

복합다양체 솔리드모델러의 자료구조 비교

최 국 현,* 한 순 흥*

A Comparison of Data Structures for Non-manifold Solid Modelers

Choi Guk-Heon,* Han Soon-Hung*

ABSTRACT

Several non-manifold data structures have been compared, which are radial-edge data structure, partial-face data structure, vertex-based data structure, and Yamaguchi's data structure. All the entities in the data structures are classified into common entities and special entities. The entities are also classified as model entities, primitive entities, bounding entities, and coupling entities. The four data structures for nonmanifold solid modelers are compared in terms of accessing efficiency, storage requirements, and inclusion of circulation. The results of comparison will serve as the basis to develop a non-manifold modeler.

Key Words : Non-manifold data structure, Topological Entity, Geometrical Entity, Primitive Entity, Coupling Entity, Bounding Entity.

1. 개 요

형상모델의 한 표현 방법인 B-Rep(Boundary Representation)의 데이터 구조는 그들이 표현할 수 있는 물체의 기하학적 차원에 따라 다양체 모델과 복합 다양체 모델로 구분된다. 복합다양체 모델을 이용하면 설계의 초기 단계인 개념설계 단계에서도 불완전한 형상의 표현이 가능하는 등 장점이 있어 최근에 관련 데이터 구조에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다.^(1,13,15)

복합다양체에 대한 자료구조는 크게 인접 그래프(Incidence Graph)방식과 정렬 위상 표현(Ordered Topological Representation)방식으로 나눌 수 있다.^(9,10) 인접 그래프 방식은 물체의 완전한 표현에 중점을 두고 있으므로, 일반적으로 정렬 위상 표현 방법에 비해 저장공간이 많이 소요되고 정보탐색 시간이 길다. 따라서 이 글에서는 필요한 정보를 간결 명료하게 저장하여 이를 쉽게 사용하는 데 유리한 정렬 위상 표현 방법의 자료구조 중, Radial-edge 자료구조⁽³⁾, Vertex-

* 한국과학기술원 자동차 및 설계공학과

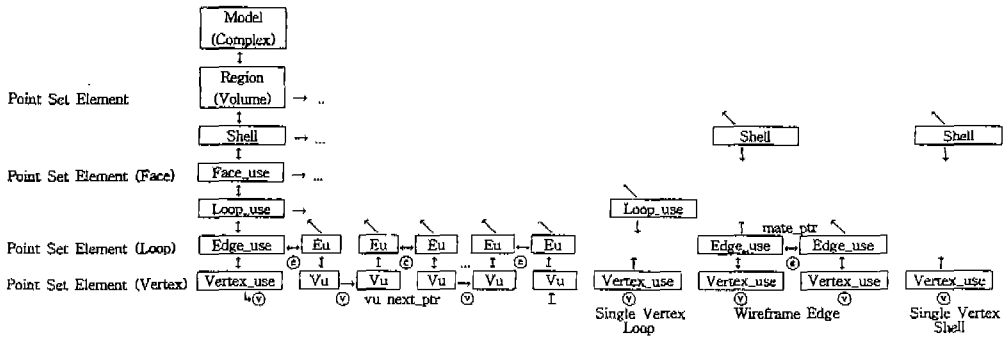


Fig. 1 Radial-edge Data Structure(3)

based 자료구조⁽⁶⁾, Yamaguchi 자료구조⁽¹⁰⁾, 부분면 자료구조⁽¹²⁾를 비교 검토하여 향후 관련 연구를 위한 기초를 마련하는데 그 목적이 있다.

2. 다양체와 복합다양체의 자료구조

어떤 솔리드 모델의 경계(Boundary)의 모든 점이 오픈 디스크(Open Disk)에 동상(Homeomorphic)이면 그 솔리드는 다양체 구조라 한다.^(2, 5, 14) 여기서 다양체란 2차원 다양체(2-manifold)를 말한다. 다양체 모델은 Regularization 등의 방법에 의하지 않고는 불리언 작업에 대해 닫혀져 있지 않다.⁽⁵⁾ 즉, 불리언 작업의 결과물이 다양체가 아닌 경우가 발생한다. 뿐만 아니라 다양체 구조는 낮은 차원의 위상요소를 포함하고 있지 않다. 이는 곧 와이어프레임이나 면과 같은 요소들이 다양체 모델에는 단독으로 표현될 수 없음을 말한다.

복합다양체 모델은 솔리드 모델뿐만 아니라 면, 와이어프레임, 점 등을 하나의 통합된 자료구조를 사용하여 표현할 수 있다. 복합다양체 모델은 다양체 모델의 영역을 확장하여 일반화한 것으로 말할 수 있다. 복합다양체는 모델링 영역의 확장에 따라 다음과 같은 장점을 갖는다. 즉,

- 와이어프레임, 면, 솔리드 등이 혼합된 물체의 표현이 가능하다.
- 물체의 중심축, 절단면 등의 표현이 가능하다.
- 다양체 모델에서는 표현 곤란한, 설계의 중간 단계에 있는 물체 표현이 가능하다.

반면 복합다양체 모델은 자료구조가 복잡하고, 알고리즘 구현이 어려우며, 저장공간을 많이 차지하는 단점이 있다.

복합다양체는 한 모서리에 2개 이상의 면이 인접한 경우가 발생되며, 이러한 복잡 형상을 표현하기 위하여 Weiler⁽⁷⁾는 face, loop, edge, vertex에 “use”의 개념을 도입하였다. Weiler의 자료구조는 근본적으로 모서리에 근거한 자료구조로서 꼭지점에서의 복합 다양체 상황을 표현하는데 미비점이 있다. Lee⁽¹²⁾는 이전의 복합다양체 자료구조들이 저장공간을 많이 차지하는 점을 해소하기 위하여 부분면 자료구조를 제안하였다. 이상의 두 자료구조는 모두 모서리에 있어서의 인접관계 표현에 중점을 두고 있으므로 이를 모서리 기반 자료구조라 하기로 한다.

Choi^(6, 8)는 Vertex-based 자료구조를 제안하여 꼭지점에 있어서의 복합 다양체 상황을 명확히 표현하였다. Yamaguchi^(10, 16)는 Feather라는 위상요소에 Fan, Blade, Wedge에 해당하는 포인터를 저장하고 있는데, 이는 Vertex-based 자료구조의 Cusp에 해당하는 것이다(Fig. 5 참조). Vertex-based 자료구조와 Yamaguchi 자료구조는 꼭지점에서의 위상요소 표현에 중점을 두고 있으므로 이들을 꼭지점 기반 자료구조라 하기로 한다.

이와 같은 복합다양체 모델에서 나타나는 위상요소들은 세분하여 모델(Model), 기본 위상요소(Primitive Entity), 연결 위상요소(Coupling Entity), 그리고 경계 위상요소(Boundary Entity)로 구분할 수 있으며, 이하에서는 공통 위상요소와 상이 위상요소에 대하여 이와 같은 세분을 적용 검토해 보기로 한다.

3. 복합다양체 자료구조의 공통 위상요소

복합다양체 모델의 위상 자료구조를 검토하기 위하

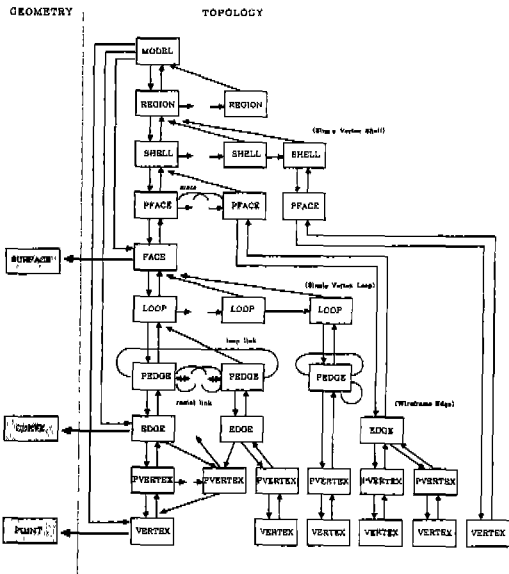


Fig. 2 Partial-face Data Structure(10)

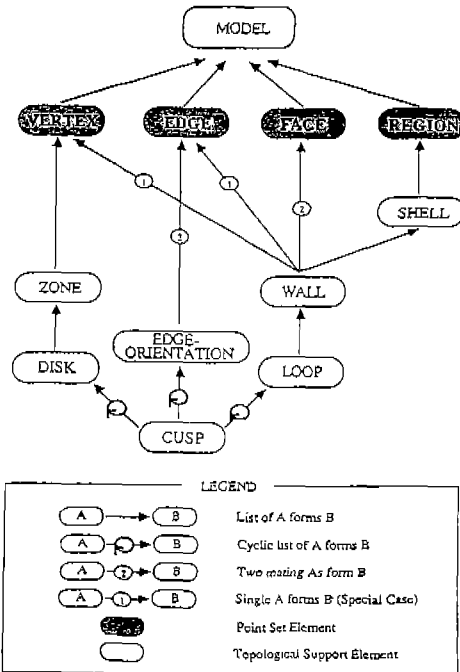


Fig. 3 Vertex-based Data Structure(6)

여, 우선 기존의 제안된 자료구조들이 공통적으로 가지고 있는 공통 위상요소들을 검토한 후, 다음절에서 상이한 위상요소에 대하여 검토하고자 한다. Fig. 1~4는

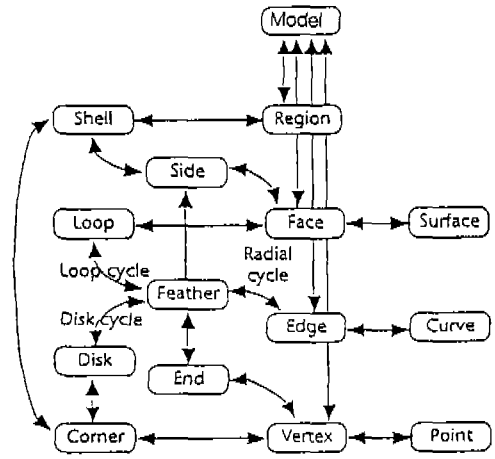


Fig. 4 Yamaguchi's Data Structure(14)

Table. 1 Pointers of Common entities

Entities	Radial-edge	Partial-Face	Vertex-Based	Yamaguchi
1. Model	next region	next region	vertex face edge region	region face edge vertex
2. Region	model next shell	model next shell	model zone shell next_of_models	model shell next
3. Shell	region next downptr	region next pface	region wall(downptr) next_of_regions	region side downptr (corner) next
4. Face	faceuse surface	pface loop surface	model fore_wall back_wall next_of_models	model side1 side2 loop next
5. Loop	loopuse	next face pface	wall cusp maleloop next_of_walls	face feather next
6. Edge	edgeuse curve	parent pvertex[2] curve	model fore_EO back_EO next_of_models	model feather next
7. Vertex	vertexuse point	parent point	model zone cusp next_of_models	model end corner next

각각 Radial-edge, 부분면 자료구조, Vertex-based 자료구조, 및 Yamaguchi 자료구조를 보여준다. 이들 자료구조에서 공통적으로 나타나는 위상요소는 다음과 같으며, Table. 1은 이들 공통 위상요소들의 포인터를

정리한 것이다.

3.1 모델 (Model)

3 차원 위상 모델링 공간이며, 엄밀한 의미에서 위상 요소가 아니라 위상요소들의 저장소 역할을 한다. 형상 모델링 시스템에서 조작하는 대상이 된다. 그러므로 자료구조의 위상요소 비교의 대상에서는 제외된다.

3.2 기본 위상요소

1) 영역(Region) : 3차원 공간의 요소로서, 하나의 모델 안에는 하나 이상의 영역이 존재한다. 무한대의 영역을 포함한 모든 영역은 하나의 바깥쪽 셸을 경계로 가지며, 내부에 다른 영역이 있는 경우에는 안쪽 셸을 갖는다. 무한대 영역의 바깥쪽 셸은 무한대에 위치한 가상의 셸이다.

2) 면(Face) : 2차원 요소로서, 하나 또는 그 이상의 꼭지점과 0 또는 그 이상의 모서리로서 구성되며, 그 경계되는 루프는 포함하지 않는다. 다음에 설명되는 루프에 의해 경계 지워지며, 적어도 하나의 바깥 루프를 갖는다. 내부에 구멍이 있으면 안쪽 루프를 갖는다. 면은 자신의 기하학적 정보인 곡면의 법선 방향을 기준으로 하여 안팎을 결정하며, 루프의 방향을 결정한다.

3) 모서리(Edge) : 2개의 꼭지점으로 정의되는 1차원 요소이다. 경계되는 시작과 끝 꼭지점은 포함하지 않는다.

4) 꼭지점(Vertex) : 0차원 요소로서 유클리드 공간 내의 한 점을 말한다.

3.3 경계 위상요소

1) 셸(Shell) : 셸은 영역의 경계 곡면이다. 영역이 닫힌 곡면으로 둘러싸이면 셸은 일반적으로 방향성을 갖는다. 홀로 있는 꼭지점이나, 순수 와이어프레임 모서리도 셸을 구성하나 방향성은 없다. 어떤 면의 양측면이 그 면을 뚫지 않고 방문할 수 있으면 그 양측면은 같은 셸에 속한다.

2) 루프(Loop) : 방향성을 갖는 면의 연결된 경계를 말한다. 바깥쪽 루프(peripheral loop)는 곡면의 법선 방향에서 볼 때 반시계방향, 안쪽 루프(hole loop)는 시계 방향이고, 홀로 있는 꼭지점이면 방향성이 없다. 엄밀한 의미에서 루프는 Radial-edge 자료구조와 Vertex-based 자료구조에서는 다음절에서 설명될 상이 위상요소 face_use(wall)의 경계이며, 부분면 자료

Table. 2 Pointers of special entities

Radial-edge		Panel-face		Vertex-based		Yamaguchi	
Entities	Pointers	Entities	Pointers	Entities	Pointers	Entities	Pointers
faceuse	shell next mate loopuse face	Partial-face	next shell chkoff(e,v) mate	wall	shell loop root(V, E, F) matemate next_of_shells	side	shell face next
loopuse	faceuse next mate downtriflex, vul loop	Partial-edge	loop chkoff(e, pv) next_in_loop radial_next	edge-orientation	vertex edge mateEO curve	and	vertex feather next
edgeuse	loopuse loopedgeuse radialedeuse mate edge vertexuse	Partial-vertex	next parent(pv,pl) vertex	zone	vertex region disk next_of_vertex next_of_regions	corner	shell next(s) next(v) disk vertex
vertexuse	loopuse next vertex			disk	zone cusp next_of_zones	disk	corner feather next
				cusp	vertex disk loop ao matemate next_of_vertices next_of_disks next_of_loops next_of_aos	feather	loop disk and edge side feather(m) feather(m) feather(wm)

구조에서는 face의 경계이다.

4. 상이 위상요소의 검토

다음은 각 자료구조에서 서로 다르게 정의하여 사용하고 있는 위상요소들을 소개한다. Table. 2는 이들 상이 위상요소들에 대한 포인터를 정리한 것이다.

4.1 Radial-edge 자료구조

Radial-edge 자료구조⁽³⁾에는 11개의 위상요소들이 있는데 그중 7개는 앞에서 설명한 바와 같으며 나머지 4개는 다음과 같다. Radial-edge 자료구조의 상이 위상요소는 모두 연결 위상요소이다.

1) face_use : 면을 이루는 양측 면을 말하며, 셸에 의해 사용된다. face_use의 경계는 loop_use가 된다. face_use는 loop_use와 face에 대한 포인터를 갖는다. 일반적으로 면의 개수의 2배 만큼 존재한다.

2) loop_use : face_use의 경계로서 edge_use의 리스트에 대한 포인터를 갖는다. 만약 홀로 있는 꼭지점 루프이면 하나의 vertex_use에 대한 포인터를 갖는다.

3) edge_use : loop_use의 구성 요소로서 한 모서리에 대해 인접 loop_use 개수만큼 존재한다.

4) vertex_use: 주어진 꼭지점에 연결된 edge_use의 개수만큼 존재한다.

4.2 부분면 자료구조

이 자료구조는 복합다양체 모델의 자료 저장 효율성에 중점을 두고 개발되었다. 앞에서 설명한 7개의 공통 위상요소 외에 3개의 상이 위상요소를 사용하고 있는데, 그들은 모두 연결 위상요소이며, 각각 다음과 같은 의미를 갖는다.

1) 부분면 : 면의 양측면 가운데 하나로써 소속 면에 대한 포인터와 방향을 갖는다. 자신의 경계인 loop와 이웃 부분면과의 관계를 저장하지 않고, 필요할 때마다 소속 면의 인접 정보로부터 유도해 낸다.

2) 부분모서리 : 면을 경계짓는 loop의 구성 요소로서, 인접 면의 개수만큼 존재하며, 방사형 순환(radial cycle)에서 앞뒤 모서리 포인터와, 루프 순환(loop cycle)내의 앞뒤 모서리 포인터를 갖는다.

3) 부분꼭지점 : 꼭지점에 연결된 꼭면 및 와이어프레임 모서리에 대하여 하나씩 존재하며, 자신이 속한 꼭지점과 하나의 모서리에 대한 포인터를 저장한다.

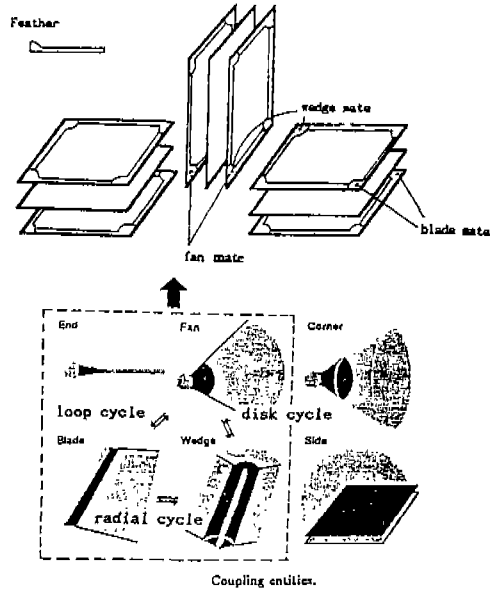


Fig. 5 The Concept of Feather(14)

4.3 Vertex-based 자료구조

총 12개의 위상요소로서 구성되며⁶⁾, 상이 위상요소의 의미는 다음과 같이 분류될 수 있다.

1) 경계 위상요소

• Disk : zone의 경계로서 셸(shell)의 국소적인 의미로서 생각할 수 있다. 꼭지점 주위에서 위상학적으로 오픈 디스크를 형성하는, face와 연관된 wall의 집합이다.

2) 연결 위상요소

• Zone : zone은 영역(region)의 국소적인 의미로 해석할 수 있다. zone은 꼭지점 주위의 미소 3차원 영역이다. vertex는 몇 개의 zone과 관련이 있는데, 이들 zone의 집합은 그 꼭지점 주위에 미소 구를 형성한다. 즉, zone은 꼭지점 주위의 작은 구의 내부를 구성하는 부분집합이 된다.

• Wall : shell을 형성하는 요소로서, 면의 양 측면 중 하나이다. 임의의 면의 한쪽 wall은 그 면의 방향과 일치하며, 다른 쪽 wall은 그 반대이다. wall의 경계는 loop이다. wall은 하나 또는 그 이상의 loop로 정의되고, 소속된 면과 짝을 이루는 wall에 대한 포인터를 가진다. 와이어프레임 모서리나 홀로 있는 꼭지점은 방향성이 없으며, 하나의 루프로 구성된다.

• EO (Edge Orientation) : 모서리의 두 방향 중의 하나이다. 5.4절에 설명될 방사형 순환을 포함한다.

• Cusp : cusp는 꼭지점과 모서리의 사용 방법을 결정하는 요소이다. cusp는 vertex와 짝을 이루는 cusp에 대한 포인터를 갖는다. cusp는 또한 EO, disk, loop에 대한 포인터를 갖는다. EO는 cusp의 플러스 또는 마이너스 방향의 순환 리스트이다. disk는 꼭지점 주위의 연속된 surface를 결정하는 cusp의 리스트를 말한다. loop는 임의의 면에서의 cusp의 순환 리스트이다.

4.4 Yamaguchi 자료구조

1) 경계 위상요소

• Disk : 이는 Vertex-based 자료구조의 disk에 해당하는 개념으로 셸의 국소적인 의미이다.

2) 연결 위상요소

• Corner : Vertex-based 자료구조의 Zone에 해당하는 개념이다.

• Side : Vertex-based 자료구조의 Wall에 해당하는 개념이다.

• End : Edge와 Vertex의 인접관계를 저장하고 있는 연결 위상요소이다.

• Feather : Vertex-based 자료구조의 cusp의 개념을 변형하여 사용하고 있는데, 이는 Fan, Blade, Wedge에 해당하는 포인터를 갖고 있다(Fig. 5 참조).

5. 복합다양체 자료구조의 비교

네 가지 복합다양체 자료구조에 대하여 속도, 메모리의 사용, 그리고 순환의 포함 정도 등을 비교 검토해 보았다.

5.1 위상요소들의 비교

부분면 자료구조는 Radial-edge 자료구조의 위상요소들과 유사한 점이 많이 있다. 부분면은 face_use와 유사하나, loop를 포함하지 않는 점이 다르다. 부분모서리는 edge_use와 유사하나, edge_use가 face_use를 경계짓는 loop_use의 구성 요소인 반면, 부분모서리는 face를 경계짓는 loop의 구성 요소이다. 부분 꼭지점은 vertex_use와 유사하나, 모서리의 양 끝을 구성하므로 edge_use를 구성하는 vertex_use와 차이점이 있다.

Vertex-based 자료구조와 Yamaguchi 자료구조는 매우 유사한 점이 많다. 즉, Vertex-based 자료구조의 Disk, Wall은 각각 Yamaguchi 자료구조에서 Corner, Side에 해당한다. Vertex-based 자료구조의 Cusp는 Yamaguchi 자료구조에서 Feather로 사용되고 있는데 이는 사용하는 포인터가 Fan, Wedge, Blade에 대한 포인터로 대체된 점이 틀린 점이다.

개념적으로 Radial-Edge 자료구조의 face_use는 부분면 자료구조의 부분면, Vertex-based 자료구조의 Wall, 그리고 Yamaguchi 자료구조의 Side에 상응한다.

5.2 인접 정보 획득 용이성

자료구조 상의 인접 위상정보 획득은 공통 위상정보 획득 용이성과, 상이 위상정보 획득 용이성으로 분류될 수 있다. 공통 위상요소의 인접관계는 모델을 제외한 6가지 요소에 대하여 모두 $6 \times 6 = 36$ 가지의 인접관계를 가질 수 있다. 모델은 실제 인접관계 추출과 무관하기 때문에 제외된다. 대부분의 자료구조들은 효율성을 위하여 일부 인접관계만을 저장하고, 저장되지 않은 나머지 요소들의 인접관계는 저장된 인접 정보로부터 유도하여 사용한다. 공통 위상요소의 인접관계는 상이 위상요소와도 밀접한 관계가 있으나, 전체적으로 볼 때 각 자료구조는 이들의 인접관계 추출에 필요한 포인터를 갖고 있으므로 서로 비슷한 시간이 소요될 것이다. 그러나 저장되지 않았기 때문에 유도하여야 할 인접관계는 자료구조에 따라 각각 차이가 있을 것이며 이것은

상이 위상요소에 따라 결정된다.

상이 위상요소의 인접관계 용이성을 알아보기 위하여서는, 많이 사용되고 또한 각 자료구조에서 모두 필요한 함수를 선정하여야 한다. 이러한 함수의 대표적인 것이 face_use(부분면, Wall, 또는 Side)에서 인접 face_use로 찾아가는 경우이다. 이는 새로운 면을 추가시켰을 때, 새 영역이 생성될지 여부를 판단하기 위하여, 오일러 작업시 빈번히 사용되는 경우이다. 임의의 face_use의 다음 face_use를 찾아가는 과정을 살펴보면, Radial-edge 자료구조, Vertex-based 자료구조, Yamaguchi 자료구조에서는 별다른 절차 없이 저장된 정보를 이용하여 쉽게 찾을 수 있다.

그러나 부분면 자료구조는 5.4절에서 설명될 방사형 순환 정보를 명확히 갖고 있지 않으므로, 인접 부분면을 찾아가자면 별도의 처리 과정이 필요하다. 이 과정은 Vertex-based 자료구조에서 다음 wall을 찾아가는 과정을 모방한 것인데, 가상 edge-use(부분모서리에 대한 포인터와 방향 플래그(flag)를 가짐) 개념을 도입한 후 다음 부분면을 찾아가는 것이다. 따라서 부분면 자료구조는 인접 부분면을 찾아가는데 있어 다른 자료구조에 비하여 비교적 시간이 많이 소요된다.^[12]

새로운 면을 추가하여 새 영역을 생성하려면 최초 하나였던 셀이 2개의 셀로 재구성되어야 하는데, 이때의 알고리즘은 Radial-edge 자료구조의 경우, 모서리의 Radial 정보를 이용하여 간단히 영역의 울타리를 찾을 수 있다. 그러나 꼭지점에 복합다양체 상황이 존재하는 경우 기하학적 계산이 필요하다. 부분면 자료구조도 이와 같은 단점을 지니고 있어 별도의 처리 알고리즘을 채택하고 있다.^[12] 그러나 Vertex-based 자료구조와 Yamaguchi 자료구조는 zone(또는 Corner)과 disk의 정보를 이용하여 꼭지점에서의 복합다양체 상황을 명확히 표현하고 있으므로, 단일화된 알고리즘으로 셀을 찾을 수 있다.

결과적으로 부분면 자료구조는 자료구조 자체만으로 인접 부분면을 찾아 갈 수 없으며, 이들 위상정보 추출을 위해 별도의 알고리즘이 필요하다. 한편, Vertex-based 자료구조와 Yamaguchi 자료구조는 꼭지점에서의 복합다양체 상황을 가장 잘 표현할 수 있음을 알 수 있다.

5.3 자료 저장 공간의 사용량

일반적으로 CAD 시스템에서의 복합 다양체 상황은

Table. 3 Storage Requirements

	Radial-edge	부분면	Vertex-based	Yamaguchi
Storage space	2.4	1.0	3.4	3.1

설계 중간 단계에서 나타나게되며, 다양체 상황은 설계 종료시점에 나타나게 된다. 따라서 다양체 상황에서의 자료 저장량이 복합 다양체 상황에서의 자료 저장량 보다 중요하다. 그러므로 자료 저장량 비교는 다양체 상황에 대하여 수행하기로 한다. 다양체 상황에서의 자료 저장량을 Wilson의 비교 방식⁽⁴⁾을 이용하여 비교한 결과는 Table.3과 같다.⁽¹²⁾ 그 내용은 부분면 자료구조가 저장공간을 가장 적게 사용하며, 그 다음이 Radial-edge 자료구조, Yamaguchi 자료구조 및 Vertex-Based 자료구조의 순이다. 이 때 사용된 가정은 다음과 같다.

- (가정) ① 꼭 필요하지 않은 필드는 무시한다.
- ② 모든 필드들은 동일한 크기의 포인터를 저장한다.
- ③ 단일 연결 리스트 구조.
- ④ 플래그(flag)는 한 비트이므로 무시한다.

5.4 순환의 포함 여부

복합다양체의 인접관계를 저장하기 위하여 3가지 순환이 사용된다 [6,10]. 다음은 이들 3가지 순환에 대한 정의이다.

- 1) 루프 순환 (Loop cycle) : 면 주위의 루프에 대한 순환.
- 2) 방사형 순환 (Radial Cycle 또는 Edge Orientation Cycle) : 모서리 주위의 면들에 대한 순환.
- 3) 디스크 순환 (Disk cycle): 꼭지점 주위의 면들에 대한 순환.

자료구조의 인접관계 추출 용이성을 보기 위하여 이들 순환의 포함 여부를 비교하면 Table.4와 같다. Radial-edge 자료구조는 edge_use에 루프 순환과 방사형 순환에 대한 정보를 갖고 있다. 부분면 자료구조는 부분모서리에 루프 순환과 방사형 순환 정보를 저장하고 있다. 그러나 방사형 순환의 경우 면들에 대한 순환에 국한되어 있고, 부분면에 대한 방사형 순환은 저장되어 있지 않다. Vertex-based 자료구조는 cusp에, Yamaguchi 자료구조는 Feather에 3가지 순환 정보를 모두 저장하고 있다. 결과적으로 Vertex-based 자료구조와 Yamaguchi 자료구조가 디스크 순환을 포함

Table. 4 Circulation inclusion.

	Radial-edge	부분면	Vertex-based	Yamaguchi
Loop cycle	○	○	○	○
Radial cycle	○	△	○	○
Disk cycle	○	○	○	○

○: 포함, △: 일부 포함.

하고 있어, 꼭지점에서의 복합다양체 상황을 가장 잘 표현할 수 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

이 글을 통하여 복합다양체 모델 중 Radial-edge 자료구조, 부분면 자료구조, Vertex-based 자료구조 및 Yamaguchi 자료구조의 공통 위상요소와 상이 위상요소에 대한 특성을 살펴보았으며, 또한 각 자료구조들의 인접 정보 획득 용이성, 자료 저장 공간의 사용량, 그리고 순환의 포함 여부 등에 대하여 비교하였다. 그 결과 Radial-edge 자료구조와 부분면 자료구조는 모서리 (Edge)를 중심으로 한 인접관계의 표현에 중점을 두고 있으며, Vertex-Based 자료구조와 Yamaguchi 자료구조는 꼭지점을 인접관계 표현에 중점을 두고 있다.

모서리 중심 자료구조는 꼭지점 중심 자료구조보다 자료 저장량이 적은 장점이 있는 반면 꼭지점에서의 위상 관계 표현이 불명확한 단점이 있다. 부분면 자료구조는 Radial-Edge 자료구조보다 자료의 저장 공간은 줄었으나, 방사형 순환 정보를 명확히 포함하고 있지 않아 인접 부분면을 찾아가는 데에는 비효율적이다. Yamaguchi 자료구조는 Vertex-based 자료구조의 Cusp를 일부 수정하여 Feather라는 개념을 도입하여 사용하고 있으나, 인접관계 추출 효율성 및 자료 저장 공간의 정도는 거의 서로 비슷한 수준이다. 이와 같은 복합다양체 지원 자료구조들의 특징과 차이점의 분석을 통하여 복합다양체 모델 개발을 위한 기초를 마련하였다.

참고문헌

1. B. G. Baumgart, "Geometric Modeling for Computer Vision", Technical Report, Report STAN-CS-74-463, Stanford Univ.: Stanford Artificial Intelligence Laboratory, 1974.

2. J. R. Munkres, *Topology: A First Course*, Prentice-Hall, 1975.
3. K. Weiler, "Topological Structures for Geometric Modeling", Ph.D. Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, August 1986.
4. P. R. Wilson, "Data Transfer and Solid Modeling", in M. J. Wozny, H. W. McLaughlin, J. I. Encarnacao (Eds.), 'Geometric Modeling for CAD Applications', Elsevier Science Publishers, North-Holland, pp.217-254, 1988.
5. M. Mantyla, *An Introduction To Solid Modeling*, Computer Science Press, 1988.
6. Y. Choi, "Vertex-based Boundary Representation of Non-manifold Geometric Models", Ph.D. Thesis, Dept. of Mechanical Engineering, Carnegie Mellon University, August 1989.
7. K. Weiler, D. McLachlan, "Generalized Sweep Operations in the Non-Manifold Environment", in M. J. Wozny, J. U. Turner, K. Preiss (Eds.), 'Geometric Modeling for Product Engineering', Elsevier, pp.87-106, 1990.
8. E. Levent Gursoz, Y. Choi, F. B. Frinz, "Vertex Based Representation of Non-Manifold Boundaries", in M. J. Wozny, J. U. Turner, K. Preiss (Eds.), 'Geometric Modeling for Product Engineering', Elsevier, pp.107-130, 1990.
9. J. Rossignac and M. A. O'Conner, "SGC: A Dimensional-independenct Model for Pointsets with Internal Structures and Incomplete Boundaries", in 'Geometric Modeling for Product Engineering', North-Holland, pp.145-180, 1990.
10. P. Linehardt, "Topological Models for Boundary Representation: a comparison with n-dimensional generalized maps", *Computer-Aided Design*, vol.23 no.1, January/February 1991, pp.59-82.
11. Y. Yamaguchi, K. Kobayachi, F. Kimura, 'Geometric Modeling with Generalized Topology and Geometry for Product Engineering', in J. Turner, J. Pegna, M. Wozny (Eds.), "Product Modeling for Computer-Aided Design and Manufacturing", IFIP TC5/WG5.2 Working Conference, North-Holland, pp. 97-115, 1991.
12. 이상현, "사출성형제품의 설계 및 해석의 통합 환경을 제공하기 위한 특징 형상 기반 비다양체 모델링 시스템의 개발", 박사학위 논문, 서울대 기계설계학과, 1993년 8월.
13. J. Rossignac, "Representing Solids and Geometric Structures", in S. Kodiyalam, M. Saxena (Eds.), 'Geometry and Optimization Techniques for Structural Design', Elsevier, pp.1-44, 1994.
14. I. Zeid, "Non-manifold Geometric Modeling: an Overview", in S. Kodiyalam, M. Saxena (Eds.), 'Geometry and Optimization Techniques for Structural Design', Elsevier, pp.45-68, 1994.
15. 한순홍, 이현찬, 김재정, 박준영, "개방형 구조를 갖는 객체 지향적 형상모델러의 개발", 특정 연구 과제 제1차 중간 보고서, 과학재단, 1994년 6월.
16. Y. Yamaguchi, F. Kimura, "Nonmanifold Topology Based on Coupling Entities", *IEEE. Computer Graphics and Applications*, Jan. pp.42-50, 1995.