

# 비다양체 위상 표현을 바탕으로 한 박판 형상 모델링 및 솔리드로의 변환

이 상 현\*, 이 건 우\*\*

## Sheet Modeling and Transformation of Sheet into Solid Based on Non-manifold Topological Representation

Sang Hun Lee\* and Kunwoo Lee\*\*

### ABSTRACT

In order to create a solid model more efficiently for a plastic or sheet metal product with a thin and constant thickness, various methods have been proposed up to now. One of the most typical approaches is to create a sheet model initially and then transform it into a solid model automatically for a given thickness. The sheet model as well as the transitive model in sheet modeling procedure is a non-manifold model. However, the previous methods adopted the boundary representations for a solid model as their topological framework. Thus, it is difficult to represent the exact adjacency relationship between topological entities and to implement the topological operations for sheet modeling and the transformation procedure of a sheet into a solid. In this paper, we proposed a sheet modeling system based on a non-manifold topological representation which can represent solids, sheets, wireframes, and their mixture. A set of generalized Euler operators for non-manifold topology as well as the sheet modeling capabilities including adding, bending, and punching functions are provided for easy modeling of sheet objects, and they are performed interactively with a two dimensional curve editor. Once a sheet model is completed, it can be transformed into a solid automatically. The transformation procedure is composed of the offset functions and the Boolean operations of sheet models, and it is even more comprehensive and easier to be implemented than the previous methods.

**Key Words:** CAD, Non-manifold (비다양체), Sheet Model (박판 모델), Offset (오프셋), Euler Operator (오일러 작업자)

### 1. 서 론

#### 1.1 필요성

최근 제품의 경량화 추세에 힘입어 각종 외장 및 기능 부품들이 플라스틱 등의 재질로 제작되는 사례가 증가하

고 있으며, 또한 얇은 철판 재료에 펀칭과 벤딩 등의 프레스 가공을 가하여 제품의 구조물과 외장 부품을 제작하는 사례를 흔히 찾아볼 수 있게 되었다. 얇고 균일한 두께의 프레스물과 마찬가지로 대부분의 플라스틱 부품들도 두께가 얇을 뿐 아니라 사출 성형 과정 중 제품의 결합을 줄

\* 고등기술연구원 생산기술연구실

\*\* 서울대학교 기계설계학과

이기 위해 보통 일정한 두께로 설계된다. 이러한 플라스틱 사출품 혹은 프레스물의 설계 및 생산의 효율성을 높이기 위해서 제품 및 금형 설계 공정의 자동화, 제조 과정의 시뮬레이션(simulation), 그리고 제품의 구조 해석 등을 위한 CAD/CAM/CAE 시스템이 개발되고 있으며, 이러한 시스템에는 이들 부품에 대한 박판(sheet) 또는 솔리드(solid) 모델과 셸(shell) 및 솔리드 메쉬(mesh) 등을 기하학적 형상 모델링 시스템(geometric modeling system)을 통하여 지원할 필요가 있다. 그러나 이와 같이 얇은 두께의 부품들을 불리안 작업(Boolean operation) 등 전통적인 솔리드 모델링 기능들을 사용하여 모델링할 경우 상당히 어렵고 비능률적이며, 또한 기존의 솔리드 모델링 시스템에서는 박판 형상의 표현에 상당한 제약이 뒤따른다. 따라서 이처럼 균일한 두께의 얇은 물체들을 쉽게 모델링 할 수 있는 기능과 솔리드뿐만 아니라 박판 모델들을 동일한 환경에서 모델링할 수 있는 형상 모델링 시스템이 개발 된다면 플라스틱 사출품 또는 프레스물의 설계 및 생산을 위한 통합 CAD/CAM/CAE 시스템을 보다 효율적으로 구축할 수 있게 될 것이다.

1.2 관련 연구

지금까지 얇은 두께의 솔리드를 쉽게 모델링하기 위한 노력들은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 솔리드 모델의 오프셋(offset)을 이용한 방법으로서 Fig.1(a)에 나타난 바와 같이 물체의 외곽 혹은 내곽의 형상을 솔리드로 모델링한 다음, 그 모델을 두께만큼 오프셋 시켜 또 하나의 모델을 생성시켜, 이 두 모델간에 불리안 작업을 하여 얇은 두께의 솔리드를 만드는 방법이다. 둘째는 박판 모델의 오프셋을 이용한 방법으로 Fig.1(b)와 같이 먼저 물체의 외곽 혹은 내곽의 형상을 박판 모델로 모델링한

후 이를 오프셋 시켜 솔리드 모델을 얻는 방법이다. 그러면 이들 두가지 방법에 대한 기존의 연구에 대해서 살펴 보도록 하겠다.

1.2.1 솔리드 모델의 오프셋을 이용한 방법

Rossignac과 Requicha<sup>(1)</sup>는 CSG 표현 방식의 솔리드 모델러에 오프셋 작업을 최초로 도입하였다. 이들은 솔리드의 오프셋을 반경이 r인 솔리드 구를 모델 전체에 대해 스위핑(sweeping)된 체적으로 규정하고, 오프셋 작업이 CSG 트리내의 비단말 노드(non-terminal node)로 들어가는 CSGO(CSG with offsetting)를 정의하여 오프셋시킨 솔리드를 표현하였다.

Lee와 Lee<sup>(2)</sup>는 경계 표현 방식(B-rep)의 솔리드 모델러인 ROMULUS의 모델링 커널(kernel)을 바탕으로 솔리드의 오프셋 기능을 개발하고 불리안 작업을 사용하여 얇은 두께의 사출 성형품을 모델링할 수 있는 기능을 개발하였다. 여기서는 먼저 제품의 외측면의 형상을 솔리드로 모델링한 다음 사용자가 물체의 두께를 지정해 주면, 시스템은 이 물체보다 두께만큼 축소된 내측면 형상의 솔리드를 생성시키고 외측 솔리드에서 내측 솔리드를 빼기(subtraction)작업을 수행시켜 얇은 두께의 솔리드를 생성하도록 하였다. 이때 축소시 발생하는 위상 자료의 변화는 고려하지 않고 있기 때문에 정당하지 않은 모델이 만들어질 가능성이 있다.

Farouki<sup>(3)</sup>는 경계 표현 방식을 사용하는 솔리드 모델러에서 간단한 유형의 솔리드에 대하여 오프셋 솔리드를 만드는 과정을 제안하였다. 여기서의 오프셋의 과정은 먼저 면, 모서리, 꼭지점에 대해 각각의 오프셋 곡면 조각들을 만든 다음, 이들을 이어 붙여서 새로운 오프셋 솔리드를 만드는 방식을 제안하였다. 그러나 이 알고리즘은 단지 볼록한 솔리드 형상에 대해서만 적용시킬 수 있는 것으로 오목한 모서리나 꼭지점이 있는 경우에는 사용할 수 없다.

Chiyokura와 Satoh<sup>(4)</sup>는 먼저 Winged-edge data structure내에서 geometric face와 non-geometric face로 이루어진 박판 면(lamina face)으로 open set을 정의하고, open set들 간의 불리안 작업을 먼저 개발한 다음, 이 불리안 작업을 사용하여 오프셋 솔리드 생성 기능과 자기 간섭을 일으키는 솔리드를 수정하는 방법을 개발하였다. 오프셋 솔리드의 생성 과정은 먼저 각 면들에 대한 오프셋 곡면을 갖는 open set들을 생성시킨 다음, 이들 간의 불리안 합집합 작업을 행하고, 끝으로 볼록

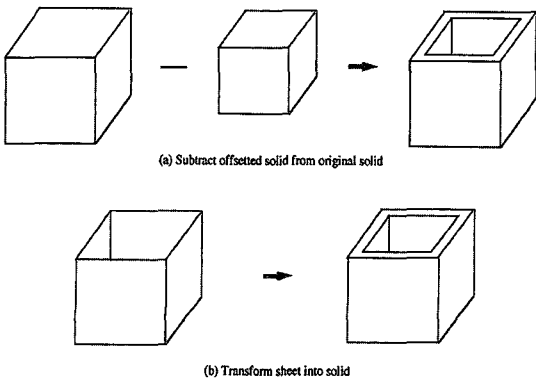


Fig. 1 Methods for creating a thin solid

한 모서리 (convex edge) 에 기인한 open set들 간의 틈을 오일러 작업을 사용하여 적당히 메꿔줌으로써 이루어진다.

이상의 연구에서 Lee와 Lee<sup>(2)</sup>의 논문을 제외한 나머지는 단지 오프셋 솔리드 모델을 생성시키는 방법에 대해서만 언급되어 있으나, 오프셋 솔리드와 원래의 솔리드간에 빼기 작업을 수행하면 균일한 얇은 두께의 솔리드 모델을 쉽게 생성시킬 수 있으므로 얇은 두께의 모델 생성 방법과 깊은 관련이 있다. 이러한 방법은 주로 사출 성형품의 모델링에 사용되며, 프레스몰에 대해서는 다음의 박판 모델을 기반으로 한 방법이 보다 적합한 것으로 생각된다.

### 1.2.2 박판 모델의 오프셋을 이용한 방법

솔리드 오프셋 및 불리안 작업을 사용하는 위의 방식은 많은 계산 시간을 필요로 하고, 다수의 구멍과 굽힘 부분이 존재하는 프레스몰과 같은 모델에 대해서는 비효율적이며, 또한 모델링하고자 하는 대상이 플라스틱 사출품일 때는 그 두께면이 단이진 경우 등에서도 효과적으로 사용할 수 없는 제약 조건이 있다<sup>(2)</sup>. 이러한 단점을 해소시키고, 박판 형상을 효율적으로 모델링하기 위해서 Stroud<sup>(6)</sup>, Lee와 Kwon<sup>(6)</sup>, 그리고 Lim과 Lee<sup>(7)</sup>는 대상 물체를 먼저 두께가 없는 박판 형상으로 모델링한 다음, 이를 체적을 갖는 솔리드 형상으로 변환시키는 방법을 제시하였다. 단, 여기에서의 박판 모델은 Winged-edge data structure와 같은 솔리드를 나타내기 위해 고안된 자료 구조를 사용하여 표현하였다.

Stroud<sup>(6)</sup>는 와이어프레임, 박판, 그리고 솔리드 모델을 BUILD에서 사용한 솔리드의 경계 표현 방식을 사용하여 표현하였는데, 그의 자료 구조에 의하면 박판 모델은 두께가 없는 솔리드로 퇴화된 것을 뜻하며, 박판 모델의 양쪽 면을 나타내기 위하여 앞뒤에 해당하는 면들의 그룹을 저장하고 있다. 이 박판 모델들은 솔리드 모델에 사용되는 표준 오일러 작업들을 사용하거나 이 오일러 작업들을 조합하여 만든 구멍 뚫기, 모서리 붙이기, 모서리에서 갈라 놓기 등의 상위 모델링 작업들을 통하여 수정되며, 일단 박판 모델이 완성되면 이로부터 솔리드 모델로 변환시킬 수 있다. 변환 과정은 먼저 sharp edge를 쪼개서 두께면에 해당하는 퇴화된 면을 만들어 나간 다음, sharp edge 들의 양 끝 점에 해당되는 꼭지점들에 모서리를 첨가시켜서 솔리드에 나타날 위상 요소들을 먼저 만들어 둔다. 이와 같이 위상 요소들의 조작이 모두 끝나면, 그 다음 각 꼭지점의 좌표, 각 모서리의 곡선, 그리고 각

면의 곡면들을 계산하여 기하학적인 정보를 치환시킨다.

Lee와 Kwon<sup>(6)</sup> 그리고 Lim과 Lee<sup>(7)</sup>의 박판 모델러는 기본적인 배경에서 Stroud의 것과 많은 공통점을 가지고 있다. 즉, Stroud의 경우에서처럼 솔리드 모델을 표현하기 위해 제안된 Winged-edge data structure를 사용하여 박판 형상을 나타내고 있으며, 이 박판 모델의 생성 및 수정을 표준 오일러 작업들을 기반으로 행하고 있다. 그러나 Stroud의 박판 모델에서는 두께면에 해당하는 퇴화된 면들을 sharp edge로 나타낸 반면, 이들의 박판 모델은 실제 두께를 가진 솔리드의 위상을 그대로 보존하고 있다. 특히 이 박판 모델러에서는 매크로화된 박판 오일러 작업들을 제공하여, 사용자가 이를 표준 오일러 작업을 수행하듯이 해 나가면, 시스템 내부에서는 솔리드의 위상 정보를 만들어 준다. 따라서 최종적인 박판 모델의 솔리드로의 변환 과정은 개념상으로는 단지 기하학적인 정보만 대치함으로써 이루어 질 수 있다. 또한 Stroud는 솔리드 변환 과정에서 발생할 수 있는 부적합한 형상들에 대한 처리에 대한 언급이 없는 반면, 이들은 퇴화된 두께면들을 회복시킬 때 발생하는 위상의 변화에 대한 처리 방법을 제시하였다.

그러나 이러한 Stroud<sup>(6)</sup>, Lee<sup>(6)</sup>, 그리고 Lim<sup>(7)</sup>의 방법에는 다음과 같은 몇 가지 문제점들이 있다.

첫째, 근본적으로 비다양체 형상인 박판 모델에 대해 솔리드에 대한 자료 구조를 사용하여 나타냄으로써 위상 요소들간의 인접 관계에 대한 충분한 위상 정보를 가지고 있지 않다. 따라서 기하학적인 정보를 검사하지 않고 위상 정보만으로 이웃 관계들을 명확히 밝혀 낼 수 없는 경우가 발생하며, 박판 모델링 중간에 발생하는 꼭지점에서의 비다양체 상황을 정확히 표현할 수 없다.

둘째, Lee<sup>(6)</sup>는 박판 모델을 만들기 위해 매크로화 된 박판 오일러 작업들을 제시하고 있으나, 이들만을 가지고서는 원하는 박판을 모델링할 수 없으며, 이들에 덧붙여 원래의 표준 오일러 작업들을 함께 사용해야 한다는 점을 지적할 수 있다.

셋째, 박판에서 솔리드로의 변환 과정에서 Stroud의 방법으로는 위상을 적당히 바꾸지 않으면 비상식적인 모델이 되는 경우를 해결해 줄 수 없다. 또한 Lee<sup>(6)</sup>는 Stroud의 방법과 달리 박판 모델에 퇴화된 두께면에 대한 위상 정보를 그대로 저장하고 있어서 박판 모델을 솔리드로 변환시킬 때 기하학적인 정보만을 대치 시킴으로써 그 과정을 간소하게 할 수 있다는 장점을 부각시켰다. 그러나 실제로는 단순한 기하학적인 정보의 치환만으로

솔리드를 만들어 낼 수 없고, 경우에 따라서 위상 정보를 수정해야 하는 경우가 발생한다. 따라서 솔리드로의 변환을 간단히 하기 위해 박판의 모델링 과정에서 솔리드일 때의 위상을 감안하여 중복되는 자료 및 복잡한 모델링 과정들을 감수한 것에 대한 효과가 반감되었다.

### 1.3 본 논문의 방향

이상과 같이 첫 번째의 솔리드 오프셋 및 불리안 작업을 사용하는 방식은 많은 계산 시간을 요하고, 또한 모델링하고자 하는 대상 물체의 두께면이 단이 진 경우와 리브 등이 존재하는 경우 등에는 적용이 어렵다는 제약 조건이 있으며, 두번째의 솔리드의 경계 표현을 박판에 까지 확장 적용시키고 박판 모델로부터 오프셋 된 솔리드를 얻는 방식은 박판 표현에 대한 자료 구조의 불완전성, 박판 모델링을 위한 충분하면서 편리한 위상 작업들의 불비, 그리고 솔리드로의 변환 과정의 복잡성 등을 문제점으로 하고 있다.

이러한 문제점들을 해결하기 위하여 본 논문에서는 비다양체 모델러를 사용한 방법을 제시한다. 먼저 다양체 모델이란 어느 점에 관해서도 그 점의 근방이 평면 또는 반평면과 동상인 공간'으로 표시되는 2차원 다양체 (two manifold)인 곡면을 경계로 갖고 있는 부피를 가진 물체, 즉 솔리드 모델을 뜻하며, 비다양체 모델은 Fig.2과 같이 다양체가 아닌 것들을 뜻한다. 여기에는 와이어프레임, 박판 및 솔리드 모델들과 이들의 복합체 및 세포 구조의 모델이 하나의 자료 구조로서 표현이 가능하다<sup>6)</sup>.

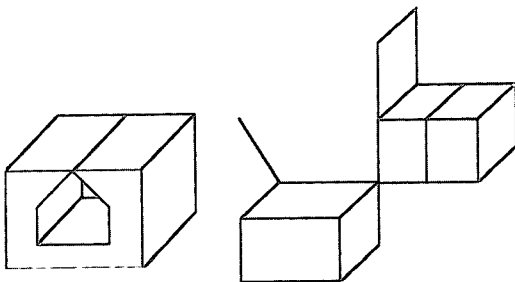


Fig. 2 Examples of non-manifold models

이러한 비다양체 모델러를 얇은 두께 물체의 모델링에 응용하면 솔리드 모델러를 바탕으로 한 기존의 방식들에 비하여 다음과 같은 장점을 가질 수 있다.

첫째, 비다양체 자료 구조에서는 모서리에서 2개 이상의 면들이 만나는 비다양체적인 상황을 충분히 나타낼 수

있기 때문에, 기하학적인 정보를 검사하지 않고 위상 정보만을 사용하여 인접한 위상 요소들에 대한 정보를 얻어 낼 수 있으며, 모델링 과정 중간에 나타나는 와이어프레임과 꼭지점에서의 비다양체 상황도 표현할 수 있다.

둘째, 비다양체 모델에 대한 오일러 작업들은 박판을 모델링 하는데 요구되는 위상 작업들을 충분히 제공한다. 따라서 이들을 사용하면 어떠한 형상의 박판 모델도 만들어 낼 수 있기 때문에, 앞의 시스템들에서와 같이 솔리드에 대한 오일러 작업들을 박판에까지 무리하게 적용시킴으로써 발생하는 복잡한 문제들을 피할 수 있다.

셋째, 박판 모델에서 솔리드로 변환시키는 과정을 훨씬 이해하기 쉬운 알고리즘으로 해결할 수 있다. 그것은 박판 모델들 간의 불리안 작업과 비다양체 오일러 작업들이 비다양체 모델러에서는 가능하기 때문이다.

따라서 본 논문에서는 기존의 솔리드 모델러를 사용하지 않고 비다양체 모델러를 사용하여 얇은 두께 물체를 모델링하는 기능을 개발하고자 한다. 제2장에서는 본 논문에서 사용한 모델러의 시스템 구조 및 자료 구조를 소개하며, 제 3장에서는 박판 모델을 생성시키는데 사용되는 오일러 작업과 여러 가지 박판 모델링 기능들을 소개하며, 제 4장에서는 앞에서 만들어진 박판 모델을 오프셋시켜 솔리드 모델을 자동으로 생성시키는 과정에 대하여 소개하도록 하겠다.

## 2. 비다양체 모델러

### 2.1 시스템의 전체 구조

본 논문에서 사용하고 있는 비다양체 형상 모델링 시스템의 전체 구조는 Fig.3에 나타난 바와 같이 커널(kernel) 부분과 커널 인터페이스(kernel interface) 부분

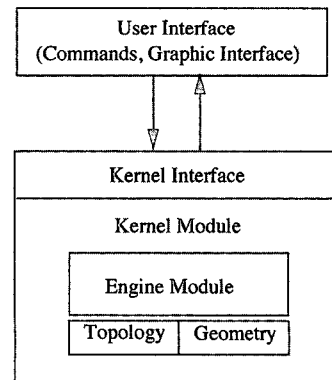


Fig. 3 System architecture of non-manifold geometric modeler

그리고 사용자 인터페이스(user interface) 부분으로 이루어져 있다. 커널 모듈의 가장 기초가 되는 모듈들은 위상 정보와 기하학적 정보를 관리하는 Topology 와 Geometry 모듈이며, 그 위에 이들을 사용한 형상 모델링 엔진(engine) 모듈들이 있다. 엔진 모듈로는 오일러(Euler) 작업, 불리안(Boolean) 작업, 곡면 모델링 작업, 라운딩(rounding) 작업, 부분 수정 작업(local operation), 그리고 박판 모델링(sheet modeling) 작업과 솔리드로의 변환 작업등이 있다.

## 2.2 비다양체 경계 표현

지금까지 비다양체 모델의 표현 방법에 관한 연구서는 주로 비다양체 모델을 표현하는데 충분하면서 효과적인 위상 요소들을 창안해 내고, 이들간에 인접 관계를 저장할 수 있는 자료 구조를 개발하는 연구가 진행되어 왔다. Weiler<sup>(8)</sup>는 물체의 모서리에 인접한 면들을 순서적으로 저장한 Radial Edge Structure라는 경계 표현 방식의 자료 구조를 제안함으로써, 하나의 모서리에 2개 이상의 면들이 인접한 비다양체적인 상황을 표현할 수 있도록 하였다. Choi<sup>(9)</sup>는 zone 과 disk라는 위상 요소를 추가로 도입하여, Weiler의 자료 구조에서 불완전하게 처리되었던 꼭지점에서의 이웃 관계를 명확히 나타내는 Vertex-Based B-rep을 제안하였다. Yamaguchi등<sup>(10)</sup>은 꼭지점, 모서리, 면 그리고 영역(region)의 기본적인 위상 요소들의 인접 관계를 나타내기 위해 6가지의 coupling entity들을 새로 도입하여, 이웃 관계에 바탕을 둔 비다양체 표현을 제시하였다. Rossignac과 O'Conner<sup>(11)</sup>은 서로 해체되어 있는 셀들의 유한 개의 집합으로 구성되어 있는 Selective Geometric Complex (SGC)를 제안하였다. 최근에는 이상헌<sup>(12)</sup>이 다양체 모델을 위한 Half-edge data structure를 비다양체 영역까지 확장시킨 곡면 표현을 중심으로한 비다양체 경계 표현 방식을 제시하였다. 이 자료 구조는 비다양체 모델에 대한 기존의 자료 구조에 비하여 이해하기 쉽고, 간결하며 계층 구조적인 것이 특징이다.

본 논문에서는 이상헌<sup>(12)</sup>의 자료 구조를 사용하여 비다양체 모델러를 개발하였다. 이 시스템에서 표현 가능한 물체는 3차원 유클리드 공간에 존재하는 0차원부터 3차원까지의 유클리드 포체 (Euclidean cell)들의 집합으로 이루어진 물체, 즉 유클리드 포복체 (Euclidean cell complex)로서, 이를 통하여 3차원 공간상의 비다양체 모델을 표현할 수가 있다. 여기서 사용된 위상 요소는 일반

적인 비다양체 모델러들에서 공통적으로 사용되는 꼭지점 (vertex), 모서리 (edge), 면 (face), 영역 (region), 루프 (loop)와 셸 (shell)을 그대로 사용하였으며, 그밖에 본 논문에서는 이들 기본적인 위상 요소들간의 인접 관계들을 나타내기 위하여 부분 면 (partial face), 부분 모서리 (partial edge) 그리고 부분 꼭지점 (partial vertex)의 3가지 독자적인 위상 요소들을 도입하였다.

부분 면, 부분 모서리 및 부분 꼭지점은 각각 면과 영역, 모서리와 면, 그리고 꼭지점과 모서리간의 인접 관계를 나타내는 데 사용된다. 즉, 부분면은 Fig.4(a)에 나타난 바와 같이 하나의 면을 둘로 쪼개서 만든 것으로서, 이로써 면에 인접한 2개의 영역에 대한 이웃 관계를 표현할 수 있으며, 부분 모서리는 Fig.4(b)에 나타난 바와 같이 하나의 모서리에 인접한 면의 개수만큼 쪼개어 모서리와 면과의 인접 관계를 표현한 것으로서, 이로써 임의의 개수의 면과 인접한 비다양체적 상황을 표현할 수 있도록 하였다. 부분 꼭지점은 Fig.4(c)에 나타난 바와 같이 꼭지점에 복수개의 곡면이나 와이어프레임 모서리가 인접해 있는 비다양체적인 상황을 지원하기 위해서 도입된 것으로서, 꼭지점에 인접한 곡면 혹은 와이어 모서리의 개수만큼 쪼개어 할당되고 있다.

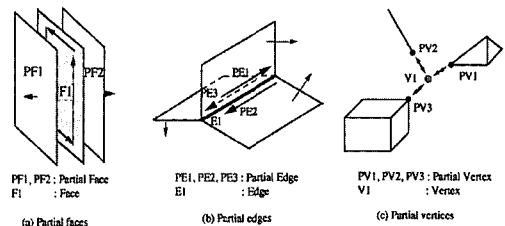


Fig. 4 Partial entities for non-manifold models

Fig.5는 본 시스템에서 사용한 위상 요소들간의 자료 구조로서 (a) 부분은 일반적인 경우를 나타내는 자료 구조이고, (b) (c) (d) 부분은 다음의 세가지 예외적인 경우를 나타내기 위해 도입한 자료 구조이다. 즉, (a)는 공간 상에 하나의 고립된 꼭지점만이 놓여 있어, 이 꼭지점만으로 셸을 형성하는 외꼭지점 셸(single vertex shell)인 경우, (b)는 모서리가 어떤 면과도 인접해 있지 않은 와이어 모서리 (wire edge)인 경우, (c)는 면 위의 하나의 고립된 꼭지점이 놓여 있어 이 꼭지점만으로 내부 루프를 형성하는 외꼭지점 루프 (single vertex loop)인 경우가 이에 해당된다.

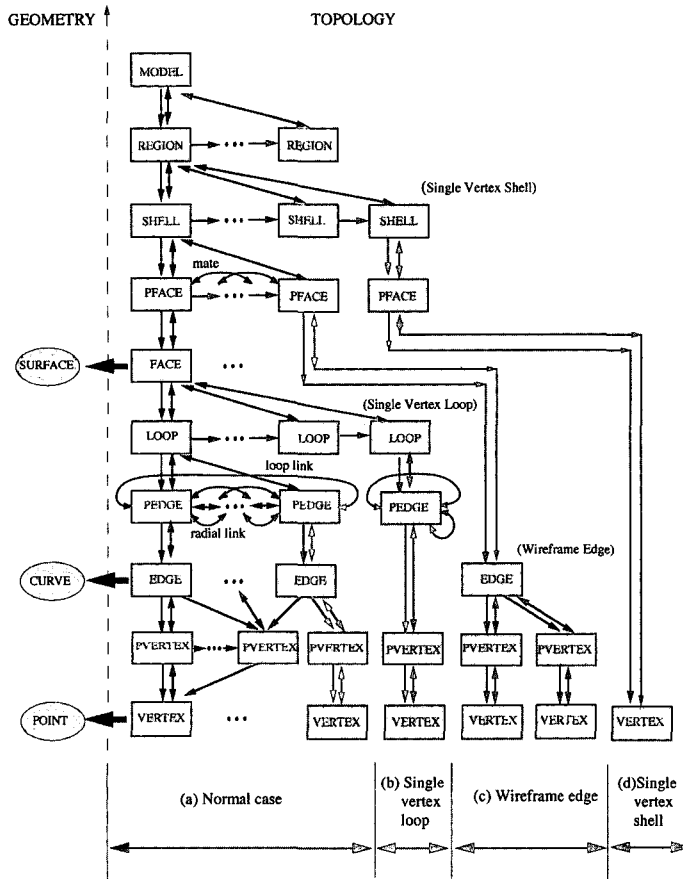


Fig. 5 Data structure for non-manifold models

### 3. 박판 모델의 생성 및 수정

본 시스템에서는 Stroud<sup>(5)</sup>나 Lee<sup>(6)</sup>의 시스템에서와 같이 박판 모델의 생성 및 수정을 위한 상위 모델링 기능들을 제공하며, 또한 가장 기본적인 위상 조작 기능인 비다양체를 위한 오일러 작업을 직접 사용할 수 있도록 되어 있다. 이를 위하여 오일러 작업을 사용자가 대화식으로 수행시킬 수 있는 사용자 인터페이스가 개발되어 있으며, 상위 박판 모델링 기능에서도 새로운 모서리를 입력시키기 위한 2차원 곡선 편집 기능이 사용자의 편의를 위해 제공된다. 그러면 이들 오일러 작업과 상위 박판 모델링 기능에 대하여 보다 상세히 설명하도록 하겠다.

#### 3.1 비다양체 모델을 위해 확장된 오일러 작업

오일러 작업은 오일러식을 만족시키면서 위상 요소들을 만들고 없애는 역할을 하는 하위 레벨의 모델링 작업으로

서, 이를 사용함으로써 모델이 항상 수학적으로 합당한 토폴로지를 갖도록 하며, 자료 구조의 특정성과 복잡성으로부터 상위 레벨의 작업들을 절연시킬 수 있다. 또한 각 오일러 작업들은 역작업이 존재하기 때문에 앞서 실행한 명령을 취소시키는 것이 용이하다.

본 시스템에서는 비다양체 모델에 대하여 이상현<sup>(12)</sup>이 제안한 총 20개의 오일러 작업과 2개의 기본적인 위상 작업을 사용하였으며, 이에 대한 리스트가 다음 Fig.6에 나타나 있다. 여기에 사용된 오일러 공식은 3차원 유클리드 공간내의 포복체(cell complex)에 대한 오일러 공식으로서 Yamaguchi등<sup>(10)</sup>이 사용한 식과 동일하다.

$$V - E + F - L = S - C + R \quad \text{-----(1)}$$

여기서 좌변의 V, E, F, L은 각각 꼭지점, 모서리, 면의 개수이며, 우변의 S는 안쪽 셀(void shell)의 개수, R은

무한대 영역을 제외한 나머지 영역의 개수를 뜻하며, C는 1차원 베타수(first Betti number)로서 곡면상에서 한 점으로 수축시킬 수 없는 원의 개수와 꼭지점과 모서리로 이루어진 그래프에서 면으로 변환되지 않은 독립적인 회로(cycle)의 개수를 나타낸다.

	Name	Description	V E F L S C R
Basic Euler Operators	MEV (KEV)	make (kill) edge, vertex	1 1 0 0 0 0 0
	MEC (KEC)	make (kill) edge, cycle	0 1 0 0 0 1 0
	MFKC (KFWC)	make (kill) face, kill cycle	0 0 1 0 0 -1 0
	MFR (KFR)	make (kill) face, region	0 0 1 0 0 0 1
	MVS (KVS)	make (kill) vertex, shell	1 0 0 0 1 0 0
MVL (KVL)	make (kill) vertex, loop	1 0 0 1 0 0 0	
Additional Euler Operators	SEMV (JENV)	split (join) edge, make (kill) vertex	1 1 0 0 0 0 0
	MEF (KEF)	make (kill) edge, face	0 1 0 0 1 0 0
	KEML (MEKL)	kill (make) edge, make (kill) loop	0 -1 0 1 0 0 0
	KEMS (MEKS)	kill (make) edge, make (kill) shell	0 -1 0 0 1 0 0
Additional Topological Operators	MMR (KMR)	make (kill) model, region	

Fig. 6 Generalized Euler operators for non-manifold models

이들 오일러 작업을 직접 사용하여 안쪽에 구멍을 가진 삼각형 박판 형상을 모델링하는 예가 Fig.7에 소개되어 있다. 이와 같이 사용자는 오일러 작업을 직접 대화식으로 수행시켜 어떠한 형상의 모델도 생성시킬 수 있다. 따라서 Lee<sup>(6)</sup>가 제시하였던 솔리드의 오일러 작업을 매크로화한 박판 오일러 작업들의 한계, 즉, 이것들만을 사용해서 원하는 박판 형상을 모델링할 수 없다는 단점을 알고 있으며, 비다양체 오일러 작업은 어떠한 박판 형상도 모델링할 수 있다.

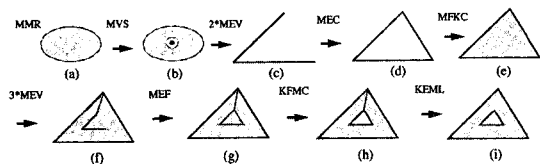


Fig. 7 Example of sheet modeling with the generalized Euler operators

### 3.2 박판 모델링 기능

오일러 작업을 사용하여 박판을 모델링할 경우 어떠한 형상도 만들어 낼 수 있다는 장점이 있으나, 오일러 작업은 하위 모델링 기능이기 때문에 실제 작업 효율은 대단히 낮다. 따라서 특정한 모델 유형에 대한 상위 모델링 작업을 개발하여 사용자에게 제공함으로써 작업의 효율을 높이도록 하였다. 본 시스템에서는 2차원 곡선 편집 기능(curve editor)을 포함한 대화식 그래픽 사용자 인터페이스를 갖춘 다음의 박판 모델링 기능들을 제공하고 있다.

- 초기 평면 박판을 생성시키는 기능
- 박판에 새로운 면을 첨가시키는 기능
- 박판에 구멍을 내는 펀칭(punching) 기능
- 박판의 특정한 모서리를 중심으로 박판을 접는 벤딩(bending) 기능
- 모서리를 스위핑(sweeping)시켜 면을 생성시키는 기능
- 박판의 일부를 눌러 내리는 드로잉(drawing) 기능
- 박판이 만나는 모서리에 라운딩(rounding)을 주는 기능

단, 본 시스템에서는 현재 자유 곡면은 아직 지원되고 있지 않기 때문에 지원 가능한 곡면의 종류는 평면, 2차 곡면(구, 원통, 원뿔) 및 토러스까지로 한정되어 있다. 그러면 본 시스템에서 제공되고 있는 상위 박판 모델링 기능들에 대하여 설명을 하도록 하겠다.

#### 3.2.1 초기 평면 박판 생성 기능

2차원 곡선 편집기에서 사용자가 대화식으로 폐곡선을 지정하고 편집기를 빠져 나오면, 박판 생성 함수에서는 편집기에서 만들어진 곡선들을 입력 변수로 받아 박판 모델을 오일러 작업을 사용하여 생성시킨다. 예를 들어 Fig.8(a)와 같은 직선들이 곡선 편집기에서 만들어져 주어진 경우, 박판 생성 기능에서는 Fig.8(b)와 같이 첫 곡선의 시작점에 MMR과 MVS를 사용하여 하나의 꼭지점으로 이루어진 모델을 먼저 생성시킨다. 다음 Fig.8(c)와 같이 n개의 곡선에 대하여 (n-1)회의 MEV와 1회의 MEC를 사용하여 와이어프레임 모델을 만든 다음, Fig.8(d)와 같이 MFKC를 사용하여 면을 채워 넣는다.

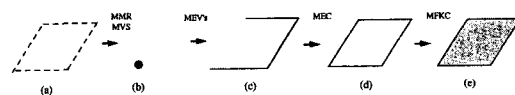


Fig. 8 Create a sheet model from outline curves

#### 3.2.2 새로운 면 첨가 기능

Fig.8(d)와 같은 박판 모델에 새로운 면을 붙이고자 할 경우 본 시스템이 제공하는 새로운 면 첨가 기능을 사용하면 된다. 이 경우 먼저 Fig.9(a)에서와 같이 면이 붙을 모서리를 사용자가 지정하고 2차원 곡선 편집기를 사용하여 새로운 면의 윤곽 곡선을 지정하면, 이 기능의 실행 함수에서는 편집기에서 만들어진 곡선들을 입력 변수로 받아 박판 모델에 새로운 면을 오일러 작업을 통해 생성시킨다. Fig.9(b)에서와 같이 MEV와 MEC를 사용하여

면의 윤곽 모서리를 생성시키고, 다음 Fig.9(c)와 같이 MFKC를 사용하여 새로운 면을 만든다.

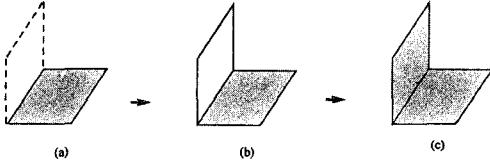


Fig. 9 Add a new face to a sheet model

### 3.2.3 펀칭 기능

박판 모델에 펀칭을 하여 구멍을 뚫는 기능은 불리안 작업을 사용하는 일반적인 방법과 하나의 평면상에 구멍을 내는 제한적인 경우로 나뉘어져 구현된다. 후자의 제한적인 경우는 Fig.10(a)와 같이 평면을 갖는 면 상에 2차원 곡선 편집기로 구멍의 윤곽선에 해당하는 곡선들을 입력하면, Fig.10(b)와 (c)에서처럼 MVL, MEV, 그리고 MEF를 사용하여 새로운 내부 면을 만든 다음, Fig.10(d)와 같이 KFMC를 사용하여 구멍을 만든다.

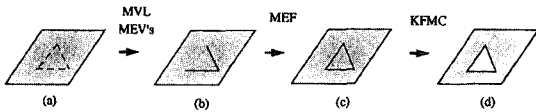


Fig. 10 Punch a laminar face with Euler operators

그러나 이 방법으로는 여러 면에 걸쳐 구멍을 내거나, 면이 평면이 아닌 곡면으로 이루어진 경우에 대해서는 적용이 곤란하다. 그러므로 이러한 일반적인 경우에도 펀칭이 가능하도록 불리안 작업을 사용한 일반적인 펀칭 기능을 구현하였다. 먼저 Fig.11(a)와 같이 사용자가 펀칭하고자 하는 면을 지정하고 2차원 곡선 편집기에서 구멍의 윤곽선에 해당하는 곡선을 입력시키면, 펀칭 기능 내부에서는 Fig.11(b)와 같이 윤곽선을 경계로 하는 박판 모델을 3.2.1의 초기 평면 박판 생성 기능을 사용하여 만든 후, Fig.11(c)와 같이 면에 대한 스위핑을 행하여 펀치에 해당하는 솔리드를 생성시킨다. 다음 Fig.11(d)와 같이 박판에서 솔리드를 빼는 불리안 작업을 행하여 구멍을 생성시킨다.

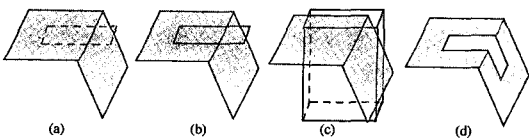


Fig. 11 Punch a sheet model using Boolean operation

### 3.2.4 벤딩 기능

벤딩 기능은 박판의 일부를 굽히기 위하여 개발된 기능으로서 사용자가 먼저 Fig.12(a)에서처럼 벤딩의 경계가 되는 직선 모서리를 지정하고 굽혀지는 쪽의 면과 굽힘 각도를 지정하면, 벤딩 기능 내부에서는 벤딩 모서리를 경계로 굽혀지는 쪽의 모든 면들을 찾아내서 Fig.12(b)와 같이 주어진 각도만큼 회전시킨다.

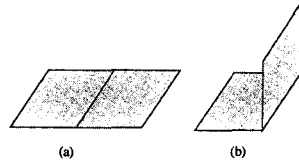


Fig. 12 Bend a sheet model

### 3.2.5 스위핑 기능

비다양체 모델러에서는 면, 모서리, 꼭지점에 대한 각각 스위핑이 가능하며, 스위핑한 결과는 자신보다 한 차원 높은 위상 요소의 생성을 가져온다. 즉, 면을 스위핑하면 새로운 영역이, 모서리를 스위핑하면 새로운 면이, 그리고 꼭지점을 스위핑하면 새로운 와이어 모서리가 생성된다. 본 시스템에서는 이 세 가지 경우에 대하여 스위핑 기능이 모두 구현되어 있으며, 그 가운데 새로운 박판 면을 생성시키는 모서리의 스위핑에 대하여 설명하도록 하겠다.

먼저 사용자가 스위핑시키고자 하는 모서리들을 지정하고 스위핑 경로를 입력시키면, 스위핑 기능 내부에서는 오일러 조작과 곡면 모델링 기능을 호출하여 박판 면들을 생성시킨다. 즉, Fig.13(a)에서와 같은 모델에서 3개의 모서리를 직선 경로를 따라 스위핑시키도록 명령을 내리면, 스위핑 기능 내부에서는 먼저 Fig.13(b)와 같이 오일러 작업의 MEV를 사용하여 모서리의 각 끝 꼭지점에 주어진 경로를 따라 와이어 모서리를 생성시킨다. 다음 Fig.13(c)와 같이 MEC를 사용하여 대상 모서리를 경로 끝까지 이동시킨 와이어 모서리들을 생성하고, Fig.13(d)와 같이 MFKC를 사용하여 면을 만든다. 이때 면의 기하학적인 데이터는 스위핑된 곡면으로 채워진다.

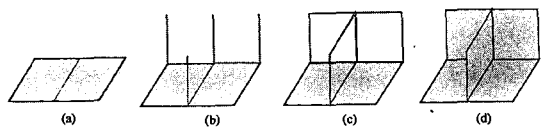


Fig. 13 Create laminar faces by sweeping edges



### 3.2.6 드로잉 기능

프레스 가공중에 드로잉 작업과 유사한 드로잉 기능을 박판 모델러에서 제공하고 있다. 여기서는 먼저 사용자가 Fig.14(a)와 같이 드로잉시킬 면으로 지정하고 깊이를 입력시키면, 시스템 내부에서는 Fig.14(b)와 같이 지정된 면의 경계에 해당하는 모서리들에 대하여 모서리 스윙핑 작업을 한다. 단, 이때 스윙핑되는 모서리는 두 개 이상의 면과 인접하고 있는 것으로 국한시킨다. 다음 Fig.14(c)와 같이 지정된 면과 동일한 형상의 면을 스윙핑 경로의 끝에 생성시키고, Fig.14(d)에서와 같이 원래의 지정된 면은 소거한다.

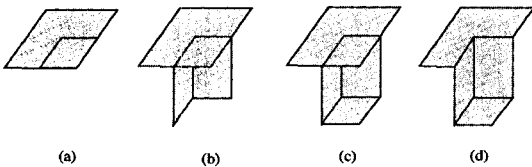


Fig. 14 Draw faces

### 3.2.7 라운딩 기능

모서리에 대한 라운딩 기능도 박판 모델러에서 제공되고 있으나 현재는 2개의 평면이 하나의 직선 모서리에서 만나는 경우로 제한되어 있으며 일반적인 라운딩 기능의 구현은 추후 계속 해야 될 작업으로 남겨져 있다. Fig.15(a)에서와 같은 박판 모델에 대하여 라운딩시킬 모서리와 반경을 입력하면, 라운딩 기능 내부에서는 먼저 Fig.15(b)와 같이 한쪽 면상에 라운딩 면의 경계에 해당하는 위치를 계산하여 오일러 작업을 사용하여 라운딩 면을 생성시킨다. 다음 Fig.15(c)와 같이 원래 모서리의 꼭지점을 라운딩되었을 때의 위치로 이동시키고, 마지막으로 Fig.15(d)와 같이 라운딩 면의 곡면과 그 면의 경계 모서리의 곡선을 라운딩 되었을 때의 형상으로 치환시킨다.

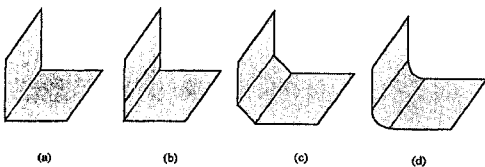


Fig. 15 Rounding function for sheet models

## 4. 박판에서 솔리드로의 변환

### 4.1 오프셋의 정의

박판 모델을 솔리드로 변환시키는 과정은 수학적 측면에서 볼 때, 주어진 박판 모델을 한쪽 또는 양쪽 방향으로 오프셋 시키는 과정으로 해석할 수 있으며, 이 때에는 볼록한 모서리에 대한 오프셋은 어떻게 할 것인가와 두께 면은 어떻게 처리할 것인가의 2가지 사항을 결정해야 한다.

#### 4.1.1 볼록한 모서리에 대한 오프셋의 처리 방식

오프셋될 모델의 볼록한 모서리 부근에서는 인접한 면들의 오프셋 사이에 틈이 발생한다. 이 틈을 보정해 주는 방법으로는 Fig.16에 나타난 3가지 방법이 흔히 쓰인다<sup>(13)</sup>. 첫번째는 Fig.16(a)와 같이 인접한 오프셋 면들을 연장해서 그것들의 교선을 구해 모서리를 넣는 방법이고, 두번째는 Fig.16(b)와 같이 원래의 모델에서 오프셋 모델까지 항상 일정한 거리를 유지할 수 있도록 라운딩 된 곡면을 채워 넣는 법, 마지막은 Fig.16(c)와 같이 틈을 선형적인 기하학적 요소를 갖는 면으로 채워 넣는 법이 있다.

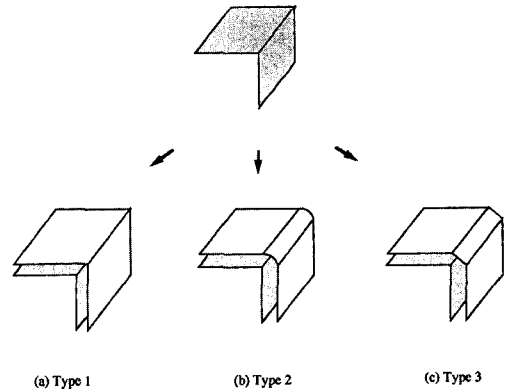


Fig. 16 Three possible different interpretations of offsetting function

오프셋 알고리즘에 어떤 방식을 채택할 것인가 하는 것은 응용 분야에 따라 결정해야 할 문제로서 어떤 한 방식이 가장 좋다고는 말할 수 없다. Stroud<sup>(6)</sup>, Lee<sup>(6)</sup>과 Lim<sup>(7)</sup>은 첫번째 방법을 사용하였고, 솔리드 모델러에서 오프셋 기능을 구현한 Rossignac<sup>(1)</sup>, Farouki<sup>(3)</sup>, Satoh<sup>(4)</sup>등의 연구들에서는 두번째 방법을 사용하였다. 본 시스템에서는 대상이 사출품이며 이 사출품은 대부분 일정한 두께를 유지하도록 설계되며, 수지의 흐름을 원활히 하고 냉각이 균일하게 되도록 하기위해 모서리 부분을 둥글게 만들기 때문에, 두번째 방법을 채택하였다.

4.1.2 두께면에 대한 처리 방식

다음 두께면에 대한 처리 방식에 대해서 살펴 보도록 하자. 오프셋에 대한 수학적 정의는 원래의 모델로부터 일정한 거리에 놓인 점들의 집합을 구하는 것을 의미하기 때문에, 박판 모델의 경계 모서리에 대해서는 원호를 그 모서리를 따라 스윙핑 시킨 곡면으로 두께면을 만들어 주면 된다. 이러한 방식을 택하면 어떠한 박판 모델에 대한 오프셋도 예외없이 하나의 일관된 알고리즘으로 처리 될 수 있다. 그러나 실제의 부품 모델에서는 그러한 튜브 형상의 곡면을 두께면으로 한 형상을 찾아 보기 어렵고, 또한 박판의 양쪽 방향이 아니라 한쪽에서만 오프셋을 시키는 경우가 대부분이기 때문에 양 방향 오프셋에서만 사용되는 이 방법은 적합치 않다. 따라서 플라스틱 사출품의 모델링을 대상으로 한 본 시스템에서는 다소 복잡한 처리 방법이 뒤따르더라도 두께면을 직선이 경계 모서리의 경로를 따라 스윙핑 한 곡면으로 대체하는 방식을 채택하도록 하였다.

4.2 박판의 오프셋 과정

박판에서 솔리드로 변환시킬 때, 박판을 최종 솔리드의 중심면으로 생각하는 경우에는 박판을 중심으로 양 방향으로 오프셋을 진행시키고, 박판을 솔리드의 외측 혹은 내측 벽으로 생각할 때에는 한쪽 방향으로의 오프셋을 수행한다. 그런데 양쪽 방향으로의 오프셋은 한쪽 방향으로의 오프셋을 박판 양쪽에 대해 반복하여 적용시키면 되므로 여기서는 한쪽 방향으로의 오프셋 과정만을 설명하도록 하겠다. 그 과정은 크게 다음의 다섯 단계로 구성된다.

- I. 박판 모델 A에서 오프셋 작업에 필요한 정보를 추출해 내서 저장시킨다.
  - II. 각 면, 모서리, 꼭지점에 대한 오프셋 박판 모델들을 만든다.
  - III. 오프셋 박판 모델간의 불리안 합집합을 수행하여 하나의 모델 B로 합친다.
  - IV. 원래 박판 모델 A로부터 오프셋 거리보다 더 가까이 놓여 있는 모델 B의 면들을 찾아 삭제한다.
  - V. 두께면들을 만들어 원래 박판 모델 A와 오프셋 박판 모델 B을 하나의 솔리드 모델로 만든다.
- 그러면 각 단계에 대해서 보다 상세히 설명하도록 하겠다.

4.2.1 오프셋 작업에 필요한 정보의 추출

본 시스템의 비다양체 자료 구조에서는 하나의 면은 양쪽에 두 개의 부분면이 부착되어 있다. 박판에서 솔리드

로 변환시킬 때 장차 두께면이 되는 경계 모서리를 두께 모서리라 하면, 일반적으로 하나의 박판 모델을 둘러싼 부분면들은 이 두께 모서리를 경계로 크게 안팎의 두개 그룹으로 나눌 수 있다. 한쪽 방향으로 오프셋을 시킨다는 것은 결국 이 한 그룹의 부분면들을 각각의 법선 방향으로 오프셋을 시킨다는 것을 뜻한다.

이 단계에서는 먼저 오프셋시키고자 하는 부분면 그룹에 대하여 모든 wedge와 disk를 찾아내서 그것들의 요철성 (convexity)들을 조사하여 분류해 두며, 또한 장차 두께면이 될 두께 모서리 및 그것들의 양 끝단을 이루는 꼭지점들을 찾아 저장해 둔다. 여기서 wedge란 하나의 모서리와 그것에 인접해 있는 2개의 부분면으로 이루어진 자료 구조이며, disk란 하나의 꼭지점과 인접한 한 사이클의 부분 면들의 정렬된 집합을 뜻한다. 여기서 분류되는 wedge의 유형은 convex, concave, smooth로서 smooth란 G1 연속성을 만족하는 경우를 뜻한다. 또한 disk는 convex, non-convex로 나뉘는데, 여기서 convex disk란 인접한 wedge들이 모두 convex인 경우이며, 그렇지 않은 wedge를 가지고 있는 경우에는 non-convex disk로 분류된다.

4.2.2. 오프셋 박판 모델의 생성

오프셋 대상으로 지정된 부분면들과 그 부분면상의 convex wedge 및 convex disk들의 세가지 요소들로부터 먼저 후보 오프셋 면들을 생성시킨다. 이들 오프셋 면들은 최종 솔리드의 내측 혹은 외측 면을 구성하는 데 충분한 후보 면들이 된다. Fig.17(a)에서와 같은 박판 모델을 바깥 방향으로 오프셋시킬 경우, 먼저 Fig.17(b)와 같이 바깥쪽 부분면들 각각에 대한 오프셋 박판 모델을

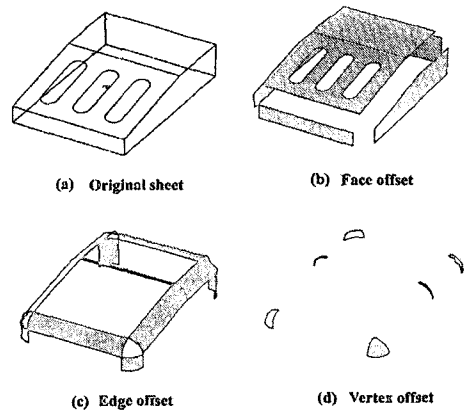


Fig. 17 Tentative offset sheets from an original sheet

만들어 낸다. 다음 Fig.17(c)에 나타난 것과 같이 convex wedge에 속한 모서리를 오프셋시켜 박판 모델들을 만들어 낸다. 이때 모델의 형상은 원호 단면을 모서리를 따라 스윙핑 시켜서 얻은 곡면이 된다. 마지막으로 Fig.17(d)에서와 같이 convex disk에 속한 꼭지점의 오프셋 박판 모델을 생성시킨다. 여기서 오프셋된 면은 꼭지점을 중심으로 한 구형의 곡면을 갖고 그 경계 모서리들은 원호로 이루어져 있다.

#### 4.2.3 오프셋 박판 모델들의 불리안 합집합

앞의 4.2.2에서 만들어진 오프셋 된 박판들을 비다양체 모델에 대한 불리안 작업을 통하여 합한다. 비다양체 모델들간의 불리안 작업에 관한 연구들은 Crocker<sup>(14)</sup>, Gursoz<sup>(15)</sup>, Masuda<sup>(16)</sup> 등에 의해 행해졌으며, 이들은 공통적으로 "병합과 선택 (Merge & Selection)"의 개념을 사용하고 있다. 병합과 선택 방법은 먼저 1차 병합 단계에서는 비다양체의 기본 입체들이 모두 모여서 이루어진 병합체 (merged set) 라는 모델을 생성시키며, 다음 2차 선택 과정에서는 주어진 불리안 작업의 CSG트리에 따라 병합체의 위상 요소들중 보여져야 할 요소들만을 추출함으로써 최종 물체의 형상을 보여 준다.

그러나 후보 오프셋 박판 모델을 하나로 합치는 과정에서는 굳이 병합과 선택 알고리즘에 따른 불리안 작업이 필요없으며, 솔리드 모델러에 사용되는 불리안 작업과 마찬가지로 단지 두 모델이 합하여진 최종 모델만 생성시킬 수 있으면 된다. 따라서 여기에서의 불리안 합집합은 다음의 3단계로 구성되어 있다.

- I. 두 모델 A와 B간의 교점, 교선 및 겹친 면 구한다
- II. 교점, 교선을 모델 A와 모델 B에 새로운 위상 요소로 생성시킨다.
- III. B의 모든 위상 요소들을 복사하여 A쪽에 대응 요소를 생성시킨다.

각 단계에 대하여 보다 상세히 설명을 하면 다음과 같다

#### (1) 두 모델 A와 B간의 교점, 교선 및 겹친 면 구하기

이는 불리안 작업의 첫단계로서 두 모델의 모든 면과 와이어 모서리 및 고립된 꼭지점들에 대한 교차 계산을 수행하여 교차점, 교차선 및 겹친 면과 이들이 각각 어떤 요소들간의 교차로 생겨났는가 하는 정보를 얻어낸다.

#### (2) 교점 및 교선에 대하여 모델 A, B에 새로운 위상

#### 요소 만들기

언어진 교점과 교선은 모델 A와 B의 어느 요소의 교차에 의한 것인지 알고 있으므로 이를 각각 양쪽의 꼭지점과 모서리로 생성시킨다. 이를 위해서는 우선 모든 교점을 꼭지점으로 생성시킨 후 교선의 양끝점을 꼭지점으로 생성시키고, 마지막으로 교선을 모서리로 생성시키는 순서를 밟는다. 이때에 적절한 오일러 작업을 적용시키게 되는데 사용되는 작업은 교점, 교선의 위치 관계에 따라 MVL, MEV, SEMV, MEKL, MEF 가운데 하나가 된다. 한편 이 단계에서 생성된 위상 요소들은 A의 어느 요소와 B의 어느 요소가 서로 대응하는 지 그 대응 관계 (partnership)를 저장해 둔다. 이때 겹친 면은 따로 위상 요소로 생성시킬 필요는 없으므로 겹친 면 쌍을 대응 관계 자료에 추가시키기만 하면 된다. 이 대응 관계는 교점 및 교선들로부터 위상 요소를 생성시 같은 위치의 꼭지점 또는 모서리가 중복되어 생성되는 것을 방지하는데 사용되며, 후에 모델 A쪽에 B쪽의 모서리 또는 면을 복사 생성시킬 때 그 경계가 되는 꼭지점 또는 모서리들을 알아 내기 위한 자료로 사용된다.

#### (3) 모델 B의 모든 위상 요소를 A쪽으로 복사

모델 A쪽에 대응하는 요소가 없는 B의 위상 요소들을 찾아 동일한 형상을 갖는 위상 요소들 A쪽에 새로이 만들어 나간다. 이때 작업은 낮은 차원인 꼭지점부터 시작하여, 모서리, 면의 순서로 하게 되는데, 이는 만들려는 요소의 경계 요소들을 미리 생성시켜 놓음으로써 적용 오일러 연산의 경우의 수를 줄일 수 있기 때문이다. 한편 모서리 또는 면을 생성시킬 때 그 경계가 되는 꼭지점 또는 모서리들을 알아야 하는데 이는 꼭지점 및 모서리의 대응 관계 자료를 참조하면 된다. 면을 만들 때는 영역 (region) 또는 볼륨이 만들어지거나 분할될 수 있다.

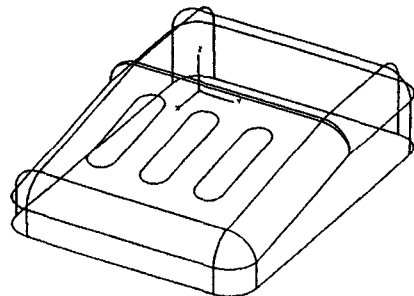


Fig. 18 Union of offset sheets

이러한 과정을 거쳐 Fig.17의 (b), (c), 그리고 (d)의 오프셋 박판 모델들을 불리안 합집합을 수행한 결과가 Fig.18에 나타나 있다.

#### 4.2.4 불필요한 면들의 소거

앞의 4.2.3에서 불리안 작업의 결과로 하나가 된 박판 모델의 면들 가운데는 원래 모델로부터 오프셋 거리보다 더 가까운 것이 있을 수 있다. 이러한 면은 최종적인 솔리드를 구성할 때 불필요한 면들로서 이들을 오일러 작업을 사용하여 삭제하여야 한다. 이를 위하여 먼저 없어져야 할 면과 모서리, 꼭지점들을 찾아내서 저장시킨다. 다음 없어져야 할 면들을 KFMC를 행하여 없앤 후, 없어져야 할 모서리들을 KEC, KEV, 및 KEMS를 적절히 사용하여 없앤다. 모서리를 없앨 때 삭제될 꼭지점들 가운데 일부가 KEV에 의해서 삭제될 수 있다. Fig.19의 예에서는 L자형 박판 모델을 안쪽으로 오프셋시켰을 때 오목한 부분 근처에서 오프셋 거리보다 가까운 면 F1과 F2가 존재하며, 이들 면의 경계 요소에 속하는 모서리와 꼭지점 중 없어질 면에만 인접한 것들도 이 두 면과 함께 위의 알고리즘에 따라 소거된다.

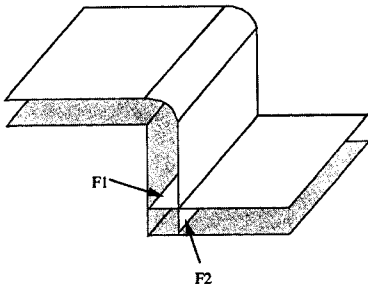


Fig. 19 Topological entities being too close to the original sheet

#### 4.2.5 두께면의 생성

앞의 4.2.4 단계까지 마치면 이미 원래의 박판에서 한쪽 방향으로 오프셋 된 박판의 형성이 끝난 상태가 된다. 이 두개의 박판이 합쳐져 솔리드의 안쪽 및 바깥쪽의 측벽을 형성하도록 하기 위해서 이 두 박판이 이어지는 곳에 두께 면들을 만들어 넣는다. 이 두께면을 만들어 넣는 과정은 다음의 4단계로 이루어진다.

- I. 원래 박판 모델에 오프셋 박판 모델을 합하여 넣는다.
- II. 원래 박판의 두께 모서리의 꼭지점들과 짝이 되는 오

프셋 박판상의 꼭지점들을 찾아 두 꼭지점을 오일러 작업을 사용하여 연결시킨다.

- III. 두께면이 만들어질 곳에 해당하는 모서리의 회로 (cycle)을 찾아서, 그 회로에 두께 면을 만들어 나간다.
- IV. 불필요한 모서리를 제거하여 모델을 간소화한다.

이 각 단계에 대하여 보다 상세히 설명하면 다음과 같다.

(1) 박판 모델과 오프셋 박판 모델을 하나의 모델로 만들면 먼저 원래의 박판 모델에 오프셋 박판 모델을 불리안 합집합을 사용하여 집어 넣어 두 모델을 하나로 합친다. 이와 같이 하나의 모델로 만드는 것은 오일러 작업이 하나의 모델내에서만 적용 가능하기 때문이며, 이 이후에는 오일러 작업을 사용하여 두께면을 만드는 것이 가능해진다.

#### (2) 두께 모서리 꼭지점의 짝 찾기

원래 박판의 두께 모서리의 꼭지점들과 짝이 되는 오프셋 박판상의 꼭지점들을 찾아내 두 꼭지점을 오일러 작업을 사용하여 연결시킨다. 짝이 되는 꼭지점을 Fig.20(a)의 예를 들어 설명하면 V1과 같이 두께 모서리의 꼭지점이 convex한 곳에 있으면 V4와 V5와 같이 그 wedge의 두 부분면의 법선 방향으로 두 개의 짝이 되는 꼭지점이 존재하고, V2와 같이 꼭지점이 concave한 곳에 있는 경우는 V6와 같이 오프셋 곡선간의 교점과 일치하는 위치에 있는 꼭지점이 짝이 되며, 끝으로 V3와 같이 박판의 가장자리에 있거나 또는 smooth한 곳에 있는 경우는 V7과 같이 인접한 부분면의 법선 방향으로 오프셋 거리만큼 떨어진 지점의 꼭지점을 짝으로 인정한다. 일단 짝이 되는 꼭지점을 찾으면 이들 둘 사이를 오일러 작업을 사용하여 연결시킨다. 맨 처음에 사용되는 오일러 작업은 MEKS이고, 그 다음부터는 MEC가 계속 사용된다.

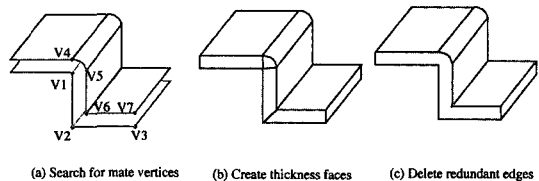


Fig. 20 Creating thickness faces

(3) 두께면 만들기

두께면이 만들어질 곳에 해당하는 모서리의 회로 (cycle)를 찾아 낸다. 이 회로는 박판 가장자리의 각 두께 모서리에 대하여 하나씩 존재하며, 또한 Fig.20(a)의 V1과 같이 convex wedge와 인접해 있는 두께 모서리상의 꼭지점에 대해서도 하나씩의 회로가 존재한다. Fig.20(b)에 나타난 것처럼 각 회로에 두께면을 만들어 매꿔나간다. 두께면을 만들 때의 오일러 작업은 MFKC를 계속 수행하다 맨 마지막에는 MFR을 수행하여 하나의 닫혀진 영역을 만들어 내며 이로서 새로운 솔리드가 만들어진다.

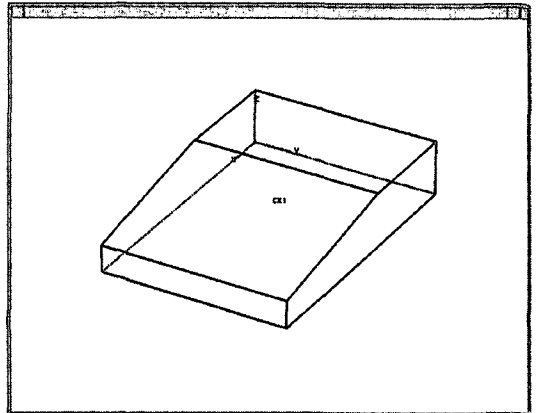


Fig. 22 Sweep sheet model and delete bottom face

(4) 불필요한 모서리의 제거

두께면에 해당하는 면들 가운데서 서로 동일한 기하학적인 곡면을 가지고 있어 하나의 면으로 합칠 수 있는 경우에 이를 하나로 합쳐 모델을 보다 간결하게 한다. 이때 사용되는 오일러 작업은 KEF이다. Fig.20(b)의 솔리드 모델에서 불필요한 모서리를 없애면 Fig.20(c)와 같이 된다.

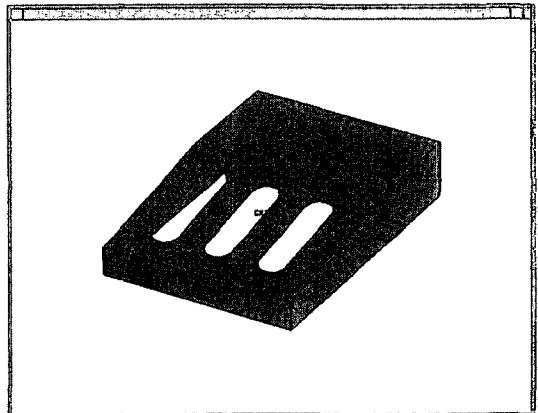


Fig. 23 Create three button holes of mouse with punch function

5. 적용 예

본 논문에서 개발한 시스템을 컴퓨터의 그래픽 입력 장치로 널리 쓰이는 마우스의 모델링에 적용시켜 보았다. Fig.21은 본 시스템의 2차원 도면 작성 기능을 이용하여 마우스의 측면의 윤곽선을 그려서 평면상의 박판 모델을 생성시킨 것이며, Fig.22는 앞의 박판 모델을 스위핑 (sweeping) 시켜서 일단 솔리드 모델을 얻은 다음, 밀면

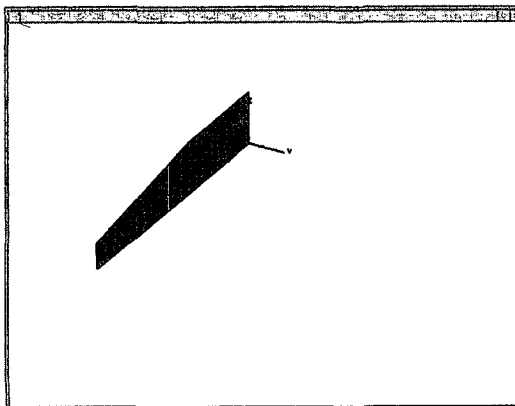


Fig. 21 Create sheet model from outline curves drawn with 2-D drafting system

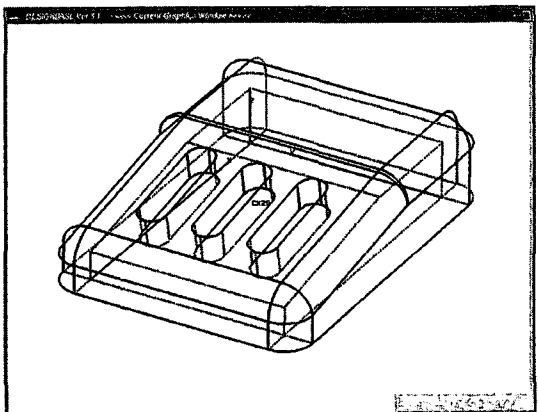


Fig. 24 Offset sheet model to create solid

을 KFR의 오일러 작업을 사용하여 없앴으로써 마우스의 내측벽에 대한 박판 모델을 생성시킨 결과이다. Fig.23에서는 박판 모델러의 편칭 기능을 사용하여 3개의 버튼 구멍을 뚫은 모습이다. Fig.24는 앞의 박판 모델을 두께 만큼 밖으로 오프셋시켜 솔리드를 생성시킨 결과이다.

## 6. 결 론

지금까지 얇은 두께의 솔리드를 쉽게 모델링하기 위한 연구는 모두 솔리드 모델을 위한 자료 구조를 바탕으로 한 것들이었다. 특히 솔리드 모델의 자료 구조를 박판 형상에까지 확장 적용시키고 이로부터 오프셋된 솔리드를 얻는 방식은 여러 가지 문제점을 안고 있다. 즉, 박판 형상을 표현하는데 솔리드 자료 구조는 부적합하며, 박판 모델링을 위한 충분하면서 편리한 하위 레벨 위상 작업들이 불충분하며, 그리고 솔리드로의 변환 과정이 복잡하다.

지금까지의 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 비다양체 모델러를 사용한 방법을 제시하였다. 그럼으로써 솔리드뿐만 아니라 비다양체 형상 모델인 박판 모델을 하나의 모델링 환경에서 자연스럽게 표현할 수 있게 되었으며, 모델링 과정에서 나타나는 모든 비다양체적인 형상들도 표현이 가능하게 되었다. 또한 박판 모델링을 위하여 비다양체까지 확장된 오일러 작업들을 제공하고 있으며, 보다 사용자가 편리하게 사용할 수 있는 고급 박판 모델링 기능도 제공하고 있다. 나아가 박판으로부터 일정한 두께를 가진 솔리드 형상을 자동으로 생성시키는 오프셋 기능도 개발하였다. 그러나 현재의 시스템에서는 자유 곡면을 지원하지 못하고 있으며, 또한 두께면 생성 시 두께면을 오프셋의 수학적 정의에 따르지 않고 실제 부품의 형상에 맞도록 직선을 두께 모서리를 따라 스윙평한 면으로 처리함에 따라 Lee(6)와 Lim(7)이 지적한 위상 변화의 필요가 발생할 수 있다. 향후 이러한 경우에 대한 처리를 보완해야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

1. Rossignac, J.R. and Requicha, A.A.E., "Offsetting Operations in Solid Modelling", Computer Aided Geometric Design, Vol.3, pp 129-148, 1986.
2. Lee, S.H. and Lee, K., "An Integrated CAD

- System for Mold Design in Injection Molding Process", Production Engineering Division, The Winter Annual Meeting of ASME, PDE-Vol.32, pp.257-271, Chicago, 1988.
3. Farouki, R.T., "Exact Offset Procedures for Simple Solids", Computer Aided Geometric Design, Vol.2, pp 257-279, 1985.
4. Satoh, T. and Chiyokura, H., "Boolean Operations on Sets Using Surface Data", ACM SIGGRAPH: Symposium on Solid Modeling Foundations and CAD/CAM Applications, Austin, Texas, pp.119 - 127, June 5-7, 1991.
5. Stroud, I., "Modeling with Degenerate Objects", Computer Aided Design, Vol.22, No.6, pp 344-351, 1990.
6. Lee, K. and Kwon, B.W., "Efficient Modeling Method of Sheet Objects", Proc. ASME Computers in Engineering Conference, San Francisco, CA, Vol.1, pp.437 - 446, August 2-6, 1992.
7. Lim, H.S. and Lee, K., "Efficient Solid Modeling via Sheet Modeling", Computer Aided Design, Vol. 27, No. 4, pp. 255-262, 1995.
8. Weiler, K., "Topological Structures for Geometric Modeling", Ph.D. Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, August 1986.
9. Choi, Y., "Vertex-based Boundary Representation of Non-manifold Geometric Models", Ph.D. Thesis, Carnegie Mellon Univ., August 1989.
10. Yamaguchi, Y. and Kimura, F., "Nonmanifold Topology Based on Coupling Entities", IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.15, No.1, pp.42-50, Jan. 1995.
11. Rossignac, J. and O'Conner, M.A., "SGC: A Dimensional-independent Model for Pointsets with Internal Structures and Incomplete Boundaries", Geometric Modeling for Product Engineering, North-Holland, pp.145-180, 1990.

12. 이상현, 이진우, "비다양체 형상 모델링을 위한 간결한 경계 표현 및 확장된 오일러 작업자", 한국 CAD/CAM 학회 논문집, Vol.1, No.1, pp.1-19, March 1996.
13. Saeed, S.E.O., Pennington, A.de and Dodsworth, J.R., "Offsetting in Geometric Modelling", Computer Aided Design, Vol.20, No.2, 1988.
14. Crocker, G.A. and Reinke, W.F., "An Editable Nonmanifold Boundary Representation", IEEE Computer Graphics & Applications, Vol.11, No.2, pp.39-51, March 1991.
15. Gursoz, E.L., Choi, Y. and Prinz, F.B., "Boolean Set Operations on Non-manifold Boundary Representation Objects", Computer Aided Design, Vol.23, No.1, 1991.
16. Masuda, H., "Form-Feature Representation based on Non-manifold Geometric Modeling", Proceedings of MICAD '92, 1992.