

B-Rep 솔리드모델을 이용한 머시닝센터용 CAD/CAM시스템 개발 (II)  
(솔리드모델을 이용한 3차원 CNC가공계획에 관한 연구)

Development of Smart CAD/CAM System for Machining Center  
Based on B-Rep Solid Modeling Techniques (II)  
(A Study on the 3-D CNC Cutting Planning Method using Solid Model)

양희구\*, 김석열\*\*

\* 한국항공대학교 기계설계학과 대학원

\*\* 한국항공대학교 기계설계학과

### Abstract

In this paper, the CNC cutting planning module for product with three dimensional solid shape is realized to develop a smart CAD/CAM system which performs systematically from the shape design of product by the B-Rep solid modeler to the CNC cutting of product by a machining center. The three dimensional solid shape of product can be easily designed and constructed by the Euler operators and Boolean operators of the solid modeler. And the various functions such as the automatic generation of tool path for the rough and finish cutting processes, the automatic elimination of overcut, the automatic generation of CNC code for the machining center and so on, are established. Especially, the overcut-free tool paths are obtained by splitting the CL solid which is composed of the offset surfaces of the solid shape of product.

주요기술용어 : CAD/CAM(컴퓨터지원 설계/가공), CNC(컴퓨터 수치제어), CL Data(CL정보, Cutter Location Data), B-Rep(경계표현, Boundary Re-presentation), Solid Model(솔리드모델), Euler Operator(오일러작업자), Boolean Operator(불리안작업자)

### 1. 서론

대부분의 CAD/CAM시스템들은 3차원 제품의 형상을 와이어프레임모델(wireframe model), 곡면모델(surface model), 그리고 솔리드모델을 이용해서 표현하고 있다<sup>[1-5]</sup>. 제품형상을 점과 특징선만으로 표현하는 와이어프레임모델은 제품형상의 경계면 및 내부·외부정보를 가지고 있지 않기 때문에 CNC가공을 위한 CNC코드의 자동생성, 제품의 역학적 해석을 위한 유한요소의 자동생성 등을 처리할 수 없다. 와이어프레임모델에 특징선들이 이루는 면들의 방정식을 추가한 형태인 곡면모델은 CNC코드의 자동생성에 많이 적용되고 있지만, 이 모델에서도 3차원 제품에 대한 유한요소의 자동생성이 불가능하기 때문에 제품의 역학적 해석에는 한계를 가지고 있다. 반면에 솔리드모델은 면들의 방정식 외에도 면들 간의 상호연결관계, 면들의 내부·외부방향 등에 대한 정보도 가지고 있기 때문에 제품의 부피에 대한 정보를 보유하게 된다. 따라서 면단위의 작업인 CNC코드의 자동생성 외에도 유한요소의 자동생성 등과 같은 부피단위의 작업에도 적용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 특히 솔리드모델을 이용하는

경우에는 단순한 형상들로부터 복잡한 형상을 도출할 수 있는 불리안작업<sup>[6,7]</sup>이 가능하기 때문에 3차원 제품의 형상설계가 용이하게 된다.

따라서 본 연구에서는 자체 개발한 B-Rep구조의 솔리드모델리<sup>[8]</sup>를 이용한 3차원 제품의 형상설계부터 머시닝센터에서의 CNC가공까지를 통합적으로 처리할 수 있는 머시닝센터용 CAD/CAM시스템을 구현하기 위한 목적의 일환으로 솔리드모델을 토대로 한 CNC가공계획모듈을 개발하였다. 개발된 CNC가공계획모듈은 시스템 사용자가 솔리드모델리의 오일러작업자와 불리안작업자를 통해서 3차원 제품의 형상을 설계하고, 사용할 밀링공구의 세원과 절삭조건을 입력하면, 그 제품을 얻기 위한 획삭공정과 정삭공정에 대한 공구경로와 CNC코드를 자동생성하는 기능을 가지고 있다. 또한 공구경로를 체계적으로 도출하기 위하여 밀링공구의 세원과 절삭조건을 토대로 제품형상을 옵셋(offset)시켜서 얻은 CL업체 또는 가공공간을 절단평면으로 스파리트(split)하는 개념을 사용하였다. 도출된 공구경로는 2차원 평면(절단평면)상에 놓여지기 때문에 가공방향으로의 좌표값 비교를 통해서 과대설계

(overcut)되는 부분을 쉽게 제거할 수 있다. 그리고 CNC가공계획모듈의 출력인 공구경로와 CNC코드는 컴퓨터화면상의 공구경로체적과 CNC코드리스트를 통해서 확인할 수 있다.

## 2. 시스템의 구성 및 내용

### 2.1 개요

효율적인 CAD/CAM시스템을 구축하기 위해서는 곡면모델러나 솔리드모델러와 같은 형상모델링시스템을 이용한 3차원 제품의 형상설계, 절삭공구의 제원, 절삭조건 및 CNC작기체의 특성을 고려한 공구경로와 CNC코드의 생성, 절삭시뮬레이션, 그리고 CNC작기체의 DNC운전 등과 관련된 많은 기능들이 필요하다. 이러한 관점에서 보면 머시닝센터용 CAD/CAM시스템은 Fig.1에 제시한 기능들과 작업흐름을 갖도록 구성하는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 Fig.1과 같은 형태의 머시닝센터용 CAD/CAM시스템을 개발하기 위한 토대를 마련하기 위하여 먼저 3차원 제품의 형상설계에서 CNC코드의 생성까지를 일괄적으로 처리할 수 있는 CNC가공계획모듈을 구축하였다. 특히 본 연구에서 개발한 CNC가공계획모듈은 시스템 사용자가 솔리드모델러의 기본입체 생성기능, 스위프(sweep)기능, 스파일트기능, 불리안기능 등을 이용해서 솔리드모델 형태로 제품형상을 설계하면, 그 모델을 토대로 황삭공정과 정삭공정에 대한 절삭공구의 제원과 절삭조건을 이용하여 공구경로와 CNC코드를 생성하는 역할을 담당하고 있다.

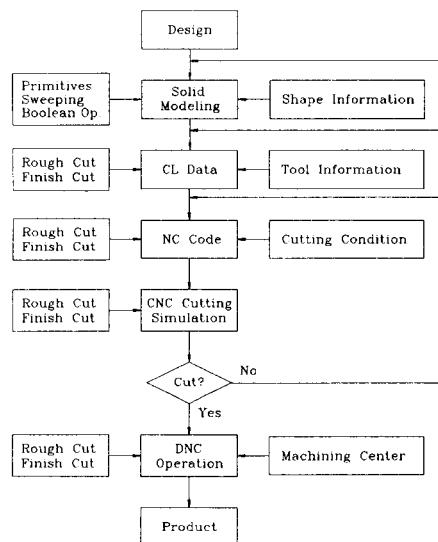


Fig.1 Configuration of smart CAD/CAM

### 2.2 CNC가공계획

#### (1) 절삭공구의 종류

일반적으로 머시닝센터에서 많이 사용하는 밀링공구의 형태는 Fig.2에서 제시한 바와 같이 볼엔드밀(ball endmill), 플랫엔드밀(flat endmill), 필릿엔드밀(fillet endmill)로 크게 나누어진다<sup>(4)</sup>. 곡면을 정삭가공하는 경우에는 볼엔드밀을 사용하는 것이 통례이지만, 볼엔드밀은 상대적으로 값이 비싸고, 절삭성도 떨어지기 때문에 황삭가공의 경우에는 필릿엔드밀을 사용하는 것이 바람직하다. 또한 플랫엔드밀은 포켓(pocket)부분을 가공하는 경우에 많이 사용한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 3가지 형태의 공구를 시스템 사용자가 필요에 따라서 임의로 선택할 수 있도록 하였다.

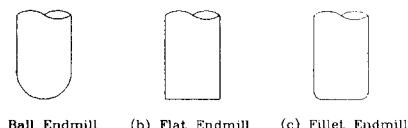


Fig.2 Classification of endmills

#### (2) CL정보의 생성

CNC가공에서 공구의 위치를 나타내는 CL정보는 공구의 바닥 끝점의 좌표값을 기준으로 하고있다. Fig.3은 필릿엔드밀에 대한 CL정보  $r_L$ 과 곡면상의 공구접촉점  $r_C$ 의 관계를 보여주고 있다. 엔드밀의 반경을  $R$ , 필릿부분의 반경을  $a$ , 엔드밀의 회전축방향(공구의 바닥 끝점에서 주축 쪽으로 향하는 방향)의 단위벡터를  $u$ , 공구접촉점에서의 곡면의 단위법선벡터를  $n$ 이라고 하면, CL정보  $r_L$ 과 공구접촉점  $r_C$ 의 관계는 식 (1)과같이 표현할 수 있다.

$$r_L = r_C + a(n - u) + \frac{R-a}{\sqrt{1-a^2}}(n - au) \quad (1)$$

여기서  $\alpha = n \cdot u$ 이다.

식 (1)에서 필릿부분의 반경  $a$ 를 엔드밀의 반경  $R$ 과 같게 놓으면 볼엔드밀에 대한 CL정보를 얻을 수 있고, 필릿부분의 반경  $a$ 를 0으로 놓으면 플랫엔드밀에 대한 CL정보를 얻을 수 있다. 결과적으로 Fig.2에 제시된 3가지 형태의 엔드밀에 대한 CL정보는 식 (1)을 이용해서 모두 구할 수 있다.

#### (3) 공구경로의 생성

공구경로는 가공정밀도, 가공효율 등을 고려해서 여러 가지 형태로 결정할 수 있는데, 일반적으로 공구경로의 연결방식에 따라 단방향(one way) 공구경로방식과 양방향(zigzag) 공구경로방식으로 크게 나누어진다<sup>(4)</sup>. 단방향 공구경로방식에

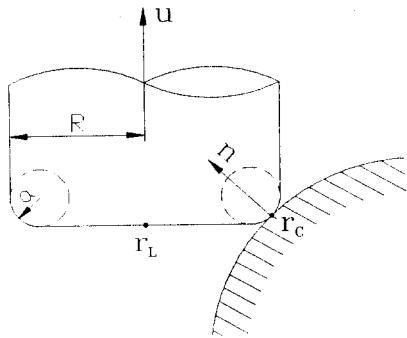


Fig.3 Calculation of cutter location data

서는 공구가 한쪽 방향으로 진행할 때만 절삭이 일어나기 때문에 절삭상태가 균일하고, 따라서 제품의 표면상태는 우수하다. 그러나 공구가 귀환하는 과정에서는 절삭이 일어나지 않기 때문에 제품의 가공시간이 길어지는 단점이 있다. 양방향 공구경로방식에서는 제품의 가공시간이 짧지만, 공구의 진행방향에 따라서 절삭상태가 달라지는 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 2가지 형태의 공구경로 방식을 시스템 사용자가 필요에 따라서 선택할 수 있도록 하였다.

특히 본 연구에서는 CL정보와 공구접촉점의 관계를 나타내는 식 (1)을 토대로 제품형상을 옵셋시킨 CL입체 또는 가공공간을 이용하여 공구경로를 생성하고 있는데, 그 방법은 다음과 같다.

#### <정삭가공에서의 공구경로 생성알고리즘>

1) 정삭공구의 제원과 정삭조건을 토대로 제품형상을 옵셋시키며 CL입체를 생성한다.

① 3차원 제품의 입체정보를 복제하여 새로운 입체를 생성한다.

② 제품의 꼭지점을 추적하여 꼭지점 주변의 면들을 찾는다. 꼭지점에 대한 추적이 모두 완료되면, 다음 단계인 2)를 수행한다.

③ 꼭지점 주변의 모든 면의 단위법선벡터  $n$ 과 엔드밀의 회전축방향의 단위벡터  $u$ 가 아래의 관계를 만족하지 않은 경우(3축 머시닝센터로 가공할 수 없는 경우)에는 ②로 돌아간다.

$$n \cdot u > 0 \quad (2)$$

④ 각각의 면에 포함되는 모든 꼭지점들을 식 (1)을 이용해서 옵셋시키고, 그 꼭지점들로 이루어지는 옵셋면을 구한다.

⑤ 복제된 입체의 꼭지점 좌표값을 대응되는 옵셋면들의 교점 좌표값으로 대체한다.

2) CL입체를 원하는 가공방향의 절단평면(수직면)으로 스플리트하여 공구경로를 생성한다.

① 주어진 공구경로간격을 따라 이동하면서 CL입체를 원하는 가공방향의 절단평면(수직면)으로 스플리트한다.

② 스플리트된 CL입체의 의과 단면형상정보들을 구하고, 그 정보들 중에서 식 (2)를 만족하는 옵셋면상의 정보들을 공구경로방식에 따라 정해지는 가공방향으로 정렬하여 공구경로를 생성한다.

황삭가공에서의 공구경로는 가공할 소재가 세풀과 비슷한 형상을 갖도록 예비성형된 소재인가 아니면 직육면체형 소재인가에 따라서 2가지 형태로 생성된다. 아래에 제시한 황삭가공에서의 공구경로 생성알고리즘 #1은 예비성형된 소재에 대한 공구경로를 생성하는 방법이며, #2는 직육면체형 소재에 대한 공구경로를 생성하는 방법이다.

#### <황삭가공에서의 공구경로 생성알고리즘 #1>

1) 황삭공구의 제원과 황삭조건을 토대로 제품형상을 옵셋시켜서 CL입체를 생성한다. 이 과정은 옵셋시킬 때 정삭여유와 잔여 황삭깊이가 더 고려된다는 점을 제외하면, 정삭가공에서의 공구경로 생성알고리즘과 동일하다. 또한 황삭가공은 정삭가공과는 달리 여러 번의 가공을 필요로 하기 때문에 CL입체도 그에 대응해서 여러 개가 생성되어야 한다.

2) CL입체들을 원하는 가공방향의 절단평면(수직면)으로 스플리트하여 공구경로를 생성한다. 이 과정은 CL입체의 크기가 큰 순서부터 차례차례 반복해서 수행한다는 점을 제외하면, 정삭가공에서의 공구경로 생성알고리즘과 동일하다.

#### <황삭가공에서의 공구경로 생성알고리즘 #2>

1) 황삭공구의 제원과 황삭조건을 토대로 제품형상을 옵셋시켜서 CL입체를 생성한다. 이 과정은 옵셋시킬 때 정삭여유가 더 고려된다는 점을 제외하면, 정삭가공에서의 공구경로 생성알고리즘과 동일하다.

2) 소재와 CL입체 사이에 존재하는 황삭가공공간을 구하기 위해서 불리안작업(차집합)을 수행하고, 그 공간을 황삭깊이에 따라서 절단평면(수평면)으로 스플리트하여 황삭가공공간층을 구한다.

3) 여러 개의 황삭가공공간층들을 원하는 가공방향의 절단평면(수직면)으로 스플리트하여 공구경로를 생성한다.

① 공구경로의 생성이 완료되지 않은 것 중에서 가장 상층부의 황삭가공공간층을 주어진 공구경로간격을 따라 이동

하면서 원하는 가공방향의 절단평면(수직면)으로 스플리트 한다.

② 수직으로 스플리트된 황삭가공공간층의 외곽 단면형상 정보들을 구하고, 그 정보들 중에서 식 (3)을 만족하는 황삭가공공간층 면상의 정보들을 공구경로방식에 따라 정해지는 가공방향으로 정렬하여 공구경로를 생성한다.

$$n_s \cdot u < 0 \quad (3)$$

여기서  $n_s$ 는 황삭가공공간층 면의 단위법선벡터이고,  $u$ 는 엔드밀의 회전축방향의 단위벡터이다.

③ 가공방향의 절단평면(수직면)과 황삭가공공간층이 만나지 않는 구역은 모두 금이송구간으로 처리한다.

④ 황삭가공공간층의 수만큼 ①부터 ③까지의 과정을 반복 한다.

결과적으로 본 연구에서 제안한 공구경로 생성알고리즘들은 솔리드모델(CL입체 또는 가공공간)에 대한 스플리트작업 및 불리안작업을 이용해서 체계적이고 용이하게 공구경로를 생성하고 있다. 그리고 그 공구경로는 모두 2차원 평면(절단평면)상에 놓여지기 때문에 가공방향으로의 좌표값 비교를 통해서 과대절삭되는 부분들을 쉽게 제거할 수 있다. 또한 ZX평면이나 YZ평면을 가공방향의 절단평면(수직면)으로 이용하면 미시닝센터뿐 아니라 자유도가 2½축인 CNC밀링머신에서도 3차원 제품의 가공이 가능해지고, 특히 원호보간을 사용할 수 있게 되어 CNC코드의 크기는 물론 가공시간을 단축시킬 수 있으며, 가공정밀도의 향상을 도모할 수 있다.

#### (4) CNC코드의 생성

미시닝센터는 CNC컨트롤러의 지령에 따라서 동작하기 때문에 제품의 가공과 관련된 모든 정보는 궁극적으로 CNC컨트롤러가 이해할 수 있는 CNC코드로 작성되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 주축회전수, 이송속도, 절삭깊이 등과 같은 절삭조건과 CNC컨트롤러의 특성을 고려해서 공구경로부터 CNC코드를 생성하였다.

### 3. 시스템의 적용실례 및 고찰

본 연구에서는 B-Rep 솔리드모델의 기본입체 생성기능, 스위프기능, 스플리트기능, 불리안기능 등을 이용한 3차원 제품의 형상설계에서 미시닝센터의 CNC코드 생성까지를 통합적으로 처리할 수 있는 CNC가공계획모듈을 구축하였다.

Fig.4는 제품형상을 구성하는 입체요소들을 솔리드모델의 기본입체 생성기능과 스위프기능을 통해서 생성한 예를 보여주고 있다. 그리고 Fig.5에는 Fig.4의 입체요소들에 대한 스플리트작업과 불리안작업을 통해서 얻은 제품의 최종형상

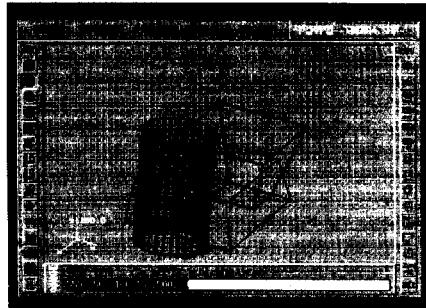


Fig.4 Generation of product shape elements

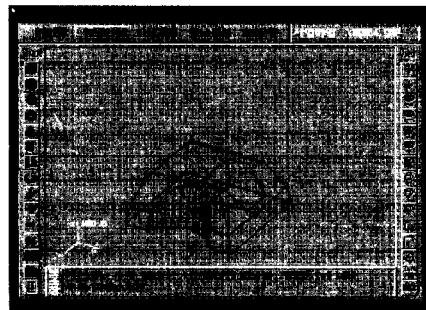


Fig.5 Generation of product shape

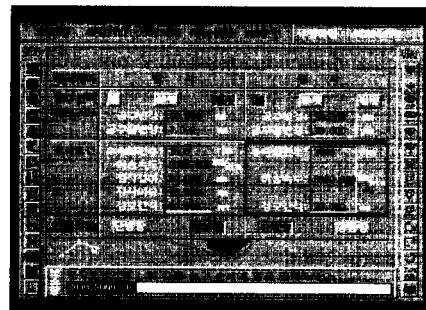


Fig.6 Determination of cutting conditions

을 나타내었다.

제품의 형상설계가 완료된 상태에서는 절삭공구, 절삭조건 및 소재에 대한 정보들을 입력할 필요가 있다. 즉 공구경로와 CNC코드를 생성하기 위해서는 절삭공구의 반경, 절삭공구의 필릿반경, 주축회전수, 이송속도, 절삭깊이, 가공여유, 공구경로간격, 절삭방법 등에 대한 정보들을 입력해야 하는데, Fig.6은 그 예를 보여주고 있다. 그리고 소재의 정보는 직육면체형 소재인 경우에는 길이, 폭, 높이, 그리고 중심점의 좌표값을 입력하고, 예비성형된 소재인 경우에는 단지 제품형상에 대한 옵셋값만을 입력하도록 하였다.

Fig.7은 공구경로 생성을 위하여 Fig.6에 나타낸 절삭공구

의 제원을 토대로 제품형상을 읍셋시켜서 만든 정삭가공용 CL입체와 은선이 재거된 제품형상을 보여주고 있다.

그리고 황삭가공용 CL입체와 정삭가공용 CL입체가 생성되면, 본 연구에서 제안한 공구경로 생성알고리즘들에 의한 공구경로의 생성과 그에 대응되는 머시닝센터용 CNC코드의 생성을 수행할 수 있게 된다. Fig.8과 9는 각각 단방향 공구경로방식과 양방향 공구경로방식에 대한 황삭경로와 정삭경로를 보여주고 있다. 제시된 예들은 절단평면(수직면)이 모두 ZX평면이고, 소재형상이 직육면체인 경우에 대한 것이다. 특히 컴퓨터화면상에 나타난 공구경로궤적에서 검은선(적색)과 흰선(황색)은 각각 급이송구간과 절삭이송구간을 의미한다.

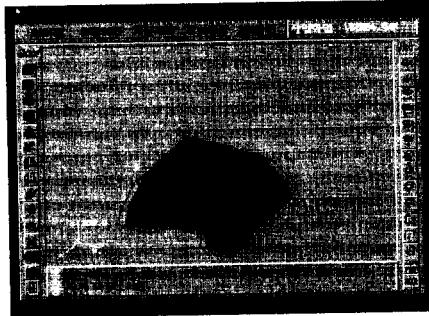
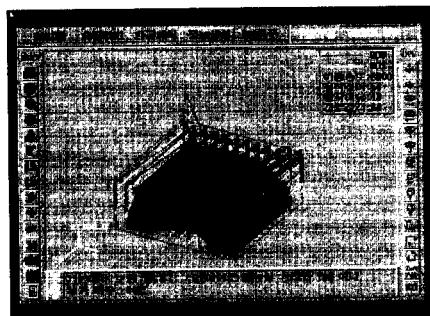
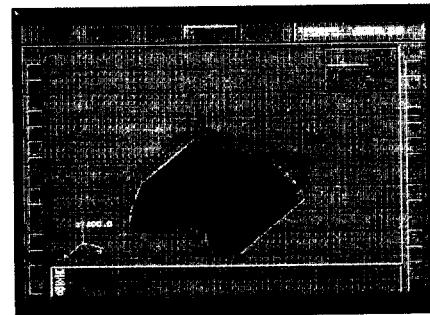


Fig.7 Generation of CL solid for finish cutting



(a) Rough cutting process



(b) Finish cutting process

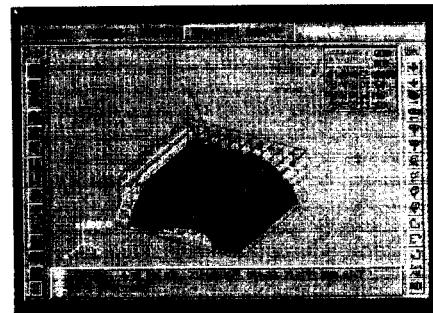
Fig.8 Generation of one way tool path

또한 Fig.10에는 Fig.9의 정삭공구경로에 대한 CNC코드의 생성례를 나타내었다.

이상과 같은 일련의 기능례에서 볼 수 있듯이 본 연구에서 개발한 CNC가공제작모듈은 솔리드모델러에 의한 제품의 형상설계부터 머시닝센터용 CNC코드의 생성까지를 체계적으로 처리할 수 있도록 구성되어 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 머시닝센터용 CAD/CAM시스템을 구축하기 위한 노력의 일환으로 솔리드모델러에 의한 3차원 제품의 형상설계에서 머시닝센터용 CNC코드의 생성까지를 통합적



(a) Rough cutting process



(b) Finish cutting process

Fig.9 Generation of zigzag tool path

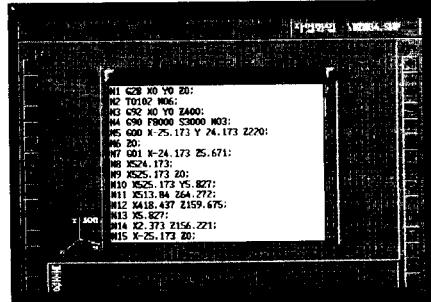


Fig.10 Verification of CNC code

으로 처리할 수 있는 CNC가공계획모듈을 구축하였다. 그리고 본 연구를 통해서 얻은 결과들을 정리하면, 다음과 같다.

① 3차원 제품의 형상은 B-Rep 솔리드모델러의 기본입체 생성기능, 스위프기능, 스플리트기능, 불리안기능 등을 이용해서 쉽게 설계할 수 있다.

② 공구경로는 절삭공구의 재원과 절삭조건을 토대로 제품형상은 옵셋시켜서 생성한 CL입체나 가공공간을 스플리트하는 방법을 통해서 얻었다. 그리고 이와 관련해서 3가지 알고리즘을 제안하였다.

③ 공구경로가 2차원 평면(절단평면)상에 놓여지기 때문에 가공방향으로의 좌표값을 비교함으로써 과대진삭되는 부분들을 쉽게 제거할 수 있다.

④ 공구경로 생성시에 가공방향의 절단평면(수직면)으로 ZX평면이나 YZ평면을 이용하면 자유도가 2½축인 CNC밀링머신에서도 3차원 제품을 가공할 수 있다. 그리고 이 경우에는 원호보간을 사용할 수 있기 때문에 CNC코드의 크기와 가공시간을 단축시킬 수 있으며, 가공정밀도도 향상시킬 수 있다.

#### 참고문헌

1. CIM을 위한 차세대 솔리드모델리 (이론 및 응용), KAIST 산학협동공개강좌, (1990)
2. M. Mäntylä : An Introduction to Solid Modeling, (1987)
3. J.D. Foley, A. van Dam, S.K. Feiner and J.H. Hughes : Computer Graphics - Principles and Practice (2nd Edition), Addison-Wesley, (1990)
4. 최병규 : CAM시스템과 CNC절삭가공, 청문각, (1989)
5. 이건우 : 컴퓨터 그래픽과 CAD, 영지문화사, (1994)
6. M. Mäntylä and Reijo Sulonen : GWB - A Solid Modeler with Euler Operators, IEEE CG&A, (1982.11), pp.17-31
7. M. Mäntylä : Boolean Set Operations of 2- Manifolds through Vertex Neighborhood Classification, Transactions on Graphics, 5(1), (1986), pp.1-29
8. 양희구, 김석일 : B-Rep 솔리드모델을 이용한 머시닝센터용 CAD/CAM시스템 개발 (I) - 반모서리 자료구조의 B-Rep 솔리드모델러에 관한 연구, 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, (1995)