

# 개방형 구조를 갖는 복합다양체 모델러에서의 불리안 작업

김 재동\*, 한 순흥\*\*

\* 한국과학기술원 자동화 및 설계공학과

\*\* 한국과학기술원 기계공학과

**Keywords** : 복합다양체 형상모델링, 불리안 작업, 병합과 선택, 개방형 구조

## 1. 머리말

형상모델링(Geometric Modeling)은 컴퓨터 기술의 발전과 더불어 실제 3차원 물체를 정확하게 표현하려는 형태로 발전하였다. 와이어프레임 모델링(Wireframe Modeling) 기술은 3차원 형상을 빠르게 모델링하고 이로부터 치수 기입이 된 정확한 2차원 도면의 생성을 가능하게 하였다[1]. 그러나, 면을 표현할 수 없기 때문에 모델의 표현이 모호해질 수 있다. 1960년대에 자유곡면의 가공을 위해 개발된 곡면 모델링(Surface Modeling) 기법은 NC 가공과 컴퓨터를 이용한 금형의 제작을 가능하게 했고, 와이어프레임 모델링보다는 더 상세하게 모델을 표현할 수 있게 되었다. 그러나, 볼륨을 표현하지 못하기 때문에 완벽한 3차원 형상 표현이라고는 할 수 없다. 1970년대에 개발되어 현재 거의 모든 범용 CAD 시스템들이 제공하고 있는 솔리드 모델링(Solid Modeling) 기법은 위 2가지의 기법과는 달리 완전한 기하학적 형상을 표현할 수 있다.

위 3가지의 모델링 기법은 주로 가공 단계의 최종 형상에 중점을 둔 방식들이다. 그러나, 설계의 관점에서 보면 이런 3가지의 모델링 기법들이 공존하는 구조를 갖는 것이 편리할 때가 많다. 1980년대 중반에 개발된 복합다양체 모델링(Non-manifold Modeling) 기법은 솔리드, 곡면 및 와이어프레임을 하나의 데이터 구조안에 표현하여 이런 요구들을 수용할 수 있게 하였다.

솔리드 모델링에서 단순한 기본요소들을 이용하여 복잡한 형상을 만드는 불리안 작업(Boolean Operation)은 모델링 작업의 기본이 되는 중요한 작업중의 하나이다. 복합다양체 모델러에서도 일반 솔리드 모델러에서와 마찬가지로 불리안 작업은 기본이 되는 중요한 작업이다. 본 연구의 목적은 개방형 구조를 갖는 복합다양체 모델러에서의 불리안 작업을 구현하고 이의 결과를 가시화 하는데 있으며 개략적인 개방형 형상모델링 시스템은 Fig.1과 같다[2].

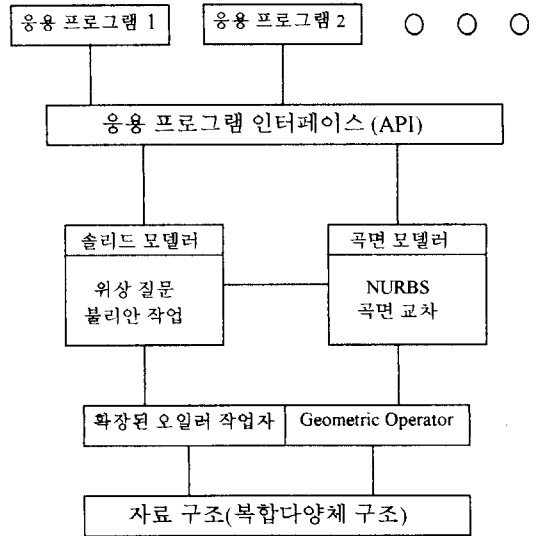


Fig. 1 개방형 구조를 갖는 형상모델러의 개략도

이 글에서는 다음과 같은 범위에 대하여 연구해온 내용을 소개한다.

(1) 복합다양체 모델러에서의 불리안 작업

복합다양체 자료구조로는 이 상현[3]의 부분면 자료구조를 사용하고 오일러 작업자는 명 세현[4]의 오일러 작업자를 수정하여 사용하였다. 그리고 본 연구에서는 다면체(Polyhedra)간의 불리안 작업만을 다룬다.

(2) 응용 프로그램 인터페이스

개방형 형상모델러란 자료구조가 개방되어 있고 표준화된 범용 인터페이스가 제공되어, 이를 바탕으로 독립적인 응용 시스템을 쉽게 개발할 수 있도록 설계된 형상모델러를 말한다. 상업용 개방형 형상모델링 시스템 커널로는 ACIS, DESIGNBASE, CV-DORS 등이 있다.

(3) 가시화

실제 모델의 구현을 위해 OpenGL이라는 그래픽스 라이브러리를 사용하여 형상모델을 가시화 한다.

2. 복합다양체 모델링

2.1 복합다양체 정의

다양체란 일반적으로 2차원 다양체(2-manifold)를 말하며, 한 곡면상의 모든 점들이 2차원임을 의미한다. 즉, 모든 점들이 2차원 디스크에 동상인(Homeomorphic) 이웃(Neighborhood)을 갖는다. 복합다양체(Non-manifold) 모델의 적당한 수학적 정의는 3차원 유클리드 공간의 부분집합인 포복체(cell complexes)이다. 이렇게 포복체

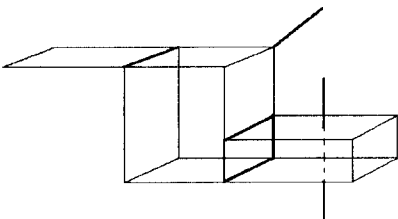


Fig. 2 복합다양체 모델

로 정의된 모델을 포복체 기반(complex-based) 복합다양체 형상 모델이라 하며[5,6], Fig. 2는 복합다양체 모델의 예를 나타낸다.

2.2 복합다양체 모델링의 필요성

기존의 솔리드 모델링 기법들이 주로 최종 형상물의 완벽한 표현에 중점을 두어 개발되었기 때문에 발생하는 설계상의 불편한 점이 있다. 이러한 문제점들의 해결과 FEM 요소 생성같은 응용 분야에서의 효율성을 위해 복합다양체 모델링은 1980년대 중반에 개발되었다. 복합다양체 모델링은 와이어프레임, 곡면 및 솔리드 모델링을 하나의 자료구조에서 통합된 표현 방식으로 지원한다. 따라서, 설계의 모든 과정에서 위 3가지의 구분없이 자연스러운 설계를 할 수 있다. 또한, 복합 재료를 이용한 설계같은 다른 재료를 접합한 부품 설계의 경우에, 내부 경계면을 포함한 설계를 할 수 있다.

일반적으로 불리안 작업은 다양체 표현에서는 달혀있지 않다. 즉, 다양체들로 불리안 연산을 수행하여도 결과는 복합다양체가 될 수 있다. 그러나, 복합다양체 표현에서는 불리안 작업이 달혀있으므로, 불리안 작업의 복합다양체 표현은 바람직하다.

2.3 부분면 자료구조와 오일러 작업자

복합다양체 모델을 표현하기 위한 자료구조로는 이상현[3]의 부분면 자료구조를 사용하였다. 이는 Weiler[7]의 Radial Edge 자료구조나 Choi[8]의 Vertex-based 자료구조에 비해 저장 데이터가 간결한 특징이 있고, 본 연구에서 사용한 오일러 작업자[4]와의 일관성을 위해 복합다양체 자료구조로서 선택하였다.

본 연구에서 사용된 부분면 자료구조의 위상요소들은 크게 기본적인 위상요소들과 부분위상요소들로 구분된다. 기본적인 위상요소들은 모델, 영역, 면, 모서리, 꼭지점과, 면과 영역에대한 방향성을 나타내는 루프와 셀로 구성된다. 부분위상요소들은 기본적인 위상요소들 간의 인접관계를 나타내기 위해 사용되는데, 이에는 부분면, 부분모서리, 부분꼭지점이 있다. Fig. 3은 부분면 자료구조를 나타낸다.

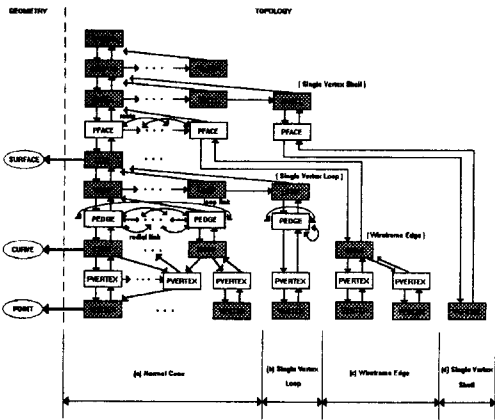


Fig. 3 부분면 자료구조

기본적인 작업자

이름	설명
mvC / kvC	Make Vertex, Complex / Kill Vertex, Complex
mve / kve	Make Vertex, Edge / Kill Vertex, Edge
meCh / keCh	Make Edge, Complex hole / Kill Edge, Complex hole
mfkCh / kfmCh	Make Face, Kill Complex hole / Kill Face, Make Complex hole
mvr / kvr	Make Vertex, Ring / Kill Vertex, Ring
mfcC / kfC	Make Face, Complex cavity / Kill Face, Complex cavity
mVkC / kVmCc	Make Vertex, Kill Complex cavity / Kill Vertex, Make Complex cavity
mvVc / kvVc	Make Vertex, Volume cavity / Kill Vertex, Volume cavity
meVh / keVh	Make Edge, Volume hole / Kill Edge, Volume hole

부가적인 작업자

이름	설명
mnr / kmr	Make Model, Region / Kill Model, Region

Table. 1 오일러 작업자들

오일러 작업자는 자료구조에 직접 접근하여 형상을 조작하는 가장 낮은 차원의 작업자이다. 본 연구에서 사용한 복합다양체의 오일러 작업자는 기본적인 작업자 9쌍(18개)과 부가적인 작업자 1쌍(2개)으로 구성되어 있으며, Table. 1은 이 오일러 작업자들을 정리한 것이다.

3. 복합다양체 모델링에서의 불리안 작업

3.1 불리안 작업

불리안 작업(Boolean Operation)이란 기본형상들을 이용하여 이들의 합집합(Union), 교집합(Intersection), 차집합(Difference)을 수행하여 원하는 형상을 얻는 작업이다. 불리안 작업은 단순한 기본형상으로부터 복잡한 형상을 쉽게 만들수 있게 해준다. 또한, NC tool의 시뮬레이

션(Simulation), 로봇의 경로 계획(Path Planning) 같은 공간 현상을 연구하는데 불리안 작업이 이용된다.

3.2 관련 연구

현재 복합다양체 모델링에서는 경계 평가의 알고리즘으로 병합과 선택(Merge and Select)을 많이 사용하고 있다. 개념적으로 병합 과정은 작업 순서와는 상관없이 교차 결과물을 만드는 것이고, 선택 과정은 병합 결과물을 가지고 직접적으로 불리안 작업을 적용시키는 과정이다. 이 병합과 선택의 개념을 적용한 불리안 작업들에 대한 연구를 살펴보면 아래와 같다.

(1) Weiler[12]는 2D 경계 평가의 병합과 선택 알고리즘을 제안했다. 이 알고리즘은 일련의 다각형을 하나의 그래프 구조(2D 경계 표현)로 병합하고, 원하는 불리안 작업들을 이 그래프 구조로부터 선택을 한다.

(2) Crocker와 Reinke[11]는 Weiler의 알고리즘을 3D 경계 평가의 병합과 선택으로 확장시켰다. 여기서는 3D 기본요소들을 하나의 병합 집합으로(Merged Set) 병합을 하고 불리안 결과는 선택 과정으로 얻는다. 이 알고리즘의 병합과 선택의 과정을 순서대로 설명하면 아래와 같다. 여기서 ①, ②, ③ 과정은 병합(Merge)에 해당하고 ④ 과정은 선택(Select)에 해당한다.

① 교차(Intersection)

병합 집합과 기본물체 사이의 교차 계산을 수행한다.

② 위상 생성(Topological Construction)

병합 집합에서 기본요소의 꼭지점, 모서리 및 면을 생성한다. 교차 결과는 이미 교차 과정에서 생성했기 때문에 다시 위상 생성을 할 필요는 없다.

③ 분류(Classification)

입력 기본요소들에 상응하는 병합 집합 요소들의 in/out/on 분류를 행하고, 이력(history) 메커니즘을 사용하여 저장한다.

④ 선택(Selection)

요구되는 불리안 작업의 결과에 해당하는 위상 요소들을 선택한다. 불리안 선택은 참여의 결정을 위해 엔터티(entity)의 이력과 CSG 트리를 사용한다.

(3) Gursoz, Choi와 Prinz[13]는 병합체(Merged Object)를 얻은 후에 선택 작업으로 불리안 작업을 수행하는데 이 과정은 아래와 같다.

① 교차 계산(Intersection Computation)

일치하는 기본요소들을 인식하여 교차의 결과로써 새로운 기본요소들을 생성한다.

② 물체들의 병합(Merging of Objects)

두 물체들이 하나의 병합체로 병합된다.

③ 솔리드들의 재분할(Repartitioning of Solids)

공간을 볼륨을 갖는 영역(Volumetric Regions)으로 분류를 한다.

④ 불리안 작업(Boolean Operations)

병합체에서 적당한 형상 기본요소들을 선택하여 불리안 작업의 결과물을 얻어낸다.

(4) Masuda[5]는 불리안 작업을 병합 작업(Merging Operation)과 추출 작업(Extracting Operation)으로 나누어 수행하였다. Masuda는 B-rep 모델을 재작업(reworking) 하는 과정으로 취소(cancel) 작업을 이용하는 방법을 선택하여, 복잡한 물체의 대화식 모델링에 중점을 두었다.

① 병합 작업

작업 순서에 독립적인 작업으로 병합 작업의 결과는 병합체이다. 대상물의 교차를 계산하고 위상구조를 수정한다.

② 추출 작업

작업 순서에 의존적인 작업으로 불리안 작업의 결과물(Resultant object)이 구해진 시스템은 결과물과 일치하는 위상요소들을 병합체로부터 추출하고 그들을 표시한다.

(5) Lee와 Kim[14,15]은 병합(Merge)과정으로 얻어진 병합체(Merged Set)로부터 선택(Selection)을 하여 불리안 작업을 행한다. 다음의 ① - ⑤의 과정은 병합 과정에 해당되고 ⑥은 선택 과정이다.

① 교차계산(Intersection)

기본물체를 복사하여 복사체를 만드는 작업이 선행되고, 병합체와 복사체의 위상요소들 간의 교차계산을 수행한다.

② 교차결과로부터 위상요소 생성하기

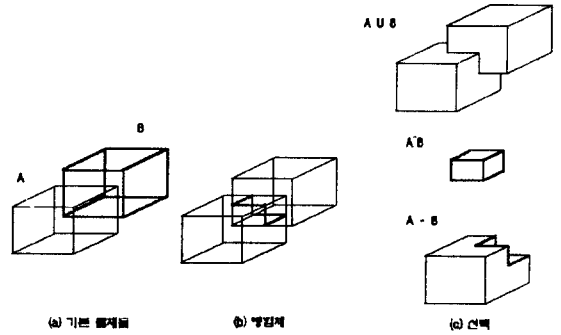


Fig. 4 병합과 선택

교차점은 꼭지점, 교차선은 모서리로 병합체와 복사체에 각각 생성시킨다. 그리고 이 꼭지점과 모서리 생성시 연혁표식(Ownership)을 결정해 준다.

③ 그룹화 작업(Grouping)

병합체나 복사체의 위상요소들을 교점, 교선 또는 겹친 면을 넘어서는 안될 경계로 삼았을 때, 서로 연결되어 있는 위상요소의 덩어리들을 찾아내는 작업이다.

④ 기본물체의 복사체로부터 병합체로 위상요소 복사 기본물체의 요소중 아직 병합체쪽에 복사되지 않은 것들은 그 대응요소를 병합체에 복사한다.

⑤ 병합체의 요소중 대응관계가 없는 위상요소들의 연혁표식 수정

병합체의 요소중 대응관계가 없는, 즉 기본물체에 의하여 변형이 되지 않는, 위상요소들의 연혁표식을 수정한다.

⑥ 선택(Selection)

원하는 불리안 작업 결과물을 선택하여 결과를 얻는다.

4. 병합과 선택

관련 연구에서 보듯이 약간의 차이는 있지만 복합다양체 모델링에서의 불리안 작업은, 공통적으로 병합과 선택의 개념을 사용했다는 것을 알수 있다. 이는 기존의 솔리드 모델러에서 사용한 경계 평가 과정과 비교하여 보면, 불리안 작업의 수정이 용이하고 일단 병합체를 구하면 불리안 결과를 얻는데 걸리는 시간을 많이 단축시킬 수 있다. 따라서, 본 연구에서도 병합과 선택의 개념을 적용하여 불리안 작업을 수행하려 하며, Fig. 4는 이 병합과 선택의 과정을 나타낸다.

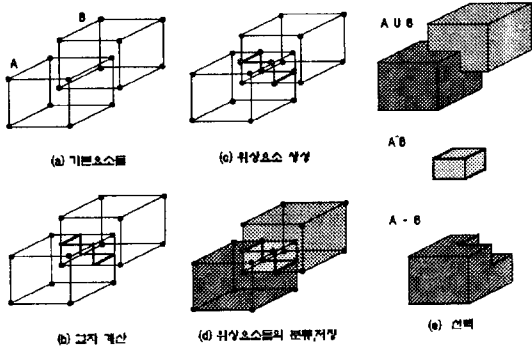


Fig. 5 본 연구의 불리안 작업

#### 4.1 본 연구에서의 불리안 작업

본 연구에서는 교차 계산을 행한후에 이 결과로 생기는 새로운 위상요소들을 생성시키고, 각각의 생성된 위상요소들과 기본물체의 위상요소들의 정보를 분류하고 저장한 후에, 최종적으로 선택을 하여 불리안 작업을 완성시킨다. Fig. 5는 본 연구의 병합과 선택의 개략적인 그림을 보여주며, 이를 정리하면 아래와 같다. 여기서 ①~③은 병합 과정이고 ④는 선택 과정이다.

- ① 교차계산
- ② 교차위상요소 생성
- ③ 위상요소들의 분류와 저장
- ④ 선택

#### 4.2 병합

병합 과정은 교차계산, 교차위상요소 생성, 위상요소들의 분류, 저장의 순서로 이루어진다. 우선 기본물체의 복사체를 만들어 불리안 작업의 재작업시 취소작업에 이용하기위해 기본물체의 정보를 보존한다.

##### (1)교차계산

병합체와 기본물체의 복사체 사이의 교차계산을 수행한다. 꼭지점, 모서리 및 면들 사이의 교차계산으로 교차점, 교차곡선, 겹친 면들을 구한다.

##### (2) 교차위상요소 생성

교차계산으로 얻은 교차요소들의 위상요소를 생성한다. 교차점은 꼭지점으로 교차곡선은 모서리로, 교차면들은 겹친면들로 병합체와 복사체에 각각 생성시킨다. 또한,

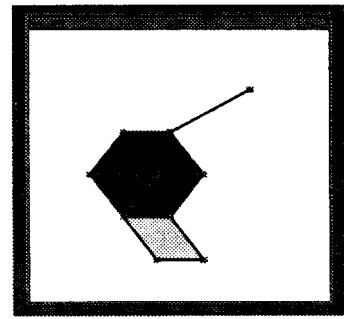


Fig. 6 복합다양체 모델링의 예

병합체와 복사체에 각각 생성된 교차위상요소들중에, 같은 요소들끼리의 동일 관계를 교차 상대(Intersection Partner)로 표시해준다. 따라서 교차결과로 생성된 복사체의 위상요소를 병합체에서 쉽게 파악할 수 있고, 이 관계를 이용하여 다음 단계의 분류 작업을 쉽게 할 수 있다.

##### (3) 위상요소들의 분류와 저장

이 과정은 다음과 같이 3가지의 단계로 나누어진다.

##### ① 기본물체만의 위상요소 복사

기본물체의 위상요소들중 병합체에 복사되지 않은 위상요소들을 분류하여, 기본물체 상대(Primitive Partner)를 표시하여 병합체에 복사한다. 이렇게 기본물체 상대를 표시하여 분류과정에 걸리는 시간을 줄일 수 있다.

##### ② 병합체만의 위상요소 복사

병합체에서 교차나 기본물체로 부터 복사되지 않고 남아있는 병합체만의 위상요소들을 분류하여 병합체 상대(Merged Partner)를 병합체에 기록한다.

##### ③ 분류

교차 상대(Intersection Partner), 기본물체 상대(Primitive Partner), 병합체 상대(Merged Partner)로부터 분류가 행해진다. 즉, 이들을 이력(History Record)에 각각 기록하게 되며, 선택 과정을 통해 각각의 불리안 작업을 수행할 수 있도록 분류되는 것이다.

#### 4.3 선택

병합 과정으로 병합체가 얻어지면 앞의 (3) 과정에서 분류된 방식으로 불리안 작업을 적용시켜, 원하는 불리안 작업을 선택 과정으로 얻을 수 있다. Fig. 6은 복합다양체 상황을 모델링한 간단한 예를 보여준다. 이 과정은 불

리안 작업의 간단한 예로 오일러 작업자를 이용하여 위 상요소들을 생성시키고 가시화를 하여 구해진 것이다.

## 5. 맺음말

이 글에서는 평면으로만 구성된 다면체들 간의 불리안 작업을, 복합다양체 자료구조를 기반으로 병합과 선택의 알고리즘으로 연구하였다. 기존의 솔리드 모델러에서의 경계 평가 방식이 모델의 복잡도에 비례하여 시간이 걸리는 반면, 이 병합과 선택의 경계 평가 방식은 병합 집합과 기본요소간의 교차수에 비례하여 작업시간이 결정되기 때문에, 빠르게 불리안 작업을 행할 수 있다. 또한, 기존의 경계 평가에서는 불리안 작업의 변화, 기본요소들의 이동같은 모델링 편집 작업시 모델의 완벽한 재평가가 필요하지만, 병합과 선택에서는 이런 시간이 거의 필요없다.

## 참고 문헌

[1] 최 영, "솔리드 모델링과 Non-manifold 모델링", CAD & Graphics, 1993. 12, pp. 220 - 227  
[2] 한 순홍, 외, "개방형 구조를 갖는 객체지향적 형상 모델러의 개발", 한국과학재단 특정연구과제 1차 중간 보고서, 1994. 8  
[3] 이 상헌, "사출성형 제품의 설계 및 해석의 통합환경을 제공하기 위한 특징형상 기반 비다양체 모델링 시스템의 개발", 서울대학교 기계설계학과 박사학위논문, 1993. 8  
[4] 명 세현, "복합다양체 자료구조를 갖는 형상모델러에서 오일러 작업자의 구현", 한국과학기술원 자동화 및 설계공학과 석사학위논문, 1995. 2  
[5] H. Masuda, "Topological operators and Boolean operations for complex-based nonmanifold geometric models", CAD volume 25, 1993. 2, pp. 119 - 129  
[6] Hiroshi Masuda, Kenji Shimada, Masayuki Numao, Shinji Kawabe, "A mathematical theory and applications of Non-manifold geometric modeling", Advanced Geometric Modeling for Engineering Application, 1990, pp. 89 - 103  
[7] Kevin Weiler, "The radial edge structure: A topological representation for non-manifold geometric boundary modeling", Geometric modeling for CAD applications, 1988, pp. 3 - 36

[8] Y. Choi, "Vertex-based boundary representation of non-manifold geometric models", PhD, thesis Department of Mechanical Engineering, Carnegie Mellon University, 1989. 8

[9] Martti Mantyla, "Boolean Operations of 2-Manifolds through Vertex Neighborhood Classification", ACM Transactions on Graphics, Vol. 5, No. 1, 1986. 1, pp. 1 - 29

[10] W. F. Bronsvoort, "Boundary evaluation and direct display of CSG models", CAD, Vol. 20, No. 7, 1988. 9, pp. 416 - 419

[11] Gary A. Crocker, William F. Reinke, "An editable nonmanifold boundary representation", IEEE Computer Graphics & Applications, 1991.3, pp. 39 - 51

[12] K. J. Weiler, "Polygon comparison using a graph representation", Computer Graphics (Proc. Siggraph), Vol. 14, No. 3, 1980. 7, pp. 10 - 18

[13] E. Levent Gurses, Young Choi, Friedrich B. Prinz, "Boolean set operations on non-manifold boundary representation objects", CAD, Vol.23, No.1, 1991. 1, pp. 33 - 39

[14] 김 성환, 이 건우 외, "설계 자동화 기술", 3차년도 연차 보고서, 과학 기술처, 1995. 10

[15] 김 성환, 이 건우, 김 영진, "비다양체 모델을 수용하는 CAD 시스템 커널을 위한 불리안 조작의 개발", 한국 CAD/CAM 학회 논문집, 1996. 3, pp. 20 - 32