

## B-rep의 다중해상도를 구현하는 통합 시스템 개발

김성찬\*, 이건우\*\*, 홍태식\*\*\*, 김민철\*\*\*\*, 정문기\*\*\*, 송영재\*\*\*\*\*

### An Integrated Approach to Realize Multi-resolution of B-rep Model

Kim, S.C.\*, Lee, K.W.\*\*, Hong, T.S.\*\*\*, Kim, M.C.\*\*\*\*, Jung, M.K.\*\*\* and Song, Y.J.\*\*\*\*\*

#### ABSTRACT

It is becoming a common trend that many designers work on a very complex assembly together in a collaborative environment. In this environment, every designer should be able to see the whole assembly in a full detail or in a rough shape at least. Even though the hardware technology is being improved very rapidly, it is very difficult to display a very complex assembly at a speed to allow smooth interactions for designers. This problem could be solved if a designer could manipulate his portion of the assembly in a full resolution while the remaining portion of the assembly is displayed in a rough resolution. It is also desired that the remaining portion is converted to the full resolution when needed. To realize this environment, the capabilities to simplify the portions of an assembly and to reset to the original resolution should be added to the current CAD systems. Thus operators realizing multi-resolution on B-rep are proposed in this paper. They are: wrap-around, smooth-out, and thinning operator. Through appropriately applying these operators sequentially, an assembly model of any desired resolution can be easily generated. Of course, the assembly can go back to the finer resolution. In this paper, the data structures and the processes to realize these operators are described and a prototype modeling system with these operators is also demonstrated.

**Key words :** Multi-resolution, LOD, Model simplification, B-rep, Feature recognition, Feature suppression

## 1. 서 론

협업 설계에서 많은 설계자들이 매우 복잡한 조립체를 동시에 다루는 것은 이제 매우 일반적인 일이 되었다. 이러한 환경에서 모든 설계자가 작어도 전체 조립체 형상을 대략이나마 볼 수 있어야 자신이 맡은 영역의 설계를 원활히 수행할 수 있다. 비록 그래픽 하드웨어의 기술이 빠르게 발전하고 있지만 설계자가 매우 복잡한 조립체 전체를 한꺼번에 실시간으로 다룰 수 있기에는 아직 어려움이 있다. 만약 설계자가 조립체에서 수정, 편집하고자 하는 영역만이 고해상도로 표시되고 나머지 영역은 저해상도 모델로 표시

되며, 원한다면 언제든지 저해상도 모델을 고해상도 모델로 변경할 수 있다면 비교적 빠르게 대용량의 조립체를 다룰 수 있을 것이다. 따라서 조립체에 대해서 다중해상도 모델을 생성하고 이를 관리할 수 있는 방법이 필요하다.

다중해상도 모델링은 컴퓨터 그래픽스 분야에서 활발히 연구되어 왔다. 이러한 연구에서는 파트나 조립체가 폴리곤(polygon) 모델로 표현되며 저해상도 모델이 필요할 경우 폴리곤의 수를 감소시켜 이를 구현한다. Boundary representation(B-rep)은 상용 CAD 시스템에서 3D 모델을 표현하는데 사용되며 형상 정보뿐 아니라 위상 정보까지 포함하고 있다. 이 때문에 B-rep 모델 기반의 다중해상도 기법이 폴리곤 기반의 것과 비교하여 CAD 시스템에 보다 적합하다고 할 수 있다.

이 논문에서는 B-rep 기반의 다중해상도를 구현하기 위해서 wrap-around, smooth-out, thinning이라는 3가지 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘들은 모델

\*교신저자, 학생회원, 삼성전자

\*\*중신회원, 서울대학교 기계항공공학부

\*\*\*서울대학교 기계항공공학부

\*\*\*\*현대자동차

\*\*\*\*\*삼성전자

- 논문투고일: 2005. 07. 20

- 심사완료일: 2006. 04. 18

을 단순화하기 위해 사용되지만 원래 모델로 되돌아가기 위해 필요한 최소한의 정보를 저장하여 원하는 경우 언제든지 복원이 가능하다. Wrap-around 알고리즘은 부위에서 사용하는 랩으로 물체를 감싸는 경우 세부 형상이 감추어지는 것과 같은 개념으로 파트나 조립체를 단순화한다. Smooth-out 알고리즘은 사포를 가지고 작은 형상을 제거하는 것처럼 파트나 조립체를 단순화한다. 마지막으로 thinning 알고리즘은 3D를 2D, 2D를 1D로 차원을 감소(dimension reduction)시킴으로써 파트나 조립체를 단순화한다. 이 알고리즘들을 구현하기 위해서 제거 가능하거나 차원 감소가 가능한 특징 형상들을 효율적으로 검색할 수 있는 방법들을 제안하였다. 다중해상도 알고리즘이 적용될 때 복원을 위해서 검색된 특징 형상의 정보가 저장되며, 이를 통해서 파트나 조립체는 언제든지 원하는 해상도의 모델을 생성할 수 있다.

다음 장에는 다중해상도 알고리즘 등을 자세히 설명하도록 한다. 또한 제안된 알고리즘을 구현하기 위해 작성된 프로그램을 소개하고 알고리즘의 효과를 입증할 수 있는 예제를 제시한다.

## 2. 관련 연구

기존에는 다양한 메쉬 기반의 다중 해상도 알고리즘이 개발되었다. 하지만 본 연구에서는 B-rep 기반의 다중해상도 모델 생성 방법을 제안하며 이 장에서는 이와 관련된 연구를 소개하도록 한다.

### 2.1 다중해상도와 관련된 연구

#### 2.1.1 삼각형 메쉬 단순화

다양한 삼각형 메쉬 기반의 다중해상도 알고리즘들이 제안되고 구현되어 왔다<sup>[1]</sup>. 이러한 알고리즘들은 정해진 기준에 의해서 삼각형 메쉬 요소를 합치거나 삼각형을 이루는 점들을 재추출함으로써 삼각형 메쉬를 단순화시키는 방법을 사용하고 있다. 그러나 메쉬 기반의 단순화 방법은 기계 설계와 같이 정확한 형상을 요구하는 응용 분야에 적용하기에는 부적절하다.

#### 2.1.2 B-rep 기반의 다중해상도 연구

최동혁<sup>[7]</sup>은 설계를 위한 특징형상을 복잡성을 나타내는 단위로 보고, 특징형상들의 적용 순서를 바꾸고 변경된 순서에 적합하도록 특징형상을 재정의함으로써 모델의 다중해상도를 구현하는 방법을 제안하였다. 그러나 특징형상의 정의를 위해 사용된 참조 형상

들의 관계 때문에 특징형상들의 순서를 자유롭게 재배열할 수 없었다.

구승범<sup>[8]</sup>은 B-rep 모델로부터 오목한 형상을 검색하여 제거함으로써 파트의 형상을 단순화하고, 각각의 단순화된 파트가 조립체에서 간섭을 일으킬 때 보이지 않는 면들을 제거함으로써 조립체의 형상을 단순화시키는 방법을 제안하였다. 그의 연구에서는 볼록한 테두리의 내부 루프(loop)를 가진 오목한 형상만이 검색되기 때문에 적용 범위가 매우 제한적이었다.

M. Belaziza<sup>[9]</sup>는 설계 과정과 해석 과정을 통합하는 특징 형상 기반의 시스템을 제안하였다. 이 시스템은 단순화와 이상화라는 두 가지 과정에 의해 생성되는 형태학적인 해석 모델을 사용한다.

이재열<sup>[10]</sup>은 특징 형상 기반 모델로부터 순차적인 솔리드 모델(progressive solid model, PSM)을 생성하기 위해 세포 위상구조를 기초로 한 방법(cellular topology-based approach)을 제안하였다. 이상현<sup>[11,12]</sup>은 세포 구조(cellular structure)의 비다양체 위상(non-manifold topological, NMT) 모델을 사용하여 모델의 특징형상을 자유롭게 재배열할 수 있음을 보였다. 또한 CAD와 CAE에서 요구되는 모든 형상 모델을 포함한 단일 마스터 모델을 생성하고, 형상들을 선택적으로 선택하여 원하는 해상도의 모델을 생성할 수 있는 방법을 제안하였다. 이 연구들에서는 최종 모델의 B-rep 정보 이외에도 추가적인 형상, 위상 정보가 필요하다.

위에서 소개된 연구들은 B-rep에서 형상뿐 아니라 위상까지 단순화하고 있지만, 웨이블릿(wavelet)을 이용하여 곡선(curve)과 곡면(surface) 정보를 감소시켜 형상만을 단순화하는 연구들도 존재하였다<sup>[13,14]</sup>.

### 2.2 특징형상 인식

특징형상 인식을 위한 알고리즘들은 인식된 특징형상을 표현하는 방법에 따라 경계(boundary) 특징형상 인식법과 체적(volumetric) 특징형상 인식법, 두 가지로 분류된다. 경계 특징형상 인식법에는 rule-base 접근법, graph-based 접근법, hint-based 접근법, artificial neural network-based 접근법 등이 있으며<sup>[15,19]</sup>, 체적 특징형상 인식법에는 convex-hull 접근법, volume growing, volume decomposition 등이 있다<sup>[20-23]</sup>.

대부분 특징형상 인식을 위한 알고리즘들은 특징형상을 찾는데 많은 시간을 필요로 한다. 그러나 본 연구에서는 다중해상도 알고리즘에 적합하며 rule-base 접근법에 기반한 단순하면서도 빠른 검색 알고리즘을 제안하였다.

### 2.3 특징형상 제거

Zhu<sup>[24]</sup>는 필렛(fillet)/라운드(round)를 효과적으로 검색하고 제거함으로써 모델을 단순화하는 방법을 제안하였다. 또한 Venkataraman<sup>[25]</sup>은 검색된 면들의 집합(face-set) 근처의 면들을 확장하거나 수축하여 이를 제거하는 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘은 부분적으로 파트를 수정하는데 유용하다. 하지만 원래 모델로의 복원을 위한 방법을 제시하고 있지는 않다.

### 2.4 차원 감소법

Blum<sup>[26,27]</sup>은 형상의 골격을 표현할 수 있는 medial axis transform(MAT) 방법을 제안하였으며, Chong<sup>[28]</sup>은 논문에서 decomposition과 reduction 방법을 이용하여 모델의 차원을 감소시키는 방법을 설명하고 있다. 본 연구에서는 두께가 얇은 형상을 검색하여 이에 대해서만 차원 감소법을 적용하고 있다. 그 외의 형상에 대해서는 wrap-around, smooth-out 등의 알고리즘들이 적용된다.

## 3. 다중해상도 구현을 위한 기본 알고리즘

여기서는 본 연구에서 제안한 wrap-around, smooth-out, thinning 등의 알고리즘을 설명하도록 한다.

### 3.1 Wrap-around 알고리즘

Wrap-around 알고리즘은 모델을 단순화할 경우 Fig. 1과 같이 마치 랩으로 둘러싸인 것과 같은 형상을 생성할 수 있다.

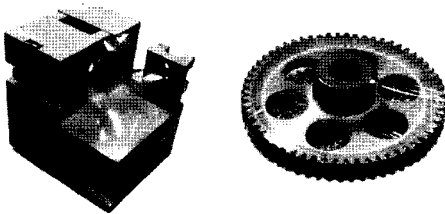


Fig. 1. Parts wrapped in plastic.

B-rep 모델에서 물체 내에 존재하는 blend, chamfer, passage, concave-region 등의 특징 형상들은 물체를 복잡하게 만드는 요인으로 생각할 수 있다. 이와 같은 특징 형상들은 면의 집합으로 이루어져 있기 때문에 이 면의 집합을 제거한 후 인접하는 면들을 확장하거나 새로운 면을 생성하여 제거된 형상의 주변부를 덮는다면 모델의 전체적인 형태를 유지하면서도 형상을

단순화시킬 수 있다.

Wrap-around 알고리즘은 Fig. 2와 같이 검색된 특징 형상을 제거함으로써 단순화된 모델을 생성하고 이를 원래의 형상으로 복원하는 것이 가능하다. 또한 특징 형상을 제거하는 방법에 따라서 Fig. 1과 같이 모델을 랩으로 감싼 형상의 모델을 생성하는 것도 가능하다.

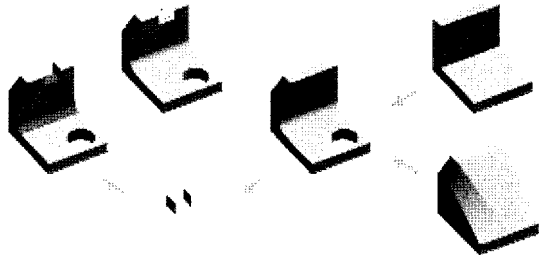


Fig. 2. Overview of wrap-around operation.

#### 3.1.1 제거될 특징 형상의 검색

Wrap-around에서 검색 가능한 특징 형상은 blend, chamfer, passage, concave-region 등 총 4가지이며 그 검색 조건은 다음과 같다.

Blend는 Fig. 3과 같이 필렛과 라운드의 두 가지 형태로 필렛은 오목한 모서리에서, 라운드는 볼록한 모서리에서 만들어 진다. 필렛과 라운드 형상을 이루는 면을 **blending-face**라 부르고, 이를 검색하기 위해 다음과 같은 몇 가지 성질을 정의한다.

- (1) Blending-face의 넓이는 주변 면들의 넓이보다 비교적 작다.
- (2) 면의 형태가 실린더, 토러스, 구 중 하나이다.
- (3) Blending-face는 spring-edge를 반드시 가진다. Spring-edge란, blending-face와 일방적인 면을 연속적으로 이어주는 모서리이다. 따라서 두 개의 spring-edge를 갖는 면은 blending-face의 후보 면이 될 수 있다.
- (4) Cross-edge는 blending-face들 사이에서 공유되는 모서리이며 running-edge는 spring-edge와 cross-edge를 제외한 모서리이다. Cross-edge 및 running-edge는 일정한 파라미터(parameter) 범위를 가지는 곡선이다.

모델 내에 위의 네 가지 조건을 모두 만족하여 검색되는 첫 번째 면을 시작면(seed-face)로 하여, spring-edge와 연결된 다른 blending-face를 blend face-set으로 구성하며 이를 blend 특징형상으로서 저장한다.

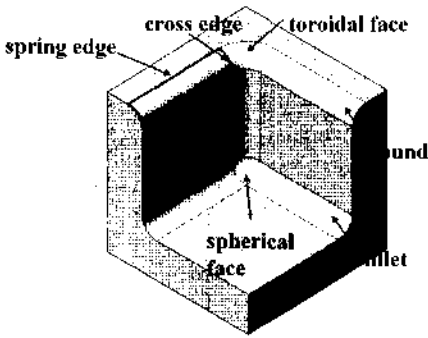


Fig. 3. Definition of blend face-set.

Chamfer는 항상 볼록한 모서리와 만나게 되며 chamfer를 이루는 면은 인접한 면과 비교하여 상대적으로 작은 면적을 가진다. 또한 Fig. 4에서처럼 chamfer-edge, running-edge, cross-edge 등을 포함하게 된다. 이러한 조건으로부터 chamfer face-set이 검색된다.

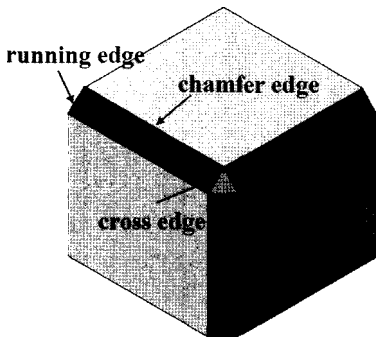


Fig. 4. Definition of chamfer face-set.

Passage 형상은 어떤 면의 내부 루프와 연결되어 있고, 그러한 루프를 이루는 모서리들은 볼록한 성질이 있다. 따라서 파트 내의 볼록한 모서리를 가지는 내부 루프(convex inner loop)가 있는 두 면과 이들과 동시에 인접한 면들을 passage 형상을 이루는 면이라 생각할 수 있다. Fig. 5에 나타난 파트의 면  $f_1$ 과 같이 convex inner loop를 가지고 있는 면이 있다면 그 면을 시작면으로 하여 convex inner loop를 이루는 모서리와 연결된 면  $f_3$ 을 찾고 시작면을 제외한  $f_3$ 과 연결된 다른 면들 중에 convex inner loop를 가지는 면  $f_2$ 를 찾는다. 따라서 이 모델은  $f_1, f_2$ 의 면과 연결된  $f_3$ 으로 이루어진 관통형상을 가진다. 이러한 연결 관계를 이용하여 검색된 면들을 하나의 passage face-set으로 정의한다.

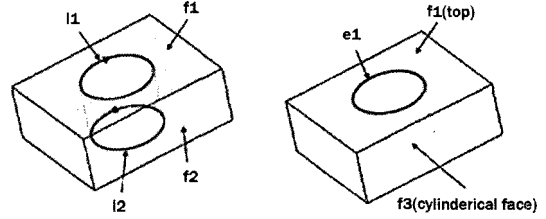


Fig. 5. Definition of passage face-set.

Concave-region 형상은 기준 되는 면을 찾고, 그 면과 인접한 면간의 법선 벡터를 계산함으로써 구할 수 있다. Fig. 6에서 모서리 E는 두 개의 면,  $f_1$ 과  $f_2$ 의 공통 모서리이다. 이때, E의 임의의 점 P에서, 각 면의 법선 벡터  $N_1, N_2$ 의 외적과, 기준 되는 면  $f_1$ 의 공통 모서리에서의 루프 방향벡터  $le$ 의 내적의 결과는  $f_1, f_2$ 가 오목한 영역을 이루는 면인지를 구분하게 한다. 공통 모서리 E를 중심으로 면이 만약 오목한 형상을 이루고 있으면,  $N_1$ 과  $N_2$ 의 외적 벡터는 면  $f_1$ 이 가진 공통 모서리의 방향과 반대가 된다. 반면 볼록한 형상을 이루고 있으면, 그 두 벡터는 같은 방향을 이룬다.

(1) Concave corner

$$(N_1 \times N_2) \cdot le = -1$$

(2) Convex corner

$$(N_1 \times N_2) \cdot le = 1$$

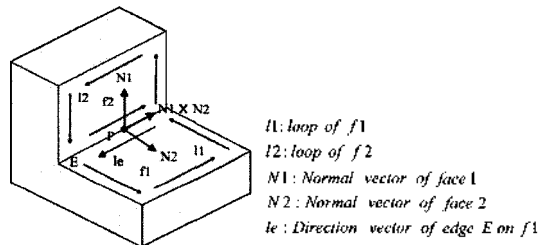


Fig. 6. Definition of concave face-set.

결국 Fig. 6과 같은 모델에서는 (1)과 같은 성질을 갖는 공통 모서리 E를 찾아내어 그것과 연결된 두 면  $f_1, f_2$ 를 오목한 영역을 이루는 concave-face라 정의한다. 실제의 모델에서는 하나의 오목한 영역이 많은 수의 concave-face로 이루어질 수 있으므로 최초로 검색된 concave-face를 시작면으로 하여 그 주변의 연결된 다른 concave-face를 계속 찾아내어 concave face-set으로 정의한다.

3.1.2 단순화 과정

검색된 형상들을 제거하는 방법은 blend 형상을 제외하고 동일하며 다음과 같다. 검색된 특징 형상을 이루고 있는 면들의 집합을 B-rep 정보에서 제거시킨 후 주변의 면들을 확장 혹은 축소시켜 전체 해당 부분을 메운다. 이때 각각의 형상에서 제거된 면들은 복원을 위하여 sheet-body의 형태로 저장된다. Fig. 7에서는 concave-region 특징형상으로 검색된 면들의 집합을 제거하여 단순화된 모델을 생성하고 복원을 위해 저장된 sheet-body의 형상을 보여주고 있다.

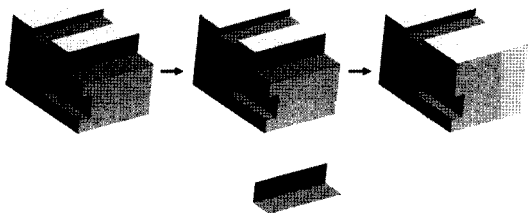


Fig. 7. Simplification operation for concave-region feature.

단 blend 형상의 경우에는 복원하는 방식에 차이가 있어 sheet-body가 아니라 blending-face가 제거된 후 새로 생긴 모서리를 wire-body의 형태로 변환하여 저장하게 된다. Fig. 8에서는 2개의 blend 특징형상을 제거하여 생성된 단순화된 모델과 추후 복원을 위해 저장된 wire-body의 형상을 보여주고 있다.

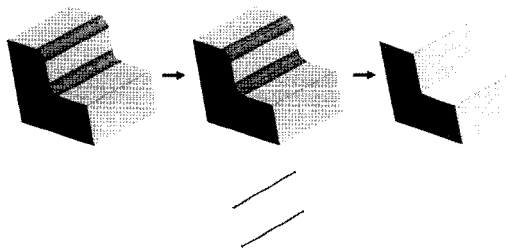


Fig. 8. Simplification operation for blend feature.

3.1.3 복원 과정

Wrap-around의 단순화 과정에서 제거된 형상 중에 concave, passage, chamfer 형상은 모델링 단계에서 주로 깎아내어 만들어진 형상, 즉 subtractive-feature라 할 수 있다. 따라서 이러한 subtractive-feature가 제거되어 단순화된 모델의 복원 과정은 다시 원래 형상처럼 깎아내어 복잡한 모델로 되돌린다. 이를 위해서, 복원하려는 단순화된 모델을 복원 과정을 위해 저

장한 sheet-body로 절단(section)하여 두 개의 바디(body)로 분리한다. Fig. 9는 복원 과정의 간단한 예로 정리하면 다음과 같다.

- (1) Wrap-around의 단순화 과정에서 저장된 sheet-body를 얻어온다.
- (2) 단순화된 모델에, 앞에서 얻어온 sheet-body를 Fig. 9의 (c)와 같이 배치한다.
- (3) 단순화된 모델을 sheet-body로 절단한다. 이때 sheet-body를 이루는 면들의 법선 벡터는 단순화되기 전 모델 내에 있었을 때와 같다. 따라서 절단 과정 후 나온 두 개의 바디는 Fig. 9의 (d)와 같이 면의 법선 벡터 방향의 바디와 그 반대 방향의 바디로 분리할 수 있다. 이 분리된 두 바디들을 각각 front-body, back-body라 부른다.
- (4) 단순화하기 전 모델은 항상 sheet-body를 이루는 면의 법선 벡터와 반대 방향에 있는 back-body가 된다. Front-body는 사용되지 않으므로 삭제한다.

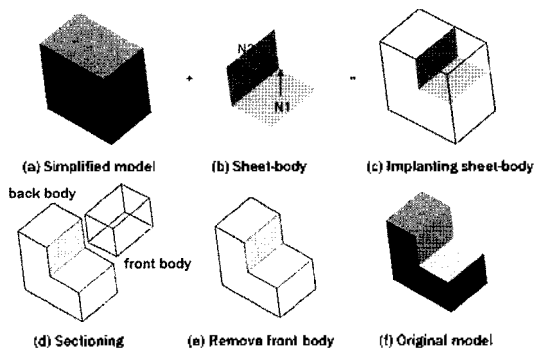


Fig. 9. Recovery operation for concave-region feature.

Round 형상도 날카로운 모서리를 깎아서 만드는 형상이므로, 위의 절단 방법을 적용할 수 있으나 필렛과 같은 경우는 오목한 모서리에 형상이 새로 추가되는 것으로 이를 적용하여 복원 과정을 구현할 수 없다. 따라서 blend 특징형상의 단순화 과정에서 저장된 wire-body의 정보를 이용하여 형상을 복원한다. 즉 Fig. 10과 같이 복원을 위하여 만든 wire-body에

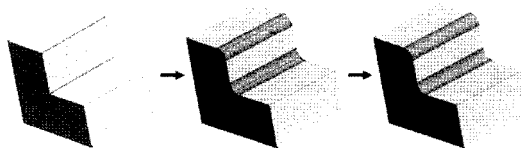


Fig. 10. Recovery operation for blend feature.

blend의 반지름을 기억시켜 놓은 후 이 정보를 이용하여 wire-body 위치에 해당하는 모서리에 blending-face를 재생성하는 것이다. Blend 형상의 복원에 일관성을 유지하기 위하여 라운드의 재생성도 필렛과 같은 방법을 사용한다.

3.1.4 오목한 영역을 감싸는 형상 생성

오목한 형상을 wrap-around의 단순화 과정으로 제거할 때 크게 두 가지 방법을 생각할 수 있다. 오목한 형상을 이루는 면들을 제거한 후 이들과 인접한 면들의 곡면을 그대로 확장시켜 덮는 방법과 실제 램프로 싸는 것과 같은 형상을 만들어 덧붙이는 방법이다. 제거가 상대적으로 간편하고 데이터의 양도 더 많이 줄일 수 있기 때문에 일반적인 wrap-around의 단순화 과정은 전자의 방법을 사용한다. 그러나 어떤 목적을 가지고 파트를 단순화시키는가에 따라 후자 역시 중요성을 가질 수 있다. 실제 램프로 싸는 것과 같은 형상을 덧붙이는 방법은 주어진 파트를 단순화시키면서도 전체적인 모양은 원본 파트와 좀 더 유사하게 유지할 수 있는 장점이 있기 때문이다. Fig. 11에서 (b)는 원본 파트(a)를 일반적인 wrap-around 방법으로 단순화시킨 것이고 (c)는 실제 램프로 싸는 것과 같은 형상을 만들어 덧붙인 것이다. 두 경우 모두 오목한 형상이 제거되어 원본 파트보다 단순화 되었지만 (c)가 전체적인 형태의 측면에서 원본 파트와 좀 더 유사한 것을 알 수 있다. 물론 B-rep 데이터의 양을 줄이는 측면에서는 (b)가 더 유리하다. (c)와 같은 방법으로 단순화된 모델은 원본 파트의 형상을 유추하기가 쉬우며 특히 전체적인 형태가 중요한 유사성 비교 등의 분야에 활용될 수 있다.

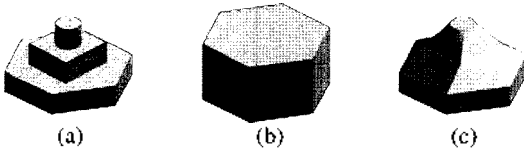


Fig. 11. Two different results from the wrap-around operation (a) Original model (b) General case (c) Special case.

이와 같이 오목한 형상을 실제 램프로 싸는 것과 같은 형상으로 대체하는 방법은 다음과 같다. 우선 파트에서 해당 오목한 영역을 검색한 뒤 오목한 모서리들을 제외한 나머지 모서리들을 서로 연결된 것들끼리 묶어 두 그룹으로 나눈다. 다음으로 그룹들 중 모서리의 수가 더 적은 쪽의 모서리들에 점(vertex)을

삽입하여 두 그룹의 모서리 수를 일치시켜 준다. 그런 다음 두 그룹을 각각 wire-body로 만든다. 다음으로 이 wire-body들의 루프의 방향을 로프트(loft)방향에 맞추어 재설정한다. 여기까지 끝나면 로프트의 기준점이 되는 시작점을 각각의 wire-body에 대하여 설정해 준다. 마지막으로 두 wire-body 사이에 로프트 바디를 생성하여 원래 파트와 합친다. 이 과정을 Fig. 12에 나타내었다.

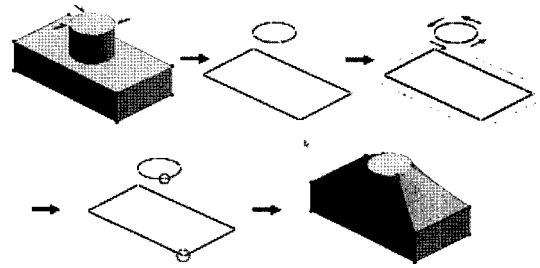


Fig. 12. Simplification operation in special case.

3.1.5 Wrap-around 알고리즘의 한계

앞에서 설명했듯이 wrap-around 알고리즘은 램프로 파트를 감싸는 듯한 형상을 생성하고자 하는 목적에서 제안되었다(Fig. 1). 그래서 wrap-around의 단순화 과정은 원본 모델에 볼륨을 더하는 효과를 지닌다. 대부분은 wrap-around 알고리즘을 통해서 만족할만한 단순화 모델을 생성할 수 있다. 하지만 원본 모델에서 볼륨을 제거하는 과정을 통해서 보다 적합한 단순화 모델을 생성할 수도 있다.

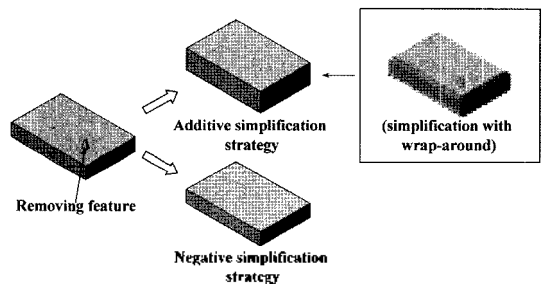


Fig. 13. Simplification strategy for small additive feature.

검색된 특징 형상이 전체 모델에 비해서 상대적으로 작을 때는 Fig. 13과 같이 이를 감싸는 형상보다는 제거한 형상이 보다 원본 형상에 가깝다. 또한 얇은 두께를 가진 형상의 경우에는 Fig. 14와 같이 차원 감소법을 통해 2D로 근사화하는 것이 원본 모델에 근접한 형상임을 알 수 있다.

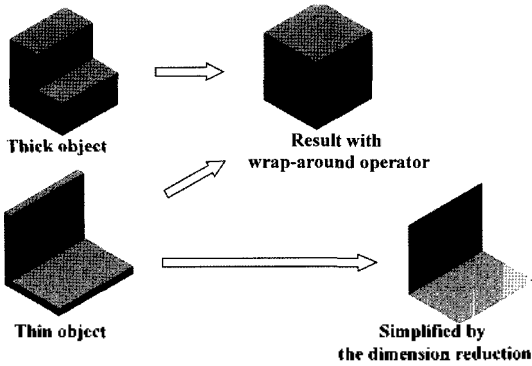


Fig. 14. Simplification strategy for thin object.

위와 같은 예제들을 고려하여 wrap-around 알고리즘의 한계를 극복할 수 있는 알고리즘으로 smooth-out과 thinning을 제안한다. 다음에는 이 두 알고리즘에 대해서 보다 자세한 내용을 설명하도록 한다.

### 3.2 Smooth-out 알고리즘

Smooth-out 알고리즘을 통해 검색되는 특징 형상이란 파트의 전체 형상에 미치는 영향이 비교적 적은 boss, rib 등의 additive-feature를 말한다. 일반적으로 전체 파트에 비하여 그 볼륨이 상대적으로 매우 작은 형상들이 이에 해당한다고 할 수 있다. 대표적인 예를 Fig. 15에 나타내었다.

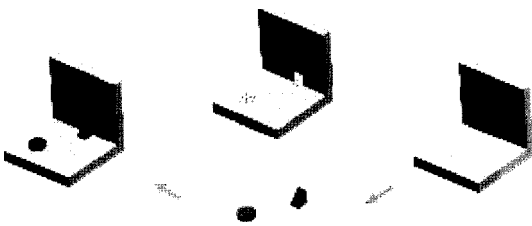


Fig. 15. Overview of smooth-out operation.

#### 3.2.1 제거될 특징 형상의 검색

Boss는 Fig. 16과 같은 순서로 검색된다. 일단 주어진 바디의 면에서 내부 루프를 찾아내고 그 내부 루프

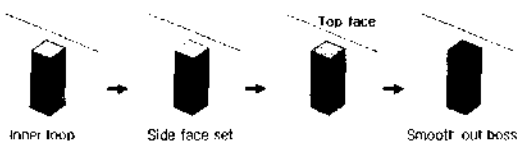


Fig. 16. Definition of boss.

에 오목한 면들의 집합(이하 side face-set)을 찾아낸다. 그런 다음 side face-set에 공통으로 볼록한 면(이하 top face)을 검색한다. 이때 top face가 존재할 경우 side face-set과 top face를 합하여 boss face-set으로 정의한다.

다음으로 smooth-out이 가능한 rib의 정의는 다음과 같다. rib들을 펼쳐보면 rib의 옆면을 이루고 있는 면들은 서로 크기와 모양이 같고 바닥 및 뒷면과 만나는 부분에서 2개의 오목한 모서리를 가진다. 그리고 rib를 이루는 면들의 집합 내에서 두 개의 면들이 공유하는 모서리는 볼록한 모서리임을 알 수 있다. Fig. 17은 이 관계를 나타낸다.

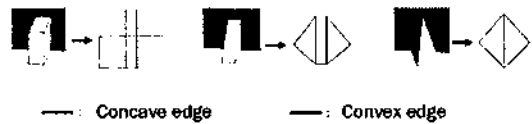


Fig. 17. Definition of rib.

위와 같은 특성을 이용하여 다음의 조건으로 검색한다.

- (1) 크기와 모양이 서로 같고 다른 면들보다 상대적으로 작은 면들의 쌍들을 찾아낸다.
- (2) 그 중에서 각 면이 2개의 오목한 모서리를 가지는 면들의 쌍들을 골라낸다.
- (3) 면들의 쌍 내의 두 면이 서로 접하고 볼록한 모서리를 공유하면 이 면들의 쌍을 rib face-set으로 등록한다.
- (4) 면들의 쌍 내의 두 면들이 서로 접하지는 않지만 제 3의 면에 공통으로 접하고 있고 그때 접하는 모서리들이 모두 볼록한 모서리이면 그 면들의 쌍과 공통으로 접하는 면들을 합쳐 rib face-set으로 등록한다.

위와 같은 조건을 Fig. 17와 같은 형상을 검색해 낼 수 있다.

#### 3.2.2 단순화 및 복원 과정

Smooth-out 알고리즘으로 검색된 특징 형상의 제거 및 복원은 wrap-around 알고리즘에서와 동일한 방법으로 이루어진다. Smooth-out 알고리즘으로 검색된 면들의 집합이 제거되면 주변 면들이 연장되어 그곳을 덮게 된다. 이때 smooth-out 알고리즘으로 검색된 면들의 집합을 sheet-body로 만들어 저장해 둔다. 복원은 저장해 두었던 sheet-body를 전체 바디와 합쳐 주면 된다. 이 과정을 Fig. 18에 나타내었다.

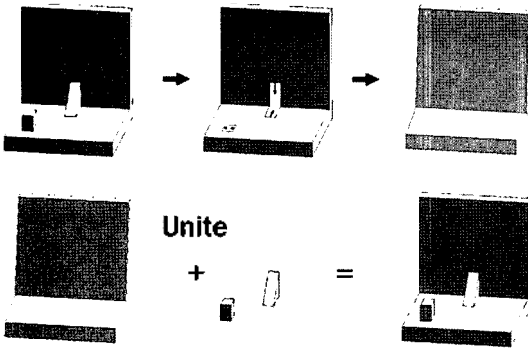


Fig. 18. Simplification and recovery operation of smooth-out.

### 3.3 Thinning 알고리즘

앞에서 설명한 wrap-around 및 smooth-out 알고리즘을 적용하여 단순화된 모델에 추가로 thinning 알고리즘을 적용하면 차원 감소 과정을 거쳐 보다 단순화된 모델을 생성할 수 있다. 또한 wrap-around 및 smooth-out 알고리즘을 적용하지 않고 곧바로 thinning 알고리즘을 적용하는 것도 가능하다. Fig 19 는 thinning 알고리즘의 전체 개략도를 나타내고 있다.

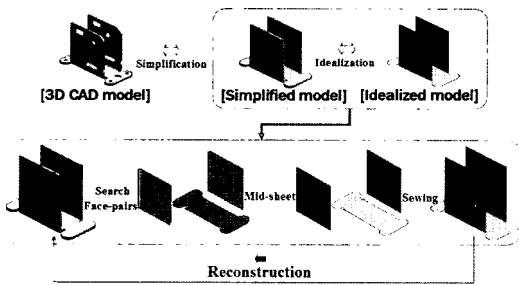


Fig. 19. Overview of thinning algorithm.

#### 3.3.1 차원 감소를 위한 특징 형상의 검색

적합한 면들의 쌍은 차원 감소 과정을 통해서 중간면(mid-sheet)으로 만들 수 있으며 이 면들의 쌍은 다음과 같은 조건을 통해 검색될 수 있다.

- (1) 두 면들은 동일한 형태(plane, cylinder, sphere, cone, torus, offset face 등)를 가진다.
- (2) 두 면들은 평행하며 법선 방향이 반대이다

#### 3.3.2 차원 감속 과정 (단순화 과정)

차원 감소 과정은 다음 순서에 의해 얇은 두께를 가진 모델을 2D나 1D로 이상화한다.

- (1) 검색된 면들의 쌍들의 중간에 untrimmed-sheet 들을 생성한다. Untrimmed-sheet의 크기는 모델

- 의 bounding-box의 사이즈와 동일하다.
  - (2) 각 untrimmed-sheet들을 모델 및 면들의 쌍들을 고려하여 trimmed-sheet로 생성한다.
  - (3) Trimmed-sheet에 복원 과정에 필요한 두께 정보를 삽입한다.
  - (4) Trimmed-sheet를 결합(sewing)하여 최종 시트(sheet)를 생성한다.
- Fig. 20은 이 과정을 보여준다.

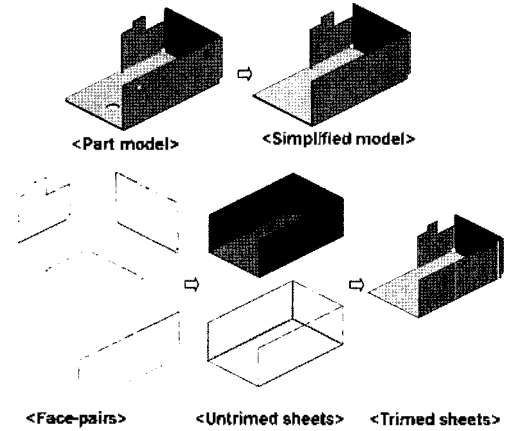


Fig. 20. Dimension reduction process.

면들의 쌍의 중간에 시트를 생성해서는 안 되는 Fig. 21과 같은 특수한 경우가 있다. Parasolid의 API를 이용하여 중간면을 생성하는 경우 Fig. 21(b)와 같이 얇은 수직 벽과 얇은 바닥 판의 중간에 중간면이 동시에 생성된다. 이 때 바닥 판은 수직 벽의 두께의 절반만큼 수축되어 생성된다. 이 때문에 모든 중간면에 두께를 동시에 부여하는 복원 과정을 거칠 경우 Fig. 21(c)와 같이 옆면이 존재하지 않는 잘못된 모델을 생성한다. 이를 해결하기 위해서는 시트를 생성하는 과정에서 수직 벽의 경우 중간면 대신 수직 벽의 바깥쪽 면으로 시트를 생성하고 이 정보를 시트에 삽입한다. 이런 과정을 거친다면 원래 모델로 적절히 복원할 수 있다.

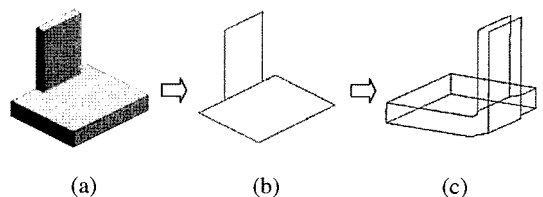


Fig. 21. Special case in thinning operation.



### 3.3.3 복원 과정

복원 과정은 차원 감소된 모델에서 각 시트의 종류와 두께 정보를 이용하여 원본 모델을 만드는 과정이다. 이는 다음과 같은 과정을 통해 구현된다.

- (1) 차원 감소된 모델에서 각 시트가 면들의 쌍의 중간에서 생성되었는지 아니면 면들의 쌍 중에 한쪽 면으로부터 생성되었는지를 확인한다.
- (2) 만약 시트가 면들의 쌍의 중간에서 생성되었다면 시트의 양 방향으로 두께를 부여한다.
- (3) 만약 시트가 면들의 쌍 중에 한쪽 면으로부터 생성되었다면 반대면의 방향으로 두께를 부여한다.
- (4) (2)와 (3)의 결과를 결합(union)한다.

## 4. 다중해상도 알고리즘의 통합

### 4.1 파트에 적용

파트 모델에 다중해상도를 구현하기 위해서 본 연구에서 제시된 다중해상도 알고리즘들이 종합적으로 적용된다. 각 알고리즘에 의해서 검색되는 특징 형상들은 multi-resolution feature (MR-feature)로 정의하며 적용된 다중해상도 알고리즘에 따라 WR-Fillet, WR-Chamfer, WR-Hole, WR-Concave, SO-Boss, SO-Rib, TH-Base 등으로 표시된다. 'WR'은 wrap-around, 'SO'는 smooth-out, 'TH'는 thinning 알고리즘이 적용되어 검색된 MR-feature를 의미한다. 검색된 MR-feature들은 시스템에서 관리되며 사용자가 원하는 해상도를 지정하면 자동으로 적합한 단순화 또는 복원 과정을 수행하여 다중해상도 모델을 생성한다.

MR-Feature는 파트 모델을 구성하는 면들의 집합으로 이루어져 있다. MR-Feature의 면적 즉, MR-feature를 구성하는 면들의 면적의 합은 전체 형상에서 MR-feature가 차지하는 복잡도를 나타내는 기준으로써 생각할 수 있다. 따라서 'WR-Fillet, WR-Chamfer,

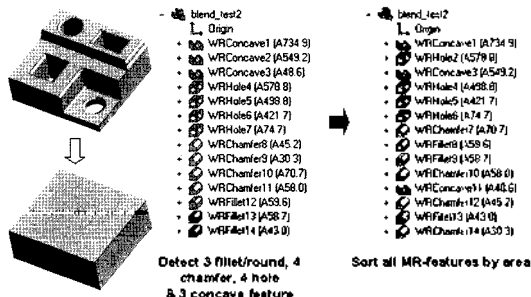


Fig. 22. Tree of MR-features reordered by area.

WR-Hole, WR-Concave, SO-Boss, SO-Rib TH-Base' 순으로 검색된 MR-feature를 면적에 따라 재배열함으로써 각 단계별로 순차적인 다중해상도 모델을 생성할 수 있다. Fig. 22은 검색된 MR-feature를 면적에 따라서 재배열한 예제이다.

검색 순서를 조절하거나 검색된 MR-feature에 기본적으로 지정된 것과는 다른 다중해상도 알고리즘을 적용함으로써 Fig. 23와 같이 다양한 형태의 모델을 생성할 수 있다.

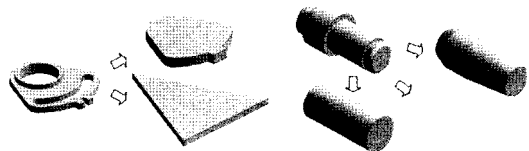


Fig. 23. Various models generated by different options.

### 4.2 조립체에 적용

조립체의 다중해상도를 구현하기 위해 각 파트에서 검색된 모든 MR-feature들을 면적에 따라 재정렬하여 최상위 조립체에서 관리하게 된다. 이는 Fig. 24과 같은 트리 구조로 표현되며 해상도 변경 시 각 파트에서 삭제되거나 복원된 MR-feature를 확인할 수 있다. 만약 설계자가 원하는 해상도를 설정하면 시스템은 면적에 따라 정렬된 MR-feature를 순차적으로 제거하여 Fig. 24와 같이 조립체의 다중해상도 모델을 생성한다.

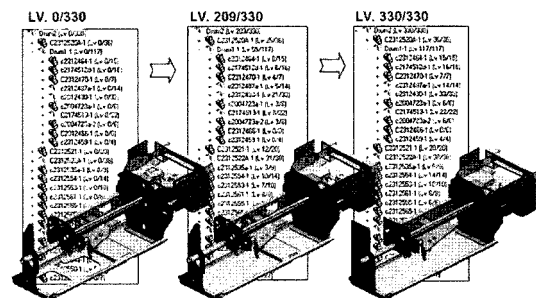


Fig. 24. Assembly-level multi-resolution.

## 5. 시스템 구현

### 5.1 Test-bed Program

제한된 다중해상도 모델 생성을 위한 알고리즘들의 성능을 검증하기 위한 프로그램으로 다중해상도 모델러(multi-resolution modeler, MRModeler)를 구현하였다. Fig. 25는 이 시스템의 간략한 구성도를 나타낸

다. 이 시스템은 SolidWorks와 Unigraphics 등 다양한 상용 CAD 시스템에서 사용되는 3차원 형상 모델링 커널(modeling kernel)인 Parasolid를 사용하여 다중해상도 알고리즘을 구현하였다.

MRModeler는 Parasolid에서 제공하는 B-rep 데이터 파일을 읽어 들일 수 있을 뿐 아니라 SolidWorks API를 이용해 구현한 출력 모듈을 통해 SolidWorks의 특징 형상 정보를 읽어 들여 이를 MRModeler에서 다시 생성할 수도 있다. 이를 통해 추후 특징 형상 기반 모델에 대해서도 제안된 알고리즘을 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

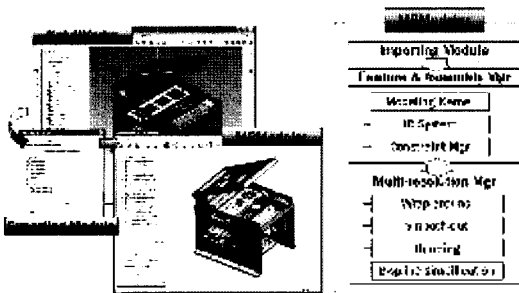


Fig. 25. System structure of test-bed program.

5.2 예제

5.2.1 파트 모델 예제

다음 표들은 파트 모델에 대해서 검색된 MR-Feature를 단계적으로 제거하여 단순화된 모델을 생성하였을 때 이에 따라 변화되는 수치를 표시하고 있다. 면들의 수는 모델의 위상 정보의 변화량을 나타내며, facet 수는 화면에 모델이 렌더링될 때 필요한 메모리와 연산량 등과 관련된 수치이다. 또한 파일 사이즈는 모델의 B-rep 데이터의 크기를 나타낸다고 할 수 있다.

Table 1의 모델은 wrap-around와 smooth-out을 적용하여 최종적으로 solid-body를 생성한 예제이다. 검색된 MR-feature는 총 10개로 면의 수, facets의 수,

Table 1. Example 1 of part model

No. of MR-feature		10		
Level	0	7	9	10
Model shape				
Face	61	45	33	8
Facets	676	160	116	20
File size	47KB	40KB	28KB	6KB

파일 사이즈가 모두 크게 감소하였음을 알 수 있다.

Table 2의 마지막 형상은 thinning 알고리즘의 차원 감소 과정을 적용시켜 실린더 형상의 3차원 모델을 원반 형태의 2차원 sheet-body로 변환한 것이다.

Table 2. Example 2 of part model

No. of MR-feature		8		
Level	0	6	7	8(TH)
Model shape				
Face	217	43	3	1
Facets	2554	1496	306	53
File size	119 KB	79 KB	2 KB	2 KB

Table 3은 thinning 알고리즘을 적용한 결과가 두 개 있다. Table 3의 세 번째 형상은 MR-feature를 최대한 제거한 뒤에 thinning 알고리즘의 차원 감소 과정을 적용시켜 sheet-body를 만든 결과이고, 마지막 형상은 원본 모델에서 바로 thinning의 차원 감소 과정을 적용시킨 결과이다. 얇은 두께를 가지는 모델의 경우 thinning 알고리즘을 곧바로 적용한다면 데이터 크기를 크게 줄이면서도 원본 모델과 매우 유사한 형상을 얻을 수 있다.

Table 3. Example 3 of part model

No. of MR-feature		7		
Level	0	6	7(TH)	Direct TH
Model shape				
Face	24	14	4	6
Facets	686	44	12	208
File size	16KB	14KB	5KB	9KB

5.2.2 조립체 모델 예제

조립체 모델의 경우는 해당 조립체를 구성하는 하위 조립체 및 파트들로 구성되어 있다. 여기서 검색된 MR-Feature의 개수란 조립체를 구성하는 파트들 각각에서 검색된 MR-feature의 수를 산술적으로 합산한 것이다.

Table 4와 Table 5에서 완전히 상세화된 모델은 원본 모델을 의미하며 최고로 단순화된 모델은 원본 모

델에서 모든 MR-feature를 제거한 모델을 의미한다. 조립체에서는 완전히 상세화된 모델과 최고로 단순화된 모델간의 facet 수, 파일 사이즈, 로딩 시간 등을 비교함으로써 제안된 다중해상도 알고리즘의 성능을 평가할 수 있다.

Table 5에서는 대부분의 컴포넌트가 thinning 알고리즘에 의해서 단순화되어 최고로 단순화된 모델의 facet 수가 완전히 상세화된 모델의 1.6%까지 감소하였다. 로딩 시간은 램(RAM)에 전체 조립체가 로딩되고 화면에 렌더링되는 시간을 의미하는데 복잡한 조립체에서 원활한 작업을 수행하는데 있어 매우 중요한 요소이다. Table 5에서는 로딩 시간이 약 1/3로 감소하였음을 알 수 있다. Table 6에서는 파일 사이즈가 13.4%, 로딩 시간이 18.6%로 조립체 예제 중에서 가장 크게 감소하였다. 이는 검색된 MR-feature의 수가 가장 많아 이를 모두 제거하였을 경우 원본 모델과 비교하여 조립체 예제 중에서 가장 단순화된 모델을 생성할 수 있음을 의미한다.

Table 4. Example 1 of assembly model



No. of component		38
No. of MR-Feature		107
Status	Fully-detailed	Most-simplified
Model shape		
Facets	19140	5565
File size	652 KB	193 KB
Loading time	1999 ms	885 ms

Table 5. Example 2 of assembly model

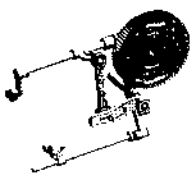
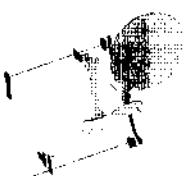
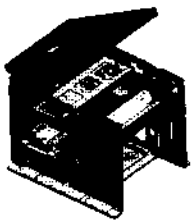

No. of component		19
No. of MR-Feature		86
Status	Fully-detailed	Most-simplified
Model shape		
Facets	14328	234
File size	404 KB	62.9 KB
Loading time	1706 ms	535 ms

Table 6. Example 3 of assembly model

No. of component		140
No. of MR-Feature		1230
Status	Fully-detailed	Most-simplified
Model shape		
Facets	108498	2697
File size	6.29 MB	865 KB
Loading time	13449 ms	2501 ms

### 5.2.3 조립체에서 부분적인 해상도 변경 예제

복잡한 조립체를 원본 모델 그대로 사용하여 작업한다면 긴 로딩 시간과 화면 갱신 시 발생하는 락(lag) 등으로 매우 비효율적일 것이다. 따라서 전체 조립체는 저해상도 모델로 로딩하고 설계자가 원하는 파트들만을 고해상도 모델로 대체하여 작업하는 것이 보다 효율적이다. Fig. 26에서는 본 연구에서 개발된 다중해상도 알고리즘을 이용하여 Table 6의 최고로 단순화된 전체 조립체에서 사용자가 선택한 하위 조립체만을 복원하는 예제를 보여준다.

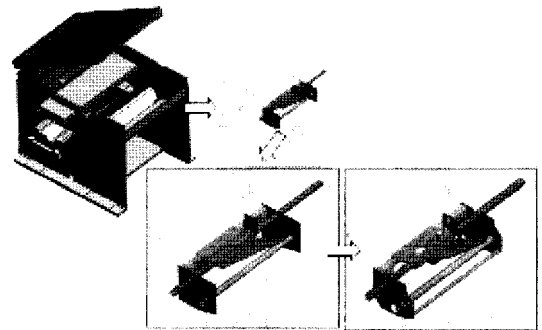


Fig. 26. Example of partially adjusting resolution on assembly model.

## 6. 결 론

본 연구에서 제안한 다중해상도 생성 알고리즘들은 기존의 메쉬 기반의 단순화 알고리즘과 비교하여 다음과 같은 장점을 지니고 있다.

첫째, 제안된 알고리즘은 B-rep 모델에 적용 가능하다. 메쉬 기반의 단순화 방법 역시 디스플레이만을 위해서라면 매우 효과적인 다중해상도를 구현할 수 있다. 그러나 필요할 때면 언제든지 정확한 형상을 복원하기 위해서는 다중해상도 알고리즘이 B-rep 모델에 적용될 수 있어야 하며 그 결과 역시 B-rep으로 표현될 수 있어야 한다. 따라서 CAD 시스템에는 제안된 알고리즘과 같은 B-rep 기반의 다중해상도 알고리즘이 필요하다.

둘째, 제안된 방법을 통해 전체 조립체를 로딩하거나 선택된 일부 파트들을 고해상도로 변경 시 빠르게 작업을 수행할 수 있다. 이를 통해 협업 설계 과정에서 자동차, 비행기 등의 매우 복잡하고 거대한 조립체를 실시간으로 다룰 수 있다.

셋째, 제안된 다중해상도 알고리즘들은 네트워크를 통한 파트와 조립체 데이터의 효과적인 전송, 해석 모델의 자동 생성, 파트간의 유사성 비교 등에 적용될 수 있다. 전체 조립체 데이터를 네트워크를 통해 보낼 때, 먼저 최적으로 단순화된 모델을 보내고 순차적으로 제거된 MR-feature 정보를 보낸다. 이를 통해 받는 쪽에서는 받는 과정 중간에도 전체 조립체의 형상을 미리 파악할 수 있다. 또한 받는 쪽의 권한을 조절함으로써 제공하는 쪽에서 공개하기를 원하는 해상도의 모델만을 제공할 수 있다. 유한 요소 해석을 위한 모델을 생성할 때 일반적으로 메쉬의 수를 적절한 크기로 제한하기 위해 중요하지 않은 형상은 제거된다. 이러한 작업에 제안된 다중해상도 알고리즘들을 적용할 수 있으며 특히 thinning 알고리즘이 유용하다. 두 모델간의 효율적인 유사성 비교를 위해서도 다중해상도 알고리즘들에 의해서 생성되는 모델 데이터를 이용할 수 있다. 먼저 최적으로 단순화된 모델로 파트 사이의 유사성을 비교한 후 제거된 MR-feature 정보를 차례대로 비교한다면 매우 효율적으로 파트들을 비교, 분류할 수 있다.

마지막으로, SolidWorks, SolidEdge, IDEAS, Unigraphics 등에서 사용되는 B-rep 기반의 3D 모델링 커널인 Parasolid를 사용하여 제안된 알고리즘을 구현하였기 때문에 손쉽게 상용 CAD 시스템에 적용이 가능하다는 장점이 있다.

다중해상도 알고리즘의 성능은 얼마나 MR-feature들을 정확하고 빠르게 검색하느냐에 따라 좌우된다. 대부분의 CAD 시스템들이 특징형상 트리(feature tree)를 가지고 있으므로 만약 이 특징형상들을 MR-feature로 변경할 수 있다면 기존의 MR-feature를 검색하는 과정보다 정확하고 빠른 작업이 가능할 것으

로 기대된다.

현재 조립체의 다중해상도 모델 생성 과정에서는 파트간의 간섭을 고려하지 않고 MR-feature를 제거하고 있다. 그러나 조립과 관련된 형상에만 관심이 있을 경우 파트간의 결합 정보와 관련된 MR-feature를 유지하면서 다른 MR-feature를 제거하는 기능이 필요하다. 이 기능은 추후 추가될 예정이다.

## 감사의 글

본 과제(결과물)는 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금으로 수행한 최우수실험실지원사업의 연구결과이며, 또한 서울대학교 정밀기계설계공동연구소의 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Bischoff, S. and Kobbelt, L., "Teaching Meshes, Subdivision and Multiresolution Techniques", *Computer-Aided Design*, Vol. 36, No. 14, pp. 1483-1500, 2004.
2. Ribelles, J., Lopez, A., Rmolar, I. and Chover, M., "A Multi-resolution Modeling of Arbitrary Polygonal Surfaces: A Characterization", *Computer and Graphics*, Vol. 26, pp. 449-462, 2002.
3. Reinhard, K., "Multiresolution Representations for Surfaces Meshes based on the Vertex Decimation Method", *Computer and Graphics*, Vol. 22, pp. 13-26, 1998.
4. Paster, I., Rodriguez, A., Espadero, J. M. and Rincon, L., "3D Wavelet-based Multiresolution Object Representation", *Computer Aided Design*, Vol. 34, pp. 2497-2513, 2001.
5. Bertram, M., "Biorthogonal Wavelets for Subdivision Volumes", *Solid modeling and Applications*, pp. 71-82, 2002.
6. 김성찬, 이규열, 김태완, "다중해상도해석을 위한 Boundary 를 가지는 비정규 메쉬의 Normal 메쉬화 방법", 한국 CAD/CAM학회 논문집, 제6권, 제3호, pp. 389-396, 2001.
7. 최동혁, 김태완, 이건우, "특징형상 변환을 이용한 B-rep모델의 다중해상도 구현", 한국 CAD/CAM학회 논문집, 제7권, 제2호, pp. 121-130, 2002.
8. Koo, S. and Lee, K., "Wrap-around Operation to Make Multi-resolution Model of Part and Assembly", *Computers and Graphics*, Vol. 26, No. 5, pp. 687-700, 2002.
9. Belaziza, M., Bourasa, A. and Brunb, J. M., "Morphological Analysis for Product Design", *Computer-Aided Design*, Vol. 32, pp. 377-388, 2000.
10. Lee, J. Y., Lee, 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, pp. 217-229, 2004.
11. Lee, S. H., "Feature-Based Multi-resolution Modeling of Solids", *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 24, No. 4, pp. 1417-1441, 2005.
  12. Lee, S. H., "A CAD-CAE Integration Approach Using Feature-based Multi-resolution and Multi-abstraction Modelling Techniques", *Computer-Aided Design*, Vol. 37, No. 3, pp. 941-955, 2005.
  13. Finkelstein, A. and Salesin, D. H., "Multiresolution curves", *Proceedings of SIGGRAPH*, pp. 261-268, 1994.
  14. Zhao, G., Xu, S., Li, W. and Teo, O. E., "Fast Variational Design of Multiresolution Curves and Surfaces with B-spline Wavelets", *Computer-Aided Design*, Vol. 37, No. 1, pp. 73-82, 2005.
  15. Kyprianou, L. K. Shape Classification in Computer Aided Design. PhD Dissertation, University of Cambridge, UK, 1980.
  16. Joshi, S. and Chang, T. C., "Graph-based Heuristics for Recognition of Machined Features from a 3D Solid Model", *Computer-Aided Design*, Vol. 20, No. 2, pp. 58-66, 1988.
  17. Gao, S. and Shah, J. J., "Automatic Recognition of Interacting Machining Features based on Minimal Condition Subgraph", *Computer-Aided Design*, Vol. 30, No. 9, pp. 727-739, 1988.
  18. Han, J. and Requicha, A. A. G., "Feature Recognition from CAD Models", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 18, No. 2, pp. 80-94, 1988.
  19. Prabhakar, S. and Henderson, M. R., "Automatic Form-feature Recognition Using Neural-network-based Techniques on Boundary Representations of Solid Models", *Computer-Aided Design*, Vol. 24, No. 7, pp. 381-393, 1992.
  20. Woo, T. C., "Feature Extraction by Volumic Decomposition", *Proc. of CAD/CAM Technology in Mechanical Engineering*, pp. 76-94, 1982.
  21. Chamberlain, M. A., Joneja, A. and Chang, T. C., "Protrusion-features Handling in Design and Manufacturing Planning", *Computer-Aided Design*, Vol. 25, No. 1, pp. 19-28, 1993.
  22. Sakurai, H., "Volume Decomposition and Feature Recognition, Part I: Polyhedral Objects", *Computer-Aided Design*, Vol. 27, No. 11, pp. 833-843, 1995.
  23. Sakurai, H. and Dave, P., "Volume Decomposition and Feature Recognition, Part II: Curved Objects", *Computer-Aided Design*, Vol. 28, No. 6-7, pp. 519-537, 1996.
  24. Zhu, H. and Meng, C. H., "B-rep Model Simplification by Automatic Fillet/round Suppressing for Efficient Automatic Feature Recognition", *Computer-Aided Design*, Vol. 34, pp. 109-123, 2002.
  25. Venkataraman, S. and Sohoni, M., "Recognition of Feature Volumes and Feature Suppression", *Solid modeling and Applications*, pp. 60-71, 2002.
  26. Blum, H., "A Transformation for Extracting New Descriptors of Shape", *Models for the Perception of Speech and Visual Forms*, pp. 362-380, 1967.
  27. Blum, H., "Biological Shape and Visual Science (Part 1)", *J. Theor. Biol.*, Vol. 38, pp. 205-287, 1973.
  28. Chong, C. S., Kumar, A. S. and Lee, K. H., "Automatic Solid Decomposition and Reduction for Non-manifold Geometric Model Generation", *Computer-Aided Design*, Vol. 36, No. 13, pp. 1357-1369, 2004.



**김 성 찬**

1999년 서울대학교 기계항공공학부 학사  
2006년 서울대학교 기계항공공학부 석사  
2006년~현재 삼성전자 기술총괄 연구원  
관심분야: CAD, 3D Geometric Modeling, Plastic Injection Mold Design, Multi-resolution Modeling



**이 건 우**

1978년 서울대학교 기계공학과 학사  
1981년 M.I.T. 기계공학과 석사  
1984년 M.I.T. 기계공학과 박사  
1984년~1986년 Univ. of Illinois at Urbana-Champaign 조교수  
1992년~1993년 M.I.T. 기계공학과 객원 부교수

2002년~2003년 Stanford 기계공학과 객원 부교수  
1986년~현재 서울대학교 공과대학 기계항공학부 교수  
관심분야: CAD, Assembly Modeling, Multi-resolution Modeling, Rapid Prototyping, Medical Device, Human Modeling & Analysis



**홍 태 식**

2004년 서울대학교 기계항공공학부 학사  
2006년 서울대학교 기계항공공학부 석사  
관심분야: CAD, 3D Geometric Modeling, Multi-resolution Modeling, Human Modeling & Analysis



**김 민 철**

2003년 한국항공대학교 항공기계공학과 학사  
2005년 서울대학교 기계항공공학부 석사  
2005년~현재 현대자동차 연구개발총괄본부 연구원  
관심분야: CAD/CAE Integration, Dimension Reduction, Volume Decomposition



**정 문 기**

2004년 서울대학교 기계항공공학부 학사  
2006년 서울대학교 기계항공공학부 석사  
2006년~현재 서울대학교 기계항공공학부 박사과정  
관심분야: CAD, 3D Geometric Modeling, Multi-resolution Modeling, Digital Human Modeling, Computer Graphics



**송 영 재**

1997년 서울대학교 기계항공공학부 학사  
2000년 서울대학교 기계항공공학부 석사  
2005년 서울대학교 기계항공공학부 박사  
2005년~현재 삼성전자 기술총괄 연구원  
관심분야: CAD, Multi-resolution Modeling, Human Modeling & Analysis