

## 특징형상 변환을 이용한 B-rep 모델의 다중해상도 구현

최동혁\*, 김태원\*\*, 이건우\*\*\*

### Multi-resolutional Representation of B-rep Model Using Feature Conversion

Choi, D. H.\* , Kim, T. W.\*\* and Lee, K. W.\*\*\*

#### ABSTRACT

The concept of Level Of Detail (LOD) was introduced and has been used to enhance display performance and to carry out certain engineering analysis effectively. We would like to use an adequate complexity level for each geometric model depending on specific engineering needs and purposes. Solid modeling systems are widely used in industry, and are applied to advanced applications such as virtual assembly. In addition, as the demand to share these engineering tasks through networks is emerging, the problem of building a solid model of an appropriate resolution to a given application becomes a matter of great necessity. However, current researches are mostly focused on triangular mesh models and various operators to reduce the number of triangles. So we are working on the multi-resolution of the solid model itself, rather than that of the triangular mesh model. In this paper, we propose multi-resolutional representation of B-rep model by reordering and converting design features into an enclosing volume and subtractive features.

**Key words** : Multi-resolution, Low resolution, High resolution, Feature, Additive feature, Subtractive feature, Feature conversion, Hierarchical inclusion relation

#### 1. 서 론

##### 1.1 연구 배경

기존의 Level Of Detail(LOD)에 관한 연구는 거의 대부분 삼각형 메쉬(triangular mesh)를 대상으로 edge-collapse, vertex-removal과 같은 방법으로 삼각형의 수를 줄여나가는 decimation에 관한 것이었다.

본 논문에서는 상용 CAD시스템에서 사용되는 B-rep 파트 모델을 다중해상도로 표현하고자 한다. B-rep 모델은 삼각형 메쉬로 이루어진 모델에 비해서 복잡한 기하와 위상을 가지고 있다. 삼각형 메쉬에서는 모든 형상을 작은 삼각형들의 집합으로 나타내는 것이므로 기하의 기본단위가 되는 것을 삼각형이라고 볼 수 있고, 위상은 인접한 삼각형끼리의 연결관계라고 볼 수

있으므로 비교적 간단하다.

하지만 B-rep에서는 직선, B-spline, NURBS 등의 다양한 기하들이 같이 사용된다. 또한 B-rep에서의 위상이라는 개념은 면, 모서리, 꼭지점을 포함하며, 그것들이 서로 어떻게 연결되어 있는가에 대한 정보라고 볼 수 있다<sup>[1]</sup>. 그러므로 B-rep 파트 모델을 다중해상도로 표현한다고 하면, 기하와 위상을 다중해상도로 표현하는 것으로 삼각형 메쉬의 경우에 비해 상당히 복잡하다.

B-rep 파트 모델의 다중해상도 구현에 대해서 본 논문에서는 다음과 같은 방식을 통해 접근해보았다.

일단 B-rep 자체를 대상으로 하지 않고, 설계에 활용된 설계 특징형상 정보를 사용한다. 특징형상정보를 활용하여 어떠한 형상이 그 파트 모델에 있어서 주된 형상(main topology)이고 어떠한 형상이 세부형상(detail topology)로 볼 수 있는가를 분석해서 계층적으로 분류하고 이러한 계층구조를 바탕으로 top-down 방식으로 파트 모델을 나타낸다.

다시 말해서, 파트 모델의 최종형상에 기여도가 높

\*INUS Technology

\*\*중신회원, 세종대학교 디지털콘텐츠학과

\*\*\*중신회원, 서울대학교 기계항공공학부

- 논문투고일: 2001. 5. 28

- 심사완료일: 2002. 2. 15

다고 판단되는 특징형상들에 우선권을 부여하고, 다중 해상도의 구현에 적합한 형태로 특징형상을 재배치하고 변환하는 과정을 거쳐서 B-rep파트 모델의 다중해상도를 구현하고자 한다.

## 1.2 관련 연구

Level Of Detail에 관한 연구로는 먼저 삼각형 메쉬를 대상으로 한 decimation이 집중적으로 연구되어 왔고, 그 외에 솔리드 모델에 대해서는 여러 가지 공학적인 응용분야에 따라서 그에 적합한 수준의 복잡도를 가진 모델을 만들어서 사용하려는 목적에서 연구가 진행되어 왔다.

### 1.2.1 Decimation

삼각형 메쉬를 대상으로 삼각형의 개수를 줄이는 decimation에 대하여는 지금까지 많은 연구가 진행되어 왔는데 대표적인 방법으로 아래에 제시되어 있는 것과 같은 local operator를 적용하는 방법이 있다<sup>[2-5]</sup>.

- Vertex-removal
- Edge-collapse
- Face-removal
- Edge-flip
- Vertex-displacement

### 1.2.2 Octree-based approach

Octree는 voxel representation처럼 공간 상의 물체를 육면체의 집합으로 나타내는데, 하나의 육면체를 8개로 분할해서 검정, 회색, 흰색노드로 구분하여, 회색노드는 계속해서 분할해 나가게 된다. Octree의 이러한 성질은 기본적으로 다중해상도의 측면을 가지고 있기 때문에, 솔리드 모델의 다중해상도를 구현하는 데에 있어서 octree를 사용하려는 연구가 진행되었다.

Carlos Andujar Gran<sup>[6]</sup>은 다면체 솔리드에 대해서 octree를 활용하여 간략화를 수행하였다. 이 논문에서는 다면체 솔리드를 대상으로 DPS(Discretized Polyhedra Simplification)라는 방법을 소개하고 있다. 먼저 다면체 솔리드를 입력으로 받아들이고 octree를 생성하여 octree 모델로 다면체 솔리드를 나타낸다. 그렇게 해서 생성된 octree 모델은 육면체의 집합의 형태인데, 그것에 면 감소 연산자를 이용하여 octree 모델 보다는 원래의 모델에 근접한 부드러운 다면체를 만들어 내는 방식으로 다면체 솔리드의 다중해상도를 구현하였다. 해상도는 octree의 그리드간격을 조정함으로써 구현된다.

### 1.2.3 Convex decomposition

Kim, Y. S.<sup>[9]</sup>은 form feature recognition을 ASVP(Alternating Sum Of Volumes with Partitioning)이라

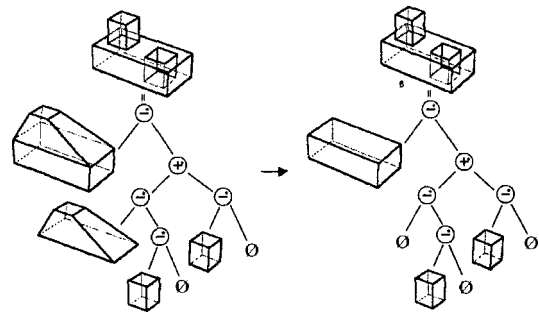


Fig. 1. Conversion of ASVP into FFD.

고 불리는 convex decomposition방식을 이용하여 구현하였다.

아래의 Fig. 1에서 왼쪽의 그림은 ASVP방식으로 convex decomposition한 예이며 이것을 form feature recognition에 활용하기 위해 오른쪽의 FFD(Form Feature Decomposition)트리로 변환하게 된다.

이 논문은 특징형상인식에 주된 초점이 놓여진 논문인데, ASVP방식으로 convex decomposition을 수행한 후 생기는 convex object간의 boolean 연산으로 이루어진 트리가 본 논문의 주제인 B-rep 파트 모델의 다중해상도의 구현에서 요구되는 성질을 가지고 있다. 즉 B-rep 파트 모델의 Level Of Detail이 top-down 방식으로 얻어지게 되고, 트리의 최상위 노드에 있는 convex object는 원래의 파트 모델을 저해상도에서 근사적으로 나타내 주는 것이라고 볼 수 있다.

### 1.2.4 Machining feature recognition

Machining에서 어떤 형상의 구현은 항상 원재료로부터 volume을 제거해내는 제거 특징형상들로 이루어져 있기 때문에, 원재료를 최종형상을 둘러싸는 저해상도 모델로 보고 제거하는 특징형상들을 세부위상으로 보면, B-rep 파트 모델의 다중해상도 구현이라는 본 논문과 연관성이 있다.

Lee, J. Y.와 Kim, K.<sup>[7]</sup>은 특징형상정보를 기반으로 설계된 모델에 대해서 그 특징형상정보를 활용해서 machining 특징형상을 추출해 내었다.

1.2.5 해석용 모델을 위한 B-rep 파트 모델의 간략화 Belaziz<sup>[8]</sup>은 해석용 도구과 CAD시스템을 통합시키기 위해서, 간략화 된 해석용 모델을 만들어 해석을 수행하고 해석결과에 따라서 원래의 모델의 파라미터를 변경해서 설계를 변경하는 구조를 제안하였다. 이 논문에서는 해석용 모델을 두 가지의 단계를 통해 만들어 내는 과정을 설명하고 있는데, 하나는 단순화(simplification)이고 다른 하나는 이상화(idealization)이다. 단순화는 특징형상 인식에 의해서 혹은 설계된 특

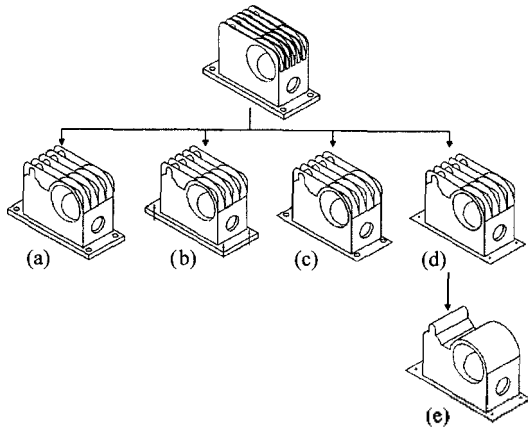


Fig. 2. Example of simplification and idealization to generate analysis model.

징형상이 있을 때는 그 정보를 가지고 해석용 모델에서 필요하지 않다고 생각되는 부분과 관련된 특징형상을 제거하는 것을 말한다. 이상화는 단순화에 의해서 생성된 모델에 대해서 가능할 경우 차원제거를 통해 해석용 모델의 차원을 줄이는 과정을 말한다.

Fig. 2는 speed reductor casing 모델에 대해서 해석용 모델을 만들기 위해서 간략화와 이상화를 거쳐서 해석의 목적에 맞게 적합한 모델을 만들어 낸 예이다. Fig. 2(a)로부터 (e)까지는 모델 해석의 필요와 목적에 따라서 해석에서 불필요하다고 여겨지는 부분을 단순화와 이상화를 통해 간략화 하여 적합한 모델을 각각 생성해 낸 예를 설명하고 있다.

**2. 특징형상의 재배치(reordering)를 이용한 B-rep 모델의 다중해상도 구현**

하나의 모델은 서로 다른 종류의 특징형상들의 집합을 사용하여 모델링될 수 있다. 따라서 하나의 설계 특징형상의 집합을 다중해상도에 적합한 형태의 특징형상의 집합으로 재배치하고 변환하는 것이 가능하다. 다시 말해서, 최종 형상을 근사적으로 표현하는데 있어서 기여도가 큰 특징형상에 우선순위를 부여함으로써, 기존의 모델링 히스토리를 계층구조를 지니는 Level Of Detail에 적합한 특징형상의 리스트로 바꿀 수 있다.

B-rep 모델의 특징형상들 간의 계층구조는 저해상도(low-resolution)에서는 최종형상을 근사적으로 둘러싸는 간단한 형상이 적합할 것이고, 고해상도(high-level)에서는 좀더 작고 상세한 형상들이 모두 포함되는 것

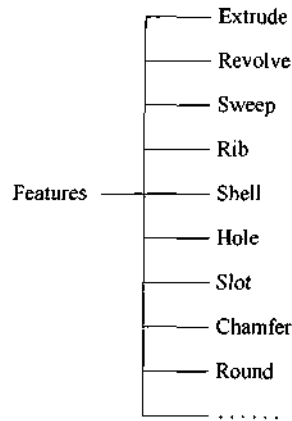


Fig. 3. Types of common features.

이 바람직할 것이다.

**2.1 솔리드 모델링 시스템에서의 특징형상**

현재의 상용 솔리드 모델링 시스템은 대부분 feature-based modeling system이다. 특징형상의 정의에 대해서는 여러 학자들이 더 좋은 정의를 내리기 위해 노력해 왔는데, Wilson, P. R.과 Pratt, M. J.<sup>[9]</sup>가 여러 가지 응용에 독립적으로 일반적인 정의를 내렸는데 이것이 널리 받아들여지고 있다. Wilson, P. R.과 Pratt, M. J.는 특징형상을 “a region of interest in a part model”라고 정의했다.

위의 Wilson, P. R.과 Pratt, M. J.의 정의는 어떠한 응용분야에 대해서도 적용이 가능한 매우 일반적인 정의라고 볼 수 있다. 하지만 상용 CAD시스템에서 사용되는 특징형상은 좀 더 쉽게 정의해서 설계자가 모델링과정에서 생각할 수 있는 개념적인 혹은 기능적인 단위라고 보아도 큰 무리가 없을 것이다.

Fig. 3에는 상용 CAD시스템에서 제공되는 특징형상의 종류가 나타나 있다. 특징형상 기본의 모델링 시스템에서는 이러한 특징형상들이 하나씩 더해져 가면서 모델링이 진행된다.

본 논문에서는 이러한 특징형상을 B-rep 파트 모델에 있어서 형상의 복잡도를 변화시키는 단위로 보고 특징형상 정보를 변환하고 재배치하는 과정을 통해 파트 모델의 다중해상도를 구현하고자 한다.

**2.2 첨가하는 특징형상과 제거하는 특징형상**

솔리드 모델링 시스템에서 설계에 사용되는 설계 특징형상은 그 형상이 체적을 더하는 것이나 빼내는 것이냐에 따라서 크게 첨가하는 특징형상과 제거하는 특

징형상으로 구분될 수 있다. 솔리드 모델링 시스템에서 설계가 진행되는 과정을 유심히 살펴보면, 많은 경우에 이러한 첨가하는 특징형상과 제거하는 특징형상이 최종 형상이 생성될 때까지 반복적으로 적용되는 것을 알 수 있다.

제거하는 특징형상은 어떠한 경우에도 첨가하는 특징형상이 있어야만 적용이 가능하므로 만약 모든 첨가하는 특징형상들에 결합연산(union operation)을 적용한다면, 최종 형상을 둘러싸는 감싸는 체적(enclosing volume)이 생성된다. 이렇게 해서 생성된 감싸는 체적을 저해상도의 모델로 생각할 수 있고 Level Of Detail에 있어서 저해상도 모델의 시작점으로서의 기능을 할 수 있을 것이다. 그런 후에, 나머지의 모든 특징형상들은 제거하는 특징형상으로 변환한다.

본 논문에서는 이렇게 해서 감싸는 체적을 트리의 최상위 노드로 가지고 나머지 제거하는 특징형상을 하위 노드로 짜지는 계층적인 특징형상 트리를 생성하였다. 제거하는 특징형상들이 파트 모델에 반영될수록, 최종 형상에 조금씩 가깝게 가게 된다.

### 2.3 특징형상의 재배치(Reordering)시 전체 체적의 보존

원래의 모델링 히스토리를 Level Of Detail을 구현하기 쉬운 새로운 형태의 특징형상들로 변환할 때 문제가 되는 것 중 하나는 원래의 모델링 히스토리를 뒤바꾸는 것이 최종형상에 영향을 미치지 않는 가능한 연산이냐는 것이다. 이 논문에서 제시하고 있는 방식은 특징형상을 모델의 체적을 변화시키는 하나의 단위로 보고 있다. 원래의 모델링 히스토리에서 각 특징형상이 적용될 때 모델에 첨가되거나 제거된 체적의 양을 새로운 특징형상으로 변환할 때 고려하여 Level Of Detail을 구현하기 때문에 항상 최종형상의 전체 체적은 일정하게 유지된다.

즉, 모델의 체적이라는 관점에서 볼 때 첨가하는 특징형상이 모델에 적용될 때 산술적으로 덧셈(+) 연산자가 적용된다고 하고, 제거하는 특징형상이 적용될 때 뺄셈(-) 연산자가 적용된다고 하면, 새로운 특징형상을 만드는 과정은 이 덧셈연산자와 뺄셈연산자의 순서를 바꾸거나 혹은 하나의 특징형상을 작은 단위로 분할하는 과정이라고 볼 수 있다. 덧셈과 뺄셈 두 연산자에 대해서는 교환법칙과 결합법칙이 성립하므로 이 논문에서 제시하고 있는 특징형상의 재배치방식은 가능한 연산이다. 아래의 2.4절과 2.5절에서 전체 체적을 일정하게 유지하기 위해 새로운 특징형상으로 변환할 때 겹치는 체적(overlap volume)을 고려해 주는 부분

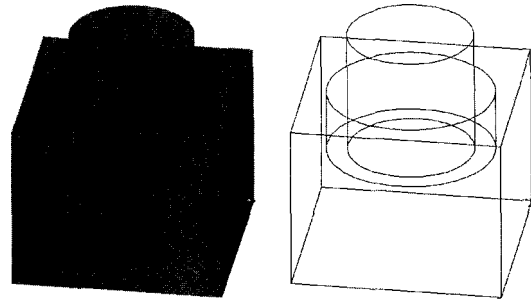


Fig. 4. Example part.

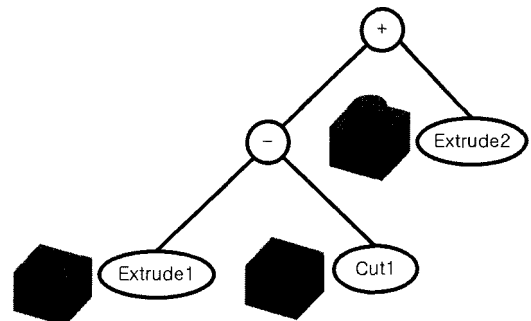


Fig. 5. Modeling history of Fig. 4 part.

이 설명되어 있다.

### 2.4 제거하는 특징형상과 첨가하는 특징형상의 재배치(Reordering)

Fig. 4에는 본 논문에서 제시하고자 하는 다중해상도 구현방식을 설명하기 위한 가장 간단한 예제 파트 모델이 제시되어 있다.

Fig. 5에는 이 예제 모델에 대한 모델링 히스토리가 나타나 있다. 이 모델은 세 개의 특징형상으로 이루어져 있는데, 두 개의 extrude 특징형상과 한 개의 cut 특징형상을 알 수 있다.

Fig. 5은 Fig. 4에 제시되어 있는 모델의 모델링 히스토리(modeling history)를 트리형태로 나타낸 그림이다. 위의 예에서, 만약 특징형상정보를 사용하여 저해상도(low-resolution)의 모델을 만들어 내고 싶다면, Fig. 6에 나타나 있는 것처럼 두개의 extrusion 특징형상으로 이루어진 감싸는 체적이 저해상도 모델이 될 수 있다.

두 개의 extrude 특징형상에 결합연산을 수행하여 저해상도 모델을 만들고 나면 cut 특징형상이 하나 남게 되는데, 이 제거하는 특징형상을 모델에 반영시키느냐 아니냐에 따라서 저해상도 모델과 고해상도 모델이 각

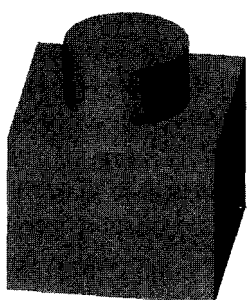


Fig. 6. A low-resolution model enclosing the original part.

기 될 수 있다. 그런데 여기서 한 가지 해결해야 할 문제가 남아있다. 그것은 원래의 모델링 히스토리의 적용 순서를 바꾸면서 겹치는 체적(overlap volume)이 생기기 때문에, 이것을 제거하는 특징형상에서 고려를 해주어야 하는 것이다.

2.5 겹치는 체적

Fig. 5에 제시된 원래의 모델링 히스토리에서는 Cut1 특징형상이 먼저 적용된 후 Extrude2 특징형상이 적용되었기 때문에 겹치는 체적이 존재하지 않았다. 그런데 저해상도 모델을 구하기 위해서 첨가하는 특징형상간에 결합연산을 먼저 수행해버렸기 때문에 Extrude1 특징형상과 Extrude2 특징형상간에 겹치는 체적이 생성되게 된다.

이것은 이 예제에서만 생기는 문제가 아니고 다른 모델에 대해서 같은 방식을 적용하면 항상 생길 수 있는 문제이다. 즉, 설계자가 설계를 할 때는 첨가하는 특징형상과 제거하는 특징형상을 같이 사용하면서 항상 겹치는 부분이 없도록 설계를 해나가겠지만, Level Of Detail을 구현하기 위해서 적용순서를 무시하고 첨가하는 특징형상간에 결합연산을 적용하기 때문에 항상 겹치는 체적이 생성될 수 있는 것이다.

Fig. 7에 이 예제 모델에 대해서 첨가하는 특징형상간에 결합연산을 수행하여 저해상도 모델을 구하고, 겹치는 체적을 고려해서 제거하는 특징형상을 변환한 과정이 설명되어 있다.

Fig. 7(a)는 원래의 모델링 히스토리를 나타내고 있는데, 여기서 특징형상들 앞의 부호는 각각의 특징형상들이 체적을 더하는 것인가 빼는 것인가에 따라서 붙여진 것이다. Fig. 7(a)에 나타나 있는 원래의 모델링 히스토리로부터, 두개의 첨가하는 특징형상들(Extrude1과 Extrude2)을 선택해서 그것들 간에 결합연산을 적용한다. Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)사이의 U기호가 결합(union)연산을 의미한다. 이 결합연산의 결과로 Fig.

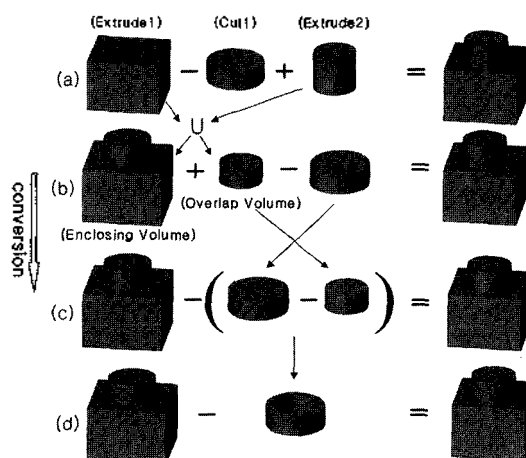


Fig. 7. Conversion of the original modeling history to an enclosing volume and subtractive feature.

7(b)에서 볼 수 있듯이 겹치는 체적과 겹치는 체적이 생성된다. 그런데 전체적으로는 최종 형상의 체적이 항상 일정하기 때문에 Fig. 7(a)에서의 첨가하는 특징형상에 의해서 더해진 만큼의 체적이 Fig. 7(b)에서도 전체 모델링 히스토리를 통해 더해져야 한다. 따라서, 변환과정 중에 생긴 겹치는 체적도 Fig. 7(b)에서 볼 수 있듯이 새로운 모델링 히스토리에 반영이 되어야 한다. Fig. 7(c)에서는, 새로운 제거하는 특징형상을 생성해 내기 위해서 겹치는 체적과 Cut1 특징형상을 결합시키는 과정을 보여주고 있다. 그 결과로 Fig. 7(d)에 나타난 새로운 제거하는 특징형상이 생성되었다. 이렇게 해서, Fig. 7(a)에 나타나 있는 원래의 모델링 히스토리로부터 시작해서 Fig. 7(d)에 제시되어 있듯이 포함 체적과 제거하는 특징형상으로 이루어진 새로운 모델링 히스토리가 생성되었다. Fig. 8에는 원래의 모델링 히스토리로부터 생성된 새로운 모델링 히스토리가

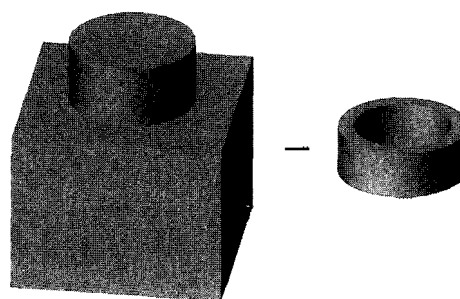


Fig. 8. Reordered volume list for multi-resolutional representation.

나타나 있다.

### 3. 특징형상들간의 계층적인 포함관계

이번 장에서는, 앞에서 설명했던 B-rep 모델의 Level Of Detail 구현 방식이 좀더 복잡한 파트 모델을 대상으로 적용된다. 앞의 Fig. 4에 제시된 파트 모델은 매우 간단한 모델링 히스토리를 가지고 있어서, 이 겹치는 체적을 해결하기 위해서 겹치는 체적을 나머지 한 개의 제거하는 특징형상(Cut1)과 결합시켜서 새로운 제거하는 특징형상을 구해야 한다는 것을 쉽게 알아낼 수 있었는데, 실제로 많은 수의 특징형상들로 이루어진 복잡한 파트 모델의 경우에는 겹치는 특징형상을 해결하는 것이 앞에서의 예제만큼 쉽지는 않다.

앞의 예제에서 보다 많은 특징형상들로 이루어진 파트 모델의 경우에는 겹치는 특징형상 문제를 해결하기 위해서 어떠한 특징형상들에서 겹침이 발생하는 지를 먼저 알아야 하고, 그러한 겹치는 체적을 나머지 어떠한 제거하는 특징형상과 결합하여 새로운 제거하는 특징형상을 생성해 낼 것인가에 대해 알아야 한다.

#### 3.1 특징형상들 간의 포함관계

B-rep파트 모델에 있어서 하나의 특징형상은 기하학적인 측면에서 볼 때 어떤 면(face)들의 집합이라고 볼 수 있다. 따라서 각각의 특징형상에 속하는 면들로 이루어지는 체적들 사이에 포함관계를 조사할 수 있다.

아래 Fig. 9에 제시된 파트 모델은 상용 솔리드 모델링 시스템중의 하나인 SolidWorks(tm)를 사용해서 모델링된 파트 모델이다.

이 파트 모델은 모두 12개의 특징형상으로 구성되어 있다. 12개의 특징형상은 4개의 extrusion 특징형상, 4개의 cut 특징형상, 3개의 반복 특징형상, 그리고 하나의 round 특징형상이다. 이 12개의 특징형상들 중에서

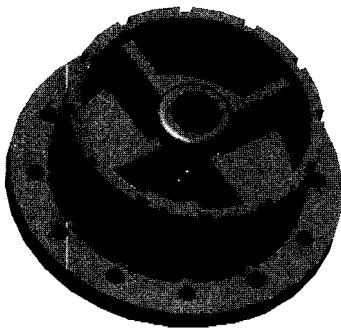


Fig. 9. More complex example part.

어떠한 특징형상들에 의해서 생성된 체적은 다른 특징형상들에 의해서 생성된 체적을 포함한다. Fig. 9의 파트 모델에서, Extrude1과 Extrude4에 의해서 생성된 포함 체적이 나머지 10개의 특징형상에 의해서 생성된 체적을 포함한다.

Fig. 10에 Fig. 9의 파트 모델에 대한 모델링 히스토리가 나타나 있다. Fig. 9의 모델에서, Extrude1과 Extrude4에 의해서 생성된 체적은 이 파트 모델을 구성하는 주된 체적(main volume)이라고 볼 수 있다. 나머지 10개의 특징형상을 포함시키거나 혹은 제외시킴으로써 생기는 기하학적인 혹은 위상학적인 변화는 모두 이 주된 체적의 범위 안에서 국한되어 일어나기 때문에 이 두개의 특징형상에 비해 상대적으로 자세한 특징형상이라고 볼 수 있다. 따라서 이 두개의 첨가하는 특징형상인 Extrude1과 Extrude4에 결합연산을 적용하여서 생기는 겹치는 체적이 저해상도 모델로서 의미가 있다고 볼 수 있다.

Fig. 10에서 볼 수 있는 Fig. 9의 모델에 대한 feature의 적용 순서는 단순히 시간의 순서에 의한 배열이다. 물론 이 특징형상들 간에 이미 상당한 구속관계가 존재하기는 하지만 단순히 이 모델링 히스토리만을 가지고 계층적인 포함 관계에 대한 정보를 직접적으로 얻을 수는 없다.

따라서 각각의 특징형상 의해 생성된 체적간의 계층적인 포함관계 정보를 얻어내기 위해서, 먼저 각각의 특징형상에 속한 면들을 얻어낸다. 그리고 나서 각각

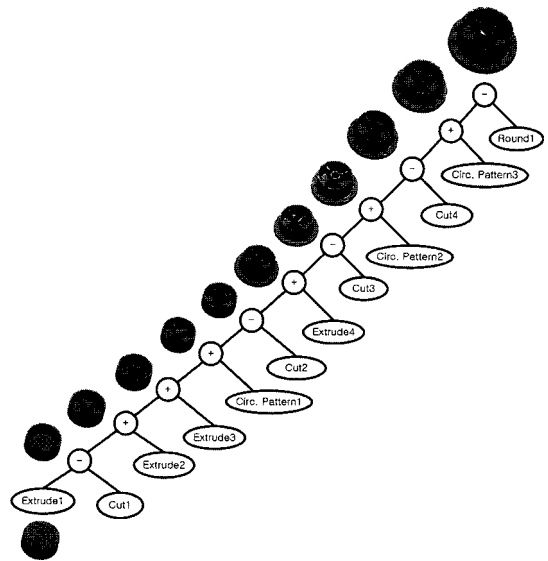


Fig. 10. Modeling history of example part.

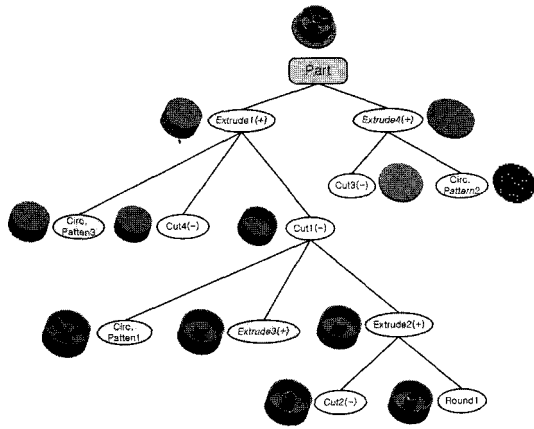


Fig. 11. Hierarchical inclusion relation between features.

의 면들의 최소포함상자를 구해서 면의 위치에 대한 정보를 얻는다. 하나의 특징형상에 속하는 모든 면들의 최소포함상자에 관한 정보를 비교하여, 각 특징형상들에 의해서 생성된 체적간의 계층적인 포함관계를 구해낼 수 있다. 이렇게 특징형상들간의 포함관계를 구해내면, Fig. 11에서 볼 수 있는 것처럼 특징형상들간의 포함관계를 계층적인 구조로 저장할 수 있다.

Fig. 11은 특정한 특징형상에 속하는 면들에 대한 최소포함상자 정보로부터 위에서 설명했던 계층적인 포함관계를 구해낸 예이다.

3.2 계층적인 포함관계로부터 겹치는 체적을 계산

앞의 절에서 설명했듯이, Fig. 10의 두 개의 첨가하는 특징형상인 Extrude1과 Extrude4에 결합연산을 적용해서 생성된 포함 체적을 저해상도모델로 볼 수 있다고 했다. Fig. 12에 그 결과로 생성된 저해상도 모델이 제시되어 있다.

그 다음 과정으로 겹치는 체적을 계산해야 한다. 이 경우에 세 개의 제거하는 특징형상, 즉 Extrude2와

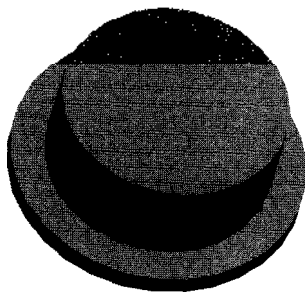


Fig. 12. Low- resolution model generated from enclosing volume.

Extrude3, 그리고 Circular pattern1이 겹치는 체적이다. 이 특징형상들에 의해 생성된 체적이 Extrude1 특징형상에 의해서 생성된 체적에 포함되기 때문이다. 이 겹치는 체적들을 나머지 제거하는 특징형상들과의 연관관계에 의해서 새로운 모델링 히스토리에 반영해 주어야 한다. 이 예제의 경우에 겹치는 체적들을 Cut1 특징형상과 결합하여 새로운 제거하는 특징형상을 생성해 주어야 한다. 왜냐하면 겹치는 체적을 새로운 모델링 히스토리에 반영을 해줄 때에는 그 겹치는 체적과 중첩되는 영역이 있는 제거하는 특징형상을 찾아서 제거되는 특징형상과 겹치는 체적을 결합하여 새로운 제거하는 특징형상을 생성해 주어야 하기 때문이다. 이는 앞의 2장에서 간단한 예제에 대해 겹치는 체적을 어떻게 새로운 모델링 히스토리에 반영을 해주는 가에 관해 설명했던 내용과 같다.

이 겹치는 체적을 기존의 모델링 히스토리에 있어서의 제거하는 특징형상과 결합하여 새로운 모델링 히스토리 상에서의 제거하는 특징형상을 구해내는 과정이 Fig. 13에 제시되어 있다. Fig. 13(a)에서 Extrude2와 Extrude3 & Circ.Pattern1 feature가 앞에서 설명했듯이 겹치는 체적이고 Cut1 특징형상이 겹치는 체적과 중첩되는 영역이 존재하는 제거하는 특징형상이다. Fig. 13(a)의 각각의 특징형상은 원래의 모델링 히스토리에 있어서의 특징형상의 종류에 따라 앞쪽에 부호를 표시 하였다.

Fig. 13(b)가 겹치는 체적과 원래의 모델링 히스토리 상에서 있어서 겹치는 체적과 중첩되는 영역이 있는 제거하는 특징형상을 결합하는 과정을 설명하는 그림이고, 그 결과 새로 생성된 제거하는 특징형상이 Fig. 13(c)에 나타나 있다. 물론 Fig. 13(c)에 제시된 체적이 일반적으로 하나의 제거하는 특징형상으로 인식되기

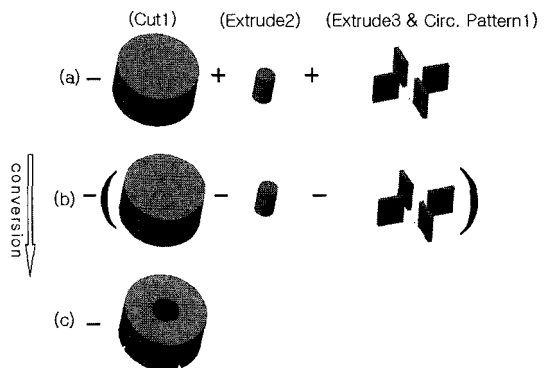


Fig. 13. Conversion of interaction feature shown in to new subtractive feature.

에는 복잡한 형상을 가지고 있기 때문에 이 체적을 간단한 형상으로 이루어진 몇 개의 제거하는 특징형상들로 분해해서 새로운 모델링 히스토리에서 저장하고 있는 것도 가능하다.

**3.3 Delta Volume**

지금까지 특징형상들간의 포함관계를 구해서 그 정보를 바탕으로 몇 개의 첨가하는 특징형상들간에 결합 연산을 적용해 저해상도 모델을 구했다. 또한 첨가하는 특징형상들간에 겹치는 체적을 계산하고 그 겹치는 체적을 연관관계가 있는 제거하는 특징형상에 더해서 새롭게 제거하는 특징형상들을 구해냈다.

이렇게 하면 이제 저해상도 모델과 여러 개의 제거하는 특징형상으로 이루어진 새로운 모델링 히스토리를 가지게 된다. 이 때 제거하는 특징형상을 적용하는 순서를 정하는 데에 어떠한 규칙이 있어야 한다.

본 논문에서는 Delta Volume이라는 개념을 적용하였다. Delta Volume이란 어떤 특징형상을 적용하기 전과 후의 체적의 차이를 나타내는 양으로 정의하였다.

어떤 특징형상이 하나의 파트 모델에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 여러 가지 방법이 있을 수 있다. 특징형상을 적용하기 전과 후의 체적의 차이가 큰 특징형상은 그렇지 않은 특징형상에 비해서 그 파트 모델에 큰 영향을 미친다고 볼 수 있고 또한 체적의 변화량은 솔리드 모델링 시스템에서 쉽게 구할 수가 있기 때문에 이러한 개념을 도입하였다.

제거하는 특징형상들을 Delta Volume의 크기 순으로 배열해서 저해상도 모델에서 차례대로 빼나가면 저해상도 모델로부터 최종형상까지 점근적으로 가까이 갈 수 있다. Fig. 14에 Delta Volume순서에 의해서 제거하는 특징형상들을 배열한 그림이 나타나 있다.

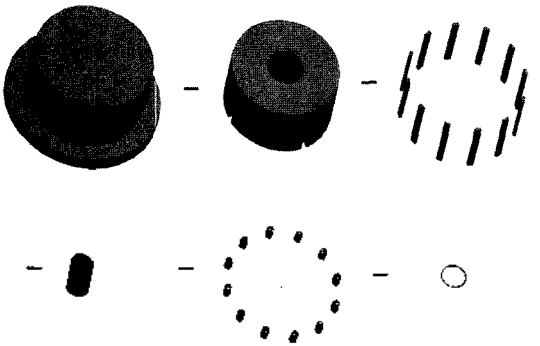


Fig. 14. Reordering subtractive features according to Delta Volume.

**4. 예제 모델에 대한 Level Of Detail 구현 결과**

Fig. 15에는 원래의 모델링 히스토리에서 파트 모델이 모델링되어 가는 과정을 보여주고 있고, Fig. 16에는 앞에서 설명했던 방식으로 생성해낸 파트 모델의 Level Of Detail이 나타나 있다.

원래의 모델링 히스토리에서도 파트 모델이 처음 시작할 때의 간단한 형상에서 최종 형상에 이르기까지 점점 더 복잡해져 가기 때문에 어떠한 의미에서는 원래의 모델링 히스토리에도 Level Of Detail가 있다고 볼 수 있겠다. 하지만 그것은 단순히 설계자가 특징형상을 적용하는 순서에 의해 결정되는 Level Of Detail로서 특징형상들간의 계층적인 포함관계를 바탕으로 만들어낸 Fig. 15의 Level Of Detail과는 차이가 있다.

또 Fig. 15와 Fig. 16을 비교해 보면, Fig. 15에서는 첨가하는 특징형상과 제거하는 특징형상이 반복되고 있기 때문에 항상 다음 레벨의 파트모델이 최종형상에 가깝다고 말할 수 없다. 하지만 Fig. 16에서는 저해상도 모델로서 감싸는 체적을 먼저 구해내고 제거하는 특징형상들을 적용하기 때문에 이 제거하는 특징형

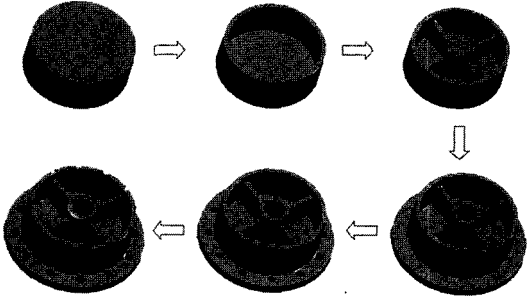


Fig. 15. Level Of Detail in the original modeling history of the example part.

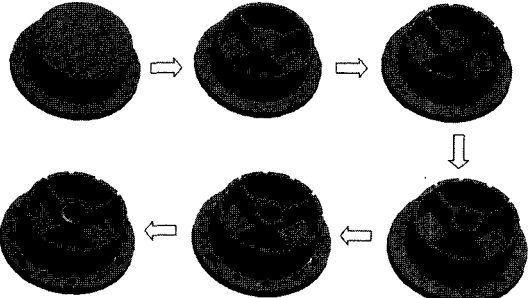


Fig. 16. Level Of Detail in the new hierarchical feature tree.



Table 1. Topological data size at different LOD level

	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
면개수	7	28	75	78	102	104
모서리 개수	12	72	213	219	291	295
꼭지점 개수	8	48	142	146	194	196

상들을 반영시키면 시킬수록 최종형상에 계속해서 가까워진다고 볼 수 있다.

또한 저해상도 모델에 있어서, Fig. 15의 저해상도 모델보다는 Fig. 16의 저해상도 모델이 직관적으로도 훨씬 최종형상을 잘 나타내 주고 있다는 것을 알 수 있는데, 그것은 최종형상에 기여도가 높은 특징형상들에 우선권을 부여하여 그것들로 저해상도 모델을 만들었기 때문이다.

Table 1는 앞의 Fig. 16에 나타난 파트 모델을 6개의 다른 해상도 레벨에 대하여, B-rep 위상 데이터의 크기를 면의 개수, 모서리의 개수, 꼭지점의 개수로 분석한 결과이다. 최고해상도의 모델에 비해서 최저해상도 모델이 1/10이하의 면의 개수를 가지고 있는 것을 알 수 있다. 또한 앞에서 설명했던 Delta Volume의 개념으로 제거하는 특징형상을 배열하여 위상 데이터의 크기도 최저해상도 모델에서 최고해상도 모델에 이르기까지 점근적으로 증가한 것을 알 수 있다.

### 5. 결 론

이 논문에서는, B-rep 파트 모델의 다중해상도 구현에 대해 논의하였다. 원래의 모델링 히스토리의 특징형상정보를 가지고 최종형상에 기여도가 높은 특징형상에 우선권을 부여하여 다중해상도 개념을 기반으로 한 새로운 모델링 히스토리를 만들었다.

저해상도 모델을 만들기 위해서 첨가하는 특징형상들에 결합연산을 적용하여 최종 형상을 둘러싸는 포함 체적을 구해내었다. 그리고 나머지의 특징형상들은 첨가하는 특징형상들 간의 겹치는 체적을 고려하여 겹침이 없는 제거하는 특징형상으로 변환하였다. 이 제거하는 특징형상을 반영할수록 저해상도 모델에서 고해상도 모델로 조금씩 접근하게 된다. 최종형상을 둘러싸는 큰 체적으로부터 체적을 하나씩 제거해 나가면서 최종형상에 이르게 된다는 점에서 이 논문에서 제안한 접근은 가공 공정과 유사한 점이 있다고 볼 수 있다.

제거하는 특징형상을 포함 체적에서 빼내는 순서를 결정할 때는 Delta Volume이라는 개념을 사용하였는데, 이것은 하나의 특징형상을 적용하기 전과 후의 체적의 차이를 말한다. Delta Volume이 큰 특징형상을

먼저 빼내고 작은 특징형상들을 나중에 빼냄으로써 최종형상에 점근적으로 가까이 가도록 하였다.

본 논문에서 제안한 접근은 설계할 때 사용된 특징형상 정보를 활용하여 B-rep 파트 모델의 모델링 히스토리를 다중해상도에 적합한 형태의 특징형상 트리로 변환하였기 때문에 복잡한 형상인식의 단계를 거치지 않는다는 것과 한번 트리를 생성해내면 원하는 해상도의 모델을 쉽게 만들 수 있다는 장점이 있다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부가 지원하는 국가지정연구실인 서울대학교 모델링커널개발연구실의 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. Lee, K. W., *Principles of CAD/CAM/CAE Systems*, Addison Wesley, Cambridge, U. K., 1999.
2. Hoppe, H., DeRose, T., Duchamp, T., McDonald, J. and Stuetzle W., "Mesh optimization," *Proceedings of ACM SIGGRAPH '93*, pp. 19-26, 1993.
3. Hoppe, H., "Progressive Meshes," *Proceedings of ACM SIGGRAPH '96*, pp. 99-108, 1996.
4. Hoppe, H., "View-dependent Refinement of Progressive Meshes," *Proceedings of ACM SIGGRAPH '97*, pp. 189-198, 1997.
5. Carlos Andújar Gran, "Octree-based Simplification of Polyhedral Solids," Doctoral Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 1999.
6. Kim, Y. S., "Recognition of Form Features Using Convex Decomposition," *Computer-Aided Design*, Vol. 24, No. 9, pp. 461-466, 1992.
7. Lee, J. Y. and Kim, K., "A Feature-based Approach to Extracting Maching Features," *Computer-Aided Design*, Vol. 30, No. 13, pp. 1019-1035, 1998.
8. Belaziz, M., Bouras, A. and Burn, J. M., "Morphological Analysis for Product Design," *Computer-Aided Design*, Vol. 32, No. 5-6, pp. 377-388, 2000.
9. Wilson, P. R. and Pratt, M. J., "A Taxonomy of Features for Solid Modelling," *Geometric Modeling for CAD Applications* (M. J. Wozny, H. W. McLaughlin & J.L. Encarnacao, eds.), North-Holland, pp. 125-136, 1988.
10. Mantyla, M., *An Introduction to Solid Modeling*, Computer Science Press, 1988.
11. Kraker, K. J., Dohmen, M. and Bronsvort, W. F., "Multiple-way Feature Conversion to Support Concurrent Engineering," *Solid Modeling '95*, Salt Lake City, pp. 105-114, 1995.
12. Kraker, K. J., Dohmen, M. and Bronsvort, W. F.,

"Maintaining Multiple Views in Feature Modeling," *Solid Modeling '97*, Atlanta, pp. 123-130, 1997.

13. Suh, Y. S. and Wozny, M. J., "Interactive Feature Extraction for a Form Feature Conversion System," *Solid Modeling '97*, Atlanta, pp. 111-122, 1997.

14. Bronsvort, W. F. and Jansen, F. W., "Feature Modeling

and Conversion: Key Concepts to Concurrent Engineering," *Computers in Industry*, Vol. 21, pp. 62-86, 1993.

15. Tseng, Y. and Joshi, S. B., "Recognizing Multiple Interpretation of Interacting Machine Features," *Computer-Aided Design*, Vol. 26, No. 9, pp. 667-688, 1994.



**최 동 혁**

1999년 서울대학교 기계항공공학부 학사  
 2001년 서울대학교 대학원 기계공학부 석사  
 2001년~현재 (주)아이니스기술 연구원  
 관심분야: 솔리드 모델링, 가상현실, 리버스 엔지니어링



**이 건 우**

1978년 서울대학교 기계공학과 학사  
 1981년 미국 M.I.T. 기계공학과 석사  
 1984년 미국 M.I.T. 기계공학과 공학박사  
 1984년~1986년 미국 Univ. of Illinois at Urbana-Champaign 조교수  
 1986년~1990년 서울대학교 공과대학 기계설계학과 조교수  
 1990년~1995년 서울대학교 공과대학 기계설계학과 부교수  
 1995년~현재 서울대학교 공과대학 기계항공공학부 교수  
 관심분야: CAD, Assembly Modeling, Multiresolution Modeling for Design and Analysis, Rapid Prototyping, Customized Shoe Design and Manufacturing



**김 태 완**

1985년 한양대학교 산업공학과  
 1993년 미국 Arizona State Univ., Computer Science 석사  
 1996년 미국 Arizona State Univ., Computer Science 박사  
 1996년~1999년 미국 SDRC 소프트웨어 엔지니어  
 1999년~2001년 서울대학교 정밀기계설계공동연구소 특별연구원  
 2001년~현재 세종대학교 컴퓨터공학부 디지털콘텐츠학과 조교수  
 관심분야: NURBS 곡선과 곡면, CAGD, 컴퓨터그래픽스, 디지털콘텐츠작