

## 3 축 CNC 를 이용한 5 축 자유곡면 가공\*

### Five-Axis Machining with Three-Axis CNC Machine

이정재\*\*, 서석환\*\*

Jung-Jae Lee and Suk-Hwan Suh

#### Abstract

One of the most distinguished advantages of five-axis machining is that complex free surfaces(such as impeller) can be machined by one setup. Five-axis CNC machine, however, is very expensive so that its usage is restricted to a few large companies. As an economical approach to five-axis machining, this paper presents a method for machining the five-axis free surfaces(using ball-end mill) on a three-axis CNC machine with an index table. The method developed consists of: a) determining the minimum number of part setups and their interference-free and collision-free potential machining area, b) calculating actual machining area for each setup, and c) generating 3-axis cutter path for each part setup. The method has been successfully tested via computer simulations for several complex surfaces including impeller.

#### 1. 서론

자유곡면 가공시 5 축 가공의 이용도는 가공형상에 따라 볼엔드밀 가공과 플랫엔드밀 가공으로 나눌 수 있다[2]. 임펠러와 같은 복잡한 가공형상을 볼엔드밀을 이용하여 1 회 셋업으로 효율적으로 가공하고[3, 4], 브레이

드와 같은 부드러운 곡면을 플랫엔드밀을 이용한 경사가공 방법[5]으로 가공 정밀도 및 효율성 향상을 도모함으로써[6, 7, 8], 5 축 가공에 대한 산업계의 관심은 고조되고 있다. 5 축 가공의 장점은 가) 1 회 셋업으로 다양한 공구자세를 취하여, 나) 셋업 및 가공 시간을 절감하고, 다) 정교한 가공으로 후가공

\* 이 연구는 94년도 한국과학재단 연구지원(과제번호: 941-1000-063-2)에 의한 결과임.

\*\* 포항공과대학교 산업공학과

시간을 절감하며, 라) 고정도의 가공면을 생성할 수 있다는 것이다[1].

그러나 5 축 가공의 유용성에도 불구하고, 5 축 CNC 머신은 3 축 CNC 머신에 비해서 매우 고가이며[9], 5 축 가공경로 생성은 5 축 CAD/CAM 장비의 지원이 없으면 매우 힘든 작업이어서, 중소기업은 물론이고 대기업에서조차도 5 축 가공의 광범위한 이용이 제한되고 있다. 따라서 기존 3 축 CNC 머신을 이용하여 5 축 가공을 구현한다면, 5 축 CNC 머신의 구입없이 경제적으로 5 축 가공을 이용할 수 있을 뿐만아니라, 3 축 CNC 머신의 활용도도 증대시킬 수 있는 획기적인 방안이 될 것이다.

3 축 CNC 머신을 이용하여 5 축 가공을 실현한 연구로는 Ralph 와 Loftus[10]의 연구외에는 문헌상에 보고된 바가 전무하다. 그들은 3 축 CNC 머신상에서 장착된 2 축 인덱스 회전축으로 가공물의 셋업자세를 조정하여, 플랫엔드밀을 이용한 경사가공을 반구형상에 대해서 적용하였다. 그들은 3 축 CNC 머신상에서 경사가공의 타당성 검토에 주안점을 두어, 가공영역의 분할없이 공구경로 단위로 평균 공구잔흔(cusp)량 또는 최대 공구잔흔량을 기준으로 경사가공이 가능한 공구자세를 선정하였다. 따라서 이 방식은 반구와 같은 단순한 형상에는 적용될 수 있으나, 자유곡면의 적용에는 한계가 있다.

본 연구에서는 Ralph 와 Loftus[10]의 연구와는 달리 임펠러 형상과 같이 다축 가공형상(1 회 셋업으로 가공할 수 없는)을 볼엔드밀을 이용하여 2 축 회전 인덱스 테이블이 장착된 3 축 CNC 머신상에서 가공하는 방법을 제시한다. 제시된 방법에서 사용되는 2 축

회전 인덱스 테이블은 3 축 CNC 머신과는 연속적인 동기제어가 되지 않고, 수동 또는 제어명령에 따라서 단속적으로 제어된다. 따라서 제안된 3 축 환경에서는 동시 5 축 제어가 불가능하므로 완벽하게 동시 5 축 가공을 구사할 수 없음을 밝혀둔다. 예를들어, 공구옆면을 이용한 ruled surface 가공은 제안된 3 축 환경에서는 모사할 수 없는 동시 5 축 가공의 특성중의 하나이다.

다축 형상을 제안된 3 축 가공환경에서 가공하기 위해서는 다음 사항들을 결정하여야 한다.

- 가공형상을 가공할 수 있는 공구자세들 또는 셋업자세들
- 각 공구자세에서 간섭을 배제한 가공 가능한 영역
- 각 가공영역에서의 공구경로 산출

다축 가공형상에 대한 셋업자세 및 가공영역 결정에 대한 기존연구로는 Vmap(Visibility Map) 방식이 있다[11, 12, 13]. Woo[11]는 복합곡면을 3 축 가공가능한 단위곡면의 집합으로 가정하고, 각 단위곡면의 Vmap 을 이용하여 복합곡면의 셋업자세를 구하고, 가공영역은 단위곡면을 단위로 분할하였다. 이 방법에서는 타 단위곡면들과의 공구몸체간섭이 고려되지 않았기 때문에 경우에 따라서 공구몸체간섭이 발생하는 셋업자세를 선정할 수 있으며[13], 공구몸체간섭으로 인하여 가공영역도 단위곡면 단위로 분할하기가 어렵다. Suh 와 Kang[14]은 자유곡면을 폴리헤드론 모델로 전환하여 각 폴리곤의 중심점에 대한 PVC(Point Visibility Cone) 를 이용 BSM(Binary Spherical Map) 을 구축하여 3,4,5 축

에 대한 셋업자세를 선정하는 방법을 제시하였다. 이 방법에서는 process planning 관점에서 공구를 직선으로 근사하여 각 곡면점들에 대한 접근성을 검사하여 접근가능한 자세들을 계산하였으나, 공구볼륨을 고려하지 않았기 때문에 경우에 따라서는 공구몸체간섭으로 인한 부적합한 해를 생성할 수 있으며 공구형상의 일반화(복잡화)로의 확장이 어렵다. 또한 곡면점에 접근가능한 자세 집합만을 고려하였기때문에 가공곡면의 셋업자세에 대한 정보는 줄 수 있으나, 공구경로산출을 위한 가공영역에 대한 정보를 제공하기는 미흡하다.

본 연구에서는 다축 자유곡면을 3축 CNC 머신상에서 블렌드밀로 가공하기 위한 가) 3축 가공환경을 제시하고, 나) 공구몸체간섭을 고려한 가공 공구자세를 설정하고, 다) 가공공구자세에서의 가공가능한 영역을 정하며, 라) 각 가공영역에서 공구경로를 산출하는 방안을 제시한다.

## 2. 제안된 3축 가공환경

본 연구에서 제안한 5축 가공실현을 위한 3축 가공환경은 3축 CNC 머신과 2축 인덱스테이블(이하 IT로 표시한다.)로 구성되며, 일례로 그림 1은 3축 수직형 CNC 머신과 B축( $\theta_1$ )과 C축( $\theta_2$ )의 회전축을 지원하는 IT로 구성된 3축 가공환경의 구조도를 보여준다. 그림 1의 3축 가공환경은 5축 CNC 머신의 분류에 따르면[15], 테이블 회전형에 해당하는 것으로 널리 이용되는 5축 머신형태이다. 5축 CNC 머신이라고 하여서 모든 5축 가공형상을 모두 가공할 수

있는것은 아니며, 가공형상에 따라서 가공에 적절한 머신형태를 결정하여야 한다[1]. 제안된 3축 가공환경은 가공형상에 따라서 3축 CNC 머신의 형태와 2축 IT의 형태를 결정하여 다양한 5축 머신의 형태를 구축할 수 있어, 가공형상의 변화에 유연하게 대처할 수 있다는 장점이 있다.

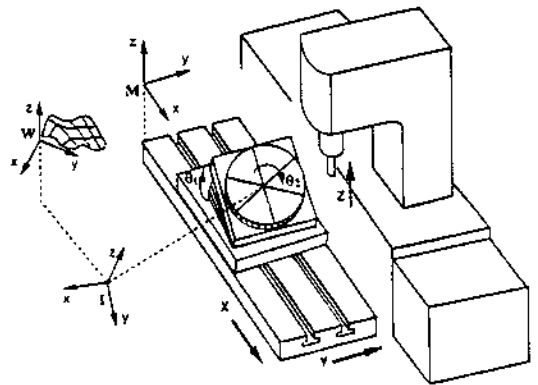


그림 1. 제안된 3축 가공환경의 일례

본 연구에서는 제안된 3축 가공환경을 모델링하기 위하여 그림 1에서 도시된 바와 같이 3개의 좌표계를 설정하였다. M은 3축 CNC 머신의 기준좌표계로 공구경로의 기준좌표계이다.

I는 IT의 좌표계로 IT의 상판 중앙지점에 위치한다. W는 가공곡면의 기준좌표계로, 가공곡면 모델링 데이터의 기준좌표계이다. 이들 3개의 좌표계의 관계는  $4 \times 4$  전환행렬  $T_j^i$ 로 표현한다.  $T_j^i$ 는  $i$  좌표계를 기준으로 한  $j$  좌표계의 관계를 나타낸다.  $T_W^I$ 는 W와 I 좌표계의 관계를 나타내며, 가공물이 IT 상에 장착된 자세를 나타낸다.  $T_I^M(\theta_1, \theta_2)$ 는 I 좌표계와 M 좌표계사이의 관계를 나타내며, IT의 파라미터  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 의 함수로 표현된다. 따

라서, W 좌표계에서 M 좌표계사이의 전환행렬  $T_W^M$  는 식 1로 표현된다.

$$T_W^M(\theta_1, \theta_2) = T_I^M(\theta_1, \theta_2) T_W^I \quad (1)$$

그림 2 는 3 축 가공환경에 대한 구조도 및 본 연구에서 사용되는 IT 를 보여준다.  $O_3$  는 I 좌표계이며, IT 파라미터들의 유효범위는  $\theta_1 = [0, 90]$ ,  $\theta_2 = [-180, 180]$  이다. 그림 2 에서 I 좌표계와 W 좌표계가 일치한다면 전환행렬  $T_W^M(\theta_1, \theta_2)$ 는 식 2와 같다.

$$T_W^M = T_{O_1}^M T_I^{O_1}(\theta_1, \theta_2) T_W^I \quad (2)$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 0 & 1 & p_y \\ 0 & -1 & 0 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_1 C_2 & -C_1 S_2 & S_1 & d_2 S_1 + a_1 C_1 \\ S_1 C_2 & -S_1 S_2 & -C_1 & -d_2 C_1 + a_1 S_1 \\ S_2 & C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_1 C_2 & -C_1 S_2 & S_1 & d_2 S_1 + a_1 C_1 + p_x \\ S_2 & C_2 & 0 & p_y \\ -S_1 C_2 & S_1 S_2 & C_1 & d_2 C_1 - a_1 S_1 + p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

여기서,  $C_i = \cos(\theta_i)$ ,  $S_i = \sin(\theta_i)$

### 3. Solution Approach

한 공구자세에서 가공가능 영역이란 공구-몸체간섭 및 머신충돌이 없이 공구가 접근가능한 영역이라고 정의하고, 이를 PMA(Potential Machining Area) 로 표시한다. 그림 3 에서는 공구자세  $t$  와 PMA 의 관계를 보여준다. 그림에서  $c$  영역은  $t$  자세에서 가시 가능하지만, 가공할 수 없는 영역이다. 왜냐하면,  $c$  영역에 공구가 접근하면 공구-몸체간섭이 발생하기 때문이다. 따라서 공구자세  $t$  의 PMA 는  $a$  와  $b$  영역이 된다. 즉, 공구자세  $t$  에서의 가시가능영역은 PMA 의 필요조건이며, PMA 는 가시가능영역에 대한 충분조건이 된다.

공구자세  $t$  에서의 PMA 를  $PMA'$  로 나타내면, 가공곡면  $S$  를 가공하기위한 최소 공구자세들 MTO(Minimum Tool Orientations) 를 산출하는 문제는 식 3 을 만족하는 공구자세들 집합  $Q$  중 최소의 원소 수를 가지는 공구집합을 결정하는 것이다.

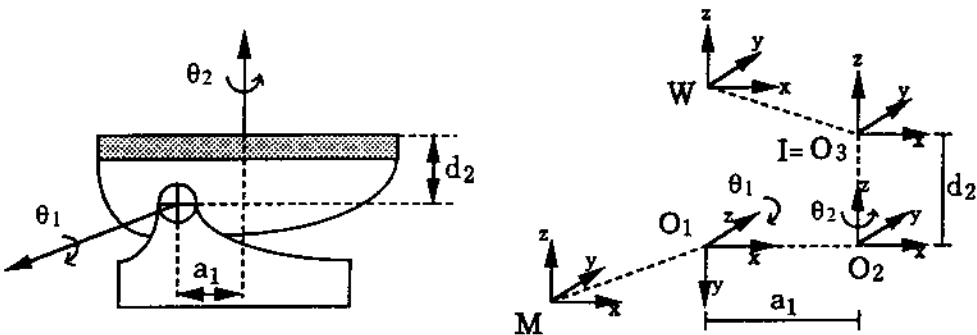


그림 2. IT 와 구조도

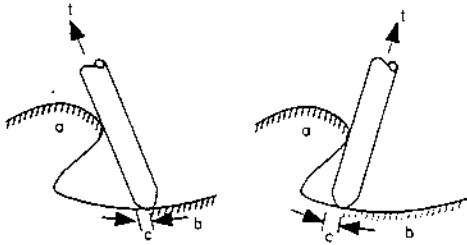


그림 3. 공구자세와 PMA

$$U_{i \in Q} PMA^i = S \quad (3)$$

MTO가 결정되면, MTO에 속한 각 공구자세에서의 가공경로를 산출하기 위하여 각 공구자세에서의 실제 가공 영역을 산출하여야 한다. 실제 가공 영역은 AMA(Actual Machining Area)로 표시한다. 그림 4에서 두 공구자세  $t_1$  과  $t_2$  의 PMA는 a 영역에서 중복됨을 알 수 있다.  $t_1$  에서  $PMA^{t_1}$  를  $t_2$  에서  $PMA^{t_2}$  를 각기 가공한다면, a 영역에서 불필요한 중복가공이 발생한다. 따라서 a 영역을  $t_1$  과  $t_2$  로 분할하여 중복영역이 없는 AMA를 생성하여야 한다. 공구자세  $i$  에서 AMA를  $AMA^i$  라 표시하면, AMA는 식 4를 만족하여야 한다.

$$U_{i \in MTO} AMA^i = S \quad (4)$$

where,  $AMA^i \subseteq PMA^i$  and  $AMA^i \neq AMA^j, \forall i, j \in MTO$

PMA가 결정되면 식 3,4를 이용하여 MTO 및 AMA를 산출하고, AMA를 기준으로 각 공구자세에서의 공구경로를 생성할 수 있다. 따라서 가) PMA의 산출 및 표현이 용이하고, 나) 식 3,4을 이용하여 MTO 및 AMA 산출 계산이 쉽고, 다) 산출된 AMA로부터 공구경로 생성이 간편하도록 PMA

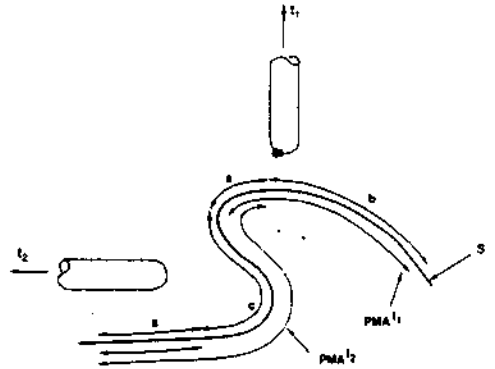
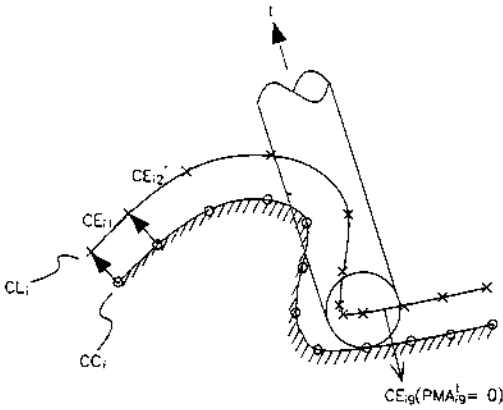


그림 4. PMA와 AMA

를 표현할 수 있다면, 보다 효과적으로 제시된 문제를 해결할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 PMA를 공구밀면간섭(공구가우징)이 배제된 CL(공구중심점) 경로를 기준으로 표현한다. 볼엔드밀 공구는 프렛엔드밀 공구와는 달리 가공곡면과의 접촉부위가 구형상이므로 공구자세가 변경하여도 접촉부위의 형상은 일정하게 유지된다. 따라서 볼엔드밀 공구는 공구밀면간섭과 공구몸체간섭을 나누어 생각할 수 있다. 공구밀면간섭이 배제된 CL 경로 산출은 Choi와 Jun의 방법 [16]을 이용하였다. 구체적인 PMA의 표현은 그림 5에서 보여진다.

그림 5에서 CL 경로  $CL_i$ 는 CL 선분들  $CE_{ij}$ 로 구성된다. 공구자세  $i$ 에서  $CE_{ij}$ 의 양 끝점이 모두 가공가능하면  $PMA^i_{ij} = 1$ 이고, 아니면  $PMA^i_{ij} = 0$ 이 된다. 그러므로 공구자세  $i$ 에서의 PMA는  $CE_{ij}$ 를 기준으로  $PMA^i_{ij}(\forall ij)$ 로 표현된다. 예를들어, 공구자세  $i$ 에서  $PMA^i_{ij} = 1, (\forall ij)$  라면, 주어진 가공곡면은 공구자세  $i$ 만으로 가공가능함을 의

미한다.



(i,j)	(1,1)	(1,2)	(1,3)	(1,4)	(1,5)	(1,6)	(1,7)	(1,8)	(1,9)	(1,10)	(1,11)
PMA <sup>t</sup> <sub>i,j</sub>	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1

그림 5. CL 경로와 PMA

제시된 PMA 표현법에 의하여 식 3 은 다음식으로 표현된다.

$$\sum_{i \in Q} PMA_{i,j}^t \geq 1, \forall i, j \tag{5}$$

$$\sum_{i \in MTO} AMA_{i,j}^t = 1, \forall i, j \tag{6}$$

where,  $AMA_{i,j}^t \leq PMA_{i,j}^t$

제시된 PMA 표현법은 가공곡면을 가공하기 위해서 공구가 반드시 통과해야 할 CL 경로를 기준으로 하여 가) PMA 가 CE<sub>i,j</sub> 를 기준으로 1 또는 0 으로 표시되어 가공영역 표현의 간결성 및 정확성을 기할 수 있고, 나) 식 5,6 은 이진수의 계산으로 MTO 및 AMA 산출의 효율성을 기할 수 있을 뿐 아니라, 다) AMA 생성후 별도의 CL 경로 생성작업이 불필요하여, 제시된 문제를 효과적으로 해결할 수 있다.

공구자세  $t$  에서 한 CE<sub>i,j</sub> 에 대한 PMA<sup>t</sup><sub>i,j</sub> 의 값을 결정하기 위해서는 CE<sub>i,j</sub> 의 가공가능성에 대한 유효성(feasibility) 검사를 하여야 한다. 유효성 검사는 3 가지로 나뉘어진다: 가) 머신 리미트 검사, 나) 공구몸체간섭 검사, 다) 머신 충돌 검사. 머신 리미트 검사는 공구의 접근위치가 머신의 운동범위내에 있는가를 결정하는 것이다. 공구몸체간섭 검사는 가공곡면과 공구몸체와의 간섭을 검사하고, 머신충돌 검사에서는 치구, 공구집, 스피들헤드 부분의 충돌검사를 행한다.

머신 리미트 검사는 W 좌표계에서 공구자세  $t$  와 검사할 공구위치점  $p$  가 주어지면, 우선 머신 공구축(Z축)이  $t$  자세를 취할 수 있는 IT 파라미터  $\theta_1, \theta_2$  를 구하고, 그 다음  $T_W^M(\theta_1, \theta_2)$  를 이용하여  $p$  의 M 좌표계에서의 위치  $p^M$  을 정한다.  $p^M$  이 CNC 머신의 가공영역내에 있으면,  $p$  에 대한 공구몸체간섭 검사 및 충돌검사를 하고, 아니면  $p$  는 공구자세  $t$  에서는 가공할 수 없다.

공구몸체간섭은 가공곡면  $S$  를 가공 허용 공차를 고려하여 볼록 폴리곤들로 형성된 폴리헤드론 모델 SPM(Surface Polyhedral Model)으로 근사하여, SPM 과 공구 중심선분과의 거리  $D$  를 계산하여 판별한다.  $D$  가 공구반경  $R$  보다 작으면 공구몸체간섭이 발생한다. SPM 을 이용한 방법은 계산이 쉽고, 안정된 결과를 주는 장점이 있으나, 반면 허용공차가 작을수록 SPM 을 구성하는 폴리곤들의 수가 증가하여 간섭검사의 계산량이 증가하는 단점이 있다. 그러나, 이 단점은 공구몸체간섭의 가능성이 있는 국부영역만을 판별하여 간섭검사를 함으로써 효율적인 계산을 할 수 있다. 또한 복잡한 형상을 가지는 공구의

경우도 공구형상을 폴리헤드론으로 근사하여 SPM 과 간섭검사를 할 수 있다.

머신충돌 검사도 공구몸체간섭 검사와 같이 폴리헤드론 모델을 이용한다. 대부분의 머신충돌은 공구집, 스핀들헤드, 치구 부분에서 발생하므로, 충돌검사는 공구집, 스핀들헤드, 치구부분을 중점적으로 한다. 공구집과 스핀들헤드를 스핀들헤드 폴리헤드론으로 치구를 치구 폴리헤드론으로 근사한다. 공구몸체와 치구 폴리헤드론사이의 충돌검사는 공구몸체 간섭 검사방법을 이용한다. 스핀들헤드 폴리헤드론과 치구 폴리헤드론과의 충돌은 각각의 폴리헤드론을 구성하는 폴리곤들의 교차관계를 조사하여, 교차하는 폴리곤이 있다면 충돌이 발생한다고 판별한다. 그리고, 스핀들헤드 폴리헤드론과 가공곡면 폴리헤드론 SPM 과의 충돌은, 우선 스핀들헤드 폴리헤드론이 차지하는 국부가공영역을 판별하여, 선택된 국부가공영역내에 포함되는 SPM 의 폴리곤들에 대해서만 스핀들헤드 폴리헤드론과의 교차관계를 검사하여 판별한다. 이 방법은 국부영역에 대해서만 검사를 함으로써 계산의 효율성을 기할 수 있다.

본 연구에서 제안된 접근방법을 요약하면 그림 6 과 같다.

#### 4. PMA 산출

PMA 는 유효한 모든 공구자세들에 대해서 산출된다. 이론적으로 유효한 공구자세들은 단위 구 상의 모든 점들이 될 수 있으나 [11], IT 의 회전축 운동범위에 따라서 유효한 공구자세들은 단위 구 상의 일부 영역에 존재한다. 이런 유효한 공구자세들의 영역을

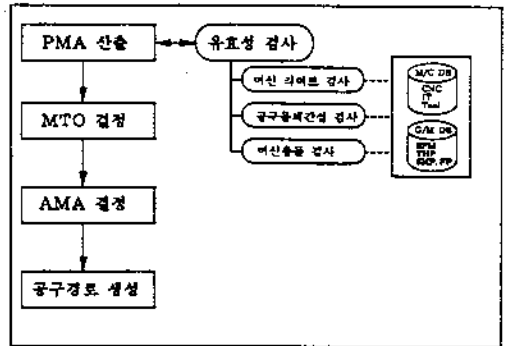


그림 6. Solution approach

TAA(Tool Axis Area) 로 표시하자. 예를 들어, 그림 2 의 IT 인 경우  $\theta_1, \theta_2$  의 유효범위를 고려하여 TAA 는 반구 형상이 된다. 또한 TAA 는 IT 의 운동범위만이 아니라 가공형상에 따라서 그 범위를 축소할 수 있다. TAA 가 결정되면, TAA 내의 모든 공구자세들에 대해서 PMA 를 구축한다.

그러나, TAA 내의 모든 공구자세들에 대해서 PMA 를 구축하는 것은 계산적인 측면에서 어렵다. 따라서 계산의 효율성을 위하여 TAA 를 일정한 간격의 공구자세들로 근사한다. 근사된 공구자세들의 집합을 TAS (Tool Axis Set) 이라 하자. 근사간격이 작아지면, TAA 에 대한 TAS 의 근사도가 높아지나, 계산량이 증가하므로, 정확도와 계산량의 보상이 필요하다. 근사간격은 가공곡면의 형상에 따라 조정될 수 있다. 가공곡면이 복잡하여 공구간섭의 가능성이 크면 근사간격을 작게 하고, 반대의 경우 근사간격을 크게 한다. 단, TAS 의 공구자세들은 IT 의 회전분해능(resolution)을 고려하여, IT 가 취할 수 있는 자세가 되어야 한다.

TAS 가 결정되면, TAS 내의 모든 공구자세들에 대해서 PMA 를 구축한다. 구축된

PMA 가 식 7을 만족하면, 주어진 가공곡면은 가공 가능하다. 아니면, TAS 내의 공구자세들로 주어진 가공곡면을 가공할 수 없다.

$$\sum_{i \in TAS} PMA_{ij}^t \geq 1, \forall ij \quad (7)$$

TAS 내의 공구자세들에 대해서 PMA 를 구축하는 절차는 4 단계로 나누어진다. 첫째 단계에서는 W 좌표계에서 정의된 공구자세  $t$  가 M 좌표계의 Z 축과 일치하도록 IT 파라미터  $\theta_1, \theta_2$  를 결정한다.  $T_W^M(\theta_1, \theta_2)$  행렬의  $3 \times 3$  의 회전성분을  $R_W^M(\theta_1, \theta_2)$  이라 하면,  $\theta_1, \theta_2$  는 식 8로 구할 수 있다.

$$[0, 0, 1]^T = R_W^M(\theta_1, \theta_2)t \quad (8)$$

둘째 단계에서는 W 좌표계상에 설정된 SPM 과  $CE_{ij}$  를 M 좌표계상의  $SPM^M$  과  $CE_{ij}^M$  로 전환하고(식 9,10), M 좌표계상에서  $SPM^M$  의 가공범위  $MA[(lx:ux), (ly:uy), (lz:uz)]$  를 설정한다(그림 7).

$$SPM^M = T_W^M(\theta_1, \theta_2) \quad (9)$$

$$CE_{ij}^M = T_W^M(\theta_1, \theta_2)CE_{ij} \text{ for } \forall i, j \quad (10)$$

셋째 단계에서는 유효성(feasibility) 검사의 효율성을 높이기 위하여 가공범위 MA 를 국부가공영역  $LMA_{i,j,k}(i=[1:l], j=[1:m], k=[1:n])$  로 세분화 한다(그림 7). 국부가공영역  $LMA_{i,j,k}$  는 한변의 길이가  $2R$  인 정육면체이다.  $LMA_{i,j,k}$  의 총 수는  $l \times m \times n$  이며,  $l, m, n$  은 다음과 같다.

$$l = \frac{(ux-lx)}{2R} + 1, m = \frac{(uy-ly)}{2R} + 1, n = \frac{(uz-lz)}{2R} + 1 \quad (11)$$

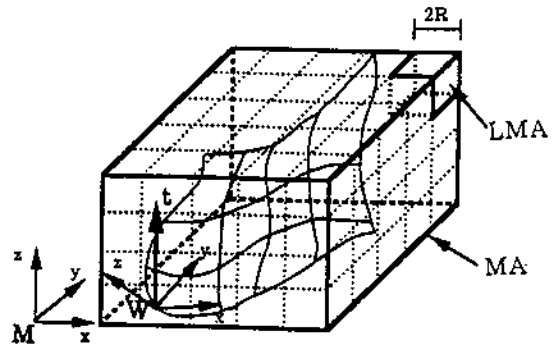


그림 7. MA(Machining Area) 와 LMA(Local Machining Area)

국부가공영역이 정해지면,  $SPM^M$  의 모든 폴리곤에 대해서 각 폴리곤이 포함되는 국부가공영역을 판별하여, 폴리곤의 인덱스를 선정된 국부가공영역  $LMA_{i,j,k}$  에 저장한다.

넷째 단계에서는 모든  $CE_{ij}^M$  의 양끝점에 대해서 유효성 검사를 하여  $PMA_{ij}^t$  를 결정하는 것이다. 유효성 검사는 가) 머신 리미트 검사, 나) 공구몸체간섭 검사, 다) 머신충돌 검사로 세분화된다. 각 검사의 구체적인 방법은 5 장에서 자세히 기술한다.  $CE_{ij}^M$  의 양끝점을  $CE_{ij}^M[1], CE_{ij}^M[2]$  으로 표시하면,  $PMA_{ij}^t$  결정에 대한 알고리즘은 다음과 같다.

```

Procedure determine_PMAijt {
  for all CEijM {
    1. n = 0; /* n is the number of feasible points */
    2. for k=1 to 2 {
      if(checked_point(CEijM[k]) = Yes) {
        if(was_feasible(CEijM[k]) = Yes) {n = n+1; continue;}
        otherwise, {PMAijt = 0; next CE;}
      }
    }
  }
}
    
```



```

}
if(machine_limit_check(CEijM[k]) = Not
_within) continue;
if(tool_body_interference_check(t,
CEijM[k])=Interference) continue;
if(machine_collision_check(t,CEijM
[k]) = Collision) continue;
n=n+1;
}
3. if(n = 2) PMAijt = 1;
4. otherwise, PMAijt = 0;
}
}

```

공구자세  $t$  에 대해서 PMA 를 구축하는 절차를 요약하면 다음과 같다.

```

Procedure generate_PMAt {
1.  $t$  에 대한 IT 파라미터  $\theta_1, \theta_2$  를 구한
다(식 8).
2. SPM 과 CEij( $\forall ij$ ) 를 M 좌표계로
전환하여 SPMM 과 CEijM 를 생성하고
(식 9,10), 가공영역 MA 를 설정한다
(그림 7).
3. MA 를 기준으로 국부가공영역 LMA
를 구축하고(그림 7), SPMM 의 폴리
곤들을 LMA 에 분류, 저장한다.
4. determine_PMAijt
}

```

## 5. 유효성 검사(Feasibility check)

유효성 검사는 가) 머신 리미트 검사, 나) 공구몸체간섭 검사, 다) 머신충돌 검사로 나누어진다.

머신 리미트 검사는 M 좌표계상의 한 공구위치  $p$  가 CNC 의 운동범위내에 존재하는가를 판별한다. M 좌표계상에서 CNC 머신의 X 축의 운동범위가  $[x-:x+]$ , Y 축의 운동범위가  $[y-:y+]$  Z 축의 운동범위가  $[z-:z+]$  라면, CNC 머신의 운동범위는  $[(x-:x+), (y-:y+), (z-:z+)]$  이다. 머신 리미트 검사의 절차는 다음과 같다.

```

Procedure machine_limit_check {
1. if( $p \in [(x-:x+), (y-:y+), (z-:z+)]$ ) return Within;
2. otherwise, return Not_within;
}

```

공구몸체간섭 검사에서는 계산의 효율성을 위해서 공구와 인접하여 간섭 가능성이 있는 검색 LMA 를 결정하고(그림 8), 검색 LMA 내에 존재하는 폴리곤들에 대해서만 공구 중심 선분과의 거리를 계산하여 간섭을 판별한다.

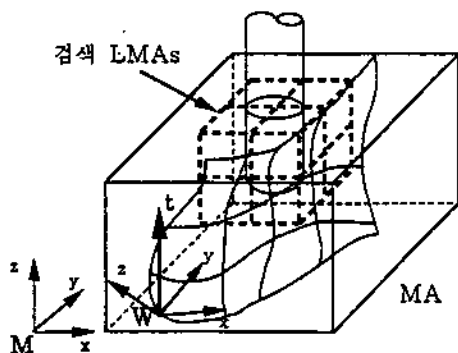


그림 8. 검색 LMA 결정

검색 LMA 가 결정되면, 우선 검색 LMA 내의 폴리곤들을 공구축을 따라서 5 개의 공

구간섭영역 TIA(Tool Interference Area)(그림 9)로 분류한다. 그림 9에서  $C$ 는 법선 벡터를  $t$ 로 하고 공구중심점  $c$ 를 지나는 평면이고,  $C'$ 는 공구축  $t$ 를 따라 공구길이  $TL$ 만큼 평면  $C$ 를 평행이동한 평면이다.  $TIA_0$ 는 공구축  $t$ 를 따라서 평면  $C$  밑의 영역으로, 이 영역에 있는 폴리곤은 공구몸체간섭이 발생하지 않는다. 마찬가지로  $TIA_4$ 는 평면  $C'$  위의 영역으로 공구몸체간섭에 영향을 주지 않는 영역이다.  $TIA_2$ 는 평면  $C$ 와 평면  $C'$  사이에 존재하는 영역으로 공구몸체간섭의 발생할 수 있는 영역이다.  $TIA_1$ 는  $TIA_0$ 와  $TIA_2$ 를 공유하는 영역으로 공구몸체간섭이 발생할 수 있는 영역이며, 마찬가지로  $TIA_3$ 도 공구몸체간섭의 가능성이 있는 영역이다. 각 폴리곤의 간섭영역 결정은 폴리곤의 선분을 기준으로 한다. 예를들어, 폴리곤의 모든 선분들이  $TIA_2$ 에 있다면, 해당 폴리곤은  $TIA_2$ 에 위치한다고 판명한다. 따라서, 폴리곤이 위치한 간섭영역을 판별하여  $TIA_1, TIA_2, TIA_3$ 내에 존재하면 공구몸체간섭 검사를 하고,  $TIA_0$ 와  $TIA_4$  영역에 존재하면 공구몸체간섭 검사를 생략한다.

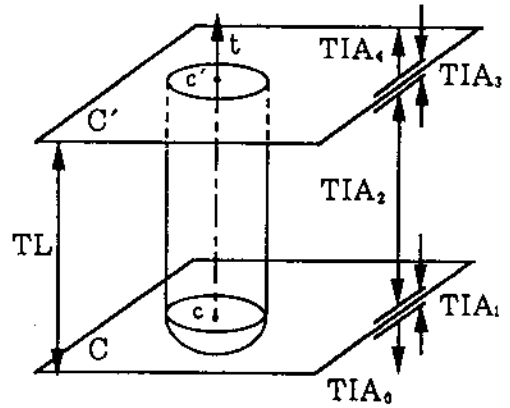


그림 9. 공구간섭영역 TIA

```

Procedure body_interference_in_TIA2 {
    1. 폴리곤과  $cc'$ 와의 교차관계를 검사한다.
        if(intersection_bet_polygon_and_
            edge(polygon,cc') = Yes) return
            Interference.
    2. 폴리곤의 선분  $e_i$ 와  $cc'$ 와의 거리  $d_i$ 
        를 계산한다.
         $d_i = \text{minimum\_distance\_between\_}$ 
             $\_edges\_in\_3D(e_i, cc')$ 
    3. 폴리곤과  $cc'$ 와의 거리  $D$ 를 계산한
        다.
         $D = \min_i d_i$ 
    4. if( $D < R$ ), return Interference.
    5. otherwise, return No_interference.
}
    
```

$TIA_1$ 에 속하면 폴리곤들의 간섭검사는 다음과 같다. 우선, 폴리곤과 평면  $C$ 의 두 교차점  $i$ 와  $r$ 를 구한다. 다음, 주어진 폴리곤을 교차선분  $ir$ 를 공유하며,  $TIA_0$ 에 속하는

$TIA_2$ 에 속하는 폴리곤들의 간섭검사는 다음과 같다. 우선, 폴리곤과 공구중심선분  $cc'$ 의 교차관계를 검사한다. 폴리곤과  $cc'$ 가 교차하면, 공구몸체간섭이 발생한다. 아니면, 폴리곤과 공구중심선분  $cc'$ 와의 거리  $D$ 를 산출하여  $D$ 가  $R$ 보다 작으면 공구몸체간섭이 발생한다.  $D$ 는 폴리곤의 선분들  $e_i$ 와 공구중심선분  $cc'$ 과의 거리  $d_i$ 중 최소값이 된다.  $TIA_2$ 에서의 간섭검사 알고리즘 `body_interference_in_TIA2`은 다음과 같다.

폴리곤  $\delta_0$  와  $TIA_2$  에 속하는 폴리곤  $\delta_2$  로 분리한다(그림 10). 폴리곤  $\delta_0$  에 대해서는 간섭검사를 생략하고, 폴리곤  $\delta_2$  에 대해서는 앞의 `body_interference_in_TIA2` 를 이용하여 간섭검사를 한다.  $TIA_3$  에 속하면 폴리곤들의 간섭검사는  $TIA_1$  에 속하는 폴리곤들의 간섭검사와 유사하다.

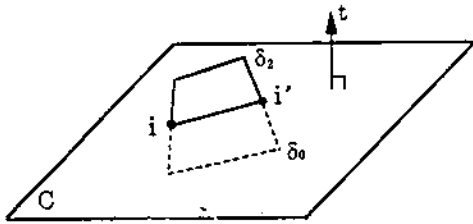


그림 10. 폴리곤의 분리

머신충돌 검사는 공구와 치구 폴리헤드론의 충돌검사, 스피indle헤드 폴리헤드론과 치구 폴리헤드론의 충돌검사, 스피indle헤드 폴리헤드론과 가공곡면 폴리헤드론 SPM 의 충돌검사로 세분화된다. 공구와 치구 폴리헤드론의 충돌은 공구몸체간섭 검사방법을 이용하여 판별한다. 스피indle 폴리헤드론과 치구 폴리헤드론과의 충돌은 각 폴리헤드론을 구성하는 폴리곤들의 교차관계를 검사하여 판별한다. 두 폴리헤드론들 사이에 교차하는 폴리곤이 존재하면 두 폴리헤드론 모델은 충돌한다고 판별한다. 폴리곤  $\delta_1$  과  $\delta_2$  사이의 교차검사 방법은 다음과 같다.

```

Procedure intersection_bet_polygons {
  1. for all edges  $e_i$  of  $\delta_1$ 
     if(intersection_bet_polygon_and_
        edge( $\delta_2, e_i$ ) = Yes) return Intersection.

```

```

  2. for all edges  $e_i$  of  $\delta_2$ 
     if(intersection_bet_polygon_and_
        edge( $\delta_1, e_i$ ) = Yes) return Intersection.
  3. return No_intersection.
}

```

스핀들헤드 폴리헤드론과 SPM 충돌은, 공구몸체간섭 검사와 같이, 우선 스피indle헤드 폴리헤드론이 차지하는 국부가공영역 LMA 를 선정하다. 다음, 선정된 국부가공영역내에 존재하는 SPM의 폴리곤들에 대해서만 스피indle헤드 폴리헤드론과 교차관계를 검사한다. SPM 의 폴리곤이 스피indle헤드 폴리헤드론을 구성하는 폴리곤과 교차하면 스피indle헤드 부분과 가공곡면사이에 충돌이 발생한다고 판명한다.

## 6. 최소 공구자세 산출

PMA 가 산출되고 식 7 을 만족하면, 식 5 를 이용하여 최소 공구자세 MTO 를 선정한다. MTO 산출 문제는 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 최소 공구자세 수( $n_{MTO}$ )를 결정하는 것이고, 둘째는 최소 공구자세 수를 가지며 식 5 을 만족하는 대안들 중에서 실제 가공에 적용될 MTO 를 선정하는 문제이다.

$n_{MTO}$  및 대안들의 산출은 breadth first 방법[18]을 응용하여, 우선 근사된 공구자세 집합 TAS 의 모든 부분집합에 대해서 원소 수가 작은 부분집합부터 순차적으로 식 5 를 만족하는가를 검사한다. 다음, 식 5 를 만족하는 최초의 부분집합이 발생하면 그 부분집합의 원소의 수가 최소 공구자세 수가 된다.

또한 최소 공구자세 수의 원소를 가지며 식 5 를 만족하는 모든 TAS 의 부분집합들은 MTO 의 대안들이 된다.

선정된 대안들 중에서 실제 가공에 적용될 MTO 의 선정은 각 대안들의 가공성을 고려하여 결정한다. 볼랜드밀 가공에서는 공구끝점에서 절삭속도가 0 가 되어 끌림현상이 발생하므로 저천 가공면이 생성되며 공구 마모 및 손상의 가능성이 커지고, 반면 공구자세가 가공면의 법선방향과의 차이가 클수록 공구휨현상이 커져 가공정밀도가 감소하여, 가공면의 법선방향에 대한 적절한 공구자세의 선정은 가공정밀도 및 표면거칠기에 중요한 요인으로 작용한다. 따라서, MTO 를 선정하는 방안으로, 우선 공구자세와 가공면의 법선방향의 차이에 대한 기준값  $\sigma$  를 설정하고, 대안내의 각 공구자세들에 대해서 각 공구자세들의 PMA 의 법선방향과 가능한  $\sigma$  의 차이를 유지하는 대안을 MTO 로 선정함이 바람직하다. 본 연구에서는  $\sigma$  를  $20^\circ$  로 설정하였으며, 이는 사용자가 변경할 수 있다.

주어진 대안들의 가공성을 계산하기 위하여, 우선 각 대안들의 공구자세  $i$  와  $t$  에서 가공할 수 있는 가공면의 법선방향과의 관계를 곡면방향성 지표  $\Delta(t)$  로 표현한다(식 12). 다음, 각 대안의 가공성은 각 대안이 포함하는 공구자세들의  $\Delta(t)$  의 합으로 나타낸다. 식 12 에서  $N_{i,j}$  는  $CE_{i,j}$  의 양끝점의 법선벡터들의 합벡터에 대한 단위벡터이다.

$$\Delta(t) = \sum_i \sum_j |\cos^{-1}(t \cdot N_{i,j}) - \sigma| \times PMA_{i,j}^t \quad (12)$$

따라서, 임의의 대안 Q 의 가공성 지표를  $\Omega(Q)$  로 표시하면,  $\Omega(Q)$  는  $\sum_{t \in Q} \Delta(t)$  로 표

현된다. 본 연구에서는 최소의  $\Omega$  를 가지는 대안을 가공성이 좋은 대안으로 선정하고, 이를 MTO 로 결정한다. MTO 선정 알고리즘은 다음과 같다.

Procedure generate\_MTO {

1.  $n\_MTO = n = 1$ ,  $MTO\_set = 0$ , and  $\Lambda = \{ \}$ .
2. for all subsets  $Q_i$  of TAS of which the number of elements is equal to  $n$  {  
 if  $\sum_{t \in Q_i} PMA_{i,j}^t \geq 1$  for  $\forall i, j$ , then  $MTO\_set = 1$  and insert  $Q_i$  into  $\Lambda$ .  
 }
3. if( $MTO\_set = 1$ )  $n\_MTO = n$  and goto Step 5.
4.  $n = n + 1$  and goto Step 2.
5. Extract from  $\Lambda$  a  $Q$  for which  $\Omega(Q)$  is minimum.
6. Set MTO to  $Q$ .

}

## 7. AMA 산출

MTO 가 결정되면, 식 6 을 이용하여 MTO 의 각 공구자세들에 대한 실제 가공영역 AMA 를 산출한다. PMA 는 해당 공구자세에서만 가공할 수 있는 독립가공영역(그림 4 에서 b,c 영역)과 다른 공구자세(들)에서도 가공할 수 있는 공통가공영역(그림 4 에서 a 영역) 로 나누어진다. 따라서 AMA 의 산출은 공통가공영역을 공유하는 공구자세들에게로 적절히 분배하는 것이다.

본 연구에서의 공통가공영역에 대한 분할 기준은 두 가지이다. 첫째는 가공성이 좋은

자세를 우선으로 한다. 둘째는 가공영역이 산발되어 분할되지 않고, 가능한 집단화되도록 하는 것이다. 왜냐하면, 가공영역의 분할선에서는 가공자세의 변화로 인한 가공오차의 흔적이 발생할 가능성이 높으며, 가공영역이 산발화될수록 가공영역의 경계선이 증가하여 오차흔적이 증가할 수 있기 때문이다. 또한 후가공시 오차흔적을 효율적으로 제거하기 위해서는 되도록 오차흔적이 적으며 일정한 형태를 유지함이 바람직하므로, 가공영역을 집단화되도록 분할하는 것이 좋다.

두가지 기준을 동시에 고려하여 공통가공영역을 산출함이 바람직하나, 동시에 두 기준을 고려함이 어려운 관계로, 본 연구에서는 우선 가공성을 고려하여 가공영역을 분할한 후, 분할된 가공영역이 산발화되어 있다면 사용자가 대화식으로 조정하는 단계적인 접근방법으로 AMA 를 산출한다.

가공성을 고려한 공통가공영역의 분할은, MTO 선정기준과 같이, 되도록 가공면의 법선방향과 가공 공구자세의 차이가  $\sigma$  를 유지함을 기준으로 한다. 임의의  $CE_{ij}$  에 대해서 공구자세  $t$  의 가공성은  $d(t,ij)$  로 나타낸다 (식 13). 본 연구에서는  $d(t,ij)$  가 작은 공구자세일수록 가공성 좋다고 가정한다.

$$d(t,ij) = |\cos^{-1}(t \cdot N_{ij}) - \sigma| \quad (13)$$

공구자세의 가공성을 고려하여  $CE_{ij}$  의 가공 공구자세  $t^*$  의 결정절차는 다음과 같다. 우선, MTO 내의 공구자세들에서  $CE_{ij}$  를 가공할 수 있는( $PMA_{ij}^t$  가 1 인) 공구자세들을 선정한다. 다음, 선정된 공구자세들 중에서 최소의  $d(t,ij)$  를 가지는 공구자세를  $t^*$  로 선

정한다.  $t^*$  가 결정되면  $AMA_{ij}^{t^*}$  를 1 로 셋팅하고, MTO 내의  $t^*$  이외의 공구자세들에 대해서는  $AMA_{ij}^t$  를 0 으로 셋팅한다. 모든  $CE_{ij}$  에 대해서 위의 절차를 이용하여 가공성을 고려한 공통가공영역 분할을 수행한다.

그림 11 은 가공성만을 고려한 가공곡면 분할의 한 예이다. a 와 c 의 영역은 공구자세  $t_1$  에게, b 영역은 공구자세  $t_2$  로 분할되었다. a 와 b 영역사이와 b 와 c 영역사이에의 두 곳에서 오차흔적이 발생될 수 있다. 그러나, b 영역은  $t_1$  에서도 가공이 가능하며, 오차흔적이 없이 a,b,c 영역을 모두  $t_1$  에서 가공할 수도 있다. 따라서 가공성을 고려하여 b 영역을  $t_2$  에서 가공할 것인지, 오차흔적을 줄이기 위해서  $t_1$  에서 가공할 것인지는, 경우에 따라서 사용자가 대화식으로 결정한다.

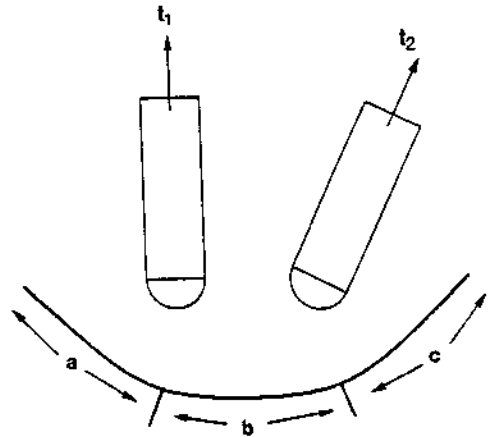


그림 11. AMA 산출

AMA 산출 알고리즘은 다음과 같다.

- ```

Procedure generate_AMA {
    1.  $AMA_{ij}^t = 0 \forall ij \text{ and } t \in \text{MTO.}$ 
    2. for all  $CE_{ij}$ 
    
```

$$\Lambda = \{ t \mid t \in \text{MTO and } \text{PMA}_{ij}^t = 1 \}$$

Extract from  $\Lambda$  a  $t$  for which  $d(t, ij)$  is minimum.

Set  $t^*$  to  $t$ , and  $\text{AMA}_{ij}^{t^*} = 1$

3. Interactive Modification

}

8. 공구 경로 계획

AMA 가 산출되면, MTO 내의 각 공구자세들에 대해서 공구경로를 생성한다. 우선 MTO 내의 공구자세  $t$  를 취하기 위한 IT 파라미터  $\theta_1, \theta_2$  를 결정하고(식 8),  $\text{CE}_{ij}^M$  를  $\theta_1, \theta_2$  에 따라 M 좌표계로 전환하여  $\text{CE}_{ij}^M$  를 생성한다(식 10). 공구경로는  $\text{CE}_{ij}^M$  를 기준으로 산출한다. 따라서, 산출된 공구경로는 M 좌표계(기계좌표계)상에서 정의되므로, 별다른 변환과정이 없이 직접 G code 로 변환될 수 있다. 또한 공구자세  $t$  는  $\theta_1, \theta_2$  에 따라서 좌표변환이 완료되면 M 좌표계에서는  $[0,0,1]^T$  가 되어, 머신의 Z 축과 동일한 자세가 된다.

공구경로는 접근경로( $o \rightarrow a \rightarrow s$ ), 가공경로( $s \rightarrow \dots \rightarrow e$ ), 퇴각경로( $e \rightarrow b \rightarrow o$ ) 로 이루어진다(그림 12). 접근경로는 공구자세 변경점  $o$  에서 가공접근점  $a$  로, 가공접근점  $a$  에서 가공시작점  $s$  까지 접근하는 공구경로이고, 퇴각경로는 가공종료점  $e$  에서 가공퇴각점  $b$  로, 가공퇴각점  $b$  에서 공구자세 변경점  $o$  로 이동하는 경로이다. 공구자세 변경점  $o$  는 IT 의 자세 변경시 머신충돌이 발생하지 않는 안전지점이다.  $o$  에서 바로  $s$  로 직선이동하거나,  $e$  에서 바로  $o$  로 직선이동을 하는 경우, 머신 충돌이 발생할 가능성이

있다. 따라서  $a$  와  $b$  는 머신충돌을 회피하도록 결정한다. 가공경로는 가공 시작점  $s$  에서 가공 종료점  $b$  사이에서 실제 가공이 일어나는 구간의 경로로  $\text{CE}_{ij}^M$  와 AMA 를 기준으로 산출한다.

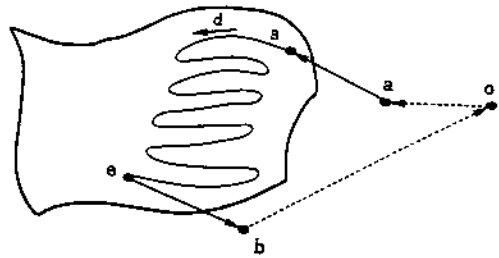


그림 12. 공구경로의 생성

접근경로(퇴각경로) 산출을 위해서 가공접근점  $a$  (가공퇴각점  $b$ ) 를 결정하여야 한다(그림 13).  $\text{AMA}_{ij}^t = 1$  인  $\text{CE}_{ij}^M$  을 기준으로 AMA 의 작업공간  $\Pi[(lx:ux), (ly:uy), (lz:uz)]$  를 구한다. 머신충돌을 피하는 가공접근점  $a$  (가공퇴각점  $b$ ) 는 공구축  $t=[0,0,1]^T$  를 따라서 가공시작점  $s$ (가공종료점  $e$ ) 로 부터 AMA 의 작업공간  $\Pi$  에서 안전거리  $\alpha$  만큼 벗어난 지점으로 한다. 따라서,  $a$  는  $[s.x, s.y, (\Pi_{uz} + \alpha)]^T$  로  $b$  는  $[e.x, e.y, (\Pi_{uz} + \alpha)]^T$  로 한다.  $\alpha$  는 사용자가 지정한다.

가공경로의 산출 방법은 순차적으로 CL 경로를 따라  $\text{AMA}_{ij}^t = 1$  인  $\text{CE}_{ij}^M$  은 연결하며 경로 패턴은 지그재그 경로를 우선으로 한다. 가공경로 패턴은 지그재그 패턴과 단일방향 패턴중 선택할 수 있다. 초기 가공경로의 진행방향  $d$ (그림 12) 도 사용자가 지정할 수 있다.

AMA 는 공구간섭 및 곡면의 방향성을 고

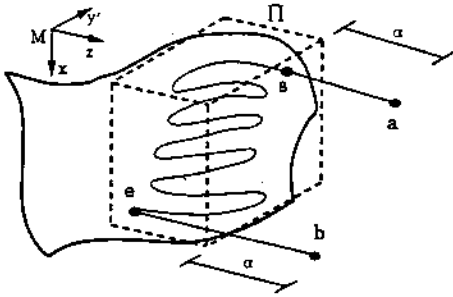


그림 13. 가공접근점(가공퇴각점)의 결정

려하여 분할하였기 때문에 각 공구자세에서 한 CL 경로내에서의 가공경로가 불연속인 경우가 발생하며 CL 경로간에도 불연속구간이 발생한다. 이 불연속 구간을 직선경로를 진행하면 곡면의 형상에 따라서 공구간섭이 발생할 수 있으므로, 간섭회피 가공경로를 산출하여야 한다. 불연속 구간은 크게 블록구간, 오목구간과 블록구간과 오목구간이 동시에 존재하는 복합구간으로 나눈다(그림 14). 오목구간은 불연속 구간을 직선을 연결하는 가공경로를 생성함이 가능하나, 블록구간과 복합구간은 직선으로 연결시 간섭이 발생하므로 간섭을 회피하는 경로를 산출하여야 한다.

간섭회피하는 방법은 다음과 같다(그림 15

참조). 공구축과 두 경로점을 포함하는 평면  $\Phi$  를 설정하고,  $\Phi$  와 가공곡면 SPM 사이의 교차곡선 IC 를 계산한다. 교차곡선 IC 는 SPM 의 폴리곤과 평면  $\Phi$  와의 교차선분들로 표현된다. IC 가 구해지면, 공구축을 따라서 IC 의 최대높이 h 를 구한다. 최대높이 h 의 위치에서 공구축을 따라서 여유량  $\beta(\beta > R)$  를 이동한 위치를 공구통과높이로 정한다. 따라서 불연속 구간에 대한 간섭회피 공구경로는 현 가공점 p 에서 공구통과높이로 공구축을 따라 공구를 퇴각한 후( $p \rightarrow d$ ), 공구통과높이를 유지하면서 다음 가공점까지 이동하고( $d \rightarrow d'$ ), 공구축을 따라서 다음 가공점 p'로 접근한다( $d' \rightarrow p'$ ).  $\beta$  는 공구반경 R 값에서 일정간격을 증가시키면서, ( $d \rightarrow d'$ ) 구간에서 간섭이 발생하지 않는 최소값을 선택한다.

### 9. 시뮬레이션 및 결과

제안된 방법의 유효성을 검증하기 위해서 5축 CNC 머신에서 가공되는 임펠러 형상(그림 16(a))에 대해서 제안된 방법을 적용하여 3축 CNC 머신으로 가공할 수 있도록 PMA, MTO, AMA 및 공구경로를 산출하였

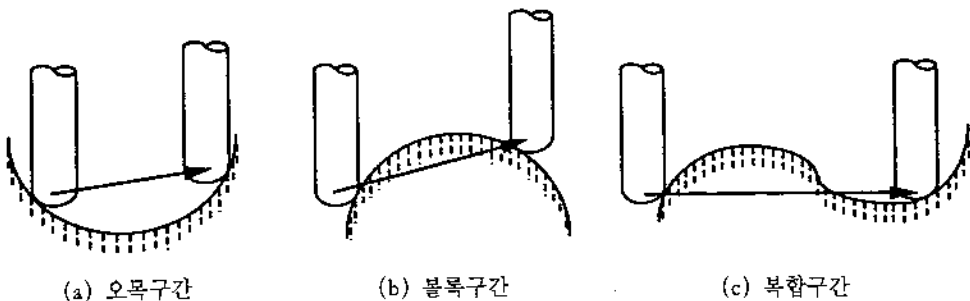


그림 14. 불연속 구간에서의 직선 가공경로

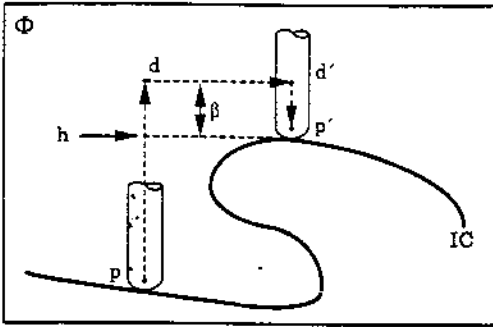
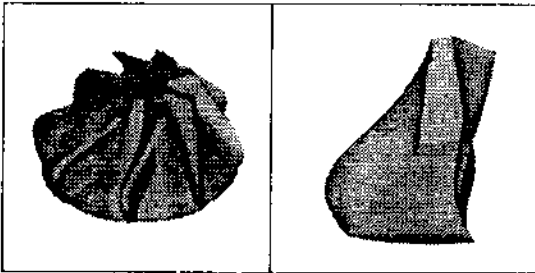


그림 15. 볼엔드밀구간에서의 간섭회피 경로



(a) 전체형상 (b) 한 가공부분  
그림 16. 임펠러 형상

다.

그림 16의 임펠러의 높이는 70 mm 이고, 최대반경은 75 mm 이다. 임펠러는 8 개의 날개가 있다. 임펠러 날개사이의 가공부분은 임펠러 중심축을 중심으로 동일한 형상이므로, 날개사이의 가공부분을 가공할 수 있는 공구 경로를 산출하여, 임펠러 중심축을 중심으로 회전하며 반복적용함으로써 전체형상을 가공하였다. 가공곡면 기준좌표계 W 는 임펠러 중심축의 하단부에 설정하고, 임펠러 중심축을 W 좌표계의 Z 축과 일치시켰다. W 좌표계와 I 좌표계는 일치한다고 가정하였다. 그림 16(b) 는 임펠러 날개사이의 가공곡면을 보여준다.

가공곡면을 가공하기 위한 공구밀면간섭이 배제된 CL 경로는 미리 다른 CAM 시스템을 이용하여 산출되어 있어도 된다. 본 연구에서는 CC(Cutter Contact) 경로 및 CL 경로를 직접 산출하였다. CC 경로의 산출은 CC cartesian 방식을 이용하여, 가공곡면과  $[0,0,1]^T$  를 법선벡터로 가지는 공구평면과의 교차곡선으로 부터 산출했다. CC 경로간의 거리는 1 mm 이고, 볼엔드밀 공구의 직경은 6 mm 이다. CC 경로로부터 공구밀면간섭을 고려하지 않은 초기 CL 경로를 산출하고, 초기 CL 경로로부터 공구밀면간섭이 배제된 CL 경로를 산출하였다. 그림 17 는 산출된 CC 경로 및 CL 경로를 보여준다. 그림 17(b) 의 초기 CL 경로에서는 경로가 꼬여서 공구밀면간섭이 발생함을 알 수 있고, 그림 17(c) 의 공구간섭이 배제된 CL 경로에서는 경로 꼬임이 없음을 알 수 있다.

산출된 공구밀면간섭이 배제된 CL 경로를 기준으로 제안된 방법으로 PMA 를 구축하였다. 본 실험에서 사용되는 IT(그림 2) 인 경우 유효한 공구자세 영역 TAA 는 반구 영역이나, 그림 16(b) 의 임펠러 날개사이의 가공곡면의 경우는 가공곡면의 후면에서의 접근하는 공구자세들은 가공에 적합한 공구자세가 아니므로, 이들에 대한 PMA 의 구축은 비효율적이다. 따라서 가공곡면의 형상을 고려하여 TAA 를 플라좌표계에서  $\rho_1 = [0,90]$ ,  $\rho_2 = [-45,45]$  에 해당하는 반구의 일부분으로 설정하고(그림 18), TAA 에서 단위 구상에서 일정한 간격으로 67 개의 공구자세로 근사하여 TAS 를 생성하여, TAS 내의 공구자세들에 대해서 PMA 를 구축하였다.

구축된 PMA 를 기준으로 MTO 산출 결



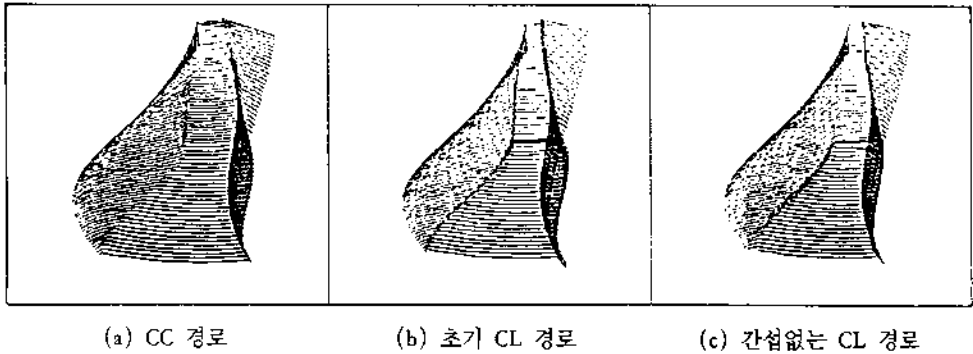


그림 17. CC 경로 및 CL 경로

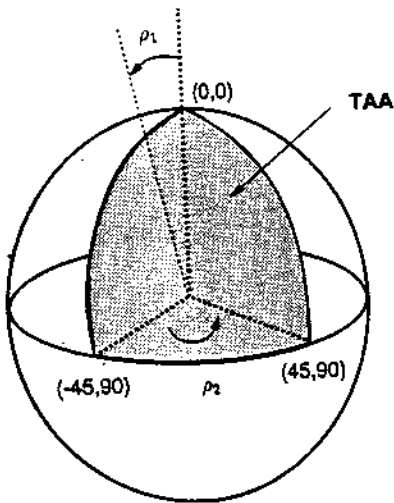


그림 18. TAA 결정

과, 최소 공구자세 수는 2 이며, 각 공구자세는 폴라좌표계 값으로 표 1 에서 보여진다. 표 1 에서 () 안의 값은 공구자세 ( $\rho_1, \rho_2$ )를 취하기 위한 IT 파라미터 ( $\theta_1, \theta_2$ )의 값이다. 그림 19(a)에서는 산출된 2 개의 공구자세에 대한 PMA 를, 그림 19(b)에서는 각 공구자세에서 가공 불가능한 영역을, 그림 19(c)에서는 각 공구자세를 취하기 위한 IT 자세를 보여준다. 그림 19(a)에서 직육

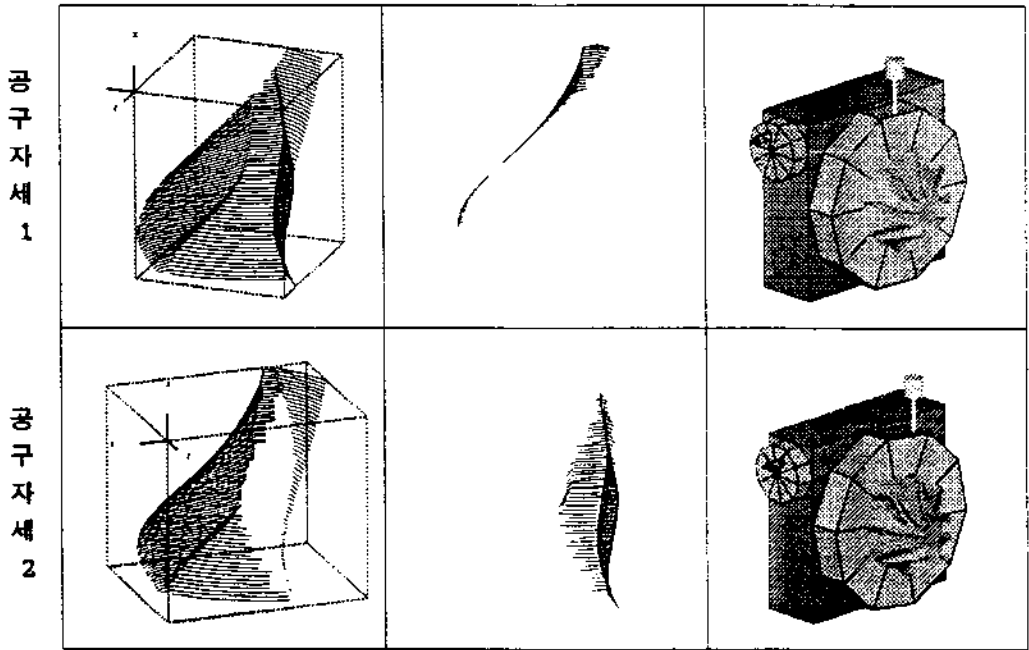
면체는 PMA 의 가공영역을 공구축을 중심으로 도기한것으로, 직육면체에 붙어있는 좌표계는 M 좌표계를 의미하는 것이며, Z 축은 공구축을 의미한다.

표 1. 산출된 MTO

|                    | 공구자세 1          | 공구자세 2        |
|--------------------|-----------------|---------------|
| $\rho_1(\theta_1)$ | 90.0°(90.0°)    | 90.0°(90.0°)  |
| $\rho_2(\theta_2)$ | -15.0°(-165.0°) | 25.0°(155.0°) |

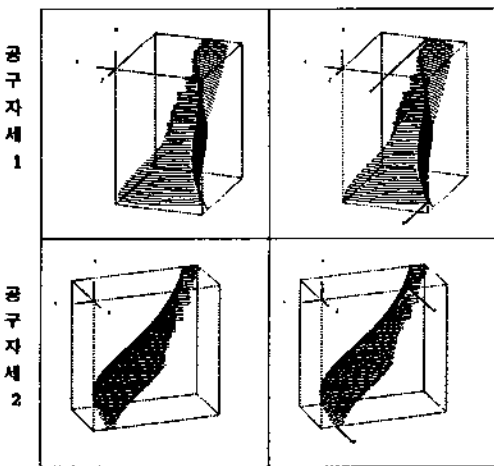
그림 20 은 산출된 MTO 에 대해서 생성된 AMA(그림 20(a)) 및 공구경로(그림 20(b))를 보여준다. 그림 20(a)에서 직육면체는 PMA 의 경우와 같이 AMA 의 가공영역을 보여준다. 그림 20(b)에서는 지그재그 패턴의 가공경로 및 접근경로와 퇴각경로를 보여준다. a 는 가공접근점을, b 는 가공퇴각점을 나타낸다.

그림 21 는 [17]에서 개발된 5축 솔리드 시뮬레이터를 통해서 가공 시뮬레이션을 한 결과를 보여준다. 그림 21(a)는 가공 초기 형상을, 그림 21(b)는 날개사이의 한 가공부분을 가공한 후의 상태를, 그림 21(c)는



(a) 가공 가능 영역 PMA      (b) 가공 불가능 영역      (c) IT 자세

그림 19. PMA 와 IT 자세



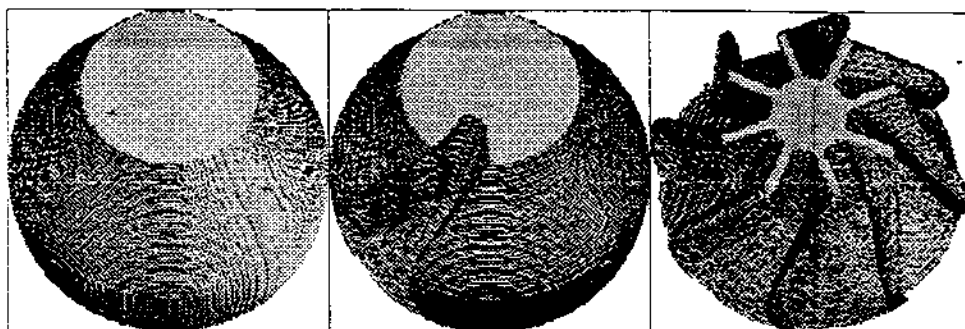
(a) 실제 가공 영역 AMA      (b) 공구경로

그림 20. AMA 및 공구경로

가공완료된 후 임펠러 형상을 보여준다.

임펠러이외의 그림 22 의 3 개의 가공형상들에 대해서도 제안된 방법을 적용하였다. 그림 22(a) 는 병 형상으로 우측하단에 병 중앙의 단면이 보여진다. 그림 22(b) 는 단면이 크로버 형상을 갖는 직선 봉이고, 그림 22(c) 는 그림 22(b) 를 휜 형상이다.

그림 23 은 그림 22 의 가공형상들에 대해서 제안된 방법을 적용한 결과를 보여준다. 그림 23(a) 에서는 각 형상에 대한 MTO 내의 모든 공구자세들을 동시에 보여주며, 각 공구자세의 가공경로도 함께 보여준다. 그림에서 직육면체는 각 공구자세에서 AMA 가공영역을 공구축을 따라서 도시한 것이다. 병

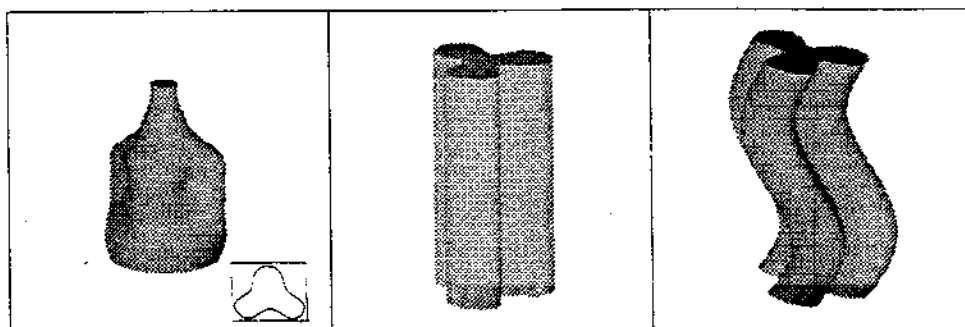


(a) 초기 형상

(b) 한 날개사이 절삭

(c) 절삭 완료 형상

그림 21. 솔리드 시뮬레이션



(a) 병 형상

(b) 크로버 형상 I

(c) 크로버 형상 II

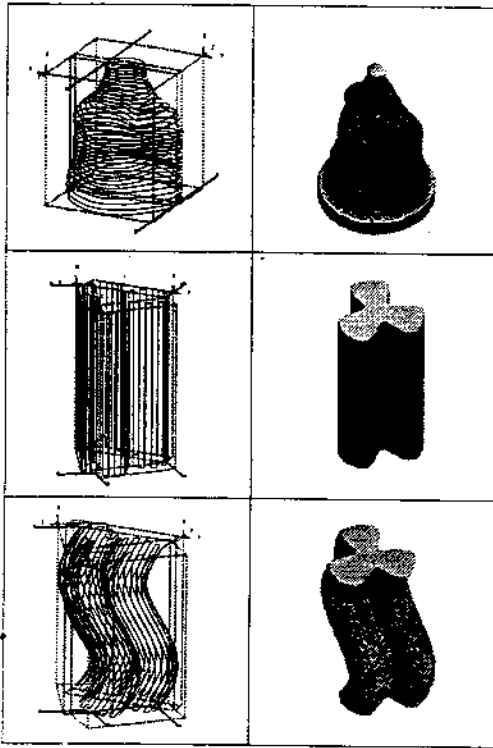
그림 22. 다른 가공형상들

형상(그림 22(a))인 경우는 최소 공구자세가 2 개 이고, 크로버 1 과 크로버 2 의 경우는 최소 공구자세가 3 개 이다. 그림 23(b) 는 각 가공형상에 대한 솔리드 시뮬레이션 결과 이다.

### 10. 결론

본 연구에서는 1 회 셋업으로 가공할 수

없는 다축 가공형상을 3 축 CNC 머신상에서 가공할 수 있는 한 방법을 제안하였다. 제안된 인덱스 테이블을 이용한 3 축 CNC 머신의 구조는 5 축 CNC 머신의 테이블 회전형에 해당하는 것으로, 널리 사용되는 형태이다. 인덱스 테이블을 이용한 3 축 가공환경은 가공형상에 따라서 다양한 형태의 인덱스 테이블의 대체가 가능하므로, 다양한 5 축 NC 머신의 형태를 쉽게 구성할 수 있는 장



(a) MTO 및 공구경로 (b) 절삭 완료 형상

그림 23. 다른 가공형상들에 대한 결과

점을 갖는다. 또한 3 축 동시제어가 가능한 5 축 CNC 머신의 경우, 동시제어가 안되는 두축을 인덱스 축으로 생각하면 제안된 방법이 쉽게 적용될 수 있다. 파트 프로그램은 가공물 좌표계의 CL 경로를, 셋업자세를 고려하여 기계 좌표계로 전환하고, 앞서 제시한 공구 경로 계획에 따라서 각 셋업별로 전환된 CL 경로를 연결함으로써 생성할 수 있다. 실가공시에는 각 셋업별로 셋업자세를 취한 후에 해당 파트프로그램을 실행시키면 된다. 본 연구에서 제안된 다축형상에 대한 3 축 가공방안은 경제적으로 다양한 5 축 CNC 머

신을 모사할 수 있는 방법이다.

그러나, 제안된 3 축 가공은 회전 인덱스 테이블의 회전 분해능 및 셋업자세의 변경으로 가공정도가 동시 5 축 가공의 가공정도에 비해 떨어지리라 예상된다. 또한 가공곡면상에는 자세변경으로 인하여 곡면분할선을 따라 오차흔적이 발생할 수 있으며, 이로 인한 후가공 시간이 증가할 수 있다. 따라서, 많은 셋업자세를 요구하는 매우 복잡한 가공형상을 가공하는 경우에는 셋업변경횟수의 증가에 따른 가공정도의 저하 및 후가공 시간의 증가로 제안된 3 축 가공환경이 제공하는 경제성이 상쇄될 수도 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] Schultz, D., "Why Five-Axis?," *Modern Machine Shop*, July, 1993, pp. 50-59
- [2] Gao, S., Harrison, E. and Davies, B., "An approach to the low-cost computer aided manufacture of components embodying free-form surfaces," *Proc. IME, J. Eng. Mfg.*, Vol. 203, 1989, pp. 119-126
- [3] Takeuchi, Y. and Idemura, T., "5-axis Control Machining and Grinding Based on Solid Model," *CIRP*, Vol. 40, No. 1, 1991, pp. 455-458
- [4] Takeuchi, Y. and Watanabe, T., "Generation of 5-axis Control Collision Free Tool Path and Postprocessing for NC data," *CIRP*, Vol. 41, No. 1, 1992, pp. 539-542
- [5] Vicker, G. and Quan, K., "Ball-Mills Versus End-Mills for Curved Surface Machining," *J. Eng. for Industry*, Vol.

- 111, Feb., 1989, pp. 22-26
- [6] Mason, F., "5x5 for high-productivity airfoil milling," *American Machinist*, November, 1991, pp. 37-39
- [7] Cho, H., Jun, Y. and Yang, M., "Five-axis CNC milling for effective machining of sculptured surfaces," *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 31, No. 11, 1993, pp. 2559-2573
- [8] Li, S. and Jerard, R., "5-axis machining of sculptured surfaces with a flat-end cutter," *Comput.-Aided Des.*, Vol. 26, No. 3, 1994, pp.
- [9] Cover Story : Machining Centers, *American Machinist*, September, 1991
- [10] Ralph, W. L. and Loftus, M., "The application of an inclined end mill machining strategy on 3-axis machining centers," *J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 33, No. 2, 1993, pp. 115-133
- [11] Woo, T. and Turkovich, B., "Visibility Map and Its Application to Numerical Control," *CIRP*, Vol. 39, 1990, pp. 451-454
- [12] Chen, L. and Woo, T., "Computational Geometry on the Sphere with Application to Automated Machining," *J. Mechanical Design*, Vol. 114, June, 1992, pp. 288-295
- [13] Chen, L., Chou, S. and Woo, T., "Separating and Intersecting Spherical Polygons: Computing Machinability on Three-, Four-, and Five-Axis Numerically Controlled Machines," *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 12, No. 4, Oct., 1993, pp. 305-326
- [14] Suh, S. and Kang, J., "Machining configuration of free surfaces for multi-axis NC machining," *Proc. 16th Int. Conf. on Computers & Ind. Eng.*, Japan, March, 1994, pp.52-55
- [15] Sakamoto, S. and Inasaki, I., "Analysis of generating motion for five-axis machining centers," *Transaction of NAMRI/SME*, Vol. XXI, 1993, pp. 287-293
- [16] Choi, B. and Jun, C., "Ball-end cutter interference avoidance in NC machining of sculptured surfaces," *Comput.-Aided Des.*, Vol. 21, No. 6, 1989, pp. 371-378
- [17] 정 정민, 김 광수, "복셀 표현법을 이용한 5 축 가공 시뮬레이션," 대한산업공학회 추계학술대회 발표논문집, 1994, pp. 549-556
- [18] Luger, F. G. and Stubblefield, W. A., *Artificial intelligence and the design of expert systems*, Benjamin/Cummings, California, 1989