

## 특징형상기반 다중해상도 모델링에 관한 연구 - Part II: 시스템 구현 및 상세수준 판단기준

이상현\*, 이규열\*\*

### A Study on Feature-Based Multi-Resolution Modelling - Part II: System Implementation and Criteria for Level of Detail

Lee, S. H.\* and Lee, K.-Y.\*\*

#### ABSTRACT

Recently, the requirements of multi-resolution models of a solid model, which represent an object at multiple levels of feature detail, are increasing for engineering tasks such as analysis, network-based collaborative design, and virtual prototyping and manufacturing. The research on this area has focused on several topics: topological frameworks for representing multi-resolution solid models, criteria for the level of detail (LOD), and generation of valid models after rearrangement of features. As a solution to the feature rearrangement problem, the new concept of the effective zone of a feature is introduced in the former part of the paper. In this paper, we propose a feature-based non-manifold modeling system to provide multi-resolution models of a feature-based solid or non-manifold model on the basis of the effective feature zones. To facilitate the implementation, we introduce the class of the multi-resolution feature whose attributes contain all necessary information to build a multi-resolution solid model and extract LOD models from it. In addition, two methods are introduced to accelerate the extraction of LOD models from the multi-resolution modeling database: the one is using an NMT model, known as a merged set, to represent multi-resolution models, and the other is storing differences between adjacent LOD models to accelerate the transition to the other LOD. We also suggest the volume of the feature, regardless of feature type, as a criterion for the LOD. This criterion can be used in a wide range of applications, since there is no distinction between additive and subtractive features unlike the previous method.

**Key words** : Multi-resolution, Level of detail, Feature, Solid model, Non-manifold, Merged set

## 1. 서 론

다중해상도 모델링 방법은 크게 대상 물체에 따라 다면체 기반 다중해상도 모델링 방법(polygon-based multi-resolution modelling method)<sup>1)2)</sup>과 특징형상 기반 다중해상도 모델링 방법(feature-based multi-resolution modelling method)<sup>3)4)</sup>으로 구분할 수 있는데, 최근 3차원 CAD 모델을 바탕으로 한 해석, 네트웍기반 협업 설계, 가상 프로토타이핑 및 생산과 같은

엔지니어링 작업을 위하여 대상 물체를 다양한 LOD의 3차원 형상 모델로 표현할 수 있는 특징형상기반 다중해상도 모델링 기술에 대한 필요성이 점점 증가하고 있다. 이러한 요구에 부응하기 위하여 다양한 연구가 수행되어 왔으며 그 내용에는 다중해상도 모델의 표현 방법, LOD 판단 기준, 특징형상 재배열시 유효한 모델 생성 방법 등을 포함하고 있다.

본 논문의 전만부 논문<sup>1)</sup>에서는 특징형상의 유효영역(effective zone of feature)이라는 새로운 개념을 개발함으로써 특징형상이 임의로 재배열된다 하더라도 언제나 원래 부품 형상과 동일한 최종 결과 형상을 담보할 수 있도록 하였다. 그럼으로써 다양한 응용 분야에 맞는 각종 LOD 판단 기준들도 수용 가능하게 되

\*교신저자, 종신회원, 국민대학교 기계자동차공학부  
\*\*종신회원, 서울대학교 조선해양공학과  
- 논문투고일: 2005. 01. 14  
- 심사완료일: 2005. 03. 10

있다. 한편, 특징형상의 유효영역은 수학적으로 정의되는 것이기 때문에 모델의 자료구조와는 독립적이며, 따라서 유효영역에 바탕을 둔 다중해상도 모델링 알고리즘은 비단 비다양체 자료구조뿐만 아니라 전통적인 솔리드 자료구조 상에서도 구현이 가능한 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 이러한 특징형상 유효영역의 개념을 바탕으로 실제 다중해상도 모델을 제공할 수 있는 특징형상 기반 비다양체 모델링 시스템을 개발하였다. 시스템 구현을 용이하게 하기 위해서 본문에서는 다중해상도 특징형상(multi-resolution feature)이라는 클래스를 정의하여 사용하였다. 이 클래스는 다중해상도 마스터 모델의 생성 및 LOD 모델들의 추출에 필요한 모든 정보를 속성으로 저장하고 있다. 또한, LOD 모델들을 데이터베이스로부터 신속히 추출하기 위하여 비다양체 병합체 모델이 채택되었으며, '병합 및 선택' 알고리즘이 LOD 모델의 경계 계산을 위하여 도입되었다. 나아가 더욱 LOD 모델의 제공 속도를 높이기 위하여 이웃한 LOD 모델간의 위상 요소들의 차이를 저장하는 방법도 제안하였다. 한편, LOD에 대한 판단 기준으로서 특징형상의 부피를 LOD 판단 기준으로 제시하고 이를 기준으로 특징형상이 재배열 되더라도 유효한 모델이 제공될 수 있음을 보여주었다. 그럼으로써 총괄에 감법 특징형상(subtractive feature)의 부피로 제한되어 있던 LOD 판단 기준에서 벗어나 특징형상의 유형이 감법이든 가법이든 상관없기 때문에 특징형상의 부피만을 기준으로 재배열될 수 있으므로써 특징형상기반 다중해상도 모델링 기법이 보다 넓은 범위의 응용분야에 적용될 수 있도록 하였다.

본 논문의 나머지 부분은 다음과 같이 구성되어 있다. 제2장에서는 다중해상도 모델의 표현 방법 및 LOD 판단 기준에 대한 기존의 연구를 조사 정리하였다. 제3장에서는 본 연구에서 개발된 다중해상도 모델링 시스템의 전체 구조에 대해서 소개하고 있다. 제4장에서는 시스템의 구현을 용이하게 하기 위해서 개발된 다중해상도 특징형상(multi-resolution feature)이라는 자료구조와 다중해상도 모델 표현에 사용된 비다양체 병합체 모델에 대해서 소개하고 있다. 제5장에서는 특징형상의 유효영역을 바탕으로 한 특징형상 재배열 알고리즘을 소개하고 있다. 제6장에서는 LOD 모델의 추출을 보다 가속화시키기 위한 방법을 제시하고 있다. 제7장에서는 전형적인 몇 가지 LOD 판단 기준을 본 논문에서 제안한 다중해상도 모델링 방식에 적용하면서 그 결과에 대해서 도의한다. 제8장에

서는 본 시스템을 적용시킨 예를 소개하고, 제9장에서는 본 논문의 결론을 기술하고 있다.

## 2. 관련 연구

솔리드 모델에 대한 특징형상기반 다중해상도 모델링 기법의 필요성과 그에 대한 해결 방법에 대하여 여러가지 연구가 진행되어 왔다. 지금까지의 연구는 다중해상도 모델의 표현 방법, LOD 판단 기준, 특징형상 재배열시 유효한 모델 생성 방법 등으로 연구 내용을 분류할 수 있다. 이 가운데 본 논문과 관련되는 다중해상도 모델의 표현 방법과 LOD 판단 기준에 대한 기존의 연구를 정리하면 다음과 같다.

### 2.1 다중해상도 솔리드 모델의 표현 방법

전통적인 솔리드 자료구조를 사용하느냐 아니면 비다양체 자료구조를 사용하느냐에 따라서 두 가지 접근 방법으로 분류된다. 전통적인 솔리드 자료구조 방식<sup>[6]</sup>에서는 다중해상도 모델이 특징형상 트리(feature tree)로 표현되며, 특징형상들은 LOD 판단 기준에 따라서 트리내에서 재배열된다. 만일 어떤 LOD에 대한 간략화된 모델이 필요하다면 시스템은 특징형상 트리를 적당히 가지치기한 후 이 트리에 대한 경계 계산(boundary evaluation)을 수행하여 해당 솔리드 모델을 얻어낸다. 이 방법은 현재 대부분 솔리드 자료구조를 사용하는 상용 3차원 CAD 시스템들 상에서 바로 구현가능하다는 장점을 가지고 있다. 그러나, 현재의 LOD  $m$ 에서 목적하는 LOD  $n$ 에 도달하기 위해서는  $|m - n|$ 번의 불리안 작업을 수행해야 하기 때문에 경계 계산에 지나치게 많은 계산 시간을 소비한다는 문제점을 가지고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 이상현 등<sup>[4,5,9, 10]</sup>은 셀 구조의 비다양체 모델을 다중해상도 모델의 자료구조로 도입하였다. 이 방식에서는 비다양체 불리안 작업 알고리즘으로 널리 알려진 '병합 및 선택(merge and select)' 알고리즘이 사용된다<sup>[11,12]</sup>. 즉, 모든 특징형상들을 병합시켜 하나의 셀 구조 비다양체 병합체(merged set) 모델로 만든 후, 임의의 LOD가 주어지면 해당 LOD 모델을 구성하는 위상 요소들을 선택하여 화면에 보여주는 방법이 사용된다. 여기에서는 모든 특징형상에 대한 경계 정보가 비다양체 병합체 모델에 저장되어 있기 때문에 경계 계산시 교차계산 및 In/Out 판정과 같은 기하학적 계산을 생략할 수 있다. 따라서 솔리드 자료구조를 이용한 방법보다 LOD 모델들을 보다 신속하게 제공할 수 있다.

### 2.2 LOD 판단 기준(Criteria for the LOD)

LOD 판단 기준은 응용 분야에 따라 다르다. 최초로 제안된 판단 기준은 감법 특징형상(subtractive feature)에 대한 부피(volume)로서 이는 주로 솔리드 모델의 렌더링과 스트리밍(streaming)을 위한 목적으로 사용되었다<sup>4,6</sup>. 여기서 특기할 점은 어떠한 가법 특징형상(additive feature)도 감법 특징형상에 우선한다는 점과 가장 해상도가 낮은 모델(즉, LOD = 0인 모델)을 모든 가법 특징형상을 합친 모델로 표현한다는 점이다. LOD가 1이상인 모델들은 감법 특징형상을 부피가 큰 것부터 차례로 빼나감으로써 얻는다. 그러나 이 방식은 몇 가지 문제점들을 안고 있다. 첫째, 만일 모델이 가법 특징형상들만을 사용하여 모델링되었다면 이 방식으로는 오직 하나의 LOD 밖에 나타낼 수 없게 된다. 둘째, 이 방식에서는 감법 특징형상들이 가법 특징형상보다 항상 더 작고 상세하다는 가정을 하고 있다. 그러나 이러한 가정은 항상 성립하는 것이 아니다. 따라서 더 상세한 모델이 더 낮은 해상도에서 발생할 수 있는 문제점을 가지고 있다.

이러한 문제 소지를 차단할 수 있는 LOD 판단 기준으로 제시된 것은 특징형상의 부피 그 자체로서 이 경우에는 특징형상의 유형이 가법인가 감법인가 하는 것을 구별하지 않는다<sup>4,5,9,10,13</sup>. 이 방식은 특징형상의 유형에 대한 아무런 제한이 없기 때문에 보다 넓은 범

위의 응용 분야에 채택될 수 있을 것으로 기대된다. LOD 판단 기준은 응용 분야에 따라 다를 수 있기 때문에 다중해상도 모델링 기법의 새로운 응용 분야를 발굴해 나감에 따라 그에 대한 더 많은 LOD 판단 기준이 제안될 것으로 기대된다.

### 3. 시스템 구조

본 논문에서 제안한 특징형상 유효영역에 바탕을 둔 특징형상 재배열 문제의 해법을 검증하고 특징형상기반 다중해상도 모델링 방법을 구현하기 위하여 특징형상기반 미다양체 모델링 시스템을 개발하였다. 다중해상도 모델링 시스템 구현을 용이하게 하기 위해서 본 시스템은 다음의 두 가지 유형의 자료를 저장 관리하고 있다. 첫째는 다중해상도 특징형상(multi-resolution feature) 리스트로서 이 특징형상은 다중해상도 마스터 모델의 생성 및 LOD 모델들의 추출에 필요한 모든 정보를 속성으로 저장하고 있다. 두번째는 병합체(merged set)라 불리는 미다양체 모델로서 이 모델은 다중해상도 모델에 필요한 모든 기하학적 및 위상학적인 자료를 모두 가지고 있다.

본 연구에서 개발된 시스템의 구조 및 응용 방법이 Fig. 1에 나타나 있다. 시스템은 크게 다음의 3가지 주 모듈들로 이루어져 있다.

- 특징형상 기반 모델링 모듈(Feature-Based

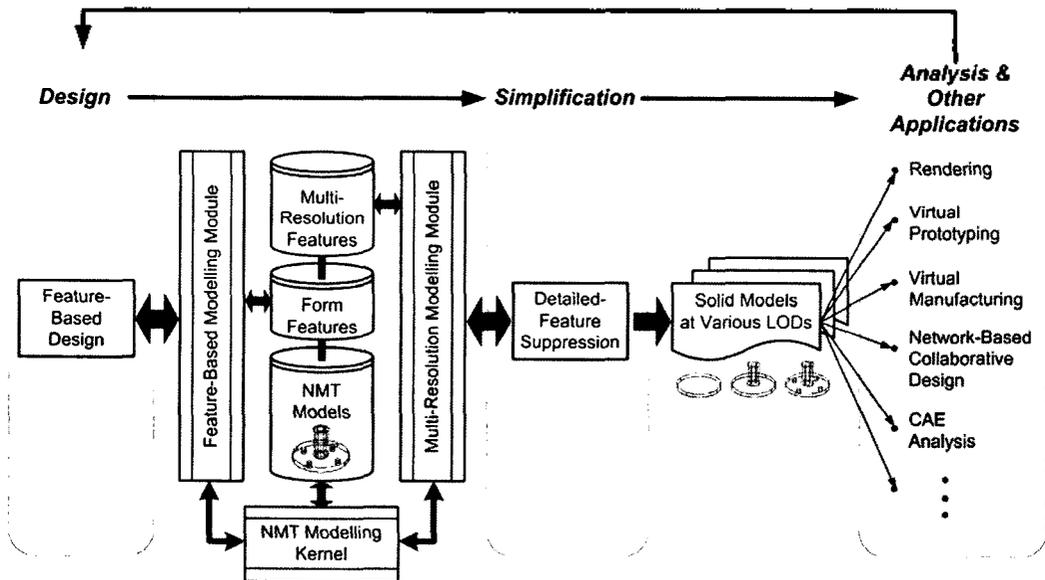


Fig. 1. System architecture.

**Modelling Module):** 이 모듈은 형상 특징형상의 라이브러리와 데이터베이스를 특징형상의 전 수명에 걸쳐 관리하는 역할을 맡고 있다. 각각의 특징형상 모델링 명령을 수행할 때마다 설계 특징형상(design feature)의 형상 모델이 비다양체 병합체인 부품 마스터 모델(part master model)에 병합된다.

• **다중해상도 모델링 모듈(Multi-Resolution Modelling Module):** 이 모듈은 다중해상도 특징형상을 관리하며, 간략화된 LOD 모델들을 얻기 위한 상세 특징형상 제거 작업을 수행하는 역할을 맡고 있다. 사용자가 원하는 LOD를 지정하면 해당 LOD 모델을 부품 마스터 모델로부터 추출시켜주는 작업을 하며, 또한 일련의 LOD들에 대한 LOD 모델들을 연속해서 추출해내는 작업도 지원해 주고 있다. 추출된 LOD 모델들은 각종 해석, 렌더링, 내트워 기반 협업 설계, 디지털 목업, 가상 생산 등과 같은 다양한 응용 분야에 사용될 수 있다.

• **비다양체 모델링 커널(Non-Manifold Topological (NMT) Modelling Kernel):** 이 형상 모델링 커널은 설계 및 이후 응용 분야에서 필요한 모든 기하학적 형상 모델들을 생성, 수정, 삭제의 관리 작업을 수행한다.

### 4. 자료 구조

#### 4.1 다중해상도 특징형상(Multi-Resolution Feature)

특징형상 기반 다중해상도 모델링 기법의 구현을 용이하게 하기 위해서 본 논문에서는 다중해상도 특징형상(multi-resolution feature)이라는 새로운 클래스를 도입하였다. 이 클래스는 다중해상도 모델을 생성시키고 그로부터 LOD 모델들을 추출해내기 위한 필요한 모든 자료를 속성(attributes)으로서 저장하고 있다. 다중해상도 특징형상의 속성은 LOD, 형상 특징형상에 대한 포인터, 생성 순서, 불리안 작업의 종류(∪

또는 -), 특징형상의 기본입체의 이름, 특징형상의 유효영역, LOD 모델에 대한 정의(불리안 작업으로 표현) 등을 포함하고 있다.

Fig. 2에는 간단한 예제 솔리드 모델을 5개의 특징형상을 적용해서 생성시킬 때의 특징형상 CSG 트리를 보여주고 있다. Table 1은 Fig. 2의 예제 모델이 처음 생성되었을 때의 다중해상도 특징형상 표를 보여주고 있다. 이때 각 특징형상은 특징형상이 처음 생성된 순서대로 배열되어 있으며, 각 특징형상의 유효영역은 자신의 기본입체 모델의 이름만으로 표현되어 있다. 즉, 초기 모델링 시에는 특징형상의 유효영역이 기본입체 전체가 된다. 각 LOD 모델에 대한 정의가 불리안 작업 문자열로 저장되어 있는 것을 볼 수 있다. 이후 LOD 판단 기준에 따라 특징형상의 LOD 값이 결정되고 LOD 오름차순으로 특징형상이 재배열되면 각 특징형상의 유효영역은 원래 영역에서 축소될 수 있다.

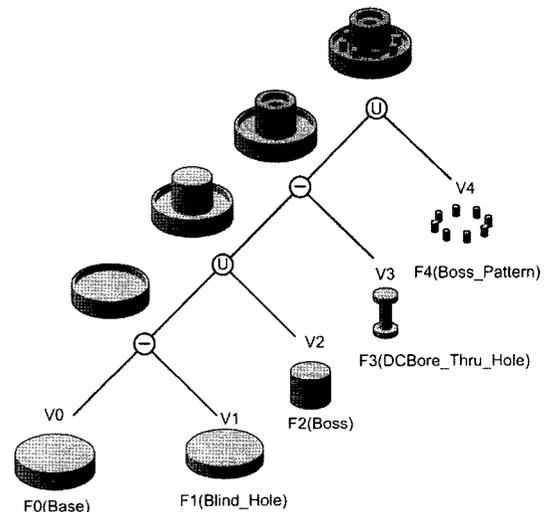


Fig. 2. An example of feature-based solid modelling: (a) the part model and its form features, (b) the feature modelling tree.

Table 1. Initial multi-resolution feature table for feature modelling in Fig. 2

No	LOD	Feature name	Creation order	Bool	Primitive	Effective zone	LOD model
0	0	Base	0	+	$V_0$	$V_0$	$V_0$
1	1	Blind_Hole	1	-	$V_1$	$V_1$	$V_0 - V_1$
2	2	Boss	2	+	$V_2$	$V_2$	$V_0 - V_1 + V_2$
3	3	2CBore_Thru_Hole	3	-	$V_3$	$V_3$	$V_0 - V_1 + V_2 - V_3$
4	4	Boss_Pattern	4	+	$V_4$	$V_4$	$V_0 - V_1 + V_2 - V_3 + V_4$

4.2 비다양체 병합체 모델

다중해상도 모델을 표현하기 위한 자료구조로 비다양체 경계 표현 방식이 채택되었으며, LOD 모델에 대한 경계 계산을 위하여 ‘병합 및 선택’ 알고리즘 (merge & select algorithm)을 도입하였다. 비다양체 경계 표현 방식은 와이어프레임, 곡면, 솔리드, 셀 구조의 모델, 그리고 이들의 혼합체를 하나의 자료구조로 표현 가능하며, 솔리드 모델과 달리 불리안 작업에 대하여 닫혀있다(즉, 비다양체 모델간의 불리안 작업 결과는 언제나 비다양체 모델이다)<sup>16-18</sup>. 비다양체 모델을 표현하기 위한 자료구조로 이미 몇 가지 경계표현 방식이 존재한다. 본 논문에서는 이 가운데 Partial Entity Structure<sup>17</sup>를 채택하였다. 그러나 본 논문에서 제안하는 모든 알고리즘들은 오직 영역(region), 면(face), 모서리(edge), 꼭지점(vertex)과 같이 경계표현 방식의 자료구조에서 공통적으로 사용되는 위상 요소들만으로 쓰여졌기 때문에 어떠한 비다양체 경계표현으로도 알고리즘의 구현이 가능하다.

‘병합 및 선택’ 알고리즘<sup>12-14</sup>에서는 먼저 불리안 작업에 사용되는 모든 기본입체(primitive)들을 병합체(merged set)라고 부르는 하나의 비다양체 모델로 합친다. 이 병합체 모델에는 불리안 작업에 사용된 기본입체들, 그들간의 교차 정보, 그리고 각 위상요소들의 기원을 표시하는 이력 정보가 완전히 저장되어 있다. 다음, 일련의 불리안 작업 표현을 입력받아 불

리안 작업 결과에 해당되는 위상요소들을 선택하는 작업을 수행한다. 사용자가 불리안 작업이나 그들의 순서를 수정할 경우, 시스템은 단지 선택 과정만 재수행함으로써 그 결과를 바로 제공해 줄 수 있다. 또한 사용자는 병합체속에 포함된 기본입체들 가운데 일부만으로 구성된 불리안 작업들을 수행시킬 수도 있다. 그럼으로써 일부 기본입체들을 병합체속에는 그대로 둔 채 최종결과로부터 선택적으로 제외시킬 수도 있다.

Fig. 3는 Fig. 2의 5개의 특징형상들로 구성된 병합체 모델을 보여주고 있다. 앞에서 언급한 병합체 모델의 특성은 특징형상기반 다중해상도 모델링 기법을 구현하는데 매우 유용하다. 그것은 모든 특징형상들에 대한 병합체 모델이 일단 생성되면, 어떠한 LOD 모델도 이 병합체 모델로부터 신속히 추출될 수 있기 때문이다.

5. 특징형상 재배열 알고리즘

만일 다중해상도 특징형상들의 순서가 어떤 LOD 판단조건에 따라 변경된다면, 유효영역과 같은 다중해상도 특징형상들의 속성도 그에 따라 변경된다. 새로운 특징형상 순서에 대해 다중해상도 특징형상의 데이터를 갱신하는 방법이 Algorithm 1에 소개되어 있다. 이 알고리즘은 먼저 가장 작은 특징형상을 n번째 위치로 옮긴다. 다음, 두번째로 작은 특징형상을 찾아 n-1번째 위치로 옮긴다. 이러한 특징형상 이전 작업은 가장 큰 특징형상이 빈칸 위치에 놓여질 때까지 계속 반복된다. 하나의 특징형상을 새로운 위치로 옮길 때마다 그것의 유효영역을 [11]의 식 (4)를 사용하여 재정의한다. 유효영역에 대한 정의는 Algorithm 2에 나타난 것과 같이 일련의 문자열로써 다중해상도 특징형상내에 저장된다.

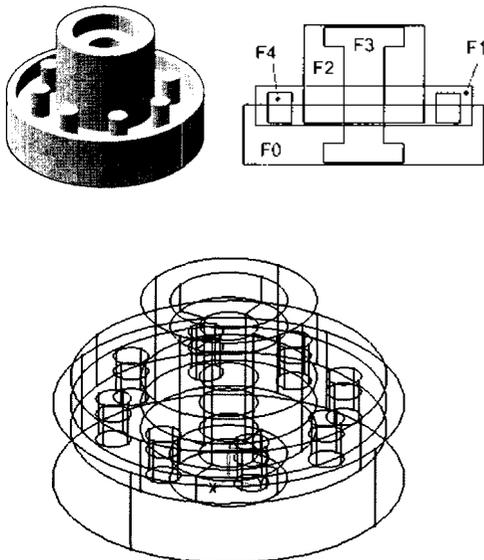


Fig. 3. A merged set of the features in Fig. 2.

**Algorithm 1. RearrangeMultiResolutionFeatures ( $F, mset$ )**

1. **Input:**  $F$ : the multi-resolution feature list.  $F = \{F_i\}_{i=0}^n$ .
2.  $mset$ : the merged set model of the features.
3. **Output:**  $F$ : the reordered list of the multi-resolution features.
4. **for**  $k \leftarrow n$  **to** 1 **do** ↓
5. // Find out the most detailed feature  $F_j$  from  $\{F_i\}_{i=0}^k$ .
6.  $j \leftarrow$  **FindLeastSignificantFeature** ( $F, 0, k$ ).
7. // Move the feature  $F_j$  to  $k$ -th position.
8. **MoveMultiResolutionFeature** ( $F, j, k$ ).
9. ↓
10. **return**  $F$ .

```

Algorithm 2. MoveMultiResolutionFeature ( $F, j, m$ )
1. Input:  $F$ : a multi-resolution feature list.  $F = \{F_i\}_{i=0}^n$ .
2.  $j$ : the current location of the feature to be moved.
3.  $m$ : the destination location of the feature  $F_j$ .
4. Output:  $F$ : the rearranged feature list.
5. // Set a character string  $S$  with the effective zone  $V_j$  of  $F_j$ .
6. for  $k \leftarrow 1$  to  $m-j$  do {
7.   if the type  $\otimes_{j,k}$  of  $F_{j+k}$  is not equal to  $\otimes_j$  of  $F_j$  then {
8.     Get the effective zone  $V_{j+k}$  of  $F_{j+k}$  in a character string.
9.      $S \leftarrow S + "-" + V_{j+k}$ .
10.  }
11. }
12. // Set the effective zone  $V_j$  of  $F_j$  with  $S$ .
13.  $V_j \leftarrow S$ .
14. // Move  $F_j$  to the  $m$ -th place.
15.  $F_{imp} \leftarrow F_j$ .
16. for  $k \leftarrow j+1$  to  $m$  do {
17.    $F_{k-1} \leftarrow F_k$ .
18. }
19.  $F_m \leftarrow F_{imp}$ .
    
```

**6. LOD 모델 생성의 가속화 방법**

LOD 모델의 추출을 보다 가속화시키기 위해서 인접한 두 LOD 모델간의 차이를 각 다중해상도 특징형상에 저장시키는 방법을 사용할 수 있다. 이 방법은 시스템 속도 향상을 위해서 기억 장소를 더 사용하는 방식이라고 할 수 있다. 즉,  $i$ 번째 다중해상도 특징형상  $F_i$ 는  $i$ 번째와  $i-1$ 번째 LOD 모델간의 차이를 두개의 셀 위상요소 리스트  $\Delta E_i^+$  과  $\Delta E_i^-$  로 저장하도록 한다. 여기서 셀 위상요소란 0, 1, 2, 3차원 셀로서 이들은 각각 꼭지점, 모서리, 면, 영역에 해당한다. 그러면  $\Delta E_i^+$  과  $\Delta E_i^-$  에 대한 정의와 알고리즘을 보다 상세히 살펴보도록 하겠다.

$n+1$ 개의 특징형상  $\{F_i\}_{i=0}^n$  을 적용시켜 생성한 원래의 솔리드 모델을  $M$ 으로 나타내고,  $i$ 번째 LOD 모델을  $M_i(0 \leq i \leq n)$  로 표시한다고 하자. 그러면  $M_0$ 는 가장 낮은 해상도의 모델이 되고,  $M_n$ 는 가장 높은 해상도의 모델이 되며 이는 원래의 솔리드 모델과 일치한다 (즉,  $M_n = M$ ). 또한  $E_i$ 가  $M_i$ 를 구성하는 셀 위상요소  $e_j$ 의 집합을 나타낸다고 하자. 그러면  $\Delta E_i^+$  과  $\Delta E_i^-$  는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta E_i^+ = E_i - E_{i-1} \tag{1}$$

$$\Delta E_i^- = E_{i-1} - E_i \tag{2}$$

여기서  $E_i = \{e_j | e_j \in M_i, e_j \in \{0-, 1-, 2-, \text{and}, 3-\text{cells}\}\}$  이다.

만일  $\Delta E_i^+$  과  $\Delta E_i^-$  가 주어진다면,  $E_i$ 는 다음 식 (3)을 이용해서  $E_{i-1}$ 로부터 쉽게 얻어질 수 있으며, 그 반대인 경우, 즉,  $E_i$ 로부터  $E_{i-1}$ 를 얻는 것은 식 (4)을 이용해서 쉽게 얻을 수 있다.

$$E_i = E_{i-1} \cup \Delta E_i^+ - \Delta E_i^- \tag{3}$$

$$E_{i-1} = E_i - \Delta E_i^+ \cup \Delta E_i^- \tag{4}$$

만일 현재의 LOD가  $i$ 이고 목적하는 LOD가  $k$ 라고 한다면,  $k$ 번째 LOD 모델  $M_k$ 의 셀 위상요소들의 리스트  $E_k$ 는 다음 식 (5)와 (6)을 이용해서 쉽게 얻어질 수 있다. 이 식들은 앞의 식 (3)과 (4)로부터 유도된 것이다.

$$\text{if } k > i, E_k = E_i \cup \sum_{j=i+1}^k \Delta E_j^+ - \sum_{j=i+1}^k \Delta E_j^- \tag{5}$$

$$\text{if } k < i, E_k = E_i - \sum_{j=i-1}^k \Delta E_j^+ \cup \sum_{j=i-1}^k \Delta E_j^- \tag{6}$$

**7. LOD 판단 기준**

**7.1 감법 특징형상의 볼륨(Volume of Subtractive Feature)**

LOD에 대한 판단 기준은 응용 분야에 따라 다르다. 특징형상의 볼륨은 가장 그럴듯한 LOD 판단 기준 가운데 하나라고 할 수 있다. 과거 대부분의 연구에서는 가법 특징형상이 모든 감법 특징형상보다 우선하고, 그 다음 감법 특징형상들을 볼륨의 내림차순으로 배열하는 방법을 사용하였다<sup>[14]</sup>. 따라서 가장 낮은 해상도의 LOD 모델은 모든 가법 특징형상들의 합한 결과이고, 그보다 높은 해상도의 LOD 모델들은 감법 특징형상들의 볼륨을 내림차순으로 차례로 빼면서 구한다. 이 방법은 주로 솔리드 모델의 렌더링이나 스트리밍과 같은 응용 분야에 적용되어 왔다. 본 논문에서 제안한 다중해상도 모델링 방법에서는 특징형상의 임의의 재배열이 가능하므로 당연히 이러한 특징형상 재배열 방식을 지원해 줄 수 있다.

부품 모델이  $n+1$ 개의 특징형상을 적용해서 생성 되었으며, 이 가운데 가법 특징형상은  $k+1$ 개 감법 특징형상은  $n-k$ 개라고 가정하자. 감법 특징형상의 볼륨을 LOD 판단 기준으로 채택하는 방식에서는 먼저, 특징형상들을 가법과 감법 유형으로 분류한다. 다음, 가법 특징형상들을 감법 특징형상들의 앞에 위치시킨다. 마지막으로, 가법과 감법 특징형상들을 각 그룹내에서 볼륨이 큰 것부터 작은 것의 순서로 정렬시

킨다. 이러한 규칙을 적용시켜 얻은 특징형상의 재배열은 다음 식 (7)로 표현될 수 있다. 여기서  $\otimes'_i$  와  $V'_i$  은 각각 특징형상 재배열 후  $i$ 번째 특징형상의 불리안 직역과 유효영역을 나타낸다.

$$M_n = \prod_{i=0}^n \otimes'_i V'_i = \left( \prod_{i=0}^k \otimes'_i V'_i \right) \left( \prod_{i=k+1}^n \otimes'_i V'_i \right), 0 \leq k \leq n \quad (7)$$

가장 낮은 해상도의 모델  $M_0$ 는  $k+1$ 개의 모든 가법 특징형상들에 대한 합집합의 결과이며, 따라서 LOD의 수는  $n-k+1$ 개로 줄어든다. 일련의 LOD 모델들  $M_0, M_1, \dots, M_{n-k}$ 는 다음 식들과 같이 얻어질 수 있다.

$$M_0 = \prod_{i=0}^k (\cup V'_i) \quad (8)$$

$$M_j = M_0 \prod_{i=k+1}^{k+j} (-V'_i), 1 \leq j \leq n-k \quad (9)$$

반일 Fig. 2의 예제 모델에 이 판단 기준을 적용시킨다면 특징형상들은  $F_0 \rightarrow F_2 \rightarrow F_4 \rightarrow F_1 \rightarrow F_3$ 의 순서로 재배열된다. 이 경우 다중해상도 특징형상들의 속성 값들은 Table 2에 나타난 것과 같이 된다. 다섯 개 특징형상 가운데  $F_0, F_2, F_4$ 가 가법 특징형상이므로 (즉,  $k=2$ ), 가장 낮은 해상도의 LOD 모델은 이 세 특징형상들을 합한 것이 되며, LOD의 총 수는 세 개가 된다. 결과적으로 세 개의 LOD 모델들이 다중해상도 마스터 모델로부터 추출될 수 있으며, 이 경우 각 LOD 모델에 대한 불리안 작업 정의는  $M_0 = V_0 \cup V_2 \cup V_4$ ,  $M_1 = M_0 - (V_0 - V_2 - V_4)$ ,  $M_2 = M_1 - (V_3 - V_4)$  이 된다. 이들에 대한 결과가 Fig. 4에 나타나 있다.

이 방법에 사용된 LOD 판단 기준은 감법 특징형상의 전체 볼륨이다. 그러나 특징형상의 전체 볼륨을 일반적인 LOD 판단 기준으로 사용되기에는 다음과 같은 문제점들을 가지고 있다.

- 현재는 가법 특징형상이 모든 감법 특징형상에 우선하여 낮은 LOD를 갖게 된다. 그러나 경우에 따라서 가법 특징형상이 감법 특징형상보다 더 작고 상세한 특징형상이 될 수 있다. 이는 가장 낮은 해상도의 모델이 그 보다 높은 해상도의 모델보다 더 상세한 형상을 가질 수 있다는 것으로 이는 LOD 정의 자체를 위반하는 것이 된다.
- 만일 부품이 단지 가법 특징형상들만으로 모델링 된다면 이 방식으로는 단지 하나의 LOD만 가능하게 된다.
- 현재는 감법 특징형상의 전체 볼륨을 LOD 판단 기준으로 하고 있다. 그러나 부품 모델로부터 특징형상을 빼낼 때 감법 특징형상의 전체 볼륨이 사용되지 않을 수도 있다. 실제로는  $V_i \cap (M_0 - M_i)$ 에 해당하는 볼륨만이 불리안 작업 과정에 기여한다. 따라서 이 교차 볼륨이 특징형상 전체 볼륨보다 더 합리적인 LOD 판단 기준이 될 수 있다.

**7.2 특징형상의 볼륨(Volume of Feature)**

감법 특징형상의 볼륨을 LOD 판단 기준으로 채택한 기존 방식의 문제점들을 극복하기 위하여 본 논문에서는 특징형상의 볼륨 자체를 새로운 판단 기준으로 제안하고자 한다. 이 판단 기준은 특징형상이 가법이나 감법이나에 관계없이 적용되므로 보다 일반적인 판단 기준이라고 할 수 있다.

특징형상의 볼륨이라는 LOD 판단 기준은 어떤 볼륨을 측정하느냐에 따라 다양한 기준으로 세분화시킬 수 있다. 가장 간단한 경우는 특징형상의 전체 볼륨을 사용하는 경우이다. 그러나, 앞 절에서 언급한 것과 같이, 그것은 최종 부품 형상에 기여하지 않는 볼륨을 포함할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Algorithm 3에 나타난 것과 같이 기준이 되는 모델과의 볼륨 차이를 판단 기준으로 삼는 방법을 제안하고자 한다.

Algorithm 3은 Algorithm 1에 의해 호출되는 알고

**Table 2.** Reordered multi-resolution feature table for the example solid model in Fig. 2: the level of detail (LOD) criterion is the volume of the feature, together with the precedence of additive features over subtractive features

No	LOD	Feature name	Creation order	Bool	Primitive	Effective zone	LOD model
0	*	Base	0	+	$V_0$	$V_0$	$V_0$
1	*	Boss	2	+	$V_2$	$V_2$	$V_0+V_2$
2	0	Boss_Pattern	4	+	$V_4$	$V_4$	$V_0+V_2+V_4$
3	1	Blind_Hole	1	-	$V_1$	$V_1-V_2-V_4$	$V_0+V_2+V_4-(V_1-V_2-V_4)$
4	2	2CBore_Thru_Hole	3	-	$V_3$	$V_3-V_4$	$V_0+V_2+V_4-(V_1-V_2-V_4)-(V_3-V_4)$

리즘으로서  $\{F_j\}_{j=\ell}^k, \ell \leq j \leq k, 0 \leq \ell, k \leq n$  (즉,  $\ell$ 번째부터  $k$ 번째까지의 특징형상들) 가운데 가장 작은 특징형상을 찾는 작업을 수행한다. 여기서  $M_i$ 는  $\{F_j\}_{j=\ell, j \neq i}^k$  (즉, 특징형상  $F_i$ 를 제외한 나머지 특징형상들)을 적용시켜 얻은 모델을 나타낸다. 만일  $M_i$ 가 기준 모델  $M_n$ 에 가장 가깝다고 하면 특징형상  $F_i$ 가 주어진 범위의 특징형상  $\{F_j\}_{j=\ell}^k$  중에서 가장 작은 특징형상이라고 할 수 있다. 기준 모델은 원래 부품 모델  $M(M=M_n)$ 을 사용할 수도 있으며, 또는 바로 이전에 구한  $LOD=k+1$ 인 모델  $M_{k+1}$ 을 사용할 수도 있다. 여기서는 원래의 부품  $M_n$ 을 기준 모델로 선정하였다.

```

Algorithm 3. FindLeastSignificantFeature ( $F, \ell, k$ )
1. Input:  $F$ : the multi-resolution feature list:  $F = \{F_j\}_{j=0}^n$ 
2.  $\ell, k$ : lower and upper bounds of the feature range for searching the least significant feature:  $\{F_j\}_{j=\ell}^k, \ell \leq j \leq k, 0 \leq \ell, k \leq n$ .
3. Output: returns the position of the feature of minimum volume.
4. // Set the variable  $min\Delta V$  to a huge value.
5.  $min\Delta V \leftarrow \infty$ .
6. for  $i \leftarrow \ell$  to  $k$  do {
7.    $M_i = \prod_{j=\ell, j \neq i}^k \otimes_j V_j$ .
8.    $\Delta V = \text{VolumeOf}(M_n - M_i)$ .
9.   if ( $\Delta V < min\Delta V$ ) then {
10.     $min\Delta V \leftarrow \Delta V$ .
11.     $min\_position \leftarrow i$ .
12.   }
13. }
14. return  $min\_position$ .
    
```

만일 이 알고리즘을 Fig. 2의 예제에 적용한다면, 특징형상들은  $F_0 \rightarrow F_2 \rightarrow F_1 \rightarrow F_4 \rightarrow F_3$ 의 순으로 재배열된 것이다. Table 3는 재배열되었을 때의 다중해상도 특징형상의 각 속성들의 값을 보여주고 있다. 여기서 특징형상  $F_0, F_1, F_2, F_3, F_4$ 의 유효영역이 각각  $V_0, V_1-V_2, V_2, V_3-V_4, V_4$ 가 됨을 볼 수 있다. Fig. 5에

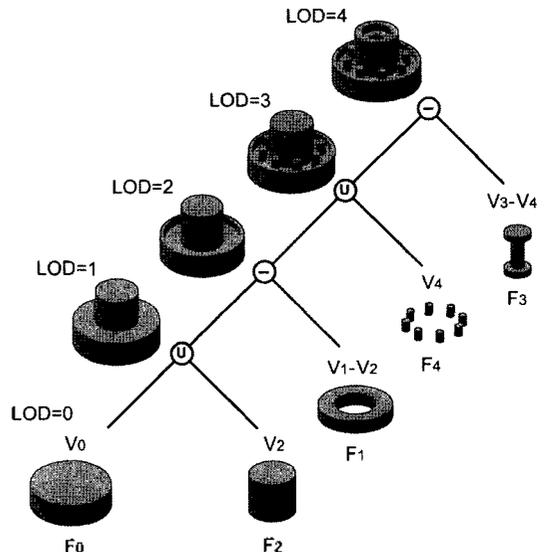


Fig. 5. The LOD models according to the multi-resolution feature table in Table 3.

나타난 것과 같은 다섯 개의 LOD 모델들이 이 다중 해상도 모델로부터 제공될 수 있다.

### 8. 적용 예

본 논문에서 소개한 다중해상도 모델링 기법을 시험 부품 모델에 대해서 적용시켜 보았다. Fig. 6는 초기의 특징형상기반 모델링 과정을 보여주고 있다. Fig. 7은 감법 특징형상의 볼륨을 LOD 판단 기준으로 선정했을 때의 LOD 모델들을 보여주고 있다. 이 경우 가장 낮은 해상도의 LOD 모델은 모든 가법 특징형상들을 합한 것이 된다. Fig. 8은 특징형상의 볼륨을 LOD 판단 기준으로 선정했을 때의 결과를 보여주고 있다. 이 경우 특징형상의 유형이 감법이나 가법이나는 상관없이 볼륨의 크기만을 기준으로 재배열한 것이다. Fig. 9은 구조 해석과 같은 작업을 할 때 엔지

Table 3. Rearranged multi-resolution features for the example solid model in Fig. 2, using feature volume as the LOD criterion

No	LOD	Feature name	Creation order	Bool	Primitive	Effective zone	LOD model
0	0	Base	0	+	$V_0$	$V_0$	$V_0$
1	1	Boss	2	+	$V_2$	$V_2$	$V_0+V_2$
2	2	Blind_Hole	1	-	$V_1$	$V_1-V_2$	$V_0+V_2-(V_1-V_2)$
3	3	Boss_Pattern	4	+	$V_4$	$V_4$	$V_0+V_2-(V_1-V_2)+V_4$
4	4	2CBore_Thru_Hole	3	-	$V_3$	$V_3-V_4$	$V_0+V_2-(V_1-V_2)+V_4-(V_3-V_4)$

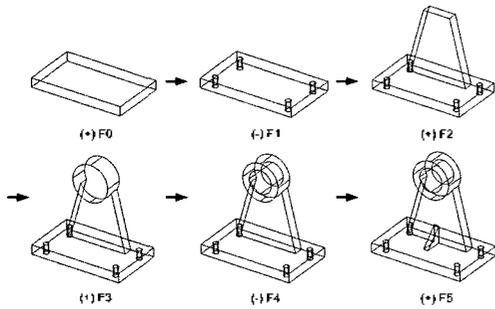


Fig. 6. Feature-based modeling process for a part model.

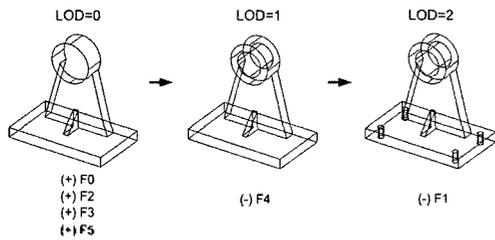


Fig. 7. Multi-resolution models where the LOD criterion is the volume of the subtractive feature together with the precedence of additive features over subtractive features.

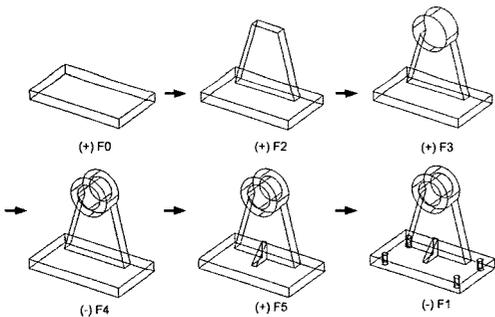


Fig. 8. Multi-resolution models where the LOD criterion is the volume of the feature, regardless of whether the feature type is additive or subtractive.

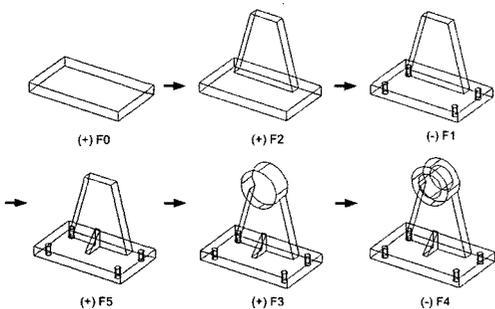


Fig. 9. Multi-resolution models where the LOD criterion is the significance of the feature in a structural analysis.

니어가 임의로 판단한 중요도의 순서대로 특징형상을 재배열한 예를 보여주고 있다.

## 9. 결 론

특징형상의 유효영역(effective zone of feature) 이라는 새로운 개념은 특징형상이 임의로 재배열된다 하더라도 언제나 원래 부품 형상과 동일한 최종 결과 형상을 담보할 수 있으며, 따라서 다양한 응용 분야에 맞는 각종 LOD 판단 기준들도 수용 가능하게 되었다<sup>[11]</sup>. 본 논문에서는 이러한 특징형상 유효영역의 개념을 바탕으로 실제 다중해상도 모델을 제공할 수 있는 특징형상 기반 비다양체 모델링 시스템을 개발하였으며, LOD 판단 기준의 확장 및 LOD 모델의 신속한 추출을 위한 방안을 제시하였다. 본 논문의 기여를 요약하면 다음과 같다.

- **특징형상기반 다중해상도 모델링 시스템 개발:** 비다양체 자료구조를 바탕으로 특징형상기반 모델링과 다중해상도 모델링이 가능한 CAD 시스템을 개발하였다. 여기에서는 다중해상도 모델을 표현하기 위하여 비다양체 병합체 모델이 채택되었으며, ‘병합 및 선택’ 알고리즘이 LOD 모델의 경계 계산을 위하여 도입되었다. 한편, 시스템 구현을 용이하게 하기 위하여 다중해상도 마스터 모델의 생성 및 LOD 모델들의 추출에 필요한 모든 정보를 속성으로 저장하는 다중해상도 특징형상(multi-resolution feature)이라는 자료구조를 제안하였다.
- **LOD 모델의 신속한 추출 방법:** LOD 모델들을 데이터베이스로부터 신속히 추출하기 위하여 비다양체 병합체 모델을 사용하였으며 나아가 더욱 LOD 모델의 추출 속도를 높이기 위한 방법으로 이웃한 LOD 모델간의 위상 요소들의 차이를 저장하는 방법도 제안하였다.
- **LOD에 대한 판단 기준:** 본 논문에서는 특징형상의 유형에 관계없이 특징형상의 볼륨만 가지고 판단하는 것을 제시하고 이를 기준으로 특징형상이 재배열되더라도 유효한 모델이 제공될 수 있음을 보여주었다. 그럼으로써 종래에 감법 특징형상(subtractive feature)의 부피로 제한되어 있던 LOD 판단 기준에서 벗어나 특징형상의 유형이 감법은 가법이든 상관없기 때문에 특징형상의 부피만을 기준으로 재배열될 수 있으므로 특징형상기반 다중해상도 모델링 기법이 보다 넓은 범위의 응용분야에 적용될 수 있게 되었다. 향후 연구 과제로서 다중해상도뿐만 아니라 다중축

약도 모델링 기법을 개발하여 다양한 축약 수준(level of abstraction(LOA))의 기하학적 모델들을 CAE 시스템에 제공하며 이러한 기술을 바탕으로 설계와 해석의 통합 환경을 제공하는 것을 고려해 볼 수 있다. 또한, 하나의 부품이 아닌 여러 부품으로 구성된 조립체의 다중해상도 표현 방법에 대한 연구도 필요하다. 그 밖에 다중해상도 모델링 기법을 적용할 수 있는 다양한 응용 분야를 개척하고 그 해당 응용 분야에 적합한 새로운 LOD 판단 기준을 제안하고 이를 적용시키는 작업도 필요하다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제 번호: R01-2002-000-00061-0) 사업의 지원으로 수행되었음.

## 참고문헌

- Cignoni, P., Montani, C. and Scopigno, R., "A Comparison of Mesh Simplification Algorithms", *Computers & Graphics*, Vol. 22, No. 1, pp. 37-54, 1998.
- Schröder, W. J., Zerge, J. A. and Lorenson, W. E., "Decimation of Triangle Meshes", *Proceedings of SIGGRAPH '92 in Computer Graphics*, Vol. 26, No. 2, pp. 65-70, 1992.
- 최동혁, 김태환, 이진우, "특정형상 변환을 이용한 B-rep 모델의 다중해상도 구현", *한국CAD/CAM학회 논문집*, 제7권, 제2호, pp. 121-130, 2002.
- 이상현, 이강수, 박상근, "선택적 불리안 연산자를 이용한 솔리드 모델의 다중해상도 구현", *한국정밀공학회 2002년도 춘계 학술대회 논문집*, KSPE 02S179, pp. 833-835, 2002. 5. 17-18.
- 이상현, 이강수, 박상근, "교환법칙을 만족하는 비다양체 모델의 선택적 불리안 작업의 개발", *한국정밀공학회 2002년도 춘계 학술대회 논문집*, KSPE 02S180, pp. 836-839, 2002. 5. 17-18.
- 이계열, 어주행, 김 현, 김형선, "셀룰러 토폴로지를 이용한 프로그래시브 솔리드 모델 생성 및 전송", *한국CAD/CAM학회 논문집*, 제9권, 제2호, pp. 122-132, 2004.
- Lee, J. Y., Lee, J.-H., Kim, H. and Kim, H. S., "A Cellular Topology-based Approach to Generating Progressive Solid Models from Feature-centric Models", *Computer-Aided Design*, Vol. 36, No. 3, pp. 217-229, 2004.
- Koo, S. and Lee, K., "Wrap-around Operation to Make Multi-resolution Model of Part and Assembly", *Computers & Graphics*, Vol. 26, No. 5, pp. 687-700, 2002.
- Lee, S. H., Lee, K.-Y., Woo, Y. W. and Lee, K.-S., "Feature-Based Multi-Resolution Modeling of Solids Using History-Based Boolean Operations - Part I: Theory of History-Based Boolean Operations", Vol. 19, No. 2, pp. 549-557.
- Lee, S. H., Lee, K.-Y., Woo, Y. W. and Lee, K.-S., "Feature-Based Multi-Resolution Modeling of Solids Using History-Based Boolean Operations - Part II: Implementation Using a Non-Manifold Modeling System", Vol. 19, No. 2, pp. 558-566.
- 이상현, 이규열, "특정형상기반 다중해상도 모델링에 관한 연구 - Part I: 특정형상의 유효영역", *한국CAD/CAM 학회지*, Vol. 10, No. 6, pp. 432-443, 2005.
- Crocker, G. A. and Reinke, W. F., "An Editable Non-manifold Boundary Representation", *IEEE Computer Graphics & Applications*, Vol. 11, No. 2, pp. 39-51, 1991.
- Masuda, H., "Topological Operators and Boolean Operations for Complex-based Nonmanifold Geometric Models", *Computer-Aided Design*, Vol. 25, No. 2, pp. 119-129, 1992.
- 김성환, 이진우, 김영진, "비다양체 모델을 수용하는 CAD 시스템 커널을 위한 불리안 조작의 개발", Vol. 1, No. 1, pp. 20-32, 1996.
- Li, B. and Liu, J., "Detail Feature Recognition and Decomposition in Solid Model", *Computer-Aided Design*, Vol. 34, No. 5, pp. 405-414, 2002.
- Charlesworth, W. W. and Anderson, D. C., "Applications of Non-manifold Topology", *Proceedings of International Computers in Engineering Conference and the ASME Database Symposium*, Boston, Massachusetts, pp. 103-112, September 17-20, 1995.
- Lec, S. H. and Lee, K., "Partial Entity Structure: A Compact Boundary Representation for Non-manifold Geometric Modeling", *ASME Journal of Computing & Information Science in Engineering*, Vol. 1, No. 4, pp. 356-365, 2001.
- 이상현, 이진우 "비다양체 형상 모델링을 위한 간결한 경계 표현 및 확장된 오일러 작업자", *한국CAD/CAM 학회지*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-19, 1996.



### 이 상 현

1986년 서울대학교 기계설계학과 학사  
 1988년 서울대학교 기계설계학과 석사  
 1993년 서울대학교 기계설계학과 박사  
 1993년~1995년 신도리코 기술연구소 책임연구원  
 1996년 대우·고등기술연구원 선임연구원  
 1996년~현재 국민대학교 부교수  
 관심분야: CAD/CAM, 3D Geometric Modeling, Die & Mold Design, Virtual Design and Manufacturing



### 이 규 열

1971년 서울대학교 공과대학 조선공학과 학사  
 1975년 독일 하노비 공과대학 조선공학 석사(Dipl.-Ing.)  
 1982년 독일 하노비 공과대학 조선공학 박사(Dr.-Ing.)  
 1975년~1983년 독일 하노비 공과대학 선박설계 및 이론연구소, 주정부 연구원  
 1983년~1994년 한국기계연구원 선박해양공학연구센터, 선박설계, 생산자동화 연구사업(CSDP)단장  
 1994년~현재 서울대학교 공과대학 조선해양공학과 교수  
 관심분야: CAD, CAGD, 선박 설계, 시뮬레이션, CALS