. u방향으로 모드0 부분을 가공한다. 그 후 v방향으로 모드3 영역과 모드4 영역을 순서대로 가공한다. Fig. 9(b)는 분할가공법을 프로그래밍하여 가공경로를 산출한 예를 보여주고 있다. 실선으로 길게 표시된 부분이 공구의 접촉점(CC-point)이며, 조그맣게 둘러싸인 부분은 공구축 방향벡터이다.

분할가공법에 의해 생성된 CL데이터를 이용하여 스튜어트 플랫폼형 밀링공작기계에 적용하여 실제 가공실험을 하였다. Fig. 10은 연세대학교에 제작된 스튜어트 플랫폼이며, Fig. 11은 분할가공법을 이용한 실제 가공예를 나타낸다.

6. 결 론

자유곡면가공시 공구로 볼엔드밀을 이용하는 것보다 플랫폼엔드밀을 이용하는 것이 절삭성 측면이나 가공효율 측면에서 더 우수하다. 그러나 간섭을 제거한 공구경로 산출이 어려운 문제가 있다. 본 논문에서는 곡면의 형상에 따라 공구가 적절한 자세

로서 가공할 수 있도록 곡면을 분할하여 가공하는 분할가공법(partition machining method)을 제시하였다. 분할가공법이란 곡면의 법선이 가리키는 방향에 따라 곡면을 다섯가지 모드로 분할하고 각 모드 형상마다 가공방향과 가공자세를 달리하여 가공하는 방법을 말한다. 또한 이를 적용할 수 있는 통합 소프트웨어를 작성하여 실제 가공데이터를 만들었다. 스튜어트 플랫폼형 밀링공작기계에 적용하여 플랫폼엔드밀을 이용한 자유곡면을 실제가공하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초 연구과제(96-0200-11-01-3) 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 맹희영, 1995, "최대 경사방향 트리를 이용한 삼각형 요소화 곡면 모델의 NC 엔드밀링 가공에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제19권, 제9호, pp. 2089~2104.
- (2) Susan X, Li and Robert B. Jerard, 1994, "5-axis Machining of Sculptured Surfaces with Flat-end Cutter," *Computer-Aided Design*, Vol. 26, No. 3, pp. 165~178.
- (3) Daoyuna Yu, Jianchun Deng, Zhengcheng Duan and Jinling Liu, 1996, "Generation of Gause Free Cutter Location Paths on Freeform Surfaces for Non-spherical Cutters," *Computers in Industry*, Vol. 28, pp. 81~94.
- (4) Vickers, G. W., Bedi, S. and Haw, R., 1985, "The Definition and Manufacture of Compound Curvature Surfaces Using G-surf," *Computers in Industry*, Vol. 6, pp. 173~183.