

# B-Rep 솔리드모델을 이용한 머시닝센터용 CAD/CAM시스템 개발( I ) (반모서리 자료구조의 B-Rep 솔리드모델러에 관한 연구)

양 희 구\*, 김 석 일\*\*

## Development of Smart CAD/CAM System for Machining Center Based on B-Rep Solid Modeling Techniques( I ) (A study on the B-Rep Solid Modeler Using Half Edge Data Structure)

Hee-Goo Yang\*, Seok-Il Kim\*\*

### ABSTRACT

In this paper, to develop a smart CAD/CAM system for systematically performing from the 3-D solid shape design of products to the CNC cutting operation of products by a machining center, a B-Rep solid modeler is realized based on the half edge data structure. Because the B-Rep solid modeler has the various capabilities related to the solid definition functions such as the creation operation of primitives and the translational and rotational sweep operation, the solid manipulation functions such as the split operation and the Boolean set operation, and the solid inversion function for effectively using the data structure, the 3-D solid shape of products can be easily designed and constructed. Also, besides the automatic generation of CNC code, the B-Rep solid modeler can be used as a powerful tool for realizing the automatic generation of finite elements, the interference check between solids, the structural design of machine tools and robots and so on.

**Key Words** : B-Rep(경계표현, Boundary Representation), Solid Modeler(솔리드모델러), Half Edge Data Structure(반모서리 자료구조), Euler Operator(오일러작업자), Boolean Operator(불리안작업자)

### 1. 서 론

최근 급격히 발전한 컴퓨터 이용기술을 다품종 소량생

산방식의 제품공정에 도입하려는 노력의 결과로서, 요구하는 제품을 미리 책정하는 설계기능, 소재를 제품으로 변환하는 제조기능, 그리고 생산활동을 계획 및 통제하는

\* 한국항공대학교 기계설계학과(대학원)  
\*\* 한국항공대학교 기계설계학과

관리기능을 컴퓨터 내에서 통합적으로 처리할 수 있는 CIM시스템이 등장하게 되었다.<sup>(1)</sup> 따라서 현재의 CAD/CAM시스템은 이러한 CIM시스템에 있어서 제품의 설계정보와 생산정보의 생성을 지원하는 시스템, 즉 기술적인 처리부분을 담당하는 시스템의 의미를 가지고 있다.

이와 같은 관점에서 보면, CAD/CAM시스템은 3차원 제품에 대한 공학적 설계, 해석, 가공을 통합적으로 수행할 수 있는 기능을 가지고 있어야 한다. 그리고 이러한 기능은 3차원 제품에 대한 완전한 형상정보를 필요로 하기 때문에 단순한 와이어프레임모델이나 곡면모델이 아닌 솔리드모델에 기반을 둔 CAD/CAM시스템이 그 개발의 난이성에도 불구하고 그동안 많은 주목을 받아 왔다.<sup>(2,3)</sup>

따라서 본 연구에서는 3차원 제품의 형상설계부터 머시닝센터에서의 CNC절삭까지를 통합적으로 처리할 수 있는 CAD/CAM시스템을 개발하기 위해서 반모서리 자료 구조에 토대를 둔 B-Rep 솔리드모델러를 구현하였다. 특히 이 솔리드모델러는 기본입체(primitive)들의 생성과 단면형상의 평행이동·회전 스위프(sweep)에 의한 입체정의(solid definition)기능, 스플리트(split)작업과 불리안작업에 의한 입체조작(solid manipulation)기능, 그리고 컴퓨터 기억용량의 효율적 사용을 위한 입체제거(solid inversion)기능을 통해서 제품의 3차원 형상을 용이하게 설계 및 관리할 수 있도록 구성되어 있다. 그리고 이러한 솔리드모델러의 형상정보처리능력은 3차원 제품에 대한 CNC코드의 자동생성은 물론 유한요소해석,

물체간의 간섭검사, 공작기계 및 로봇의 구조설계에도 효과적으로 적용할 수 있다.

## 2. B-Rep 솔리드모델러의 구성 및 내용

### 2.1 개요

지금까지 3차원 제품의 형상은 와이어프레임모델러, 곡면모델러, 그리고 솔리드모델러에 의해서 표현되어 왔다.<sup>(4-6)</sup>

와이어프레임모델러는 제품의 형상을 점과 특징선으로 표현하기 때문에 개발이 용이하고, 정보입력작업도 단순하다. 그러나 제품형상의 경계면 및 내부·외부정보가 없기 때문에 CNC절삭가공을 위한 CNC코드의 자동생성, 제품의 역학적 해석을 위한 유한요소의 자동생성 등이 불가능하다. 곡면모델러는 와이어프레임모델에 특징선들이 이루는 면들의 방정식을 추가한 형태이며, CNC코드의 자동생성에 많이 적용되고 있다. 그러나 이 시스템에서도 3차원 제품에 대한 유한요소의 자동생성이 불가능하기 때문에 제품의 역학적 해석에는 한계를 가지고 있다. 솔리드모델러는 제품의 형상을 생성시킬 때 곡면모델러에서 다루는 면들의 방정식 외에도 면들간의 상호연결관계, 면들의 내부·외부방향 등에 대한 토폴로지(topology)정보도 가지고 있기 때문에 제품의 부피에 대한 정보를 보유하게 된다. 따라서 면단위의 작업인 CNC코드의 자동생성 외에도 유한요소의 자동생성, 물체간의 간섭검사, 공작기계 및 로봇의 구조설계 등과 같은 부피단위의 작업

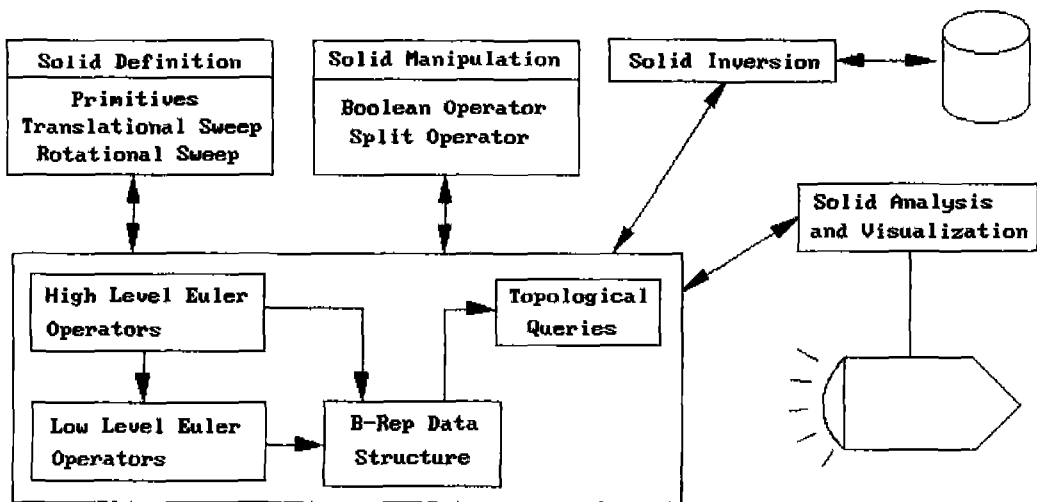


Fig. 1 Components of B-Rep solid modeler

에도 적용할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 이러한 솔리드모델러의 형상정보처리능력을 머시닝센터용 3차원 CAD/CAM시스템과 접목시키기 위해서 Fig. 1과 같은 형태로 반모서리 자료구조의 B-Rep 솔리드모델러를 개발하였다.

## 2.2 B-Rep 솔리드모델러

### (1) 반모서리 자료구조

반모서리 자료구조의 B-Rep 솔리드모델러에서는 입체, 면, 루프(loop), 모서리, 꼭지점 등과 같은 토폴로지 요소의 정보들과 그들의 상호연결관계를 이중연결리스트(doubly linked list)로 표현하는 방법을 통해서 입체를 생성한다.<sup>(3)</sup>

이러한 반모서리 자료구조의 특징은 하나의 모서리를 진행방향이 서로 반대인 2개의 반모서리로 분리하고, 분리된 각각의 반모서리가 원래의 모서리를 공유하는 2개의 면에 대해서 별도로 사용되도록 하는 데 있다. 또한 면

과 구멍의 경계를 표현하기 위해서 각각의 경계선에 해당되는 외부루프와 내부루프의 개념을 사용하고 있는데, 이러한 루프들은 각각에 대응되는 반모서리의 연결리스트들을 가지고 있다. 반모서리의 진행방향은 항상 면의 내부가 진행방향을 좌측에 있도록 주어지기 때문에 외부루프에서의 반모서리의 진행방향과 내부루프에서의 반모서리의 진행방향은 서로 반대로 설정된다. 따라서 반모서리 자료구조의 이러한 특성은 입체를 생성하는 과정에서 매우 유용하게 사용된다. 그리고 이중연결리스트로 토폴로지요소들의 관계를 표현하기 때문에 관련정보들을 빨리 도출할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서 구축한 반모서리 자료구조는 기본적으로 입체, 면, 루프, 반모서리, 꼭지점으로 이루어지는 5단계의 계층구조로 구성되어 있다. 즉 입체는 면의 정보, 면은 외부·내부루프의 정보, 루프는 반모서리의 정보, 반모서리는 꼭지점의 정보를 각각 가지고 있으며, 이러한 토폴로지요소들은 서로 이중연결리스트로 연결되어 있다. 특히 본 연구에서는 입체의 형상을 보다 신속하게 컴퓨터 화면상에 표시하기 위해서 입체가 모서리의 정보, 모서리가 반모서리의 정보를 가질 수 있는 형태의 반모서리 자료구조를 사용하였는데, 그 개념은 Fig. 2와 3에서 볼 수 있다.

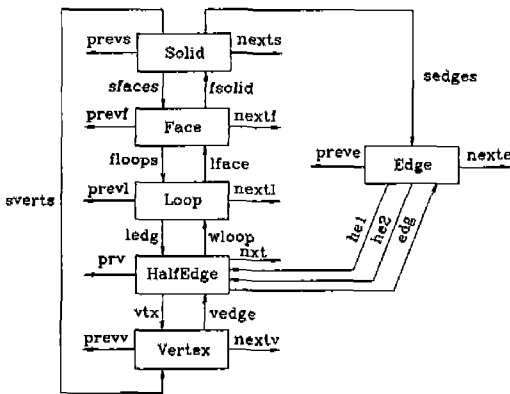


Fig. 2 Hierarchic view of half edge data structure

### (2) 오일러작업

오일러작업은 입체, 면, 루프, 모서리, 꼭지점 등과 같은 토폴로지요소의 정보들을 자료구조에 추가하거나, 자료구조에서 삭제 및 수정하면서 입체를 형성하는 작업을 의미한다.

입체는 항상 토폴로지요소의 수가 식 (1)에 나타난 Euler-Poincare관계식을 만족해야 하기 때문에, 오일러작업에서는 토폴로지요소들이 서로 독립적인 관계를 가질 수 없다. 즉 하나의 토폴로지요소가 입체에 추가되거나, 입체에서 삭제될 때에는 다른 토폴로지요소의 변화가 필연적으로 동반된다.

$$v - e + f = 2(s - h) + r \quad (1)$$

여기서  $v$ 는 꼭지점의 수,  $e$ 는 모서리의 수,  $f$ 는 면(외부루프)의 수,  $s$ 는 독립된 입체의 수,  $h$ 는 입체를 관통하는 구멍의 수, 그리고  $r$ 은 면에 존재하는 내부루프의 수이다.

본 연구에서는 식 (1)을 만족하는 오일러작업을 효과적으로 수행할 수 있도록 다음과 같은 오일러작업자(Euler

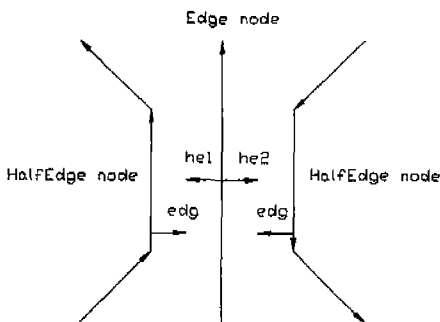


Fig. 3 Identification of half edges

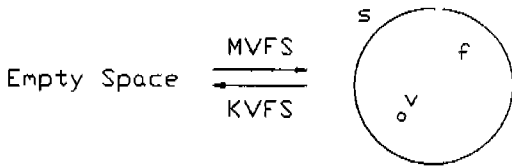


Fig. 4 MVFS(KVFS) operator

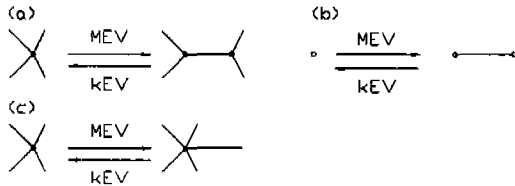


Fig. 5 MEV(KEV) operator

operator)들을 구성하였다.<sup>(7)</sup>

① MVFS와 KVFS (Make(Kill) Vertex, Face, Solid)

MVFS작업은 독립적인 입체를 만들 때 사용하며, 자료 구조에 입체, 면 및 꼭지점에 대한 정보를 추가시킨다. 그리고 KVFS작업은 MVFS작업의 역작업을 의미한다. 이러한 개념은 Fig. 4에서 볼 수 있다.

② MEV와 KEV (Make(Kill) Edge, Vertex)

MEV작업은 자료구조에 기존의 꼭지점에서 시작하는 하나의 모서리를 추가하고, 동시에 그 모서리의 끝점을 꼭지점으로 추가할 때 사용한다. Fig. 5는 이러한 작업의 3가지 형태를 보여주고 있다. KEV작업은 MEV작업의 역작업이다.

③ MEF와 KEF (Make(Kill) Edge, Face)

MEF작업은 하나의 면(외부루프)상에 존재하는 꼭지점들을 모서리로 연결하여 면(외부루프)을 추가할 때 사용한다. 이러한 작업에는 모서리의 연결조건에 따라서 Fig. 6과 같은 3가지 형태가 존재한다. KEF작업은 MEF작업의 역작업이다.

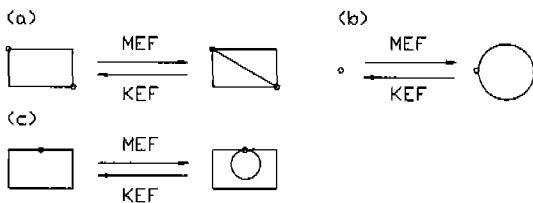


Fig. 6 MEF(KEF) operator

④ MEKR과 KEMR (Make(Kill) Edge, Kill(Make) Ring)

MEKR작업은 Fig. 7에서와 같이 외부루프와 내부루프를 하나의 모서리로 연결하여 하나의 외부루프로 만들거나, 2개의 루프를 하나의 모서리로 연결해서 하나의 루프로 만들 때 사용한다. KEMR작업은 MEKR작업의 역작업이다.

⑤ MFKRH와 KFMRH (Make(Kill) Face, Kill(Make) Ring, Hole)

MFKRH작업은 한 면의 외부루프를 다른 면의 내부루프로 만들어서 2개의 면을 결합시킬 때 사용하며, 그 예는 Fig. 8에서 볼 수 있다. KFMRH작업은 MFKRH작업의 역작업을 의미한다.

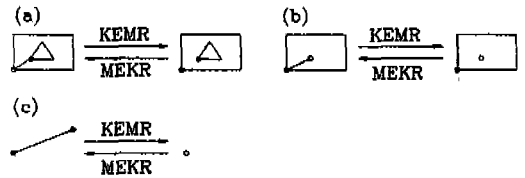


Fig. 7 MEKR(KEMR) operator

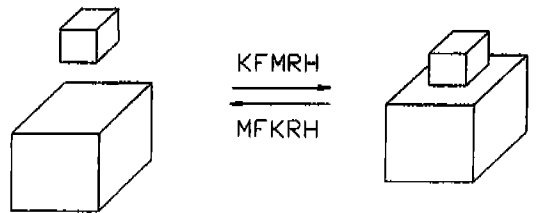


Fig. 8 MFKRH(KFMRH) operator

(3) 불리안작업

불리안작업은 두 입체간의 합집합(union), 차집합(difference) 및 교집합(intersection)을 통해서 얻은 최종입체를 솔리드모델러의 자료구조에 저장하는 작업이다. 특히 단순한 기본입체로부터 복잡한 최종입체를 생성할 수 있는 불리안작업은 솔리드모델러가 가지고 있는 가장 유용한 특성이며, 견고(robust)한 작업결과를 얻기 위해서는 많은 토폴로지요소들의 관계와 기하학적 조건들을 모두 고려해야 한다.<sup>(8)</sup>

B-Rep 솔리드모델러에서는 경계도출(boundary evaluation)과정을 통해서 불리안작업이 적용되는 두 입

체의 정보로부터 최종입체의 정보를 생성한다. 경계도출을 위해서는 먼저 두 입체가 서로 교차하는 면과 모서리를 찾고, 그리고 그 교점을 계산할 필요가 있다.

본 연구에서는 Newell이 제안한 식 (2)를 이용하여 입체상의 면의 방정식을 구하고,<sup>(9)</sup> 그 면에서 상대 입체의 모서리를 이루는 두 꼭지점까지의 거리와 방향을 구할 수 있는 식 (3)을 새로운 교차판별식으로 제안하여 교점을 계산하였다.

$$[a \ b \ c \ d] \cdot [x \ y \ z \ 1]^T = 0 \quad (2)$$

여기서  $n$ 개의 꼭지점으로 이루어진 평면의 방정식을  $ax+by+cz+d=0$ , 그리고 그 꼭지점들의 평균좌표값을  $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 라고 하면, 계수  $a, b, c, d$ 는 아래와 같이 주어진다.

$$a = \sum_{i=1}^n (y_i - y_{i+1})(z_i + z_{i+1}),$$

$$b = \sum_{i=1}^n (z_i - z_{i+1})(x_i + x_{i+1}),$$

$$c = \sum_{i=1}^n (x_i - x_{i+1})(y_i + y_{i+1}),$$

$$d = -[\bar{x} \ \bar{y} \ \bar{z}] \cdot [a \ b \ c]^T$$

또한 식 (2)에서 구한 평면의 방정식 계수  $(a, b, c, d)$ 와 교차여부를 검색할 모서리의 꼭지점 좌표값  $x_{vtx}$ ,  $y_{vtx}$ ,  $z_{vtx}$ 을 이용하면, 평면에서 꼭지점까지의 거리와 방향을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$d_{ref} = [x_{vtx} \ y_{vtx} \ z_{vtx}] \cdot [a \ b \ c]^T + d \quad (3)$$

결과적으로 식 (3)에서 얻어지는  $d_{ref}$  값이 하나의 모서리를 이루는 두 꼭지점에 대해서 부호가 서로 반대이거나, 하나의 값이 0이라면, 각각 서로 다른 입체에 속하는 면과 모서리가 교차한다는 것을 의미하기 때문에 그 교점에서의 경계도출을 수행한다.

도출된 교점들을 경계모서리로 연결하는 작업이 완료되면, Fig. 9에 제시한 예에서 볼 수 있듯이 수정된 입체의 면들이 상대 입체에 대해서 갖는 포함관계를 IN/OUT/ON의 상태로 분류할 수 있다.

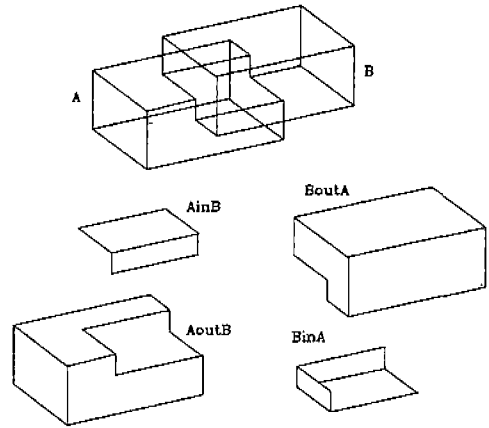


Fig. 9 Boundary classification of two bricks

이러한 면들의 포함관계를 이용하면, 두 입체간의 합집합, 차집합 및 교집합을 식 (4)에서와 같이 구할 수 있다.<sup>(8)</sup>

$$\begin{aligned} A \cup B &= AoutB + BoutA \\ A \setminus B &= AoutB + (BinA)^{-1} \\ A \cap B &= AinB + BinA \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $\cup$ 은 합집합,  $\setminus$ 는 차집합,  $\cap$ 은 교집합을 의미한다.

이상과 같은 불리안작업의 기본적인 수행과정을 정리하면 다음과 같다.

- ① 서로 교차하는 두 입체상의 면과 모서리를 찾고, 그 교점을 도출한다.
- ② 도출된 교점들을 경계모서리로 연결하고, 수정된 입체의 면들이 상대 입체에 대해서 갖는 포함관계를 IN/OUT/ON의 상태로 분류한다.
- ③ 요구되는 불리안작업(합집합, 차집합, 교집합)에 맞도록 수정된 면들의 모서리를 서로 연결한다.
- ④ 불리안작업의 결과로서 얻어진 최종입체의 정보를 반모서리 자료구조에 저장한다.

### 3. B-Rep 솔리드모델러의 기능레 및 고찰

본 연구에서 개발한 B-Rep 솔리드모델러는 3차원 입체의 형상을 보다 쉽게 설계할 수 있도록 기본입체의 생

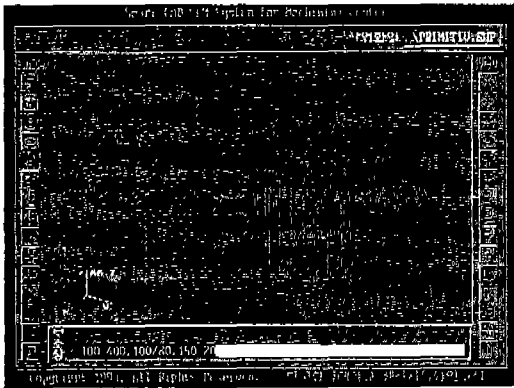


Fig.10 Generation of primitives

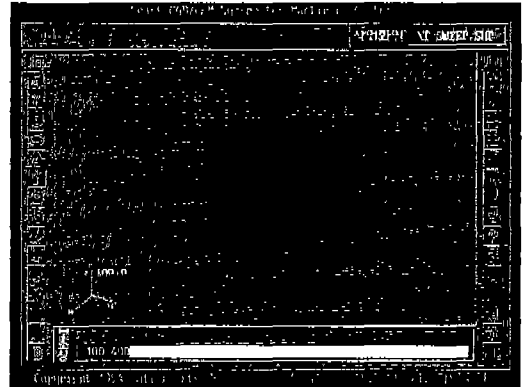


Fig.12 Translational sweep operation

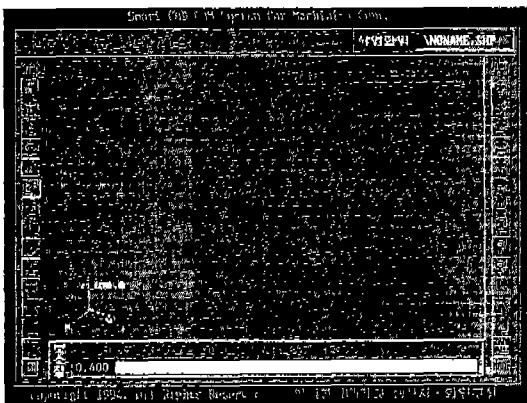


Fig.11 Generation of sectional shape

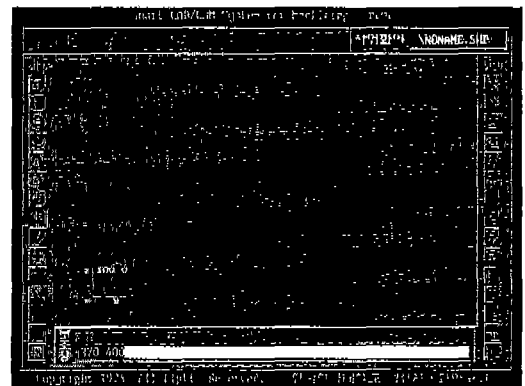


Fig.13 Generation of sectional shape

성기능, 평행이동·회전 스위프기능, 스플리트기능, 블리 안기능 등을 가지고 있다.

기본입체는 3차원 입체를 설계할 때 자주 나타나는 입체요소를 정형화시켜 놓은 것이다. 이러한 기본입체의 생성작업에서는 입체의 중심좌표값과 특징매개변수값만을 필요로 하기 때문에 해당 입체의 생성작업은 매우 단순하게 된다. 본 연구에서 개발한 B-Rep 솔리드모델러는 Fig.10에서 볼 수 있는 직육면체, 구, 원통, 원뿔, 토러스 등과 같은 기본입체들을 자동생성하는 기능을 가지고 있다. 그리고 컴퓨터 화면의 좌측상단에 이와 관련된 기능을 가진 아이콘들을 배치하여 기본입체의 생성작업을 효율적으로 수행할 수 있도록 하였다.

3차원 입체를 설계하는 과정에서는 동일한 단면형상을 갖는 입체요소들이 자주 사용된다. 이러한 입체요소의 중

류로는 단면형상을 평행이동시킨 형태와 회전시킨 형태가 있다. 본 연구에서 개발한 B-Rep 솔리드모델러는 평행이동 스위프기능과 회전 스위프기능을 통해서 이러한 입체요소들을 생성할 수 있도록 구성되어 있다. Fig.11과 12에는 단면형상을 정의하고, 그 단면형상을 평행이동시켜서 하나의 입체를 생성하는 평행이동 스위프기능을 나타내었으며, Fig. 13과 14에는 단면형상을 정의하고, 그 단면형상을 회전시켜서 하나의 입체를 생성하는 회전 스위프기능을 나타내었다. 그리고 이러한 스위프작업들의 편의성을 도모하기 위해서 컴퓨터 화면의 좌측중단에 이와 관련된 기능을 가진 아이콘들을 배치하였다.

스플리트작업은 하나의 입체를 주어진 평면으로 절단하여 새로운 입체들을 만드는 작업을 의미한다. 일반적으로 이러한 스플리트작업은 입체의 생성 외에도 입체의 단

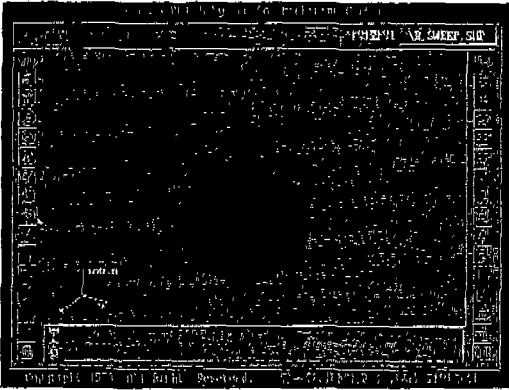


Fig.14 Rotational sweep operation

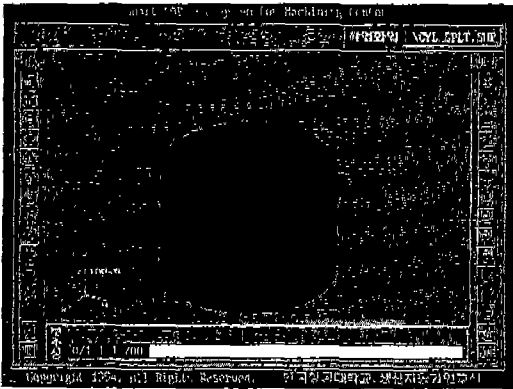


Fig.15 Split operation

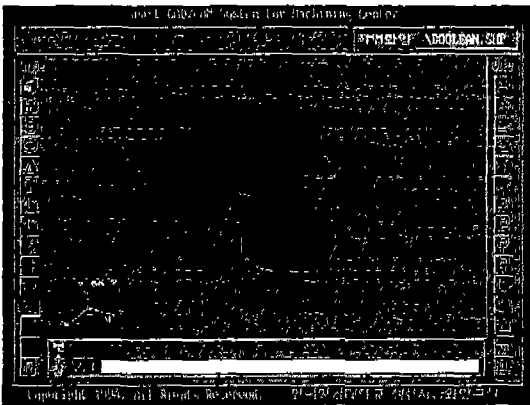


Fig.16 Boolean operation

면형상을 보기 위해서 사용된다. 기술적인 내용으로는 스플리트작업을 불리안작업의 한 형태라고 볼 수 있다. 본 연구에서 개발한 B-Rep 솔리드모델러의 스플리트기능을 이용해서 원통을 두 입체로 분할한 예는 Fig.15에 제시하였다. 그리고 스플리트작업의 편의성을 고려해서 관련 아이콘을 컴퓨터 화면의 좌측중단에 배치하였다.

실제 사용되고 있는 3차원 제품의 형상은 단순한 형태의 것도 있지만, 일반적으로 복합적인 형태의 것이 더 많다. 그리고 이러한 형상을 하나하나 직접 설계해 나가는 방법은 매우 복잡하고 번거로운 작업을 요구하게 된다. 따라서 단순한 형상들을 이용해서 원하는 형상을 효율적으로 설계하기 위해서는 입체간의 합집합, 차집합 및 교집합을 통해서 최종입체를 얻을 수 있는 불리안작업이 반드시 요구된다. 본 연구에서 개발한 B-Rep 솔리드모델러의 불리안기능은 Fig.16에서 볼 수 있는데, 이 예에서는 원통과 직육면체 사이에서 나타날 수 있는 3가지 형태의 불리안작업(합집합, 차집합, 교집합) 결과들을 제시하였다. 그리고 이러한 불리안작업과 관련된 아이콘들은 컴퓨터 화면의 좌측하단에 준비되어 있다.

컴퓨터 화면의 좌측하단에 있는 MRS 아이콘은 완성된 입체를 평행이동 및 회전시켜서 원하는 공간상에 재배치하거나, 입체의 크기를 재조정할 수 있는 기능을 가지고 있고, DEL 아이콘은 입체를 공간상에서 제거하는 기능을 가지고 있다. 그리고 지금까지의 작업내용을 확인할 수 있는 기능의 아이콘을 컴퓨터 화면의 맨 좌측하단에 배치하였다.

또한 완성된 입체는 컴퓨터 화면의 우측상단에 있는 아이콘들을 이용해서 확대 및 축소하여 볼 수 있고, 입체의 각도에서 자유롭게 볼 수 있다. 그리고 입체의 정면도, 평면도 및 측면도를 컴퓨터 화면상에 신속히 표시하기 위한 기능의 아이콘들도 컴퓨터 화면의 우측하단에 준비되어 있다. 특히 MODE 아이콘은 3차원 형상을 설계하는 과정에서 중간작업 결과를 직접 확인할 수 있도록 온선택저, 입체번호 확인, 면번호 확인, 모서리번호 확인, 꼭지점번호 확인 등과 같은 기능들을 담당하고 있다.

이상과 같은 일련의 기능설명에서 알 수 있듯이 본 연구에서는 3차원 제품의 형상을 보다 쉽게 설계할 수 있도록 사용자의 편의성 측면을 충분히 고려해서 B-Rep 솔리드모델러를 구성하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 3차원 제품의 형상설계부터 머시닝센터에서의 CNC절삭까지를 통합적으로 처리할 수 있는 CAD/CAM시스템을 개발하기 위해서 반모서리 자료구조를 이용한 B-Rep 솔리드모델러를 구현하였다.

구현된 B-Rep 솔리드모델러는 기본입체의 생성기능, 평행이동·회전 스위프기능, 스플리트기능, 불리안기능 등을 가지고 있으며, 솔리드모델러의 반모서리 자료구조는 제품 형상을 컴퓨터 화면상에 신속히 표시할 수 있도록 입체가 모서리의 정보, 모서리가 반모서리의 정보를 가질 수 있는 형태로 구축하였다. 그리고 불리안작업에서의 두 입체간의 경계도출을 보다 효과적으로 수행하기 위해서 새로운 형태의 면과 모서리간의 교차판별식을 제안하였다.

#### 참고문헌

1. 佐田登志夫 : CIM の設計と構築, オーム社, 1992.
2. CIM을 위한 차세대 솔리드 모델러 (이론 및 응용), KAIST 산학협동공개강좌, 1990.
3. M. Mäntylä : An Introduction to Solid Mod-

- eling, 1987.
4. J.D. Foley, A. van Dam, S.K. Feiner and J. H. Hughes: Computer Graphics-Principles and Practice(2nd Edition), Addison-Wesley, 1990.
5. 최병규: CAM시스템과 CNC절삭가공, 청문각, 1989.
6. 이건우: 컴퓨터 그래픽과 CAD, 영지문화사, 1994.
7. M. Mäntylä and Reijo Sulonen: GWB - A Solid Modeler with Euler Operators, IEEE CG&A, pp.17-31, 1982.11.
8. M. Mäntylä: Boolean Set Operations of 2-Manifolds through Vertex Neighborhood Classification, Transactions on Graphics, 5(1), pp.1-29, 1986.
9. I.E. Sutherland, R.F. Sproull and R.A. Schumacker: A Characterization of the Hidden-Surface Algorithms, ACM Computing Surveys, 6(1), pp.1-55, 1974.