

얇은 두께 솔리드의 효율적인 모델링을 위한 박판 오프셋 알고리즘 개발

김현수*, 이상현**

Sheet Offsetting Algorithms for Efficient Solid Modeling for Thin-Walled Parts

Kim, H. S.* and Lee, S. H.**

ABSTRACT

This paper describes an efficient solid modeling method for thin-walled plastic or sheet metal parts, based on the non-manifold offsetting operations. Since the previous methods for modeling and converting a sheet into a solid have adopted the boundary representations for solid object as their topological framework, it is difficult to represent the exact adjacency relationship between topological entities of a sheet model and a mixture of wireframe and sheet models that can appear in the meantime of modeling procedure, and it is hard to implement topological operations for sheet modeling and transformation of a sheet into a solid. To solve these problems, we introduce a non-manifold B-rep and propose a sheet conversion method based on a non-manifold offset algorithm. Because the non-manifold offset algorithm based on mathematical definitions results in an offset solid with tubular and spherical thickness-faces, we modify it to generate the ruled or planar thickness-faces that are mostly shown in actual plastic or sheet metal parts. In addition, in order to accelerate the Boolean operations used the offset algorithm, we also develop an efficient face-face intersection algorithm using topological adjacency information.

Key words : CAD, Non-manifold, Sheet Model, Offset, Euler Operator, Boolean Operation

1. 서 론

1.1 관련 연구

사출 성형에 의한 플라스틱 부품들과 프레스 가공에 의한 판금 부품들은 오래전부터 모든 산업 분야에 광범위하게 사용되어 왔다. 최근 기계 설계에 솔리드 모델러를 바탕으로 한 3차원 CAD 시스템의 사용이 확산되어 갑에 따라 이와 같이 얇고 균일한 두께를 갖는 솔리드 형상을 효율적으로 모델링 할 수 있는 기능이 필요해지게 되었다^[4,7,10,11]. 이에 따라 개발된 대표적인 모델링 기능으로서 셸링(shelling)에 의한 방법^[2]과 박판 모델의 솔리드로의 변환 방법^[4,7,10,11]이 제안되어 왔다.

셸링에 의한 방법은 Fig. 1(a)에 나타난 것과 같이 주어진 솔리드 모델로부터 주어진 두께의 물체를 생성해내는 방법을 뜻하는 것으로서, Forsyth^[2]는 솔리드 모델에 대한 오프셋 알고리즘을 제시한 후, 이를 원용한 솔리드 모델의 셸링(shelling) 알고리즘을 제시하였다. 여기에서는 사용자가 먼저 부품의 외곽 또는 내곽 형상에 대한 솔리드 모델을 먼저 모델링하고 각 면들에 대한 두께를 지정해 주면, 시스템은 그 모델을 또 하나 복사하여 주어진 두께만큼 각 면을 오프셋시킨 후 원래의 모델로부터 이를 불리안(Boolean) 차집합(subtraction or difference) 연산으로 빼내어 최종 형상을 완성시킨다. 각 면에 대한 지정 두께의 크기에 따라 최종 형상은 일반적으로 Fig. 1(a)에 나타난 것과 같이 일부 면이 열린 얇은 두께의 바가지와 같은 형상이 된다. 이러한 셸링 방법은 플라스틱 사출품과 같이 내,외측 벽이 있는 오목한 형상에는

*학생회원, 국민대학교 기계설계학과 대학원

**종신회원, 국민대학교 기계·자동차공학부

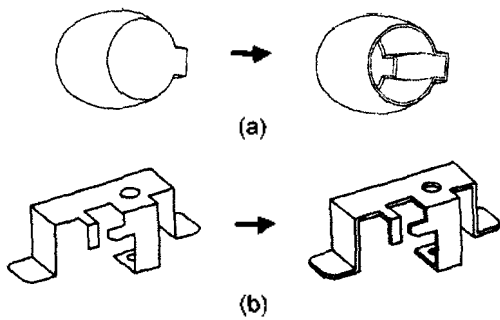


Fig. 1. Thin-walled solid modeling methods (a) shelling operation (b) conversion of a sheet into a solid⁴⁾.

적합하나, Fig. 1(b)에서와 같이 평판을 굽혀서 만들어진 프레스물과 같은 부품에 대해서는 적합하지 않다.

셸링 작업의 대안으로서 Fig. 1(b)에 나타난 것과 같은 박판 형상의 솔리드로의 변환 방법이 있다. 이 방법은 대상 물체를 먼저 두께가 없는 박판 형상으로 모델링한 다음, 이를 음셋시켜 체적을 갖는 솔리드 형상으로 변환시키는 방법으로서 Stroud⁶⁾, 권병욱과 이진우⁷⁾, Lim과 Lee⁴⁾, 이상현과 이진우¹¹⁾ 등이 이에 대한 각자의 방법을 제시하였다.

먼저, Stroud⁶⁾는 최종 솔리드 모델뿐만 아니라 박판 모델도 솔리드의 경계 표현 방식의 자료 구조를 사용하여 나타내는 방법을 제안하였다. 박판에서 솔리드로의 변환 과정은 먼저 박판의 바깥쪽 경계 모서리인 날모서리(sharp edge)를 쪼개서 두께면에 대한 위상 요소들을 만든 다음, 그 위상 요소들의 기하학적인 정보를 계산하여 치환시키는 방법을 사용하였다. 그러나 이 방법은 변환중에 자기 간섭(self-intersection)이 발생하는 경우나 두께면에서 추가적으로 위상 변화가 필요한 경우 이를 적절히 보정해 주지 못하는 단점이 있다. 한편, Lim과 Lee⁴⁾는 박판 모델을 두께를 갖는 솔리드 모델과 동일한 위상 정보를 가지도록 하고, 그럼으로써 박판 모델의 솔리드로의 변환 과정은 단지 기하학적인 정보의 대치만으로 이루어 질 수 있도록 하였으며, 만일 변환 과정에서 두께면에서의 위상의 변화가 필요한 경우 이에 대한 처리 방법을 제시하였다. 그러나 이들과 같이 솔리드의 경계 표현을 박판에까지 확장 적용시키고 박판 모델로부터 음셋된 솔리드를 얻는 방식에는 많은 문제점이 있다. 먼저 비다양체 물체인 박판을 다양체 자료 구조로 표현함으로써 위상 요소들간의 인접 관계에 대한 적절한 정보를 가지고 있지 않고, 이로 말미암아 박판 모델링 기능의 개발에 어려움이 많게

되고, 솔리드로의 변환 알고리즘이 복잡하게 되었다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 이상현과 이진우¹¹⁾는 비다양체 자료 구조를 사용한 박판 모델러와 솔리드로의 변환 과정을 제안하였다. 여기에서의 솔리드 변환 과정은 먼저 모든 부분면과 모서리 및 꼭지점에 대하여 음셋 박판 모델들을 생성하고 이들을 불리안 합작업으로 합친 다음, 거리를 측정하여 불필요한 면들을 소거시키고, 두께면들을 오일러 작업자를 사용하여 생성시키는 방법을 사용하였다. 그럼으로써 박판 모델에 대해 정확한 인접 정보를 저장할 수 있고, 박판에서 솔리드로의 변환 알고리즘을 단순화시킬 수 있게 되었다. 그러나 이 방법에서는 음셋 박판 모델들의 불리안 작업 수행시 교차 곡선 계산을 위해 많은 시간을 소모하고, 또한 두께면을 생성시키는데 있어 자기 간섭을 일으키는 경우는 두께면을 생성시키지 못한다는 단점이 있다.

한편, 대표적인 상업용 비다양체 모델링 커널인 ACIS에서는 박판 모델을 한쪽 또는 양쪽 방향으로 음셋시켜 솔리드 모델로 변환시켜 주는 api_sheet_thicken()이라는 함수를 제공하고 있다¹²⁾. 이 함수에서는 음셋 시 음셋된 면들간의 자기 간섭을 해소시켜주는 기능을 가지고 있다. 그러나, 이 함수는 다음과 같은 몇 가지 제약점을 가지고 있다. 먼저, 박판 모델은 반드시 다양체 모델이어야 하며, 하나의 럼프(lump), 하나의 셸(shell)로 이루어져 있어야 한다. 또한, 인접한 면은 서로 법선 방향이 일관성있게 한 방향으로 향해 있어야 한다. 즉, 이 함수는 T자 형태의 박판과 같은 일반적인 비다양체 박판 모델에 대한 음셋은 불가능하다고 할 수 있다.

최근 이상현^{12), 13)}은 일반적인 비다양체 모델에 대한 음셋 작업을 제안하였는데, 이를 사용함으로써 기존에 개별적으로 개발되어 응용되었던 와이어프레임, 박판 및 솔리드 모델에 대한 음셋을 하나의 통합된 환경 내에서 지원할 수 있게 되었으며, 음셋 시 자기 자신과 간섭을 일으키는 경우에 대한 별도의 처리 작업을 생략할 수 있게 되었다. 그러나 이 음셋 방법은 수학적 정의를 바탕으로 하고 있기 때문에 이를 이용하여 박판 모델을 솔리드로 변환시킬 경우 두께면이 모두 관상 곡면(tubular or canal surface) 또는 구면(spherical surface)를 갖게 되는데 이는 실제 제품 형상에서는 그다지 많이 나타나지 않는 비실용적인 형상이다. 또한 원래 모델의 각 면, 모서리, 꼭지점에 대한 음셋 모델을 만들어 이를 불리안 합작업을 수행시키는 방법을 사용하는데 이로인한 교차 곡선 계산 시간이 많이 소요되는 단점을 안고 있다.

1.2 본 논문의 목적

따라서 본 논문에서는 비다양체 자료구조를 사용함으로써 솔리드 자료 구조를 사용한 기존 방법들의 문제점을 극복하고, 또한 비다양체 오프셋 알고리즘을 실용적인 얇은 두께의 솔리드 모델을 생성시킬 수 있도록 개선함으로써 [11]에서 지니고 있던 두께면 생성시 자기 간섭 문제를 해결하고자 한다. 한편, [11]과 [12]의 방법에서 공통적으로 가지고 있는 불리안 작업의 비효율성을 극복하기 위하여 교차곡선 계산시 모델의 위상 정보를 이용하는 방법을 개발함으로써 보다 효율적이고 강력한 얇은 두께 솔리드 생성 기능을 제공하고자 한다. 단, 본 논문에서 취급하고 있는 모델의 곡면은 2차 곡면까지로 제한되어 있으며, 그보다 높은 차수의 곡면에 대해서는 향후 연구로 남겨두었다.

2. 박판 오프셋 알고리즘의 전체 흐름

비다양체 모델에 대한 거리 r 만큼의 양의 방향으로의 오프셋은 반경이 r 인 솔리드 구를 그 구의 중심이 주어진 모델의 모든 점들에 대하여 움직여 지나 갔을 때, 쓸린 볼륨이라고도 할 수 있다^[12]. 경계 표현 방식의 자료 구조에서는 이 볼륨의 경계를 표현함으로써 오프셋 모델을 표현하게 되며, 이를 구하기 위한 일반적인 비다양체 오프셋 알고리즘은 Fig. 2에서와 같이 다음의 4단계로 이루어져 있다. 첫번째 단계에서는 먼저 주어진 모델의 경계 요소들 가운데

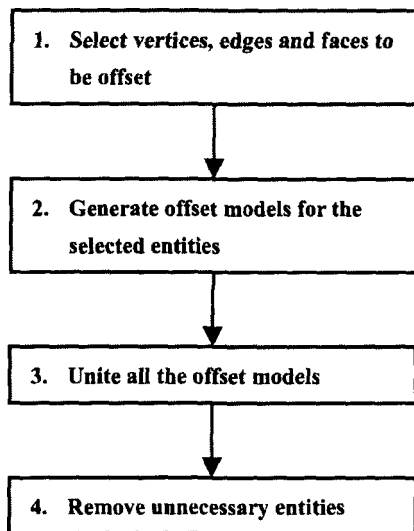


Fig. 2. Non-manifold offset algorithm.

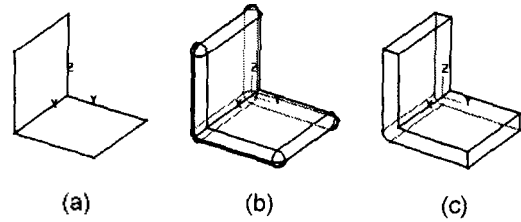


Fig. 3. Comparison of the mathematical offset model with a practical one (a) a simple L-shaped sheet model (b) a solid model constructed by an offset algorithm based on a mathematical definition of offset (c) an offset solid model being desirable for practical part design.

오프셋에 필요한 꼭지점, 모서리, 면들을 선택하고, 두번째 단계에서 이들에 대한 각각에 대한 오프셋 모델들을 생성한다. 세번째 단계에서는 이들 오프셋 모델들을 비다양체 불리안 작업을 이용하여 하나의 비다양체 모델로 합치고, 마지막으로 오프셋된 모델의 위상 요소들가운데 원래 모델로부터의 거리가 오프셋 거리보다 작은 요소들을 찾아내 적절한 오일러 작업을 사용하여 소거한다.

Fig. 3(a)에 나타난 것과 같은 간단한 L자형 박판 모델에 이 과정을 적용하면, Fig. 3(b)와 같이 두께면이 관상 곡면 또는 구형 곡면을 갖는 솔리드 모델이 된다. 이는 오프셋된 모델의 바깥쪽 경계가 원래의 모델로부터 주어진 오프셋 거리만큼 떨어져 있어야 하는 오프셋의 수학적 정의와 그에 바탕을 둔 알고리즘을 적용했기 때문이다. 그러나 이러한 형상은 실제 제품에서는 거의 사용되지 않는 비실용적인 형상이므로, 실제 설계시에 요구되는 형상은 Fig. 3(c)에 나타난 것과 같이 두께면이 평면 혹은 룰드 곡면(ruled surface)을 갖는 솔리드 모델이다. 따라서 Fig. 2의 전체 과정 가운데 두번째 단계의 선택된 꼭지점이나 모서리들에 대한 오프셋 모델을 만들 때 이를 고려하도록 알고리즘을 수정해야 한다.

한편, 일반적인 비다양체 오프셋 작업을 박판 모델에 적용하고자 할 때는 [11]에서 언급한 바와 같이 박판 모델에 대한 실용적인 오프셋을 정의하는 데 있어 두께면을 어떻게 처리할 것인가 하는 문제와 더불어 불룩한 모서리에 대한 처리 방식을 어떻게 해야 할 것인가에 대한 결정이 필요하다. [11]에서와 마찬가지로 여기서도 불룩한 모서리에 대해서 원래의 모델에서 오프셋 모델까지 항상 일정한 거리를 유지할 수 있도록 라운딩 된 곡면을 채워 넣는 법을 채택하였다. 이 방식은 일반적인 오프셋에서 이미 취

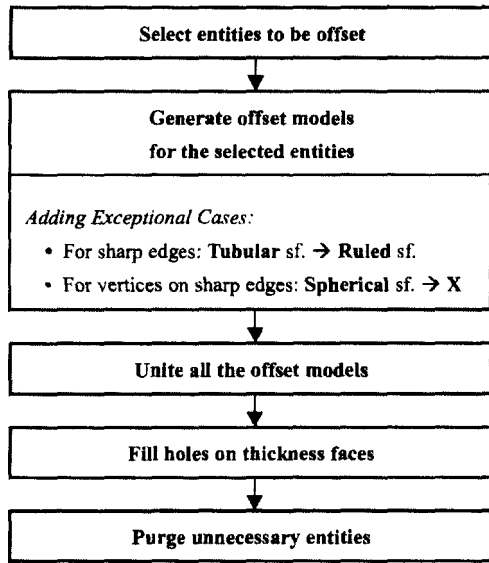


Fig. 4. Sheet offset algorithm for creating practical thin-walled solid models.

하고 있는 방법이므로 이를 위해서 특별히 기존의 알고리즘을 수정할 필요는 없다.

또한, 세번째 단계의 불리안 합작업을 수행시킬 때, 기존 모델들에 대한 위상 정보를 전혀 사용하지 않고 모든 가능한 교차 계산을 수행하기 때문에 많은 계산 시간을 소모하게 된다. 더욱이 대부분의 교차 계산 결과는 이웃한 음셋 모델들간에 경계에서 서로 접하는 경우인데, 이러한 경우 수치적으로 안정된 해를 구하기가 오히려 어려워진다.

이러한 문제점을 해결하여 실용적이며 효율적인 얇은 두께의 솔리드 모델링 기능을 개발하기 위해 본 논문에서는 Fig. 4에 나타난 것과 같은 기존의 일반적인 비다양체 음셋 알고리즘을 개선한 박판 음셋 전용 알고리즘을 제시하였다.

여기서 첫번째 단계는 기존의 일반적인 음셋 알고리즘과 동일하며, 두번째 단계에서는 첫번째 단계에서 선택된 위상 요소들에 대한 음셋 모델들을 생성할 때에 평면 또는 룰드 곡면을 갖는 두께면을 갖도록 일부 내용이 수정되었으며, 세번째 단계의 음셋 모델들의 합집합 작업에서는 교차 곡선의 효율적인 계산을 위하여 위상 정보를 이용하도록 수정하였다. 또한 네번째 단계로서 음셋 모델들의 합집합 작업 후에 구멍을 메꾸는 단계를 하나 더 추가시키고, 마지막 단계인 불필요한 요소의 제거 과정에서는 기존의 거리 측정이 아닌 비다양체적인 요소들을 제거하는

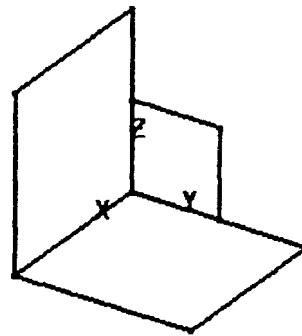


Fig. 5. A sample sheet model.

새로운 위상 작업을 개발하였다. 따라서 기존의 일반적인 음셋 알고리즘에 비하여 구멍을 메꾸는 작업이 제3과 4단계 사이에 하나 더 추가되었으며, 기존 알고리즘의 제2, 3, 4단계의 내용에 변화가 있었다.

박판 모델에 대하여 음셋을 시키는 방법은 박판의 바깥쪽, 안쪽, 그리고 양쪽으로 음셋시키는 방법을 생각해 볼 수 있다. 즉, 박판을 솔리드의 외측 혹은 내측 벽으로 먼저 모델링한 후 이로부터 다른쪽 벽을 갖는 솔리드로 변환시키고자 할 경우에는 박판 모델을 바깥쪽 또는 안쪽의 한쪽 방향으로 음셋을 수행시키고, 박판이 최종 솔리드의 중심면인 경우에는 박판을 중심으로 양 방향으로 음셋을 진행시키게 된다. 이 세가지 음셋은 단지 음셋시킬 위상 요소의 선정과 두께면 생성시 만들어지는 면의 넓이가 달라지는 것, 그리고 불리안 작업시 합쳐지는 모델들이 음셋된 것들만 합칠 것인지 아니면 원래 박판도 포함시킬 것인지 정도의 작은 차이가 있을 뿐, 위의 알고리즘 자체는 변화가 없다. 따라서 본 논문에서는 먼저 다음의 Fig. 5에 나타난 것과 같은 예제 모델을 사용하여 먼저 양쪽으로 음셋시키는 경우에 대해 위의 알고리즘의 각 단계를 보다 상세히 설명하고, 안쪽이나 바깥쪽 한쪽 방향으로 음셋시킨 경우 달라져야 할 내용과 그 결과에 대해서 후에 간략히 언급하도록 하겠다. 그러면 위 알고리즘의 다섯 단계를 하나하나 상세히 설명하도록 하겠다. 단, 본 논문에서 사용한 비다양체 자료 구조는 [9]에서 제시된 부분 요소 자료 구조를 사용하였다.

3. 양쪽 방향으로의 음셋의 세부 과정

3.1 음셋 대상 위상 요소들의 선택

비다양체 음셋 알고리즘에서는 이 단계에서 대상 모델의 경계 요소들 가운데 장차 음셋 모델의 경계

에 영향을 줄 가능성이 있는 모든 면, 모서리, 꼭지점들을 선택하여 저장시키는데, 이들은 모든 영역들 중 캐비티 영역의 경계에 해당되는 것들을 모두 추출함으로써 구할 수 있다. 이를 박판 모델에 적용시키면 박판 모델의 모든 면, 모서리, 꼭지점들이 선택된다. 그러나 실제에 있어서는 부분면(partial-face), 쐐기(wedge), 디스크(disk)를 단위로 정보를 저장하고 있는 것이 차후 작업을 용이하게 하므로, 본 논문에서는 이들을 도입하도록 하였다.

먼저, 부분면은 부분 요소 자료 구조를 구성하는 한 위상 요소로서 면의 한쪽면에 해당하며 법선 방향은 인접 영역의 내부를 향하고 있다¹⁾. 다음, 쐐기란 Fig. 6(a)에 나타난 w_1, w_2, w_3 와 같이 모서리가 된 구석을 나타내는 임시 자료 구조로서 하나의 모서리와 그것에 인접해 있는 2개의 부분면에 대한 포인터를 저장하고 있으며, 볼록한(convex), 오목한(concave), 또는 매끄러운(smooth) 것으로 분류된다. 즉, Fig. 6(a)의 w_1 은 (E_1, PF_1, PF_2)를 저장하고 있으며 오목한 쐐기로 판명된 반면, w_3 는 매끄러운 쐐기로 판명된다. 단, 여기서 매끄럽다는 표현은 G^1 연속성을 만족하는 경우를 뜻한다. 끝으로, 디스크는 Fig. 6(b)에 나타난 것과 같이 꼭지점 부근의 구석을 나타내는 임시 자료 구조로서 하나의 꼭지점과 인접한 한 사이클의 부분 면들의 정렬된 집합을 뜻하며, 실제로는 하나의 부분꼭지점(partial-vertex)와 반시계 방향으로의 쐐기들의 리스트를 저장하고 있다. 또한, 이 디스크는 볼록한(convex) 것과 오목한(concave) 것, 기타의 것으로 나뉘는데, 여기서 볼록한 디스크란 인접한 쐐기들이 모두 볼록한 경우이며, 오목한 디스크란 인접한 쐐기들이 모두 오목한 경우이고, 기타의 경우는 이 둘에 속하지 않는 나머지 모든 경우에 해당된다. Fig. 6(b)에 나타난 디스크 d_1 의 경우 (PV_1, w_4, w_5, w_6)을 저장하고 있으며, 볼록한 디스크로 분류된다.

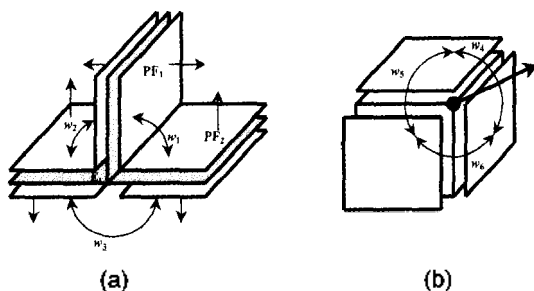


Fig. 6. Temporary topological entities for sheet offsetting (a) wedges (b) disks.

이 단계에서는 먼저 읍셋시키고자 하는 부분면 그룹에 대하여 모든 쐐기들과 디스크들을 찾아내서 그것들의 요철성을 조사하여 분류해 두며, 또한 장차 두께면이 될 날 모서리(sharp edge)들을 찾아 저장해 둔다.

3.2 선택된 위상 요소들에 대한 읍셋 모델 생성

앞 단계에서 선택된 모든 디스크, 쐐기, 부분면들에 대하여 각각에 대한 읍셋 모델들을 생성시킨다. 비다양체 읍셋의 수학적 정의에 따라 각 읍셋 모델의 기하학적인 형상을 예측하면, 각 디스크에 대한 읍셋 모델은 반경이 읍셋 거리이고 중심이 꼭지점의 좌표가 되는 구면(spherical surface)로 정의되며, 각 쐐기에 대한 읍셋 모델은 반경이 읍셋 거리인 원판을 모서리를 따라 쏘고 지나갈 때 생성되는 관상 곡면으로 정의될 수 있다. 또한 각 부분면에 대한 읍셋 모델은 부분면의 법선 방향으로 읍셋시키는 정규 읍셋(normal offsetting) 곡면을 갖게 될 것이다. 단, 본 논문에서도 [12]의 경우와 마찬가지로 각 요소에 대한 읍셋 결과가 자기 간섭을 일으키지 않는 경우로 대상을 한정시키고 있다. 이 의미는 다른 요소의 읍셋 결과와 교차가 일어나면 안된다는 말이 아니며, 단지 한 요소의 읍셋 모델이 스스로 교차하는 경우는 허용되지 않는다는 것임을 유의해야 한다.

그러나 이와 같이 하는 경우 두께면에 해당하는 부분까지 관상곡면으로 만들어지기 때문에 이를 평면 또는 플드 곡면으로 만들기 위해서 기존 알고리즘의 수정이 필요하다. 즉, 쐐기에 대한 읍셋 모델을 만들 때, 그 쐐기가 박판 모델의 경계에 해당되는, 즉, 인접한 면의 개수가 하나인 날 모서리(sharp edge)인 경우에는 관상 곡면 대신 플드 곡면을 갖는 박판 모델로 읍셋 모델을 생성시키고, 디스크에 대한 읍셋 모델을 만들 때에도 그 꼭지점이 날 모서리들 상에 있는 경우에는 그 디스크에 대한 읍셋 모델은 생성시키지 않도록 알고리즘을 수정한다. 그밖의 위상 요소들에 대한 읍셋 모델의 생성은 기존의 방법과 동일하다. 이와 같은 수정은 읍셋에 대한 수학적 정의에는 위배되는 것이나 실용적인 얇은 두께의 솔리드 모델이 되기 위해서는 허용하지 않을 수 없는 사항이다.

이와 같이 수정된 방법을 앞의 예제 박판 모델에 적용시킨 경우 그 결과가 Fig. 7에 나타나 있다. 여기서 Fig. 7(a)는 각 부분면을 읍셋시킨 결과를 나타내고 있다. Fig. 7(b)는 각 쐐기를 읍셋시킨 결과로서 날 모서리에 대해서는 관상곡면이 아니라 평면을

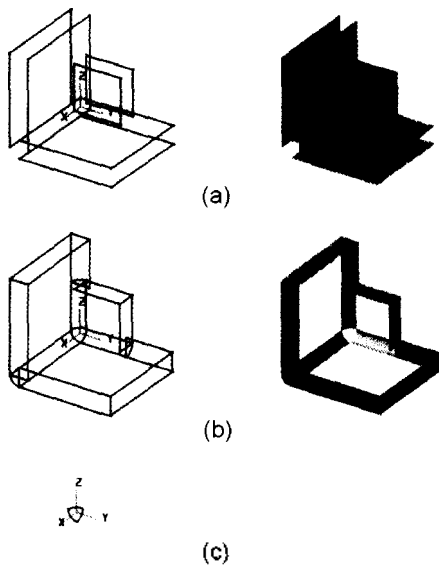


Fig. 7. Offset models for the sample sheet model (a) partial-face offsets (b) wedge offsets (c) disk offsets.

갖는 음셋 모델이 생성된 것을 볼 수 있다. 끝으로 Fig. 7(c)는 각 디스크를 음셋시킨 결과로서 날 모서리상에 있는 꼭지점에 대해서는 음셋 모델이 생성되지 않은 것을 볼 수 있다.

3.3 기존의 위상 요소에 부모 정보 추가

앞의 단계에서 만들어진 각 디스크, 쉘기, 부분면에 대한 모든 음셋 모델들을 비다양체 모델에 대한 불리안 합집합 작업을 수행하여 합친다. 본 논문에서 사용한 불리안 작업 알고리즘은 김성환 등^[8]이 제시한 것을 채용했으며, 이는 기존의 Masuda^[5]나 Crocker와 Reinke^[1]가 제안한 “Merge and Selection” 알고리즘에 바탕을 둔 것이다. 이 불리안 합작업은 다음과 같이 크게 4단계로 구성되어 있다.

(단계 1) 병합체(merged set)와 기본물체(primitive)를 입력받아 두 모델의 모든 위상 요소들 간의 교차점, 교차곡선 및 겹친 면들을 찾는 교차 계산을 한다.

(단계 2) 찾은 교차점과 교차 곡선들은 대응하는 위상요소인 꼭지점과 모서리들로 병합체와 기본물체에 생성된다.

(단계 3) 병합체에 기본물체를 효율적으로 복사할 수 있도록 그룹화를 수행한다.

(단계 4) 병합체에 없는 기본물체의 모든 위상 요소들을 병합체에 복사한다.

이로써 최종의 병합체가 두 모델의 불리안 합집합

결과가 되며, 이 병합체는 다시 그 다음 모델과의 불리안 합집합 작업에 입력으로 사용되어 음셋된 모든 모델과의 불리안 합집합 작업의 결과가 하나의 병합체로 얻어지게 된다.

이와 같이 불리안 작업을 수행하기 위해서는 앞에서 설명했듯이 먼저 대상이 되는 두 물체간의 모든 위상 요소들간의 교차 곡선 또는 교차점을 계산해야만 한다. 그런데, 실제에 있어 이 과정이 전체 불리안 작업에서 가장 많은 계산 시간을 소비하며, 또한 계산시 공차 문제로 인한 오류 발생의 근원지이기도 하다. [11]이나 [12]의 음셋 알고리즘에서는 이와같은 교차 계산을 두 면의 기하학적인 정보만을 이용하여 교차 곡선 및 점들을 계산해낸다. 그러나, 음셋 모델들의 교차 계산 결과를 살펴보면, 면들간의 교차가 주로 면의 경계에서 서로 접하는 경우가 흔히 발생하는 것을 알 수 있다. 이렇게 서로 접하는 교차의 경우는 원래 모델에서 서로 인접해 있던 위상 요소들의 음셋 모델들 간에 주로 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서, 원래 모델의 위상 요소의 인접관계를 적절히 활용한다면 두 면이 서로 접하는 경우의 교차 곡선 계산을 회피할 수 있으리라고 짐작할 수 있다. 실제로, 교차 곡선의 계산 시 서로 접하는 경우가 오히려 많은 공차상의 문제점을 야기할 수 있다는 점을 감안하면 이와 같이 위상 정보를 이용한 교차 곡선 계산 생략은 계산상의 효율성뿐만 아니라 시스템의 안정성을 높여주는 효과를 가져다 준다고 할 수 있다. 그러면, 위상 요소의 인접 관계를 이용한 교차곡선 계산의 간략화 방법에 대하여 보다 자세히 설명하도록 하겠다.

3.3.1 기존의 위상 요소에 부모 정보 추가

위상 정보를 이용한 교차 곡선 계산의 간략화 알고리즘에 들어가기 앞서 이 알고리즘의 구현을 위하여, 먼저, 음셋된 모델의 각 위상 요소들이 원래 모델의 어떤 위상 요소로부터 유래하였는지에 대한 부모 정보를 가질 수 있도록 기존의 각 위상 요소의 클래스에 부모에 대한 특성치를 추가하도록 하였다. 즉, 꼭지점, 모서리, 면의 세가지 위상 요소에 대한 자료 구조에 부모 위상 요소에 대한 포인터를 하나의 특성치로 저장할 수 있도록 하였다. 그럼 각 부분면과 쉘기, 그리고 디스크의 음셋 모델에 어떠한 부모 정보가 저장되는지 살펴보도록 하겠다.

부분면의 음셋 모델에 대한 유래 정보

면으로부터 음셋된 모델은 자신의 각 모서리, 꼭지점에 대하여 이들이 유래한 원래 모델의 위상 요

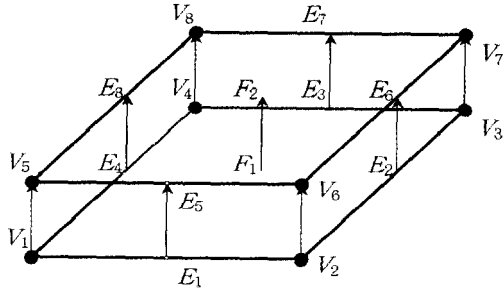


Fig. 8. Parents of the entities of a partial-face offset model.

소를 부모 정보(parent information)로 저장한다. 예를 들어 Fig. 8에서와 같이 원래 모델의 부분면 PF1을 읍셋시키는 경우 읍셋 모델의 네 모서리 E_5, E_6, E_7, E_8 는 각각 E_1, E_2, E_3, E_4 를 부모로 저장한다. 또한, 읍셋 모델의 네 꼭지점 V_5, V_6, V_7, V_8 는 각각 V_1, V_2, V_3, V_4 를 부모로 저장한다.

췁기의 읍셋 모델에 대한 유래 정보

Fig. 9에서와 같이 읍셋 모델이 모서리 E_1 의 볼록한 췁기로부터 유래한 경우에는 앞의 면으로부터 유래한 읍셋 모델의 경우와 다르게 부모 정보가 저장된다. 먼저, 읍셋 모델의 모서리들 가운데 E_1 과 평행인 모서리들인 E_2 와 E_3 는 모두 E_1 을 부모로 저장하고, 양끝의 두 원호 곡선 E_4 와 E_5 는 각각 V_1 과 V_2 를 부모로 저장한다. 끝으로 꼭지점 V_3 와 V_6 는 모두 V_1 을 부모로 저장하고, V_4 와 V_5 는 V_2 를 부모로 저장한다.

디스크의 읍셋 모델에 대한 부모 위상 요소들

꼭지점의 볼록한 디스크로부터 읍셋된 모델의 모든 면, 모서리, 꼭지점들은 부모로서 원래 모델의 꼭지점을 저장한다. Fig. 10에 나타난 것과 같이 읍셋

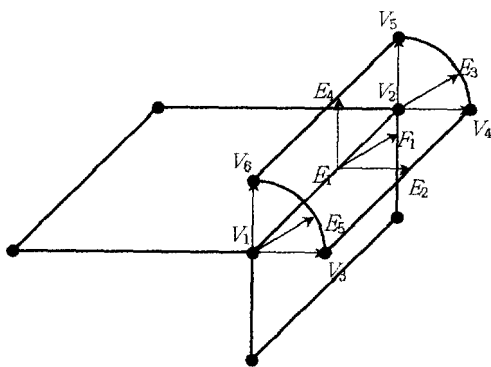


Fig. 9. Parents of the entities of a wedge offset model.

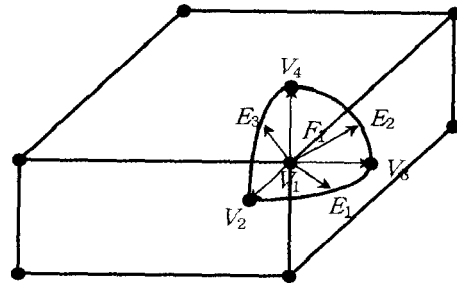


Fig. 10. Parents of the entities of a disk offset model.

된 모델의 $E_4, E_5, E_6, V_2, V_3, V_4$ 의 부모 요소는 모두 V_1 이 된다.

부모의 위상 정보 유지

읍셋 모델의 면이나 모서리들은 Fig. 11에 나타난 것과 같이 볼리안 작업 도중 다른 면이나 모서리와 교차에 의하여 분할될 수 있다. 이 경우 F_1 과 F_2 가 각각 2개의 면으로 분할되고, 이들의 경계 모서리인 E_1, E_2, E_4, E_5 가 각각 2개로 분할된다. 이와 같이 원래의 요소들이 분할되는 경우에는 새로 만들어진 요소에 부모 정보를 복사해 주도록 하였다. 그럼으로써 새로 분할된 위상 요소가 이후에 다른 읍셋 모델과 볼리안 합집합 작업을 계속하는 경우에도, 부모 위상 요소를 비교하여 인접하는 두 면의 경계 곡선이 교차 곡선으로 찾아질 수 있도록 하였다.

3.3.2 위상 정보를 이용한 교차 계산

앞에서와 같이 읍셋된 모델의 경계 요소들에 자신들이 어디서 유래되었는지에 대한 정보가 저장되어 있으면, 이를 이용하여 교차 곡선이나 교차 점을 얻어내는 것은 다음과 같은 순서로 진행된다.

(단계 1) 접하는 교차 곡선의 탐색

볼리안 작업의 대상이 되는 두 모델의 모든 모서리들에 대해 같은 부모 위상 요소를 가지고 있는 모서리들을 추출해 낸다. 그런데 현재의 방법은 앞의

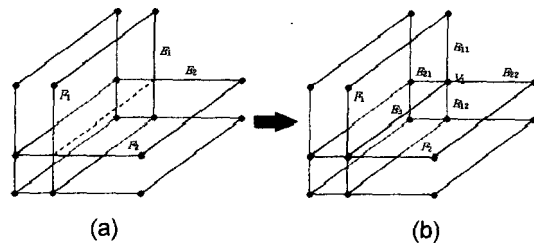


Fig. 11. Topological entities split by intersections (a) before intersection (b) after intersection.

Fig. 9나 Fig. 10과 같이 하나의 위상 요소로부터 여러 개의 위상 요소들이 생성될 수 있으므로, 실제 어느 모서리들이 3차원 공간상에서 동일 위치에 있는지 검사해야 한다. 이를 위해 구한 모서리들의 곡선에 대해서 어떤 한 곡선의 양 끝점이 모두 다른 곡선 상에 있는지를 검사하여 그러한 경우에 그 곡선을 교차 곡선으로 결정한다.

(단계 2) 접하는 교차점의 탐색

우선 두 면의 꼭지점들 중에서 같은 부모 위상 요소를 갖는 꼭지점들의 그룹들을 구한다. 제1단계에서 교차 곡선을 구하는데 사용된 모서리의 양끝 꼭지점을 포함하고 있는 그룹들은 삭제한다. 끝으로 남아있는 꼭지점 그룹들의 각각에 대해 그룹내의 꼭지점들간의 거리를 비교하여 같은 위치에 있는 점들을 추출한다.

만일 앞의 제 1, 2단계에서 교차곡선이나 교차점이 구해지지 않으면 기존의 일반적인 두 면의 교차 계산 작업을 수행한다. 즉, 면으로부터 곡면 정보와 그 경계 곡선들을 모두 가지고 있는 트림 곡면(trimmed surface)을 생성시켜 이들간의 교차 곡선과 교차점들을 계산해 낸다.

3.4 두께면 상의 구멍 막기

앞의 불리안 합집합 작업이 모두 완료되면 하나로 합쳐진 비다양체 모델을 얻게 된다. 그런데, 앞의 두 번째 단계에서 실용적인 두께면 형상을 만들기 위하여 날모서리 상에 있는 꼭지점에 대해서 아무런 육색 모델을 만들지 않기 때문에 Fig. 12에 나타난 것과 같이 두께면 상에 구멍을 갖는 모델이 만들어 질 수 있다. Fig. 12(a)는 예제 모델에 대한 앞의 불리안 작업까지의 결과를 나타내주고 있는데, 이 모델의 경우 3개의 1/4 원판 모양의 구멍이 두께면 상에 존재하는 것을 볼 수 있다. 완전한 솔리드 모델을 얻기 위해서 이러한 구멍들을 메워주는 작업을 수행해야 하며, 이를 위해 본 논문에서는 가능한 범위내에

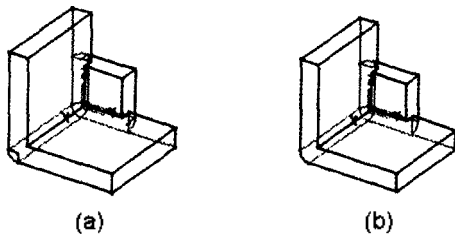


Fig. 12. Automatic hole removal on thickness faces (a) three holes on the thickness faces (b) after removing holes.

서 자동으로 구멍을 찾아 메워주는 알고리즘을 개발하였다.

구멍을 메우기 위한 작업은 다음과 같이 크게 2단계로 나뉘어지며 시스템에 의하여 자동으로 수행되어 진다.

구멍 막기 알고리즘

(단계 1) 구멍 찾기

주어진 모델에 대해서 구멍을 찾는 작업을 한다. 이를 위해 먼저 날모서리들을 모두 찾아 리스트 구조로 저장한 후, 이 가운데 루프를 구성하는 모서리들을 찾아 하나씩 꼬집어낸다. 이 각각의 루프가 바로 두께면 상의 구멍의 경계를 구성하게 된다. 만일 날모서리의 리스트에 루프를 형성하지 못하고 남아있는 모서리들이 있다면 이들은 자동으로 처리될 수 없고 후에 사용자가 대화식으로 구멍 막는 작업을 하여야 한다.

(단계 2) 자동 구멍 막기

찾아진 루프에 대해 오일러 작업 가운데 MFKC또는 MFR을 적용시켜 구멍을 없앤다. 시스템은 이 둘 가운데 어느 것이 적합한지를 검사하여 자동으로 선택 수행한다. 일반적으로 N개의 루프가 찾아지고 또 루프를 구성하지 못하는 날모서리가 없다면, (N-1)회의 MFKC를 수행하여 구멍을 없애다가 마지막 루프에 대해서는 MFR을 수행한다.

(단계 3) 수동 구멍 막기

제 1단계의 구멍 찾기에서 루프를 형성하지 못하는 날 모서리가 있는 경우에는 이를 수동으로 처리해야만 한다. 현재의 시스템에서는 이러한 경우 시스템이 루프를 구성하지 못한 날모서리들을 알기 쉽게 빨간색으로 표시해주고, 사용자가 직접 대화식으로 오일러 작업을 수행하여 필요한 모서리를 만들어 구멍을 메우도록 하고 있다. Fig. 13과 같은 경우는 구멍의 경계가 되는 모서리가 없기 때문에 면을 만들기 전에 새로운 모서리를 먼저 만들어 주어야 한다. 평면 다면체 모델에 대해서 이와 같이 구멍을 자동으로 막을 수 없는 경우에 대해서는 뒤의 토론의 장에서 좀더 자세히 논의하도록 하겠다.



Fig. 13. An exceptional case of removing holes on thickness faces.

3.5 불필요한 위상 요소의 제거

병합체 모델의 두께면상의 구멍을 모두 메운다하더라도 때에 따라 솔리드 내부에 와이어 모서리(wire edge)나 영역을 분할하는 칸막이 면(screen face) 등과 같이 솔리드 모델에는 불필요한 요소들이 남아 있을 수 있다. 따라서, 마지막으로 이러한 불필요한 요소들을 제거하여 완전한 다양체 경계를 갖는 솔리드 모델로 만드는 작업을 수행해야 한다. [12]의 일반적인 비다양체 옴셋 알고리즘에서는 이러한 불필요한 요소들을 원래 모델로부터의 거리가 옴셋 거리보다 작은 지를 검사하여 가려냈으나, 본 논문에서는 두께면을 형성하는 날모서리의 옴셋에 일정 거리 떨어진 환상 곡면 대신 름드 곡면을 사용하였기 때문에 이 검사 방식을 그대로 사용할 수 없다. 또한 본 논문에서 언급자 하는 박판 모델에 대한 옴셋의 결과가 솔리드 모델이라는 것이 이미 결정되어 있기 때문에 굳이 계산 시간이 많이 소요되는 거리 측정을 바탕으로 한 기존의 검사 방법을 사용할 필요가 없다.

불필요한 위상 요소를 제거하고 완전한 솔리드 모델을 얻기 위하여 본 논문에서는 먼저 제거해야 할 불필요한 위상 요소들을 Fig. 14에 나타난 것과 같이 9가지 경우로 분류하고, 이들을 찾아낸 후, 이들을 각각 적절한 오일러 연산자를 사용하여 제거하는 알고리즘을 개발하였다. 이에 대한 구체적인 내용은 C의 문법으로 아래와 같이 기술하였다.

불필요한 위상 요소의 제거 알고리즘

```

for (f ← each face of the model) {
    if (f is adjacent to the same region in both
        sides) // (1) laminar face
        delete f with KFMC;
    if (f is adjacent with two different finite regions)

```

```

// (2) screen face
delete f with KFR;
}
for (e ← each edge of the model) {
    if (e is a wire) // (3) wire-edge
        if (e is the only path connecting its two
            ending vertices)
            delete e with KEMS;
        else
            delete e with KEC;
    else
        if (e has two partial-edges) {
            if (the partial-edges belong to the same
                loop) // (4) isthmus or (5) strut edge
                delete e with KEML;
            if (the faces of two partial-edges lie on
                the same plane) // (6) redundant edge
                delete e with KEF;
        }
}
for (v ← each vertex of the model) {
    if (v is linked with a partial-face)
        // (7) single-vertex shell
        delete v with KVS;
    else if (v is linked with a partial-edge and has
        only one partial-vertex)
        // (8) single-vertex loop
        delete v with KVL;
    else if (v is adjacent to two edges that lie on
        the same line) // (9) redundant vertex
        delete v with JEKV;
}

```

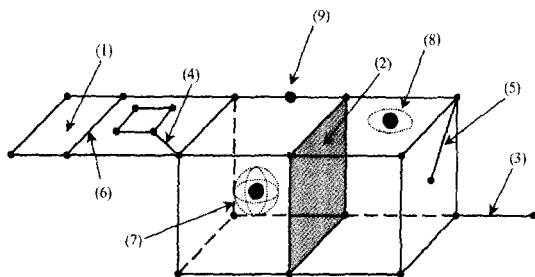


Fig. 14. Topological entities to be purged: (1) laminar face (2) screen face (3) wire edge (4) isthmus edge (5) strut edge (6) redundant edge (7) single-vertex shell (8) single-vertex loop (9) redundant vertex.

4. 한쪽 방향으로의 옴셋의 세부 과정

지금까지는 주어진 박판 모델을 양쪽 방향으로 옴셋시키는 과정에 대하여 설명하였다. 그러나 많은 경우 모델링 하고자 하는 부품의 외곽 형상을 먼저 모델링한 후 그로부터 일정한 두께의 살을 붙이는 것이 일반적이기 때문에 이와 같이 한 쪽 방향만으로의 옴셋 기능도 개발할 필요가 있다. 이러한 경우 모델의 형상은 주로 플라스틱 사출 제품의 기본 형상과 같이 안과 밖이 구분이 되는 형태로서, 본 논문의 알고리즘을 개발하는 데 있어서는 주어진 박판 모델이 다양체 형태라고 가정하도록 하겠다. 즉, 중간에

리브의 형상과 같은 것이 붙어 있어 하나의 모서리에 2개 이상의 면이 인접하는 비다양체적인 상황이 발생하는 것은 허용하지 않도록 하겠다. 그 이유는 일반적으로 사출 제품을 설계할 경우 일정 두께의 주 형상을 먼저 만든 후, 그 위에 부 형상인 리브나 보스와 같은 특징 형상들을 설계하는 것이 보통이며, 이 경우 주형상은 다양체 박판 모델로서 여기에 두께를 부여하여 오프셋 솔리드로 만든 후 부형상을 솔리드 모델로 여기에 붙이게 된다. 물론 부형상을 포함하여 오프셋시킬 수도 있으나, 만일 리브와 같은 부형상이 붙어 있는 경우에는 이 부분이 양쪽 방향으로 오프셋이 되어 주어진 두께보다 더 두꺼운 모델이 발생하기 때문에 바람직스럽지 않은 측면도 있다.

한쪽 방향으로의 오프셋 과정은 앞에서 제시한 양쪽 방향으로의 오프셋 알고리즘의 다섯 단계를 동일하게 진행시켜 나아가되 다음과 같은 사항들을 변경함으로써 손쉽게 구현할 수 있다.

(단계 1) 오프셋 대상 위상 요소들의 선택

사용자가 하나의 부분면을 선택하면, 이를 출발점으로 하여 박판의 외곽 경계인 날모서리들을 경계로 하는 부분면의 집합을 탐색해 낸다. 이 부분면의 집합으로부터 모든 썩기와 디스크들을 찾아내서 저장한다. 다양체 형상의 박판에서는 안과 밖의 두개의 부분면 집합이 존재하므로 사용자가 선택한 부분면의 방향에 따라 이 가운데 하나가 선택되는 것이다. 또한 앞에서와 마찬가지로 장차 두께면으로 변환될 날 모서리들을 찾아 저장해둔다.

(단계 2) 선택된 위상 요소들에 대한 오프셋 모델 생성

앞에서 선택된 모든 디스크, 썩기, 부분면들에 대한 오프셋 모델을 생성시키는 것은 3.2장의 양쪽 방향 오프셋 알고리즘과 동일하다. 그러나 날 모서리에 대해 톨드 곡면을 갖는 두께면을 생성시킬 때는 모서리의 시작 꼭지점과 그로부터 부분면의 법선 방향으로 주어진 두께만큼 떨어진 두 점을 연결시킨 선분이 날 모서리를 따라 스윙핑되었을 때 만들어지는 형상이 되도록 한다. 즉, 양쪽 방향으로 오프셋시킬 경우의 절반에 해당하는 선분을 스윙핑시키는 결과가 된다. 또한 원래의 박판 모델을 하나 복사하여 이를 오프셋 모델들의 그룹에 포함시킨다. 그럼으로써 원래의 박판 모델이 최종 솔리드의 한쪽 벽을 구성할 수 있도록 한다. 단, 이때 다음 단계인 불리안 작업시 두 면간의 교차 계산을 용이하게 하기 위하여 부모 위상 요소를 오프셋 모델의 각 요소에 저장시키는데, 원래 박판 모델을 복사하는 경우는 복사된 모델의 각 위상 요소가 원래 모델의 해당 위상 요소를 부모

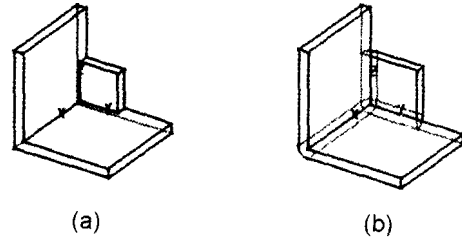


Fig. 15. One-side offset solids (a) offset in the outer direction (b) offset in the inner direction.

로써 저장하도록 한다.

(단계 3) 오프셋 모델들의 불리안 합집합 생성 앞의 3.3장의 경우와 동일하다.

(단계 4) 두께면 상의 구멍 막기 앞의 3.4장의 경우와 동일하다.

(단계 5) 불필요한 위상 요소의 제거 앞의 3.5장의 경우와 동일하다.

Fig. 5의 예제 모델에 대하여 안쪽 또는 바깥쪽으로 오프셋시킨 결과가 Fig. 15에 나타나 있다.

5. 적용 예

Fig. 5의 예제 이외에 몇 가지 박판 모델에 대하여 본 논문에서 제시한 방법을 적용하여 실용적인 얇은 두께의 솔리드 모델을 생성시킨 예들을 소개하도록 하겠다. Fig. 16(a)는 컴퓨터의 입력 장치인 마우스 위쪽 덮개의 내벽 형상에 대한 박판 모델을 보여 주고 있다. 이를 바깥쪽으로 오프셋을 하면 Fig. 16(b)와 같은 라운드된 최종 솔리드 모델을 얻을 수 있다. 이 경우 두께면상인 내 귀퉁이의 밑 부분에 구멍이 발생하지만 네번째 구멍 막기 단계에서 자동으로 탐색되어 제거된다.

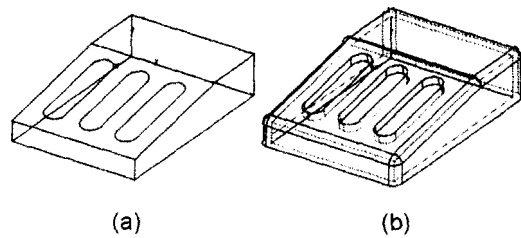


Fig. 16. Modeling of a mouse (a) a sheet model for the inner wall of a mouse (b) thin-wall solid model obtained by offsetting in the outer direction




6. 토 의

6.1 위상 정보를 이용한 교차 계산 생략의 효율성 평가

본 논문에서 제시한 위상 정보를 이용한 두 면간의 교차 계산 알고리즘이 기하학적 정보만 이용하는 기존의 방법에 비하여 얼마나 효율적인지에 대하여 몇 가지 샘플 모델들에 대하여 비교해 보도록 하겠다. Table 1의 첫번째 열에 나타난 것과 같이 여기에서 사용된 모델들은 먼저, 두 개의 피라미드가 그 정점에서 서로 맞닿아 있는 형상의 비다양체 모델과 Fig. 5의 3면으로 이루어진 박판 모델, 그리고 Fig. 16에 나타난 마우스의 박판 모델이다. 이들에 대한 오프셋 방식은 Table 1의 두번째 열에 나타난 것과 같이, [12]의 일반적인 오프셋 알고리즘을 적용시킨 경우와 본 논문에서 제시한 실용적인 오프셋 알고리즘을 적용시킨 경우를 모두 포함시켰으며, 오프셋시 주어진 오프셋 거리는 모두 같은 값을 사용하였다. Table 1의 세번째 열에서는 불리안 작업시 면들간의 교차 계산에 소요된 시간을 나타내고 있는데, 기하학적인 정보만을 이용하는 원래 방법과 위상 정보를 이용하도록 수정한 본 논문의 방법을 적용했을 때 걸린 시간을 비교해서 나타내고 있다. 수행 시간의 측정 방법은 불리안 작업 내부의 두 면간의 교차 계산 부프로그램의 전후에 시간을 기록하는 프로그램 코드를 삽입하여, 기록된 시간의 차이를 1/100초 단위로 계산하여 출력하였다. 사용한 컴퓨터는 Intel Pentium™ II-350MHz CPU와 128MB를 장착한 IBM 호환 PC로서 운영체제는 Microsoft 한글 Windows NT 4.0 상에서 테스트하였다.

Table 1의 측정 결과를 보면, 위상 요소의 정보를

Table 1. Computing times for intersections in Boolean operations

Model	Offset method		Elapsed time(ms)		Reduced time(%)
	Thickness surface type	Direction	Original	Modified	
	Tubular	Positive	0.96219	0.53788	44.1
			0.9629	0.53558	44.4
	Tubular	Positive	0.81575	0.46262	43.3
			0.81434	0.46381	43.0
	Ruled	Inner	0.01604	0.03725	-56.9
			0.01613	0.03717	-56.6
	Ruled	Outer	0.10445	0.05455	47.8
			0.10486	0.05678	45.9
	Ruled	Both	0.10817	0.07072	34.6
			0.10806	0.07021	35.0
	Ruled	Outer	0.66032	0.47079	28.7
			0.66017	0.47081	28.7

이용한 두 면간의 교차 계산 작업이 기존의 방법보다 약 30~45%의 시간을 단축하였음을 알 수 있다. 그런데, Fig. 15(a)의 경우, 즉, 3면 모델을 안쪽 방향으로 오프셋을 한 경우에는 수정된 불리안 합집합 작업의 수행 시간이 오히려 증가한 것을 볼 수 있다. 이것은 안쪽 방향의 오프셋 결과에서, 실제 면과 면의 교차 계산이 발생하는 경우가 오프셋 면들끼리 경계에서 인접하는 경우보다 많았으며, 서로 접하는 면들도 모두 평면으로서 교차 곡선 계산이 단순하기 때문에, 추가된 부모 위상 요소의 정보 조사 부분이 오히려 불필요한 수행 시간을 더했기 때문으로 추측된다.

6.2 구멍 자동 매워 넣기의 예외 상황

앞에서 구멍을 자동으로 찾는 방법은 날 모서리를 모두 찾아낸 다음 루프를 형성하는 것들을 뽑아내는 방식을 취했다. 그러나 실제로는 두께면 상에 발생하는 구멍들 중에는 날모서리들로서 루프를 구성하지 못하는 경우가 발생한다. 이러한 경우에는 구멍의 경계에 있는 면 상에 사용자가 직접 오일러 연산자를 사용하여 모서리를 만들어 준 다음, 구멍의 경계를 구성하는 모서리들을 선택하여 MFKC나 MFR을 수행시켜 구멍을 없애 주어야 한다.

틀드 곡면으로 두께면을 만들었을 때 발생하는 위상학적인 문제에 서는 앞서 Lim과 Lee^[4]의 논문에서 평면 박판 모델의 경우에 대하여 논의를 하고 있다. 따라서 본 논문에서도 여기에서 취한 방법을 인용하여 법선 벡터의 방향이 같은 쪽을 향하고 있는 두 평면이 한 모서리 공유하며 인접해 있는 경우, 이를 오프셋할 경우 두께면에 어떠한 현상이 일어나는지 관찰하도록 하겠다. 특히, 두께면 상에 발생하는 구멍들 중에 날모서리로 구멍이 이루어지지 않는 경우가 어떤 때에 발생하는 지에 대해서 관찰해 보도록 하겠다. 먼저, [4]에서의 분류 기준을 사용하기 위해 먼저 Fig. 17에 나타난 것과 같이 옆에서 본 두 평면의 사잇각을 α . 위에서 본 두 모서리의 벌어진 각을 β 로 정의하였다. 그러면 이 α 와 β 값의 변화에 따라 어떠한 오프셋 결과가 얻어지는지 살펴보겠다.

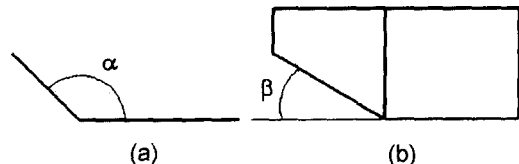


Fig. 17. Definition of α and β angles (a) in the side view (b) in the top view.

(경우 1) $0^\circ < \alpha < 90^\circ$, β : 임의값

Fig. 18과 같이 β 에 상관없이 인접하는 모서리를 사이에 두고 구멍이 2개 생긴다. 이 경우에, 구멍 찾기 알고리즘에서는 중간 모서리가 날모서리가 아니기 때문에 구멍으로 찾지 못한다. 이러한 구멍을 막기 위해서 사용자가 새로 모서리를 만들 필요는 없고, 기존의 모서리를 선택해서 오일러 연산자 MFKC와 MFR를 사용하면 된다. 원래 박판 모델의 아래쪽 바깥으로 돌출한 부분은 다음 단계인 불필요한 위상 요소 단계에서 제거된다.

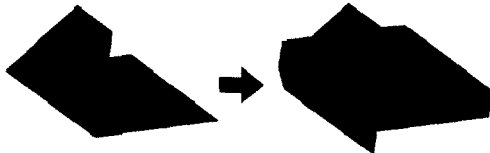


Fig. 18. Case 1: $0^\circ < \alpha < 90^\circ$, β : arbitrary.

(경우 2) $\alpha = 90^\circ$, $0^\circ < \beta < 90^\circ$

Fig. 19와 같이 기존의 모서리가 구멍을 구성한다. 그러나 경우 1과 같이 날모서리가 아니기 때문에, 구멍으로 찾지 못한다. 사용자가 오일러 작업자 MFKC나 MFR를 사용하여 면을 생성할 때, 직접 모서리를 선택해 주어야 한다.

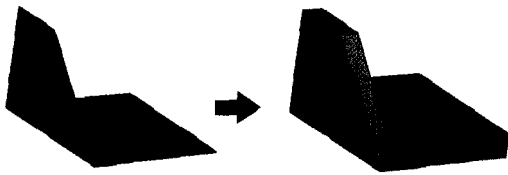


Fig. 19. Case 2: $\alpha = 90^\circ$, $0^\circ < \beta < 90^\circ$.

(경우 3) $90^\circ < \alpha < 180^\circ$, $0^\circ < \beta < 90^\circ$

Fig. 20과 같이 면의 중간에서 다른 두 모서리가 접하기 때문에, 먼저 사용자가 오일러 작업자를 사용하여 면 위에 다른 두 모서리와 연결되는 모서리를 생성해 주어야 한다. 그리고 나서 MFKC나 MFR로 구멍을 막을 수 있다.

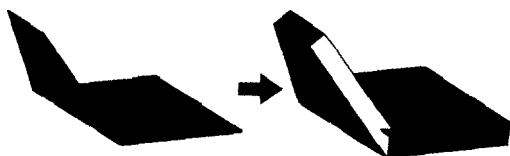


Fig. 20. Case 3: $90^\circ < \alpha < 180^\circ$, $0^\circ < \beta < 90^\circ$.

(경우 4) $90^\circ < \alpha < 180^\circ$, $-180^\circ < \beta < 0^\circ$ 그 이외에 $\beta < 0^\circ$ 인 경우에는, Fig. 21처럼 육섯된 두께면이 다른 면의 내부로 겹쳐 들어가기 때문에, 구멍이 발생하지 않는다.

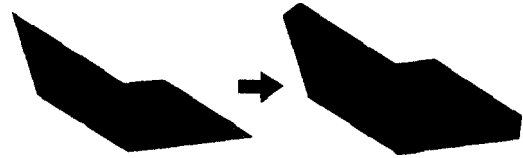


Fig. 21. Case 4: $90^\circ < \alpha < 180^\circ$, $-180^\circ < \beta < 0^\circ$.

이상과 같이 평면 다면체 모델로서 두 면이 만나는 각도에 따라 두께면의 형상이 어떻게 나타나며, 구멍이 발생할 경우 이에 대한 자동처리가 현재의 알고리즘으로 어디까지 이루어지는 지를 살펴보았다. 실제 사출품이나 판금 제품의 경우 제작상의 편의를 위해 가급적 직교하거나 라운드를 넣어 부드럽게 면이 만나도록 하기 때문에 구멍을 자동으로 메꿀 수 없는 경우는 자주 발생하지 않는다. 또한 기존의 Lim과 Lee^[4]의 연구에서는 위의 각각에 대한 두께면 형상을 생성시키도록 일일이 프로그램을 나누어 작성한 것에 비하면 우리의 방법은 보다 일반적인 알고리즘에 근거한 것이므로 더 개발이 용이하다고 할 수 있다.

7. 결 론

본 논문에서는 일반적인 비다양체 육섯 작업을 바탕으로 육섯 솔리드의 두께면에 롤드 곡면을 적용시키고, 육섯 과정에서 사용되는 불리언 합집합 작업의 계산 시간을 감소시키기 위해 위상 정보를 이용한 교차 계산의 알고리즘을 개발함으로써 박판 모델로부터 실용적인 얇은 두께의 솔리드 모델을 효율적으로 생성시키는 방법을 개발하였다.

(1) 기존의 일반적인 비다양체 육섯 방법은 육섯의 수학적 정의에 따라 두께면이 판상 곡면을 갖는 육섯 모델을 생성하였다. 그러나 이는 실제 제품의 형상에서는 많이 나타나지 않는 모델이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 두께면의 형상이 롤드 곡면이 되도록 알고리즘을 수정하였다. 그런데, 이 롤드 곡면을 사용하면 두께면 상에 구멍이 발생하는 문제점이 있으므로 이를 방지하기 위해 본 논문에서는 가능한한 구멍을 자동으로 찾아 막아 주는 알고리즘을 개발하였다. 만일 본 논문의 알고리즘으로 메워지지 않는 구멍이 있다면 이를 사용자가

대화식으로 작업할 수 있는 환경을 조성하였다.

(2) 비다양체 읍셋 과정에서는 내부에서 불리안 합작업을 사용하는데 여기에는 면과 면사이의 교차 계산이 필수적이다. 기존의 방법에서는 면에 대한 트림 곡면을 구하여 이들간의 교차계산을 하는 방식을 사용하고 있다. 이러한 방식은 많은 계산 시간을 소모할 뿐만 아니라 의외로 접하는 경우가 많이 발생하기 때문에 교차 곡선 결과에 대한 수치 정밀도와 시스템의 안정성에도 좋지않은 영향을 끼치게 된다. 따라서 본 논문에서는 박판 모델의 각 위상 요소들의 읍셋 모델을 불리안 합집합 작업으로 합칠 때, 인접한 위상 요소의 읍셋 모델간에는 서로 교차가 없는 경우, 원래 모델의 위상 요소들 간의 인접 정보를 이용하여 인접한 읍셋 면의 경계 모서리나 꼭지점을 찾게 함으로써 불리안 작업 시간의 단축뿐만 아니라, 수치 오차의 발생을 억제하고 시스템의 안정성을 높이도록 하였다.

이상에서 언급한 바와 같이 본 논문에서 개발한 방법을 사용하면 더욱 효율적인 박판에서 솔리드 모델로의 변환이 가능하며, 이를 플라스틱 사출 제품이나 프레스 성형 제품의 설계에 폭넓게 응용될 수 있으리라 생각된다. 그러나 현재의 알고리즘에서는 두께면에 발생할 수 있는 모든 구멍들을 완전히 자동으로 제거할 수는 없으며, 다양한 곡면 모델에 대한 실험을 누락하였기 때문에 향후 이에 대한 연구와 보완이 필요하다고 본다.

참고문헌

1. Crocker, G. A. and Reinke, W. F., "An Editable Non-manifold Boundary Representation," *IEEE Computer Graphics & Applications*, March, 1991.
2. Forsyth, M., "Shelling and Offsetting Bodies," *Proceedings of Third Symposium on Solid Modeling and Applications*, Salt Lake City, Utah, USA, pp. 373-381, May 17-19, 1995.
3. 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.
4. Lim, H. S. and Lee, K., "Efficient Solid Modeling via Sheet Modeling," *Computer Aided Design*, Vol. 27, No. 4, pp. 255-262, 1995.
5. Masuda, H., "Topological operators and Boolean operations for complex-based non-manifold geometric models," *Computer Aided Design*, Vol. 25, No. 2, pp. 119-129, 1993.
6. Stroud, I., "Modeling with Degenerate Objects," *Computer Aided Design*, Vol. 22, No. 6, pp. 344-321, 1990.
7. 권병욱, 이진우, "플라스틱 제품의 효율적인 모델링 기법," 대한기계학회 논문집, 제15권, 제5호, pp. 1503-1511, 1991.
8. 김성환, 이진우, 김영진, "비다양체 모델을 수용하는 CAD 시스템 커널을 위한 불리안 조작의 개발", 한국 CAD/CAM학회 논문집, 제1권, 제1호, pp. 20-32, 1996.
9. 이상현, 이진우, "비다양체 형상 모델링을 위한 간결한 경계 표현 및 확장된 오일러 작업자," 한국CAD/CAM학회 논문집, 제1권, 제1호, pp. 1-19, 1996.
10. 이상현, "사출 성형제품의 설계 및 해석의 통합환경을 제공하기 위한 특징 형상 기반 비다양체 모델링 시스템의 개발," 한국CAD/CAM학회 논문집, 제1권, 제2호, pp. 133-149, 1996.
11. 이상현, 이진우, "비다양체 위상 표현을 바탕으로 한 박판 형상 모델링 및 솔리드로의 변환," 한국 정밀 공학회지, 제13권, 제7호, pp. 100-113, 1996.
12. 이상현, "비다양체 모델의 읍셋 기능 개발," 한국 CAD/CAM 학회 논문집, 제 3권, 제 1호, pp. 1-14, 1998.
13. Spatial Technology, Inc., *ACIS Optional Husks 5.0*, pp. 9-1-9-7, 1999.
14. Lee, S. H., "Offsetting Operations on Non-manifold Boundary Representation Models with Simple Geometry," *proceedings of the Fifth ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*, Ann Arbor, Michigan, pp. 42-53, June 9-11, 1999.

김 현 수

1998년 국민대학교 기계설계학과 학사
2000년 국민대학교 기계설계학과 석사
2000년-현재 삼성 SDS 근무
관심분야: Solid Modeling, CAD/PDM

이 상 현

1986년 서울대학교 기계설계학과 학사
1988년 서울대학교 기계설계학과 석사
1993년 서울대학교 기계설계학과 박사
1993년-1995년 신도리코 기술연구소 책임 연구원
1996년-현재 국민대학교 기계-자동차공학부 조교수
관심분야: CAD/CAM, Geometric Modeling, Reverse Engineering