

## 복합다양체 솔리드 표현을 위한 경계정보의 분류

최국헌\*, 한순홍\*\*

### Classification of Boundary Information for Non-manifold B-rep Solid Modeler

Guk-heon Choi\* and Soon-Hung Han\*\*

#### ABSTRACT

Existing data structures for non-manifold solid modelers use basic data entities, such as vertex, edge, loop, face, shell, and region to find adjacency relationships. But, no one clearly identified what additional types of data entities are necessary to represent incidence relationships. In this paper, we classified the boundary information of vertex, edge, face, and region from the 3-D space view. As the results we can clearly define the boundary information required for adjacency relationships. The existing B-rep data structures for solid modeler are compared whether they have the required boundary information.

**Key words :** B-rep, Boundary Information, Non-manifold

#### 1. 솔리드 표현을 위한 인접 경계 정보에 대한 기존의 연구

솔리드 모델러 자료구조의 설계는 그 모델러의 사용 용도에 따라 저장하여야할 정보의 범위를 선정하여야 한다. 그러기 위해서는 먼저 저장 되어야할 정보의 종류를 알아야 하는 데, 그것은 크게 Weiler에 의한 인접(adjacent) 위상 정보의 개념에 의한 방식<sup>[1,2]</sup>과, 이를 요약한 Yamaguchi의 이웃관계 표현과 경계 정보를 이용한 방식<sup>[3,4]</sup>을 들 수 있다.

Weiler의 검토 방식은 최 영<sup>[5,6]</sup>, 이상현<sup>[7,8]</sup>의 논문에서도 채택되고 있는 방식으로, 정보의 종류를 정의하기 위해 먼저 기본(basic) 위상요소를 선택하고, 이들 기본 위상요소들 상호 간의 물리적인 인접관계의 검토에 중점을 두고 있다. 영역(Region), 셸(Shell), 면(Face), 루프(Loop), 모서리(Edge), 꼭지점(Vertex) 6개의 기본 위상요소를 선택하고, Table 1과 같이 이들의 물리적인 인접관계인  $6 \times 6 = 36$ 개의 인접 정보의 종류를 분류하였다. 그러나 Weiler의 검토

방법은 몇 가지 문제점을 포함하고 있는 데, 우선 기본 위상요소의 선정 기준이 명확하지 않다는 것이다. 예를 들어, 영역의 경계인 셸과, 면의 경계인 루프는 기본 위상요소에 포함되었으면서, 또 다른 요소인 모서리와 꼭지점의 경계 요소가 기본 위상요소에서 누락된 이유에 대한 설명이 불명확하다. 또한 그는 이미 알려진 기본 위상요소 이외에 또 다른 기본 위상요소의 존재 여부에 대한 명확한 해답을 제시하지 못하고 있다.

한편, Yamaguchi 등은 각각 0-cell, 1-cell, 2-cell, 3-cell에 해당하는 꼭지점, 모서리, 면, 그리고 영역을 기본 위상요소(Primitive entities)라 분류하고, Fig. 1과 같이 이들의 중심점에서 미소 반경(infinitesimal radius)를 가지는 구를 생각하였다. 그는 이 미소 구(ball)가 기본 위상요소와 갖는 교차 관계를 이웃(Neighborhood)라 정의하고, 이 이웃 정보를 표현하기 위하여 Table 2와 같이 end, fan, corner, blade, wedge, side라는 연결 위상요소(coupling entities)를 정의하였다. 그리하여 기본 위상요소의 이웃 정보는 이들 연결 위상정보를 이용하면 표현할 수 있다고 하였다. 그는 또, 경계 위상정보(Bounding entities)인 셸(영역의 경계), 루프(면의 경계), 그리고 디스크(꼭

\*정회원, 동서울대학 금형설계과

\*\*중심회원, 한국과학기술원 기계공학과

Table 1. Adjacent relationship information for non-manifold modeler

Basic element type	Adjacent group element type					
	Vertices	Edges	Loops	Faces	Shells	Regions
Vertex	V{V}	V{E}	V{L}	V{F}	V{S}	V{R}
Edge	E{V}2	E{<E>}	E{<L>}	E{<F>}	E{<S>}	E{<R>}
Loop	L{<V>}2	L{<E>}2	L{<<L>>}2	L{F}1	L{S}2	L{R}
Face	F{<<V>>}2	F{<<E>>}2	F{L}	F{<<F>>}2	F{S}2	F{R}
Shell	S{V}	S{E}	S{L}	S{F}	S{S}	S{R}
Region	R{V}	R{E}	R{L}	R{F}	R{S}	R{R}

Notations:

- { } Linear Group
- [ ] Unordered Group
- < > Circular Ordered Group

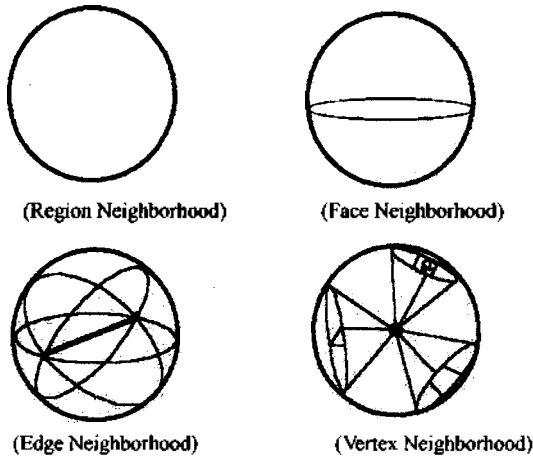


Fig. 1. Neighborhood of primitive entitutes [3,4].

지점의 경계)를 정의하고, 복합다양체 모델을 표현하기 위하여서는 기본 위상요소의 이웃 관계와 이들 경계 위상정보를 이용하면 된다고 하였다. 이러한 그의 연구는 Weiler의 36개의 정보를 요약 정리한 것으로 볼 수 있다. 하지만 그의 연구 역시 경계정보에서 모서리에 대한 경계정보가 누락된 이유 등에 대한 설명이 불가능하다.

이와 같이 솔리드 모델의 표현에 필요한 정보의 종류에 대한 기존의 검토는 기반 위상요소나 경계 위상요소의 선정 기준이 체계적이지 않고 직관적이어서, 또 다른 정보의 존재 여부를 명확히 설명할 수 없다.

본 글에서는 기존의 정렬 위상 표현 방식의 경계 표현법을 사용하는 복합 다양체 자료구조 들이 표현하여야할 정보의 종류를 명확히 규정하지 못하고 있기 때문에 이에 대한 해결 방안을 제시하고자 한다. 이를 위하여 기존의 관련 연구들이 채택한 방식인 인접 정보 검토 방식과 달리 경계 정보의 종류에 대

Table 2. Coupling entities [3,4]

	Vertex	Edge	Face	Region
Vertex	-	end	Fan	corner
Edge	end	-	Blade	wedge
Face	fan	blade	-	side
Region	corner	wedge	side	-

한 검토를 수행한다. 이러한 검토를 통해 복합다양체 자료구조가 갖추어야 할 정보의 종류를 명확히 규정하며, 기존의 대표적인 자료구조들이 포함하고 있는 경계 정보의 종류를 비교 분석하였다.

## 2. 복합다양체 모델링의 개요

3차원 CAD 시스템에 있어 모델은 선, 표면, 그리고 솔리드(solid)의 형태로 표현될 수 있다. 이 중 솔리드 모델은 정보 함축(abstract)이 가장 적어 비교적 실물에 가까운 정보를 가지고 있는 가장 현실감 있는 물체 표현 방법이다. 솔리드 모델의 장점은 완전한 솔리드 정보의 보유에 있다. 즉, 솔리드 모델러는 주어진 물체(object)가 진짜 솔리드인지 아닌지를 컴퓨터 내에서 쉽게 판별할 수 있다. 또한 솔리드 모델은 개념 설계 후 가상적으로 목형을 제작함으로써 실물 목형 제작에 드는 시간 및 비용을 줄일 수 있다. 솔리드 모델을 이용하면 다른 표현 방법에서 비교적 처리가 어려웠던 면과 면의 접촉 부분에서의 NC 공구 경로 생성(tool path generation) 등의 쉽게 할 수 있다.

솔리드를 표현하는 수학적 이론은 크게 Point Set 이론과 Algebraic Topology 이론으로 분류될 수 있다. Point Set 이론에 근거한 솔리드 모델 표현 방법의 대표적인 것이 CSG(constructive solid geometry)이며, Algebraic Topology에 근거한 대표적인 솔리드 표현 방법이 경계 표현법(B-rep: boundary

representation)이다. CSG에서는 솔리드를 기본 물체의 불리언 작업에 의하여 표현하며, Tree 형태의 비교적 간단한 자료구조를 보유하고 있다. CSG 표현법에서는 물체의 표면 정보가 명시적(explicit)으로 포함되어 있지 않다. 반면 경계 표현법은 면, 모서리, 꼭지점을 기본으로 하여 구성된 자료구조를 이용하여 표면에 대한 정보를 직접 기술하게 된다. 이 방법을 이용하면 물체의 면에 대한 정보가 명확히 기술할 수 있다.

최근 솔리드를 컴퓨터에 효율적으로 표현하고자 하는 여러 형태의 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>19,21</sup>. 이러한 연구는 완전한 솔리드를 표현하는 단계에서 나아가 여러 차원의 물체, 예를 들어 0차원 물체인 독립된 꼭지점, 1차원 물체인 와이어프레임 모서리, 2차원 물체인 면, 그리고 3차원 물체를 하나의 통합된 자료구조에서 표현하고자 하는 연구가 진행되어 왔으며, 상업용 모델러에서도 이러한 자료구조를 채택하기 시작하고 있는 단계에 있다. 이와 같이 여러 차원의 물체를 하나의 통합된 자료구조에 표현하는 모델러를 복합다양체(non-manifold)<sup>13,14</sup>라 한다. 복합다양체 모델은 CAD 시스템의 모델링 작업에서 자유도를 확장함으로써, 설계의 초기 단계에서 완료 단계에 이르는 전문가 뿐만 아니라 설계 해석 등 필요한 여러 분야에, 동일한 모델링 데이터와 자료구조를 사용할 수 있는 장점이 있다.

한편, Cell Complex는 수학적으로  $n$ -cell들의 집합들로서 정의된다<sup>15</sup>. 이  $n$ -cell은  $n$ -차원의 open sphere에 homeomorphic한 3D Euclidean space 내의 경계를 가진 부분집합(bounded subset)이다. 3-D cell complex는 0-cell, 1-cell, 2-cell, 그리고 3-cell의 집합으로 표현할 수 있다. 형상모델링에서 0-cell은 꼭지점, 1-cell은 모서리, 2-cell은 면, 3-cell은 일정한 체적을 가진 영역을 말한다.

Fig. 2는 경계 표현법을 사용한 형상 모델러의 개략적인 구조를 보여준다. 형상 모델러는 자료구조를 바탕으로 이를 조작하기 위한 오일러 작업자 및 불리언 작업자 등 위상 작업자와 형상 작업자가 있다. 그 위에 솔리드 모델러, 표면 모델러, 와이어프레임 모델러가 구축되며, 이들 위에 응용 프로그램 인터페이스가 구축된다. 솔리드 모델을 표현하기 위한 B-Rep의 자료구조는 크게 인접 그래프(incidence graph)방법과 정렬 위상 표현(ordered topological representation)법이 있다. 인접 그래프 방식<sup>16,17</sup>은 그래프(graph) 혹은 하이퍼 그래프(hyper graphs)로써, 일반적으로 노드(node)는 모델링 영역의 각 Cell에 해당하고, Edge는

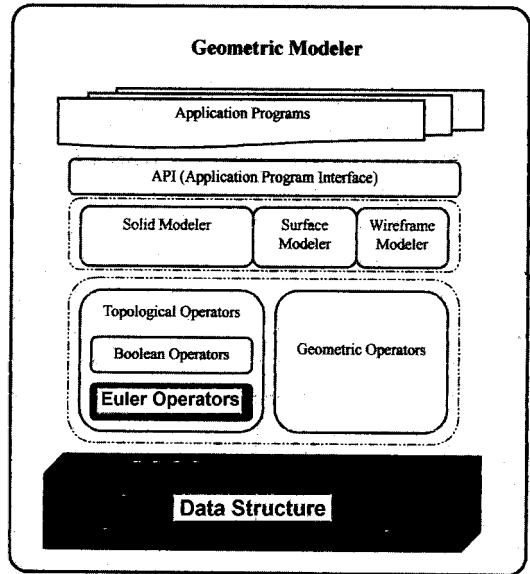


Fig. 2. Schematic of a geometric modeler.

Cell 사이의 인접관계를 만든다. 이러한 인접 그래프 방식은 3차원 이상  $n$ -차원의 표현이 가능한 장점이 있으나, 정렬 위상 표현법에 비하여 자료 저장량이 과다하고 정보의 추출이 비효율적이다. 반면, 정렬 위상 표현법은 자주 사용되는 인접정보를 직접 저장하고, 저장되지 않은 정보는 필요 시 저장된 정보로부터 추출하여 사용한다. 실제 복합 다양체 모델러에서는 효율적인 정보의 저장으로 인하여 정보 추출이 용이한, 정렬 위상 표현법의 자료구조를 대부분 사용하고 있다. 정렬 위상 표현법에 속하는 자료구조로는 Radial-edge<sup>12</sup>, 부분면<sup>15,6</sup>, Cusp 기반<sup>7,8</sup>, Feather 기반<sup>13,4</sup>, 및 ACIS<sup>10</sup> 자료구조 등이 있다.

정렬 위상 표현법에 속하는 복합 다양체 자료구조는 표현 가능한 인접정보에 따라 모서리 기반 자료구조와 꼭지점 기반 자료구조로 세분할 수 있다. 모서리 기반 자료구조는 모서리에 있어서의 인접정보 표현에 중점이 두어진 자료구조로서, Radial-edge, 부분면, 그리고 ACIS 자료구조가 여기에 해당한다. 꼭지점 기반 자료구조는 모서리 뿐만 아니라 꼭지점에 있어서의 인접 정보도 함께 저장하고 있는 자료구조다. 꼭지점 기반 자료구조에 속하는 것으로는 Cusp 기반 자료구조와 Feather 기반 자료구조 등이 있다. 모서리 기반 자료구조는 자료의 저장량이 적은 대신에 꼭지점에 있어서의 복합 다양체 위상 정보가 불충분한 단점이 있다. 반면 꼭지점 기반 자료구조는 모서리와 꼭지점에 있어서 복합 다양체 인접 정보를 충분히 보유하고 있으나 그 결과로 자료의 저장량이

많은 단점이 있다.

### 3. 솔리드 표현을 위한 경계 정보

위상요소의 인접 관계를 검토하기 위해 정보 종류를 파악하는 지금까지 접근 방식은 직관적인 방법으로 체계적인 접근이 미흡하였다. 따라서 추가적인 정보의 존재 여부에 대한 해답을 얻을 수 없었다. 본 절에서는 솔리드의 표현에 필요한 정보의 종류를 명확히 규정하기 위하여 다른 관점 즉, 경계 표현이라는 물체 표현 방식 자체가 가지고 있는 본래의 의미를 충실히 따라, 거기에 맞는 정보의 종류를 검토한다.

3차원 물체의 표현에 필요한 요소는 기본적으로 영역, 면, 선, 그리고 점이므로, Fig. 3에서와 같이 영역, 면, 선, 그리고 점에 대한 경계 정보를 3차원의 관점에서 검토하면, 경계 표현법을 사용하여 물체를 기술하는데 필요한 정보의 종류를 명확히 알 수 있다.

Fig. 3의 (a)에서와 같이 영역은 면의 집합으로 둘러싸인 닫힌 공간에 의하여 그 경계가 구분된다. 영역의 경계는 하나 이상 존재하므로 그 각각의 경계 구성 면의 소속을 명확히 구분하기 위하여 별도의 경계 위상 요소의 도입이 필요하다. 이 영역의 경계에 해당하는 위상 요소를 셸(Shell)이라고 한다. 또한 복합 다량체 모델에 있어 면은 양 측면이 서로 다른 영역에 속하는 것이 일반적이지만 특별한 경우 고립된 면(Dangling face)과 같이 양 측면이 하나의 동일한 영역에 속하는 경우가 있을 수 있기 때문에, 이러한 경우 면의 소속 영역을 명확히 표현하기 위하여, 셸은 면의 양쪽 벽에 해당하는 측면(Side)으로 구성되는 것이 바람직하다. 따라서 영역의 경계는 측면들로 구성되는 셸로서 표현할 수 있다.

Fig. 3의 (b)에서와 같이 3차원의 관점에서 면을 검토하면 우선 면의 법선 방향에 대해 경계가 존재함을 알 수 있는 데 이를 측면(Side)라 한다. 또한 면은 그 크기를 한정짓는 경계 정보를 필요로 한다. 이 경계는 여러 개의 모서리들의 집합으로 구성되며, 하나 이상의 여러 개의 서로 다른 경계가 있을 수 있으므로 이러한 정보를 효율적으로 표현하기 위하여 루프(Loop)의 도입이 필요하다. 즉, 면의 경계를 표현하기 위해서는 측면과 루프가 필요하다.

Fig. 3의 (c)에서와 같이 3차원의 관점에서 모서리를 검토하면 그 경계는 양쪽 끝의 두 경계 꼭지점과 모서리를 둘러싸고 있는 반경이 영(Zero)에 가까운 미소 실린더로 볼 수 있다. 양 끝 꼭지점은 항상 2개만이 존재하므로 관련 정보를 표현하기 위한 별도

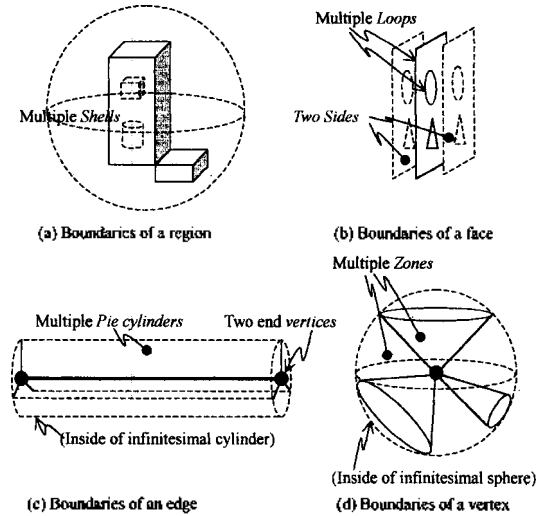


Fig. 3. Boundaries of primitive entities.

위상 요소 도입이 불필요하다. 모서리의 또 다른 경계인 미소 실린더 정보는 각 면의 양쪽 측면과 미소 파이 실린더로 구성됨을 알 수 있다. 그러므로 이 미소 파이 실린더에 대한 정보는 관련 측면에 대한 순환으로 대체하여 표현할 수 있다. 만약 이 미소 파이 실린더 정보를 면에 대한 순환으로 표시하게 되면 고립 면(dangling face)이 붙어 있는 모서리의 경우에 경계 정보를 명확히 찾을 수 없다. 즉, 모서리의 경계 정보 중 하나인 미소 실린더 정보는 그 모서리를 중심으로 하는 일련의 측면(side)에 대한 순환이며, 이 순환을 방사순환(radial cycle)이라 한다. 이 순환은 오직 하나만이 존재하므로 순환 정보를 표현하기 위하여 별도로 위상 요소를 도입할 필요가 없다. 즉, 모서리의 경계 정보는 양끝 꼭지점과 미소 실린더에 대한 정보(방사순환 정보)가 된다.

Fig. 3의 (d)에서와 같이 꼭지점을 3차원의 관점에서 검토하면, 꼭지점은 반경이 영(Zero)인 미소 구를 그 경계로 갖는 것으로 볼 수 있다. 꼭지점 주위의 미소 구의 내부는 면들의 집합으로 둘러싸인 여러 개의 서로 다른 영역으로 구성되며, 이 서로 다른 미소 구 내부의 영역을 전체 모델링 공간의 영역과 구분하기 위하여 존(Zone)이라 한다. 존의 경계는 영역의 경계와 같이 하나 이상의 경계 요소로 구성될 수 있으므로, 이를 표현하기 위한 별도의 위상 요소 디스크(Disk)의 도입이 필요하다. 영역의 경계인 셸과 같이 디스크는 면의 소속 존을 명확히 하기 위하여 측면의 집합으로 구성한다. 즉, 꼭지점의 경계는 여러 개의 존에 대한 정보를 명확히 기술할 수 있으면 된다.

이상의 검토 결과를 종합하면 3차원 물체를 표현하기 위한 경계 정보는, 영역의 경계 표현을 위하여 Shell, 면의 경계를 표현하기 위하여 Loop와 Side, 모서리의 경계를 표현하기 위하여 미소 실린더(방사순환) 정보와 양끝 꼭지점, 꼭지점의 경계 정보 표현을 위하여 존에 대한 정보가 요구됨을 알 수 있다. 거꾸로 솔리드의 표현에는 이외에 별도의 또 다른 경계 정보가 필요하지 않음을 알 수 있다.

4. 기존 B-rep 모델러의 경계 정보 검토

복합 다양체 표현을 위한 경계 정보를 지금까지 제안된 여러 가지 자료구조에 적용하여 검토해 보기로 한다. Fig. 4는 경계 표현법을 이용한 자료구조들의 발전 과정을 경계 정보의 포함 여부의 관점에서 도식화한 것이다. Baumgart가 제안한 Winged-edge 자료구조<sup>[19,20]</sup>는 다양체 물체 표현을 위한 것으로 면의 경계를 2차원의 관점에서 검토한 것이며, 그는 루프라는 별도의 위상요소를 도입하지 않아 하나의 루프로 이루어진 면의 경우만을 표현할 수 있었다. 따라서 그의 자료구조는 좀더 일반적인 관점, 즉 복합 다양체의 관점에서 살펴보면 영역의 경계인 셀, 면의 경계인 루프와 측면, 모서리의 경계인 미소 실린더 정보(방사순환 정보), 꼭지점 경계 정보인 존 정보를 명확히 표현하지 못하고 있다. Mantyla의 Half-edge 자료구조<sup>[21]</sup>는 Fig. 4의 (a)와 같은 다양체 모델로서 Winged-edge 자료구조에 별도의 위상요소인 루프를 추가하여, 여러 개의 루프를 가진 면의 표현이 가능해졌다. 그러나 영역의 경계를 명확히 표현할 수 있는 Shell의 도입이 없었다. Shell의 개념을 명확히 도입하지 않음에 따라 면의 법선 방향의 경계 정보인 측면의 정보 역시 명시적(Explicit)으로 표현하지 않았다. 또한, 모서리에서의 인접 정보인 미소 실린더 정보(방사순환 정보)와 꼭지점에서 경계 정보인 존 정보가 생략되어 있다.

모서리 기반 자료구조로 알려진 Weiler의 Radial-Edge 자료구조는 Fig. 4의 (b)와 같은 자료구조로서 영역의 경계인 Shell, 면의 경계인 루프와 측면, 그리고 모서리에서의 경계 정보인 파이실린더 정보(방사순환 정보)와 양 끝점 정보는 포함하고 있으나, 꼭지점의 경계 정보인 존 정보가 누락되어 있다. 한편 이상현의 부분면 자료구조와 ACIS 자료구조는 위의 모서리 기반 자료구조에 속하지만, 모서리의 경계 정보인 미소 실린더 정보가 면에 대한 순환으로 포함되어 있다. 꼭지점 기반 자료구조로 알려진 최영

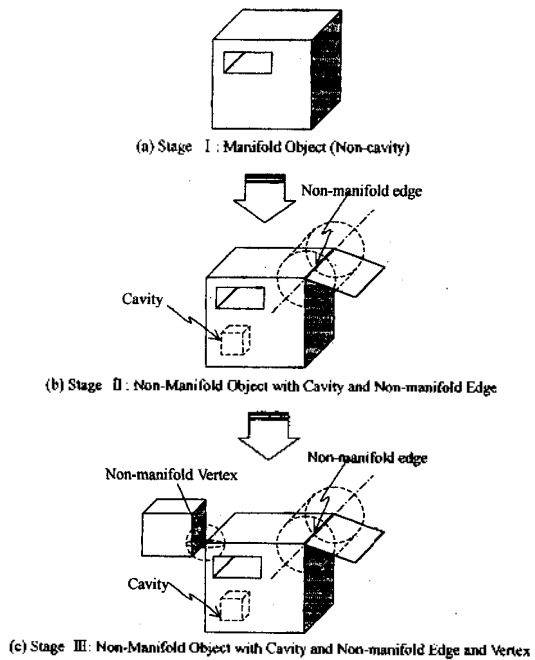


Fig. 4. Representation steps of non-manifold entities.

의 cusp 기반 자료구조, Yamaguchi의 Feather 기반 자료구조, 그리고 최국현의 선택 저장법을 이용한 자료구조<sup>[14]</sup>는, Fig. 4의 (c)와 같은 단계의 자료구조로서 영역, 면, 모서리에서의 경계 정보 뿐만 아니라, 꼭지점에서의 경계 정보인 존 정보를 명확히 포함하고 있다. 따라서 이 부류의 자료구조들은 솔리드의 표현에 필요한 경계 정보를 모두 표현하고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

솔리드 모델의 표현을 위한 정렬 위상 표현법에 속하는 경계 표현법의 자료구조에 대한 기존의 연구는, 저장하여야 할 정보의 종류에 명확한 정의가 결여되어 있다. 즉, 저장하여야 할 위상 정보의 추가적인 존재 여부에 대한 설명이 결여되어 있다. 본 논문에서는 이와 같은 정보의 종류를 경계 정보를 중심으로 상세히 검토하였다. 그 결과 경계 표현법을 이용하여 솔리드를 표현하는 데 필요한 정보는, 영역의 경계인 셀, 면의 경계인 측면과 루프, 모서리의 경계인 양 끝 꼭지점과 미소 실린더 정보(방사순환 정보), 그리고 꼭지점의 경계 정보인 존의 정보임을 확인하였다. 또한 3차원 솔리드의 표현을 위한 정보는 이와 같은 경계 정보를 포함하면 충분하며, 더 이

상의 추가 정보는 필요 없음을 살펴보았다. 마지막으로 이와 같은 경계 정보의 포함 여부를 기존의 슬리드 모델러 자료구조와 대비하여 분석하였다.

**참고문헌**

1. Weiler, K. "Topological structures for geometric modeling", *PhD Thesis*, Rensselaer Polytechnic Institute, Aug. 1986.
2. Weiler, K. McLachlan, D. "Generalized sweep operations in the non-manifold environment", in Wozny, M. J. Turner, J.U. Preiss K. (Eds.), *Geometric modeling for product engineering*, Elsevier, pp. 87-106, 1990.
3. Yamaguchi, Y. Kobayachi, K. Kimura, F. "Geometric modeling with generalized topology and geometry for product engineering", in Turner, J. Pogna, J. Wozny M. (Eds.), *Product modeling for computer-aided design and manufacturing*, IFIP TC5/WG5.2 Working Conference, North-Holland, pp. 97-115, 1991.
4. Yamaguchi, Y. Kimura, F. "Non-manifold topology based on coupling entities", *IEEE Computer graphics and applications*, pp. 42-50, Jan. 1995.
5. 이상헌, "사출 성형 제품의 설계 및 해석의 통합 환경을 제공하기 위한 특징 형상 기반 비다양체 모델링 시스템의 개발", 박사학위논문, 서울대 대학원 기계설계학과, 1993년 8월.
6. 이상헌, 이진우, "비다양체 형상 모델링을 위한 간결한 경계 표현 및 확장된 오일러 작업자", 한국 CAD/CAM 학회 논문집, Vol. 1, No. 1, pp. 1-19, 1996년 3월.
7. Y. Choi, "Vertex-based boundary representation of non-manifold geometric models", *PhD Thesis*, Dept. of Mechanical Engineering, Carnegie Mellon University, Aug. 1989.
8. Levent Gursoz, E. Choi, Y. Prinz, F.B. "Vertex based representation of non-manifold boundaries", in Wozny, M.J. Turner, J.U. Preiss K. (Eds.), *Geometric modeling for product engineering*, Elsevier, pp. 107-130, 1990.
9. Requicha A.A.G. and Voelcker, H.B. "Constructive solid geometry", *Technical Memo. No. 25*, Production Automation Project, University of Rochester, NY, 1977.
10. Tilove, R.B. "A study of geometric set-membership classification", *Technical Memo No. 30*, Production Automation Project, University of Rochester, NY, 1977.
11. Tilove, R.B. and Requicha, A.A.G. "Closure of Boolean operations on geometric entities", *Computer Aided Design*, Vol. 12 No. 5, pp. 9-20, Sep. 1980.
12. 한순홍, 최국헌, 명세현, "개방형 형상모델러의 시스템 설계", 대한조선학회 논문집, 제 32권 제 4호,

- pp. 9-18, 1995년 11월.
13. Munkres, J.R. *Topology: A First Course*, Prentice-Hall, 1975.
14. 최국헌, 한순홍, 이현찬, "선택저장법을 이용한 복합 다양체 자료구조", 한국 CAD/CAM학회 논문집, Vol. 2, No. 3, pp. 171-176, 1997년 9월.
15. Masuda, "Topological operators and Boolean operations for complex-based non-manifold geometric models", *Computer-Aided Design*, Vol. 25, No. 2, pp. 119-129, Feb. 1993.
16. Linehardt, P. "Topological models for boundary representation: a Comparison with n-dimensional generalized maps", *Computer-Aided Design*, Vol. 32, No. 1, pp. 59-82, Jan./Feb. 1991.
17. Rossignac, J. O'Conner, M.A. "SGC: A dimensional-independent model for point sets with internal structures and incomplete boundaries", in *Geometric modeling for product engineering*, North-Holland, pp. 145-180, 1990.
18. Spatial Technology Inc., "ACIS geometric modeler application guide", p. 7-4, Mar. 1996.
19. Baumgart, B.G. "A polyhedron representation for computer vision", In *AFIPS Proceedings*, Vol. 44, pp. 589-596, 1975.
20. Baumgart, B.G. "Geometric modeling for computer vision", *Technical Report, Report STAN-CS-74-463*, Stanford Univ.: Stanford Artificial Intelligence Laboratory, 1974.
21. Mantyla, M. *An introduction to solid modeling*, Computer Science Press, 1988.

**최 국 헌**



1983년 연세대학교 기계공학과 학사  
 1985년 연세대학교 기계공학과 석사  
 1985년 ~ 1998년 현대정공(주) 기술연구소 선임연구원  
 1999년 한국과학기술원 기계공학과 박사  
 1999년 ~ 현재 동서울대 금형설계과 전임강사  
 관심분야: Solid Modeling, Computer Graphics, 가상현실

**한 순 홍**



1977년 서울대학교 조선공학과 학사  
 1979년 서울대학교 조선공학과 석사  
 1990년 The University of Michigan 박사  
 1979년 ~ 1993년 한국해사기술연구소 CSDP사업단  
 1993년 ~ 현재 한국과학기술원 기계공학과 교수  
 관심분야: 설계 전문가 시스템, 시스템 통합(STEP), 형상 모델링