

## 선택 저장을 이용한 복합 다양체 자료구조

최국현\*, 한순홍\*\*, 이현찬\*\*\*

### Optional Storage of Non-manifold Information for Solid Models

Guk-Heon Choi\*, Soon-Hung Han\*\* and Hyun-Chan Lee\*\*\*

#### ABSTRACT

Existing non-manifold data structures which use the ordered topological representation method, are designed based on a "Model" which is the highest topological entity. Their non-manifold information is always included in edges and vertices even if they are in the manifold situation. Thus they require large storage spaces than manifold data structures. The proposed data structure reduces its storage space by removing unnecessary information stored in edges and vertices. Topological information is classified into manifold and non-manifold information. The main non-manifold information is radial cycles and disk cycles. The proposed data structure always stores manifold information. For the non-manifold situation, the edge stores radial cycles, and the vertex stores disk cycles. The storage space can be reduced in the later stage of CAD design when the ratio of non-manifold to manifold entities is small.

**Key words :** B-Rep, Non-manifold data structure, Selective storage, Topological entities, Adjacency information

#### 1. 서 론

물체의 기하학적 형상과 관련된 정보를 컴퓨터에 적절히 표현한 것을 형상 모델이라 하고, 이러한 형상모델의 생성을 목적으로 만들어진 컴퓨터 프로그램을 형상 모델러라 한다. 형상모델의 대표적인 표현 방법으로는 기본도형(Primitive Element)과 불리언 작업을 이용하여 Tree를 구성함으로써 형상을 표현하는 CSG(Constructive Solid Geometry) 표현법과, 물체의 경계에 대한 정보로써 형상을 표현하는 B-Rep(Boundary Representation)이 있다.

한편, 어떤 물체의 경계(Boundary)를 구성하는 모든 점이 오픈 디스크(Open Disk)에 동상(Homomorphic)이면 그 물체는 다양체(Manifold)라 한다<sup>[1]</sup>. 물체 경계의 임의의 점에 있어 다양체를 형성하지

않는 부분이 있으면, 그러한 물체를 복합 다양체(Non-Manifold)라 하는데 이러한 다양체 모델에서는 면, 선, 그리고 점과 같은 낮은 차원의 위상요소들이 3차원 솔리드 모델과 함께 표현될 수 없다. 반면에 복합 다양체 모델은 솔리드 뿐만 아니라 면, 와이어 프레임, 점 등을 하나의 통합된 자료구조를 사용하여 표현할 수 있다. 그러므로 복합 다양체 모델은 3차원 물체의 표현에 중점을 둔 다양체의 영역을 확장하여 일반화한 것이다. 복합 다양체 모델은 자료구조가 복잡하고, 알고리즘의 구현이 어려우며, 저장 자료량이 많은 단점이 있는 반면, 모델링 영역의 확장에 따라 CAD(Computer Aided Design) 초기 모델, FEM(Finite Element Method) 해석 모델, GIS(Geographical Information System) 모델 등에 응용이 가능한 장점을 보유하고 있어 관련 연구가 활발히 진행되고 있다.

복합 다양체 모델을 표현하기 위한 B-Rep의 자료구조들은 크게 인접 그래프(Incidence Graph) 방법과 정렬 위상 표현(Ordered Topological Representation)

\*학생회원, 현대정공/한국과학기술원

\*\*중신회원, 한국과학기술원 기계공학과

\*\*\*중신회원, 홍익대 산업공학과

법으로 나눌 수 있다. 인접 그래프 방식<sup>[2,3]</sup>은 그래프(Graphs) 혹은 하이퍼 그래프(Hyper Graphs)로, 보통 노드(Node)는 모델링 된 부분의 Cell에 해당하고, Edge는 Cell간의 인접 관계를 나타내는 방법이다. 이러한 인접 그래프 방식은 3차원 이상의 n-차원의 표현이 가능한 장점이 있으나, 정렬 위상 표현법에 비하여 자료 저장량이 과다하고 정보의 추출이 비효율적이다. 반면, 정렬 위상 표현법은 최소의 필요한 정보를 저장하고 나머지 정보는 저장된 정보로부터 추출하여 사용하는 방식이다. 그러므로 정렬 위상 표현법은 효율적인 정보의 저장과 이용이 가능하여, 실제 복합 다양체 모델러에서는 대부분 정렬 위상 표현법의 자료구조를 사용하고 있다. 정렬 위상 표현 방법을 사용하는 자료구조의 예로는 Radial-edge 자료구조<sup>[4,5]</sup>, 부분면 자료구조<sup>[6,7]</sup>, Cusp 기반 자료구조<sup>[8,9]</sup>, Feather 기반 자료구조<sup>[10,11]</sup>, 및 ACIS 자료구조<sup>[12]</sup>가 있다.

정렬 위상 표현법의 복합 다양체 자료구조는 표현 가능한 인접정보에 따라 모서리 기반 자료구조와 꼭지점 기반 자료구조로 구분할 수 있다. 모서리 기반 자료구조는 모서리에 있어서의 인접정보 표현에 중점이 두어진 자료구조로서 Radial-Edge 자료구조, ACIS 자료구조, 그리고 부분면 자료구조가 여기에 해당한다. 꼭지점 기반 자료구조는 모서리와 꼭지점 양쪽 모두의 인접 정보 표현에 중점을 두고 있는 자료구조로서 Cusp 기반 자료구조와 Feather 기반 자료구조가 여기에 해당한다. 모서리 기반 자료구조의 경우는 자료의 저장량이 적은 대신에 꼭지점에 있어서의 복합 다양체 위상 정보가 불충분한 단점이 있다. 꼭지점 기반 자료구조는 모서리와 꼭지점에 있어서 복합 다양체 인접 정보를 충분히 보유하고 있으나 그 결과 자료 저장량이 많은 단점이 있다.

한편, 임의의 복합 다양체 모델에 있어 2차원, 1차원, 및 0차원 형상 요소에 대응하는 면, 모서리, 그리고 꼭지점에 있어 복합 다양체 혹은 다양체 상황 여부를 고찰해 보면, 설계 초기 단계에서는 복합 다양체 상황에 있는 요소인 면, 모서리, 꼭지점이 전체 요소에 대하여 차지하는 비율은 상대적으로 크나 이 경우 저장하여야 할 전체 자료량은 적어 저장량이 크게 문제시 되지 않는다. 그러나, 설계 완성 단계에 가까워 지면 복합 다양체 요소의 전체 요소에 대한 비율은 무시하여도 좋을 정도 이나 전체 자료량은 많아 그 저장 공간이 문제시 된다. 즉, 복합 다양체 모델에 있어서 자료 저장량이 문제가 되는 경우는 Fig. 1에서와 보는 바와 같이 전체 정보량이 많아 지게 되는 CAD 설계의 후반기가 되며, 이때 대부분의

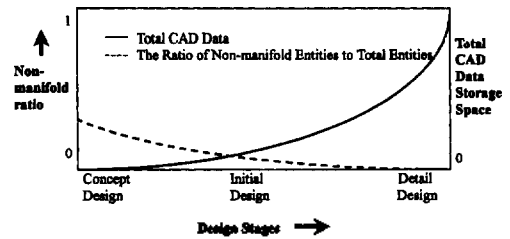


Fig. 1. Non-manifold ratio and total CAD data storage space.

CAD 모델에 있어 복합 다양체 상황에 있는 요소인 면, 모서리, 꼭지점의 전체 요소에 대한 비율은 무시할 수 있을 정도로 적다. 그러므로 복합 다양체 자료구조는 다양체 요소가 지배적인, 따라서 복합 다양체 요소의 비율은 무시할 수 있는, 설계 후반기의 자료 저장량을 줄일 수 있도록 설계되어야 한다.

설계 후반기의 자료저장량 과다를 해소하기 위한 연구로서, 모델의 부분적인 다양체 혹은 복합 다양체 여부에 따라 관련 자료구조를 전환 이용하려는 시도가 있었다<sup>[13]</sup>. 이는 설계 중간단계의 복합 다양체 셸(Shell)에 대하여서는 복합 다양체 자료구조를 사용하고, 설계가 종료되어 다양체 셸로 바꾸면 다양체 자료구조로 전환 이용하는 방안에 대한 연구로 새로운 자료구조를 고안하기 보다는 기존의 자료구조인 부분면 자료구조와 Half-Edge 자료구조를 전환 이용하여 저장 공간을 축소하려는 데 중점을 두었다.

본 논문은 완전한 복합 다양체 정보를 표현하기 위한 관련 인접 정보를 충분히 보유하면서 기존의 자료구조 들이 보유하고 있었던 문제점인 CAD의 후반기의 자료 저장량 과다를 해소할 수 있는 새로운 자료구조를 제안하는 데 그 연구 목적이 있다.

본 논문에서는 사용할 위상요소에 대한 개념을 정의하고, 이를 근간으로 하여 복합 다양체 자료구조가 저장하여야 할 인접 정보의 종류와 그 저장 방법에 대한 일반적인 검토를 수행한다. 그리고 검토된 개념에 따라 기존 자료구조의 문제점을 개선한 새로운 자료구조에 대한 제안하며, 제안된 자료구조를 기존 자료구조 들과 비교 검토를 실시한 후, 제안된 자료구조에 대한 오일러 작업자 구현 등의 순으로 기술한다.

## 2. 위상 요소의 개념

본 절에서는 앞으로 제안되는 새로운 자료구조의

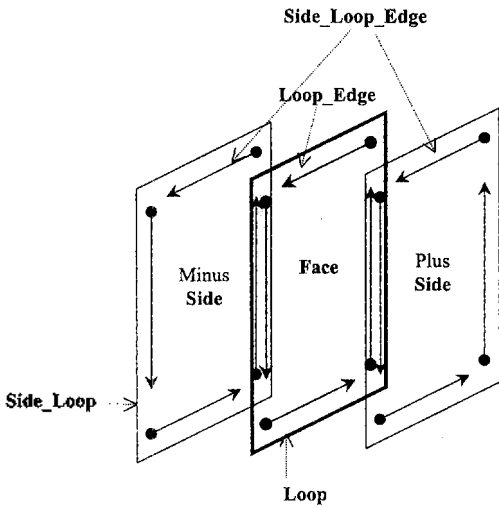


Fig. 2. Concept of Loop, Side\_Loop, Loop\_Edge, and Side\_Loop\_Edge.

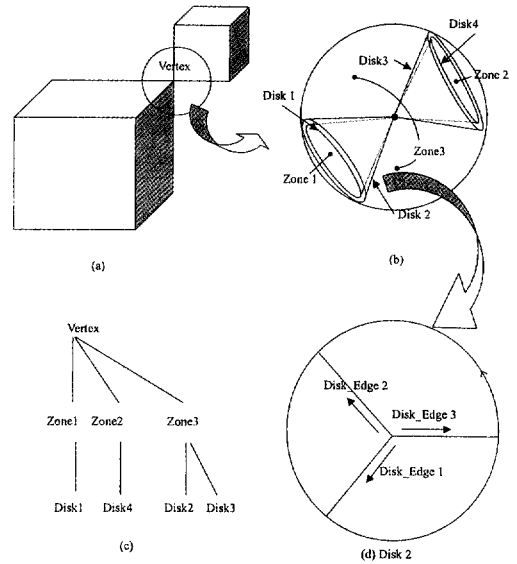


Fig. 3. Concept of Zone, Disk, and Disk\_Edge.

기본 개념이 되는 위상 요소에 대하여 검토한다.

먼저, 위상 요소를 조작하기 위한 최상위 요소를 Model이라 한다. 임의의 물체의 존재로 인하여 점유되거나 비 점유됨으로써 구분되는 3차원 공간에 대한 위상 요소를 Region이라 정의하고, Region의 경계 정보를 체계적으로 저장하기 위한 위상요소를 Shell이라 정의한다. 또한 2차원 형상요소에 해당하는 위상 요소를 Face라 하고, 이 Face의 각 양 측면

에 해당하는 위상요소를 Side라 정의한다. Fig. 2와 같이 Face의 경계 정보를 보유하고 있는 위상요소를 Loop라 하며, Side의 경계를 Side\_Loop라 정의한다. Loop를 구성하는 위상 요소를 Loop\_Edge라 하며, Side\_Loop를 구성하는 위상 요소를 Side\_Loop\_Edge라 정의한다.

또한 공간 상의 1차원 요소를 Edge라 한다. Fig. 3과 같이 2개의 육면체가 꼭지점을 접점으로 하여

Table 1. Topological Entities of Existing Data Structures Corresponding to the New Entities

New Topological Entity	Radial-Edge	ACIS®	Partial-Face	Cusp-Based	Feather-Based
Region	Region	Lump	Region	Region	Region
Shell	Shell	Shell	Shell	Shell	Shell
Face	Face	Face	Face	Face	Face
Side	Face_Use		Partial_Face	Wall	Side
Loop	Loop	Loop	Loop		Loop
Side_Loop	Loop_Use			Loop	
Edge	Edge	Edge	Edge	Edge	Edge
Loop_Edge		Coedge	Partial_Edge		
Side_Loop_Edge	Edge_Use			Cusp	Feather
Disk_Edge					
Vertex	Vetex	Vertex	Vertex	Vertex	Vertex
Zone				Zone	Corner
Disk				Disk	Disk

맞붙어 있을 경우, 0차원 요소인 꼭지점에 대한 위상 요소를 Vertex라 정의하고, 임의의 주어진 Vertex 주위의 미소(infinitesimal) 구에 있어, 면들의 집합에 의하여 나누어지는 미소 구 내부의 격리된 미소 공간을 Zone이라 정의한다. 또한 Zone의 경계를 이루는 요소를 Disk라 정의한다. 3차원 미소 공간에 해당하는 Zone의 경계인 Disk는 꼭지점 주위에 있어서 면들의 집합에 의하여 격리되는 미소 공간의 경계에 대한 정보로, 그 구성 요소는 관련 Side들의 집합에 대한 정보를 가지는 위상 요소 Disk\_Edge로 표현할 수 있다. Table 1은 이와 같은 위상 요소들을 기존 자료구조의 각 위상요소들과 대비시켜 비교한 것이다.

### 3. 인접 정보의 종류와 저장 방법

복합 다양체의 자료구조를 설계하기 위하여서는

저장되는 인접 정보의 범위를 명확히 정의하여야 하는데 3차원 CAD 시스템의 경우, Weiler<sup>[4]</sup>와 이상현<sup>[6,7]</sup>은 위상 요소인 꼭지점, 모서리, 면, 루프, 셀, 영역에 대하여 6×6=36의 인접관계를 고려하였다. 본 논문에서는 3차원 형상을 표현하는 CAD 모델이 갖는 인접 정보의 범위를 0, 1, 2, 및 3차원 형상요소에 대응하는 꼭지점, 모서리, 면, 그리고 영역을 기준으로 하여, 이들이 갖는 4×4=16개로 축소하여 검토한다. 그 이유는 루프와 셀이 각각 면과 영역의 경계에 대한 정보를 표현하기 위하여 도입된 위상요소이기 때문이다. 정렬 위상 표현 방법은 이들 인접 정보 중 중요한 정보는 직접 저장하고, 저장되지 않은 정보는 저장된 정보를 이용하여 추출한다.

Table 2는 검토된 16개의 인접 정보의 종류와, 기존의 자료구조들이 일반적으로 사용하고 있는 인접 정보를 표현하는 방법을 정리한 것이다. 인접 정보를 표현하는 방법은 자료구조의 사용 목적에 따라

Table 2. 16-Adjacency Information

Adjacency information			Description	Existing method
Base	Adjacency	Ab- breviation		
Vertex	Vertex	vv	For a given vertex, information of the other end vertices along an edge	Use "ve" and "ev"
	Edge	ve	Information of all edges which share a given vertex	Directly stored, or use "vr"
	Face	vf	All faces associated with the given vertex	Use "vr" (roughly use "ve" and "ef")
	Region	vr	Local regions associated with the given vertex (Disk cycle)	In some data structures, directly stored
Edge	Vertex	ev	Two end vertices of an edge	Directly stored
	Edge	ee	Edges connected to a given edge	Use "ve" and "ev"
	Face	ef	Faces connected to the end of a given edge (Radial cycle)	Directly stored
	Region	er	Regions related to a given edge	Use "ef", and "fr"
Face	Vertex	fv	Vertices on a face	Use "fe", and "ev"
	Edge	fe	Boundary of the face (Loop cycle)	Directly stored in "Loop_Edge" or "Side_Loop_Edge"
	Face	ff	All faces connected to a given face	Use "fe", and "cf"
	Region	fr	One or two regions related to a given face	Directly stored in "Side" or "Face"
Region	Vertex	rv	All vertices within a region	Use "re", and "ev"
	Edge	re	All edges within a region	Use "rf", and "fe"
	Face	rf	Boundary faces of a region	Directly stored
	Region	rr	Neighboring regions of a given region	Use "rf", and "fr"

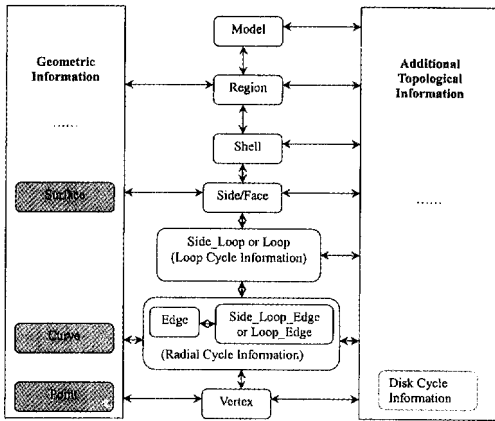


Fig. 4. A Skeleton data structure of ordered topological representation.

여러 가지가 있을 수 있으나 정렬 위상 표현법의 자료구조 들은 일반적으로 Fig. 4와 같은 기본 형태를 취한다. 여기서는 Table 2에서 검토된 인접 정보가 Fig. 4와 같은 구조를 가진 자료구조에서 어떠한 형태로 저장되는 지를 살펴 본 후, 이들 인접 정보가 좀더 효율적으로 저장될 수 있는 방안에 대해 검토하기로 한다.

Model은 Region의 집합으로 구성되며, Region에 관련된 인접 정보인 "rf" 정보는 경계 위상 요소인 Shell을 통하여 체계적으로 저장된다. Region의 또 다른 인접 정보 "rr", "re", 그리고 "rv" 정보는 Table 2에 기술된 바와 같이 다음에 설명될 다른 위상 정보를 이용하여 간접적으로 저장된다. Shell은 Side 혹은 Face로 구성된다. Side 혹은 Face는 각각 자신의 경계에 대한 정보를 Side\_Loop 혹은 Loop의 정보를 갖음으로써 "fe" 정보를 체계적으로 표현하며, 그 소속 Region에 대한 정보인 "fr" 정보를 직접 보유한다. 면과 관련된 다른 2가지 인접 정보 "ff", "fv" 정보는 다른 인접 정보를 이용하여 간접적으로 저장된다. Side\_Loop 또는 Loop는 각기 그 구성 요소로 Side\_Loop\_Edge와 Loop\_Edge를 보유한다. Side\_Loop\_Edge와 Loop\_Edge는 각각 "ev" 정보 중 자신의 출발점에 해당하는 Vertex에 대한 정보를 보유한다. 끝 점에 대한 정보는 Side\_Loop\_Edge 나 Loop\_Edge에 관련 정보를 보유하거나 소속 모서리의 정보로부터 관련 정보를 얻는다. "ef" 정보는 모서리에 관련 있는 면에 대한 정보로 직접 저장한다. 한편 "ee" 정보나 "er" 정보는 Table 2에서와 같이 다른 인접 정보를 이용하여 간접 저장된다. 꼭지점에 관련된 정보인 "vr" 정보와 "ve" 정보는 직접 저

장하는 것이 일반적이다. "vf" 정보는 관련 모서리의 정보를 이용하거나 "vr" 정보를 이용하여 간접 저장되며, "vv" 정보는 관련 모서리의 정보를 이용하여 간접 저장된다. 그 외에 추가적인 위상 정보 혹은 좌표 값, 방정식과 같은 형상 정보가 Fig. 4와 같은 기본 골격을 가진 자료구조에 추가된다.

이상에서 설명된 대부분의 위상 정보는 Fig. 4와 같은 기본 골격을 가진 자료구조를 취함으로써 쉽게 표현 가능하며, 그 저장 방법의 변화에 따른 각 자료구조의 특성 변화는 심하지 않다. 그러나 "fe" 정보, "ef" 정보, 그리고 "vr" 정보는 그 저장 방법에 따라 자료구조의 특성이 결정되는 중요한 요소이므로 그 효율적인 저장 방법에 대한 검토가 요구된다. 여기서 "fe" 정보는 루프순환, "ef" 정보는 방사순환, "vr" 정보는 디스크순환으로 불리며, 다음에서는 이들을 3가지 순환 정보의 이상적인 저장 방안을 검토한다.

루프순환 정보는 Loop의 경계인 Loop\_Edge에 관련 정보를 표현하는 방법과 Side의 경계인 Side\_Loop\_Edge에 관련 정보를 표현하는 2가지의 경우가 있을 수 있다. 루프 순환은 Loop\_Edge로 관련 정보를 표현하는 것이 바람직하다. 이를 Side\_Loop\_Edge로 표현하면 정보의 중복 저장이 있게 된다. 그 이유는 루프 순환이 Face의 경계에 대한 정보이기 때문이다.

모서리를 공유하는 면에 대한 정보인 방사순환 정보는 Face보다는 Side에 대한 순환으로 표현하는 것이 좋다. 그 이유는 오일러나 불리언과 같은 위상 작업 중 임의의 주어진 모서리를 공유하는 Side의 다음 Side를 찾아야 할 경우가 빈번히 발생하기 때문이다. 따라서 Side에 대한 방사순환을 "완전 방사순환", Face에 대한 순환을 "불완전 방사 순환"이라고 하기로 한다. 디스크순환 정보를 표현하기 위하여 일반적으로 주어진 꼭지점 주위의 미소 영역인 Zone을 고려하게 되고, 이 Zone은 자신의 구성 요소로서 Disk를 보유한다. 이 Disk는 Side에 대한 순환으로 표현하는 것이 좋다. 만약 Face에 대한 순환으로 표현하면 주어진 꼭지점에서 미소 영역의 안쪽 혹은 바깥쪽을 구분할 수 없게 되어, 이의 구분을 위한 별도의 알고리즘이 도입되어야 한다. 특히 꼭지점에 고립된 면(Dangling Face)이 붙어 있는 경우, 이의 소속을 분명히 하기 위하여서는 Side에 대한 순환으로 Disk를 표현하는 것이 좋다. Disk는 Fig. 3에 설명된 Disk\_Edge를 통하여 디스크 순환 정보를 보유한다.

한편, 기존의 복합 다양체 자료구조 들은 최상위 위상 요소인 모델을 기준으로 복합 다양체 표현 여부를 판단하도록 설계되어 있다. 그러나 전체 모델이 복합 다양체인 경우 일반적으로 하위 위상 요소가 모두 복합 다양체 상황에 있는 것은 아니다. 예를 들면, 육면체의 한 모서리에 고립된 면이 붙어 있는 경우, 육면체의 12개의 모서리 중 복합 다양체 상황에 있는 모서리는 한 개 뿐이며, 나머지 11개의 모서리는 다양체 상황에 있게 된다. 따라서 복합 다양체 모델의 자료구조는 하위 위상 요소 모두가 항상 복합 다양체 정보를 포함하고 있을 필요가 없음을 알 수 있다. 기존의 복합 다양체 자료구조 들은 하위 위상 요소에 있어 복합 다양체 정보와 다양체 정보의 구분 없이 설계되어 경우에 따라 불필요한 정보를 저장하고 있는 하위 위상 요소가 많이 있을 수 있다. 따라서 불필요한 정보의 중복을 피하기 위하여서는 인접 정보를 복합 다양체 정보와 다양체 정보로 분류할 필요가 있다.

검토된 16개의 인접 정보 중 대한 방사 순환 정보는 복합 다양체 모서리에 필요한 정보이다. 다양체 모서리에 인접하고 있는 면은 오직 2개 이므로, 상대 면에 대한 정보는 Half Edge 자료구조<sup>[1]</sup>에서와 같이 Loop\_Edge의 짝에 대한 정보로 표현할 수 있다. 또한, 디스크순환 정보는 복합 다양체 꼭지점에서 필요한 정보이다. 다양체 꼭지점에서는 오직 2개의 국소 영역 단이 존재하므로 주어진 꼭지점에서 물체의 내부 셀로 이동할 것인지 아닌지 여부 만을 판단하는 것이 필요하며 이는 별도의 디스크 순환 정보를 필요하지 않는다. 그러므로 복합 다양체 자료구조는 "모서리" 혹은 "꼭지점"의 복합 다양체 상황 여부에 따라 관련 정보를 선택적으로 저장하여야 한다.

4. 선택 저장을 이용한 복합 다양체 자료구조

본 논문에서는 Fig. 4와 같은 기본 골격을 채택하여 정렬 위상 표현법의 자료구조가 갖는 기본 인접 정보를 항상 보유하고, 각 모서리나 꼭지점이 복합 다양체 상황이 되면 해당 정보를 추가로 선택 저장하는 새로운 자료구조를 제안한다.

Fig. 5는 제안되는 새로운 자료구조 이다. Model은 하나 이상의 Region으로 구성되며, Region은 Shell을 이용하여 경계 정보를 체계적으로 표현한다. Shell은 Dangling face의 소속을 명확히 하기 위하여 Side로 구성하며, 이 Side는 소속면에 대한 정보를 보유한다. Face는 Loop를 통하여 경계에 대한 정보를 보유하며,

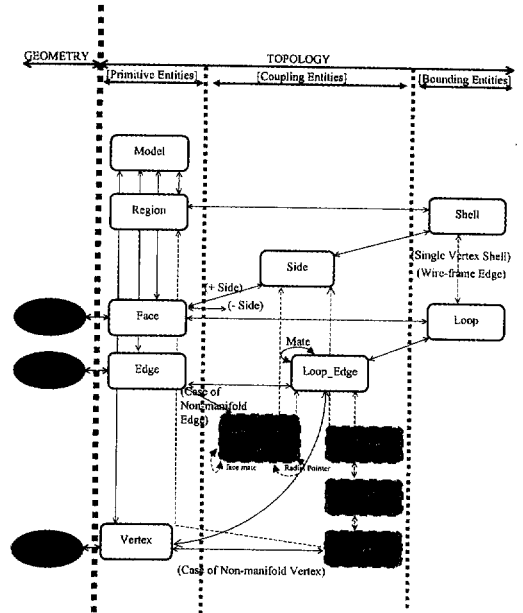


Fig. 5. Non-manifold data structure using selective storage.

양과 음의 Side에 대한 정보를 보유한다. Loop는 자신의 구성 요소인 Loop\_Edge에 대한 정보를 보유한다. Loop\_Edge는 루프 순환의 다음 Loop\_Edge에 대한 정보, 자신의 출발 점에 대한 정보, 그리고 소속 Edge에 대한 정보를 보유한다. Loop\_Edge는, 모서리가 다양체 상황이 되면, 인접한 상대 면을 찾아 갈 수 있도록 짝이 되는 Side에 대한 정보를 보유한다. 또한 대칭 관계에 있는 Side가 다양체 상황임을 고려하여 "ve" 관계를 직접 저장한다. 모든 Edge는 Loop\_Edge를 하여 루프순환 정보를 보유한다.

만약 Fig. 6에 : 시된 바와 같은 복합 다양체 모서리가 되면 추가로 완전 방사 순환 정보를 보유하고 있는 Side\_Loop\_Edge에 대한 정보를 보유한다. Fig.

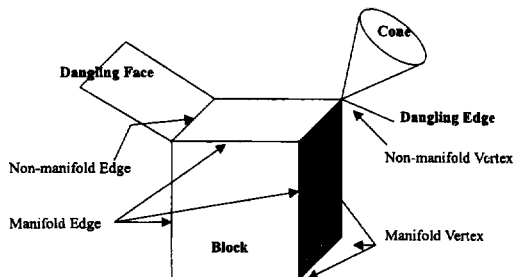


Fig. 6. Non-manifold model with manifold and non-manifold entities.

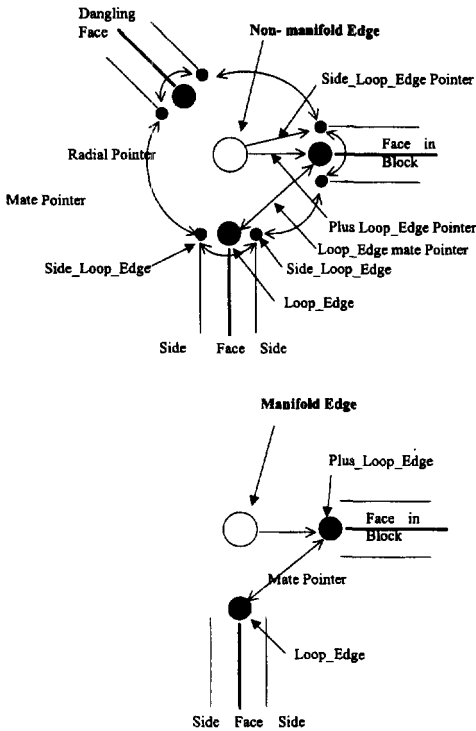


Fig. 7. Information of Side\_Loop\_Edge in manifold and non-manifold Edge.

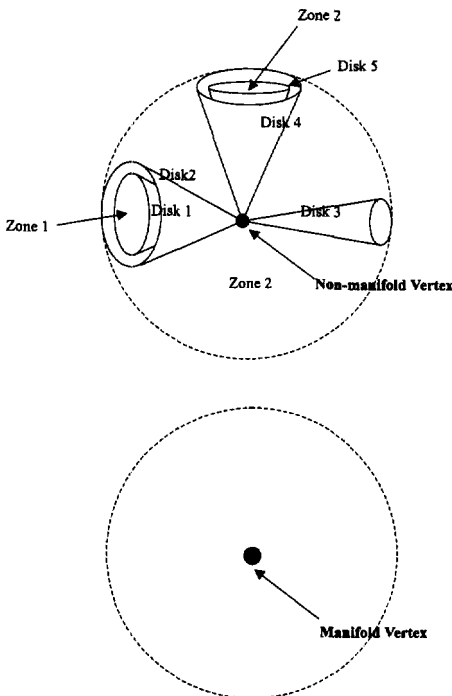


Fig. 8. Disk information in Non-manifold and manifold Vertex.

Table 3. Special cases in 3D modelers

Child \ Parent	3D	2D	1D
2D face	○	■	■
1D line	②	○	■
0D point	①	③	○

7은 복합 다양체 상황에 있는 모서리와 다양체 상황에 있는 모서리에 있어서의 보유 정보의 차이를 도식화 한 것이다.

Fig. 8은 복합 다양체 상황에 있는 꼭지점과 다양체 상황에 있는 꼭지점에 있어서의 위상 정보 보유의 차이를 도식화 하여 나타낸 것이다. 꼭지점은 기본적으로 Loop\_Edge에 대한 정보를 보유하며, 만약 Fig. 6의 예에서와 같은 복합 다양체 꼭지점이 되면 추가로 Zone, Disk, 그리고 Disk\_Edge로 구성되는 디스크 순환에 대한 정보를 보유한다. 바꾸어 말하면, 다양체 모서리는 Side\_Loop\_Edge에 관한 정보를 보유하지 않으며, 다양체 꼭지점은 Zone, Disk, Disk\_Edge에 관련된 위상 정보를 보유하지 않는다.

복합 다양체 자료구조는 Fig. 4와 같은 기본 골격을 취함으로써 Table 3에 “○” 표시가 되어 있는 경우를 기본적으로 표현할 수 있으나, 그 밖의 특수한 경우인 ①~③에 해당하는 공간 상의 점, 와이어프레임, 그리고 면 상의 점 대한 표현 방법이 고려되어야 한다. 새로 제안되는 자료구조는 Fig. 5에 표시된 바와 같이 한 개의 Shell, 한 개의 Loop, 한 개의 Loop\_Edge, 그리고 한 개의 Vertex로 공간 상의 독립된 점을 표현하고, 모든 모서리를 한 개의 루프에 연결하여 이를 셀에 속하게 함으로써 와이어프레임을 표현한다. 또한, 임의의 주어진 면에 하나의 꼭지점과 하나의 Loop\_Edge로 구성된 별도의 루프를 기존의 루프 리스트에 추가함으로써 면 상의 점을 표현한다.

### 5. 기존 자료구조와의 비교

Radial-Edge 자료구조, ACIS 자료구조, 부분면 자료구조는 “vr” 정보가 저장되어 있지 않다. 따라서 꼭지점에 있어서의 복합 다양체 정보를 찾아가는 데에 문제점이 있다. ACIS 자료구조, 부분면 자료구조는 불완전한 방사 순환 정보를 보유하고 있다. 또한 ACIS 자료구조는 “ve” 정보가 없어 주어진 임의의 모서리를 삭제할 때 관련 Edge를 함께 삭제하여야

할 지 여부를 판단하는 데 어려움이 있다. 제안된 자료구조는 "vr" 정보를 명확히 저장할 뿐 만 아니라, 완전한 방사 순환 정보에 해당하는 "ef" 정보를 저장하며, "ve" 정보도 Loop\_Edge에 직접 저장하고 있다.

Cusp 기반 자료구조, Feather 기반 자료구조는 꼭지점에서의 "vr" 정보와 완전한 방사 순환에 해당하는 "ef" 정보를 저장하고 있으나, 다양체 상황에 있는 모서리나 꼭지점에서도 복합 다양체에서만 필요한 정보를 항상 보유하고 있어 자료 저장 공간이 낭비가 많다. 새로 제안된 자료구조는 정보를 각 모서리 및 꼭지점에 대하여 복합 다양체 정보와 다양체 정보로 구분하여 저장함으로써 자료 저장량을 줄일 수 있다.

새로운 자료구조의 실제 정보 저장량을 기존 자료구조와 비교하기 위하여 다양체 자료구조의 비교에 사용되었던 Wilson<sup>[1]</sup>의 비교 방식을 확장하여 복합 다양체 자료구조의 비교에 사용하였다. 자료 저장량은 Fig. 1에서 검토한 바와 같이 실제 저장량이 문제 시 되는 설계 후반기에 대하여 비교하는 것이 타당하므로, Wilson의 가정에, "복합 다양체 상황에 있는 요소인 면, 모서리, 그리고 꼭지점의 전체 요소에 대한 자료 저장 비율은 무시할 수 있다"는 가정을 추가하여 복합 다양체 자료구조 비교에 사용한다. Table 4는 이러한 가정에 근거한 비교 결과를 요약한 것이다. 새로 제안되는 자료구조는 복합 다양체 모델에 요구되는 충분한 위상 정보를 보유하면서 부분면 자료구조와 유사한 수준의 비교적 적은 자료 저장 공

간이 필요함을 알 수 있다.

한편, Table 3에서 구분한 특수한 경우 ①~③에 대한 처리는 이들 경우 만을 표현하기 위해 별도로 도입되는 위상요소가 없어야 유리한데, 그 이유는 별도의 위상요소를 도입할 경우 오일러나 불리언 작업시 각 위상 요소의 상황이 변할 때 마다 메모리를 할당하고 지우는 작업을 수행하여야 하는 등 알고리즘의 복잡성을 초래하여 처리 속도의 지연을 가져오기 때문이다. 이러한 특수한 경우에 대한 처리 방안을 살펴보면 ACIS 자료구조는 모서리의 양쪽 끝을 일치시키는 편법을 사용하지 않고는 독립된 꼭지점의 표현이 불가능하며, 와이어 프레임 표현을 위하여 별도의 위상 요소를 도입하고 있다. Feather 기반 자료구조는 별도의 위상 요소를 도입하여 독립된 꼭지점이나 와이어 프레임을 처리한다. 제안된 자료구조는 앞 절에서 검토한 바와 같이 별도의 위상 요소의 도입 없이 특수한 경우의 처리가 가능하다.

### 6. 오일러 작업자의 구현

Fig. 9는 복합 다양체 모델의 위상 조작 작업 과정 중 모서리에 있어서 상황 변화에 따른 위상 정보의 변천을 보여준다. 이러한 위상 정보의 변천은 기존의 자료구조와는 달리 제안된 자료구조가 모서리 및 꼭지점에 있어서 복합 다양체 상황이 발생 여부에 따라 해당 정보를 보유하거나 혹은 보유하지 않는 데에 기인하는 것이다 와이어프레임 모서리는 2개

Table 4. Summary of data structure comparisons

		Radial-Edge	ACIS <sup>®</sup>	Partial-Face	Cusp-Based	FeatherBased	New proposed
Relative storage space	Single list	1	0.38	0.43	1.21	1.22	0.43
	Double list	1	0.39	0.49	1.38	1.18	0.50
"fe" information (Loop cycle)		Duplicated storage	Stored	Stored	Duplicated storage	Duplicated storage	Stored
"ef" information (Radial cycle)		Stored	Incomplete	Incomplete	Stored	Stored	Stored
"ve" information		Stored	Not stored	Not stored	Using "ef" information	Using "ef" information	Stored
"vr" information (Disk cycle)		Not stored	Not stored	Not stored	Stored	Stored	Stored
Method of special cases treatment		*	**	*	*	***	*

\*Can represent without introducing special entities.

\*\*Represents wire-frame by introducing additional entity, "wire". Cannot represent the isolated vertex without coinciding two end vertices of an edge.

\*\*\*Represents by introducing additional entities; "ball", "tube", and "ring".



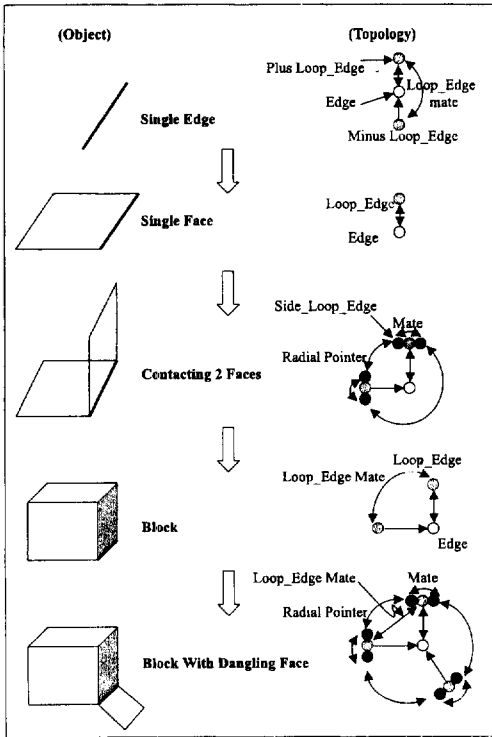


Fig. 9. Topology transition in an Edge during modeling process.

의 Loop\_Edge를 보유하며 Side\_Loop\_Edge는 보유하지 않는다. 하나의 면과 접촉하고 있는 모서리는 하나의 Loop\_Edge를 보유하며, Side\_Loop\_Edge 정보 역시 없다. 2개의 면과 접촉하는 모서리가 되면 Loop\_Edge 이외에 Side\_Loop\_Edge 정보를 보유하게 되며, 물체가 블록을 형성하는 경우와 같이 다양체 모서리가 되면 더 이상 Side\_Loop\_Edge 정보가 필요하지 않기 때문에 관련 정보를 보유하지 않는다. 그 대신 2개의 Loop\_Edge는 서로 짝의 형태로서 모서리에 접하고 있는 상대의 면에 대한 정보를 보유한다. 다양체 모서리에 다시 면이 추가되면 각 면에 대하여 2개 짝의 Side\_Loop\_Edge를 생성하여 방사 순환 정보를 보유한다. 이와 같은 위상 상황의 변환에 따른 기본 알고리즘의 개념으로 임의의 모서리에 면을 추가하는 경우와 임의의 꼭지점에 면 또는 모서리를 추가하는 경우를 예를 들어 요약 소개하면 다음과 같다.

임의의 모서리에 면을 추가할 때의 알고리즘

주어진 모서리의 상태를 검사하여

1) 와이어프레임 모서리인 경우: 기존의 Loop\_Edge를 면의 방향에 일치하도록 정리하고, 필요 없

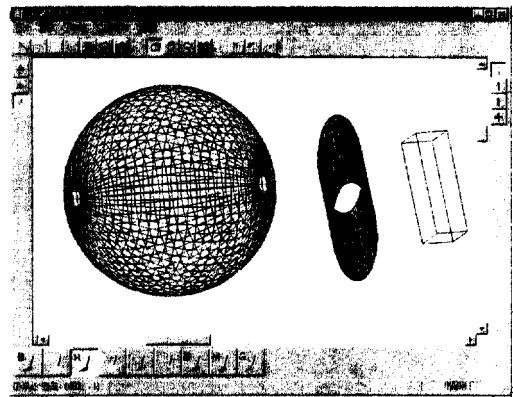


Fig. 10. Implemented example model using Euler operator.

는 Loop\_Edge를 제거하여, 주어진 면에 대하여 하나의 루프를 형성하고 관련 정보를 정리한다.

2) 하나의 면에 속해 있는 경우: (1) 면의 추가로 다양체 모서리가 되면: 추가된 면에 대하여 Loop\_Edge를 만들어 기존 면의 Loop\_Edge와 짝을 이루도록 하고, (2) 그렇지 않으면: 모서리에 한 개의 새로운 Loop\_Edge와 4개의 새로운 Side\_Loop\_Edge를 만들어, 2개는 기존의 Loop\_Edge에 나머지 2개는 새로 생성한 Loop\_Edge에 연결하고 방사 순환 정보 및 기타 관련 정보를 연결한다.

3) 2개 이상의 면이 있는 경우: (1) 주어진 모서리가 다양체 모서리인 경우: 기존의 각 면에 대하여 각각 2개씩 과 신규면에 2개의 Side\_Loop\_Edge를 만들어 연결하고 관련 방사 순환 정보 및 기타 관련 정보를 표시한다. (2) 아닌 경우: 2개의 Side\_Loop\_Edge를 만들어 신규면에 추가하고 방사 순환 정보 및 기타 관련 정보를 연결한다.

임의의 꼭지점에 면 또는 모서리를 추가할 경우의 알고리즘

주어진 꼭지점의 상태를 검사하여

1) 3차원 물체에 연결된 꼭지점인 경우: (1) 주어진 꼭지점이 디스크 순환 정보를 보유하고 있으면: 새로 추가되는 면, 모서리에 대하여 기존의 디스크 순환 정보와 관련하여 Zone, Disk, Disk\_Edge 정보를 추가하고 (2) 아니면: 새로운 Zone, Disk, Disk\_Edge 정보를 생성하여 관련 정보를 연결한다.

2) 그렇지 않으면(만약 주어진 꼭지점이 0, 1, 2 차원 물체에만 해당하면): 디스크 순환 정보를 부여하지 않는다.

본 논문에서는 이와 같은 기본 알고리즘의 개념

을 해당 각 오일러 작업자에 적용하여 Masuda<sup>[11]</sup>의 오일러 작업자를 사용하여 구현하였다. Fig. 10은 제안된 자료구조에 대하여 C++ 언어를 이용하여 구현한 오일러 작업자를 이용하여 생성된 모델의 예이다.

### 7. 결 론

기존의 복합 다양체 자료구조에서는 복합 다양체 모서리나 꼭지점에서 필요한 정보를 다양체 모서리나 꼭지점에서도 항상 보유하고 있었다. 그 결과 복합 다양체 자료구조는 다양체 자료구조에 비하여 자료 저장량이 많은 단점이 있다. 이러한 점을 개선하기 위하여 모서리 및 꼭지점의 다양체 또는 복합 다양체 상황 여부를 기준으로 하여, 복합 다양체 위상 정보는 해당 요소가 복합 다양체 상황이 될 때에만 보유하도록 하는 새로운 자료구조를 제시하였다. 즉, 제안된 자료구조는 다양체 관련 정보를 기본적으로 보유하고, 복합 다양체 모서리에 대하여는 방사순환 정보를, 그리고 복합 다양체 꼭지점에 대하여는 디스크 순환 정보를 추가로 선택 저장하도록 하는 것이다.

제안된 자료 구조는 복합 다양체 모델이 필요로 하는 충분한 인접 정보를 보유하면서, 다양체 요소가 지배적인 CAD 설계 후반기의 자료 저장량을 줄일 수 있다는 장점을 지닌다. 또한 제시된 자료구조는 별도의 위상요소의 도입 없이 특수한 경우를 처리할 수 있다. 제안된 자료구조에 대하여 Masuda의 오일러 작업자를 구현하여 샘플 모델을 구현하였다. 향후 본 자료구조의 특성을 고려한 새로운 오일러 작업자의 제안, 불리언 작업자 구현, 그리고 관련 알고리즘의 최적화에 대한 추가 연구가 수행되어야 한다.

### 참고문헌

1. Mantyla, M., *An Introduction to Solid Modeling*, Computer Science Press, 1988.
2. Rossignac, J. and 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.
3. 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.
4. Weiler, K., "Topological Structures for Geometric Modeling", PhD Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, Aug. 1986.
5. Weiler, K. and McLachlan, D., "Generalized Sweep Operations in the Non-Manifold Environment", in Wozny, M.J., Turner, J.U. and Preiss, K., (Eds.), *Geometric Modeling for Product Engineering*, Elsevier, pp. 87-106, 1990.
6. Lee, S.H., "Feature Based Non-manifold Geometric Modeling System to Provide Integrated Environment for Design and Analysis of Injection Molding Products (in Korean)", PhD Thesis, Seoul National Univ., Aug. 1993.
7. Lee, S.H. and Lee, K.W., "Compact Boundary Representation and Generalized Euler Operators for Non-manifold Geometric Modeling (in Korean)", *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-19, Mar. 1996.
8. Choi, Y., "Vertex-Based Boundary Representation of Non-manifold Geometric Models", PhD Thesis, Dept. of Mechanical Engineering, Carnegie Mellon University, August 1989.
9. Gursoz, E.L., Choi, Y. and Prinz, F.B., "Vertex Based Representation of Non-Manifold Boundaries", in Wozny, M.J., Turner, J.U. and Preiss, K., (Eds.), *Geometric Modeling for Product Engineering*, Elsevier, pp. 107-130, 1990.
10. Yamaguchi, Y., Kobayachi, K. and Kimura, F., *Geometric Modeling with Generalized Topology and Geometry for Product Engineering*, in Turner, J., Pegna, J. and Wozny, M., (Eds.), *Product Modeling for Computer-Aided Design and Manufacturing*, IFIP TCS/WG5.2 Working Conference, North-Holland, pp. 97-115, 1991.
11. Yamaguchi, Y. and Kimura, F., "Non-manifold Topology Based on Coupling Entities", *IEEE Computer Graphics and Applications*, pp. 42-50, Jan. 1995.
12. Spatial Technology Inc., *ACIS Geometric Modeler Application Guide*, pp. 7-4, Mar. 1996.
13. Lee, J.H., "A Study on the Non-manifold Geometric Modeling", MS Thesis, Hong-ik Univ., Dec. 1994.
14. Wilson, P.R., "Data Transfer and Solid Modeling", in Wozny, M.J., McLaughlin, H.W. and Encarnacao, J.H., (Eds.), *Geometric Modeling for CAD Applications*, Elsevier Science Publishers, North-Holland, pp. 217-254, 1988.
15. Masuda, H., "Topological Operators and Boolean Operations for Complex-Based Non-Manifold Geometric Models", *Computer-Aided Design*, Vol. 25, No. 2, pp. 119-129, Feb. 1993.



### 최 국 현

1983년 연세대학교 기계공학과 학사  
 1985년 연세대학교 기계공학과 석사  
 1985년 ~ 현재 현대정공(주) 기술연구소  
 선임연구원  
 1992년 ~ 현재 한국과학기술원 기계공학과  
 박사과정  
 관심분야 : Solid Modeling, Computer graphics, Virtual prototype.



### 한 순 홍

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



### 이 현 찬

1978년 서울대학교 산업공학과 학사  
 1980년 한국과학기술원 산업공학과 석사  
 1988년 The University of Michigan 박사  
 1991년 ~ 현재 홍익대학교 산업공학과  
 교수  
 관심분야 : Solid Modeling, Feature Modeling, Computer Graphics, Engineering Data Base