

특징형상기반 다중해상도 모델링 기법에 관한 연구

이 상 현*

A Survey of Feature-based Multiresolution Modeling Techniques

Sang Hun Lee*

ABSTRACT

For recent years, there has been significant research achievement on the feature-based multiresolution modeling technique along with widely application of three-dimensional feature-based CAD system in the areas of design, analysis, and manufacturing. The research has focused on several topics: topological frameworks for representing multiresolution solid model, criteria for the LOD, generation of valid models after rearrangement of features, and applications. This paper surveys the relevant research on these topics and suggests the future work for dissemination of this technology.

Key words : Multiresolution, Level Of Detail, Feature, Solid, Non-Manifold

1. 서 론

최근 제조업체에서는 특징형상기반 3차원 CAD 시스템을 이용한 제품 설계와 생성된 3차원 모델을 기반으로 한 엔지니어링 해석 및 생산이 널리 확산되어 가고 있다. 그러나 특징형상을 포함한 제품 모델이 이후의 응용 분야에 적용될 때에는 보다 간략화된 형태의 모델을 필요로 하는 경우가 많이 있으며, 그 상세 수준은 경우에 따라 다르다. 그 대표적인 예가 해석 모델로서 가장 대표적인 해석 방법인 유한 요소법에서 입력값으로 요구되는 제품의 기하학적인 형상은 간략화된 솔리드 모델 또는 나아가 솔리드를 박판이나 와이어프레임 형태로 축약시킨 모델을 필요로 하며, 그 간략화의 정도는 상황에 따라 다르다^[1,2].

이러한 요구를 만족시키기 위하여 기존의 다면체 모델에 대한 다중해상도 모델링 기법에 대응하여 특징형상 기반 다중해상도 모델링 기법이라는 새로운 기술이 개발되었다. 여기서 다중해상도 모델링 기법이란 하나의 형상 모델에 대하여 다양한 상세 수준(level of detail (LOD))에 대응되는 간략화된 형상 모델을 제공하는 기법을 뜻하며, 여기에는 대상 물체에

따라 크게 두 가지, 즉, 다면체기반(polygon-based)^[6,23]과 특징형상기반(feature-based)^[9-11,13,14,17-19,26,28]의 다중해상도 모델링 방법으로 분류된다. 먼저 다면체 기반 다중해상도 모델링 방법에서는 Fig. 1(a)에 나타난 것과 같이 그 대상이 다면체 모델이고 낮은 해상도의 모델을 생성하기 위해 소거하는 대상이 꼭지점, 모서리, 면과 같은 위상학적 요소들로서 이 방식의 주된 목적은 컴퓨터 그래픽스에서 빠른 디스플레이를 성취하고자 하는 것이다. 이와 달리 특징형상 기반 다중해상도 모델링은 Fig. 1(b)에 나타난 것과 같이 그 대상이 특징형상기반 솔리드 모델이고, 소거 대상이 위상 요소보다 훨씬 상위 수준의 모델링 요소인 특징형상이다. 이 방식의 주된 목적은 CAD 모델을 간략화시켜 효율적으로 활용하기 위한 것으로 주 응용 분야는 FEM과 같은 공학 해석, 네트워크기반 협업 설계, 가상 프로토타이핑 및 가상 생산이다. 최근 CAD 분야에서는 제품 설계 및 생산에 그 응용성이 탁월한 이 특징형상기반 방법이 활발히 연구되고 있다. 한편 다중해상도 모델링 기법과 관련된 용어로 다중축약도 모델링이 있다. 통상적으로 말하는 다중해상도 모델링 기법은 물체의 세부 형상을 제거하여 간략화된 형상을 얻는데 반하여 다중축약도 모델링 방법은 물체의 차원을 낮추어 간략화된 형상을 얻는 방법을 취한다^[13]. 이 방법은 광의의 개념으로는 다중해상도 모델링 기법에 속한다고 할 수 있으며 통상 해석모델을 추

*종신회원, 국민대학교 기계자동차공학부
- 논문부고일: 2008. 06. 08
- 논문수정일: 2009. 05. 11
- 심사완료일: 2009. 05. 19

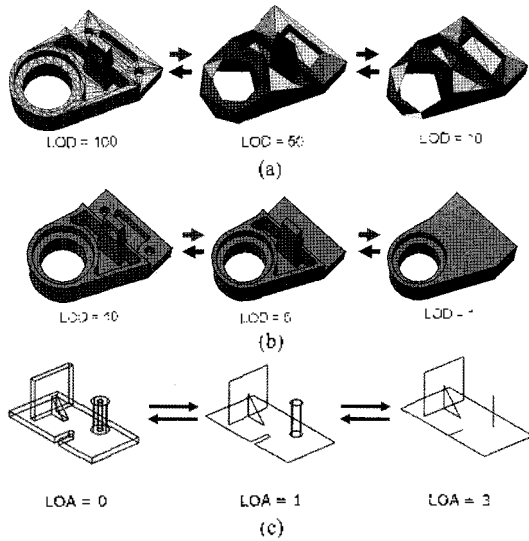


Fig. 1. Terminology related with multi-resolution modeling techniques: (a) polygon-based multiresolution modeling, (b) feature-based multiresolution modeling, (c) feature-based multi-abstraction modeling^[13,14].

출하는데 사용된다. 이 방법에서는 Fig. 1(c)에 나타난 것과 같이 소위 축약 수준(level of abstraction; LOA)을 변경시키면서 그에 상응하는 축약된 이상화된 모델을 사용자에게 제공한다.

본 논문에서는 제품의 설계 및 생산을 위한 특징형상기반 다중해상도 모델링 기법에 대한 최근 연구 동향에 대하여 소개하고자 한다. 즉, 이 기법이 무엇을 대상으로 하며, 어떤 표현 방법을 채용하고 있으며, 어떻게 여러 상세수준에 해당하는 모델들을 생성시키며, 상세수준의 기준으로 어떤 것들이 사용되고, 이를 어디에 응용할 수 있는지에 대한 포괄적인 내용을 소개하고자 한다. 또한, 이 기술이 보다 완성도를 높이고 제반 응용 분야에 확산되기 위해서는 어떠한 기술이 상차 개발되어야 하는지에 대해서도 언급하겠다.

본 논문의 구성은 다음과 같이 되어 있다. 먼저 제 2장에서는 특징형상기반 다중해상도 모델을 표현하기 위한 자료구조에 대하여, 제3장에서는 대상 특징형상의 종류에 대해서, 제4장에서는 다중해상도 모델 생성을 위한 특징형상 재배열 방법에 대해서, 제5장에서는 다중해상도 모델의 상세수준 판단 기준에 대해서 각각 소개하고 있다. 또한, 제6장에서는 본 기술의 적용 대상이 부품인지 조립체인지에 따라 기존 연구를 조사 정리하였다. 제7장에서는 본 기술의 응용 분야에 대해서 소개하고 있으며, 제8장에서는 본 논문의 결론 및 향후 연구 방향을 정리하였다.

2. 다중해상도 모델의 표현을 위한 자료구조

특징형상기반 다중해상도 모델의 표현을 위해 사용되는 위상학적 자료구조로는 크게 두 가지로 분류될 수 있다. 그 하나는 전통적인 CAD 시스템에 널리 사용되어 온 솔리드 경계 표현 방식(solid boundary representations (B-rep))이며 다른 하나는 비다양체 경계 표현 방식(non-manifold B-rep) 방식이다^[12]. 비다양체 경계 표현 방식은 다시 셀 구조 모델(cellular model)과 와이어프레임, 곡면, 솔리드 등이 섞여있는 혼합 차원 모델(mixed-dimensional model)로 나뉘어진다. 이들에 대해 좀더 자세히 살펴보면 다음과 같다.

2.1 솔리드 경계표현법

최초의 특징형상기반 다중해상도 모델링 방법은 전통적인 솔리드 자료구조를 사용하였다^[20]. 이러한 방법에서는 다중해상도 모델이 특징형상 트리(feature tree)로 표현되며, 특징형상들은 LOD 판단 기준에 따라서 트리 내에서 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. 솔리드 자료 구조를 사용하는 방법은 현존하는 상용 3차원 CAD 시스템들 상에서 바로 구현가능하다는 장점을 가지고 있으나, 현재의 LOD에서 목적하는 LOD에 도달하기 위해서는 그 LOD 차이값 횡수만큼의 불리한 작업을 수행해야 하기 때문에 경계 계산에 지나치게 많은 계산 시간을 소비한다는 문제점을 가지고 있으며, 또한 표현 범위가 솔리드로 한정되는 문제점을 가지고 있다.

김성찬 등^[26]은 최동혁 님^[26]의 방법에 2개의 선택적인 작업을 추가하여 그 능력을 확장시켰다. 첫번째 작업은 특징형상의 스케치를 간략화시키는 것으로서 복잡한 스케치에 의해 만들어진 특징형상의 경우 단순화된 스케치에 의해 보다 단순한 결과 솔리드 물체를 얻을 수 있게 하였다. 두번째 작업은 작은 가법 특징(additive feature)형상을 제거하는 것으로서 원래 부품 모델에 비해 어떤 특징형상의 불륨이 매우 작으면 이를 특징형상 트리에서 무시하도록 함으로써 보다 단순한 모델을 얻도록 하였다. 하지만 가법 특징형상 제거 시 가법 특징형상이 감법 특징형상(subtractive feature)과 간섭을 일으키는 경우에 대한 고려가 필요하다. 여기서 가법 특징형상은 돌출 특징형상(protrusion feature)으로, 감

법 특징형상은 함몰 특징형상(depression feature)으로 불리기도 하나 본 논문에서는 불리안 작업과의 연관성을 고려하여 가법과 감법 특징형상으로 통일하여 기술하였다.

이어 Kim *et al.*¹⁵은 상용 솔리드 모델링 커널인 Parasolid를 바탕으로 wrap-around, smooth-out, thinning operator의 3가지 작업을 개발하여 이들을 적절히 적용함으로써 어떤 원하는 해상도의 모델을 얻을 수 있도록 하였다. 그러나 이 작업자들은 다중해상도 특징형상(MR-feature)을 기존 모델에서 어떻게 탐색하는가에 크게 좌우되기 때문에 성능향상을 위해서는 특징형상 인식보다는 특징형상 매핑 기법을 이용하여 CAD 시스템의 특징형상을 MR-feature로 변환시키는 방법을 고려할 필요가 있다.

2.2 비다양체 경계표현법

2.2.1 셀 구조 모델

솔리드 자료구조의 분체를 해결하기 위하여 셀 구조의 비다양체 모델이 다중해상도 모델을 표현하기 위한 자료구조로 도입되었다. 이 방법에서는 모든 특징형상들이 하나의 셀 구조 모델로 병합된 다음 주어진 LOD에 따라 그에 해당하는 모델에 참여하는 위상요소들을 선택하여 화면에 보여주도록 되어 있다. 모든 특징형상에 대한 경계 징모가 셀 구조 모델 내에 저장되어 있기 때문에 LOD 모델을 생성하기 위해 따로 경계 계산(boundary evaluation)을 할 필요가 없으며, 그 결과 솔리드 자료구조를 사용하는 것보다 훨씬 더 빨리 다중해상도 모델을 제공할 수 있다.

Lee *et al.*¹¹은 이 셀 구조 모델을 바탕으로 한 다중해상도 모델링 방법을 네트워크 기반 협업 설계에 적용하였다. 이 연구 결과는 솔리드 모델이 집진적으로 네트워크를 통해 전달될 수 있으며 엔지니어링 작업을 위해 적절한 LOD에 해당하는 모델을 공유할 수 있음을 보여주었다. 한편, Lee¹¹는 Partial Entity Structure¹⁶를 자료구조로 채용하고 다중해상도 모델링을 위하여 병합 및 선택 알고리즘(merge & select algorithm)^{17,18}을 도입하여 다중해상도 모델을 신속히 추출할 수 있도록 하였다. Fig. 2에 나타난 것과 같이 이 병합체 모델은 모든 기본입체에 대한 정보와 이들 간의 교차에 대한 정보, 그리고 각 위상요소들이 어디에서 유래했는지에 대한 연혁 정보를 모두 가지고 있기 때문에 불리안 작업 결과를 보여주기 위해서는 단지 요소 선택 과정만 필요하다. 이러한 특성은 다중해상도 모델링의 고속화에 매우 적합한 것이다. 이에 덧붙여 고속화를 가속화시키기 위한 방법 개발이 함께

이루어졌는데 그 대표적인 방법은 시스템에서 인접한 LOD 모델과의 차이에 해당하는 경계 징모를 저장시킴으로써 현 LOD에서 주어진 LOD로 옮겨가는데 걸리는 연산 작업을 최소화시키는 방법이다¹¹. 이 방법을 사용하면 사용 기억장소 저장량은 늘어나나 '선택' 과정이 생략되고 단지 위상요소 리스트간의 불리안 작업만 수행되므로 LOD 모델 추출에 걸리는 시간이 더욱 단축되게 된다.

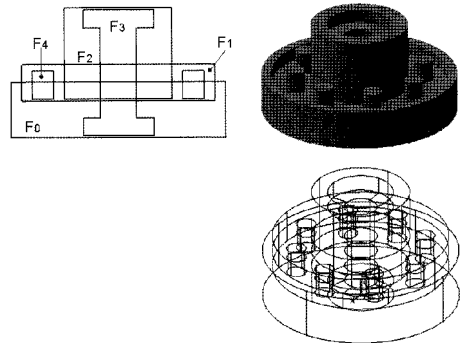


Fig. 2. A merged set of the geometric models of the features¹¹.

2.2.2 혼합 차원 모델

해석을 위한 모델은 간략화되고 이상화된 모델로 여기에는 비단 솔리드 모델뿐만 아니라 중립면이나 와이어프레임 모델을 포함될 수가 있다. 엔지니어의 의도와 해석결과의 필요 정확도에 따라 다양한 축약 수준(LOA)의 모델이 CAE 시스템에 제공될 필요가 있다. 이러한 여러 차원의 모델이 혼합된 다중해상도 해석 모델을 지원하기 위해서는 솔리드에서 비다양체 모델로 그 표현 범위를 넓히는 것이 필요하다.

Lee¹¹는 완벽한 CAD-CAE 통합을 위한 다중해상도 및 다중축약도 모델링을 위해서 혼합 차원의 비다양체 모델을 도입하였다. 여기에서는 각 특징형상 모델링 작업이 수행될 때마다 특징형상에 대하여 설계와 해석을 위한 다른 유형의 기하학적 모델이 동시에 생성된 후, 이 모델들이 Fig. 3에 나타난 것과 같이 부품 마스터 모델에 모두 병합된다. 다양한 LOD에 대한 솔리드 모델이 이 마스터 모델로부터 즉각 추출될 수 있으며, 나아가 다양한 LOA에 대한 축약된 비다양체 모델도 신속히 추출되어 CAE 시스템에 전달될 수 있다. 쉽게 변경이 발생하면 마스터 모델이 변경되며 따라서 결과적으로 설계와 해석용 모델이 각각 동시에 변경되는 효과를 얻을 수 있다.

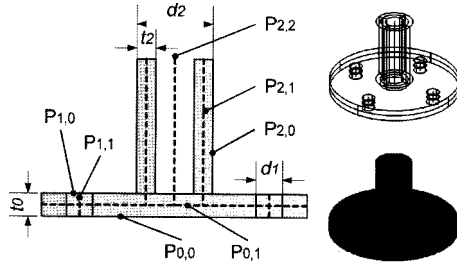


Fig. 3. A merged set of the geometric models of the features^[14].

3. 대상 특징형상

특징형상은 다양한 방식으로 분류가 가능한데 제품의 카테고리, 특징형상의 적용 분야, 그리고 특징형상의 형상에 따라 다를 수 있다. 특징형상의 형상에 바탕을 둔 분류 체계를 살펴보면 특징형상(form feature)은 볼륨 특징형상(volumic feature), 천이 특징형상(transition feature), 그리고 특징형상 패턴(feature pattern)의 세가지 기본 유형으로 분류할 수 있다^[8]. 볼륨 특징형상은 구멍이나 보스와 같이 형상 체적을 증가시키거나 감소시키는 특징형상이며, 천이 특징형상은 라운딩이나 모따기와 같이 곡면을 분리시키거나 혼합하는 특징형상을 뜻하며, 특징형상 패턴은 원형 또는 직선 배열 패턴과 같이 규칙적인 기하학적 형상의 배열을 갖는 유사한 특징형상의 집합을 뜻한다. 대상 특징형상은 설계 시 사용된 특징형상을 다중해상도 모델링에 그대로 사용하는 방식과 다중해상도 모델링을 위해 새로운 특징형상을 정의하고 이에 해당하는 특징형상을 설계된 형상 모델로부터 인식하여 사용하는 방식 두 가지가 있다.

설계 특징형상을 그대로 사용하는 방식은 [11, 14, 17, 28]에서 채택한 방식이며, 특징형상을 인식하여 다중해상도 모델링을 수행하는 방식은 [9, 27]에서 채택하는 방식이다. 설계 특징형상을 기반으로 하는 다중해상도 모델링을 위해서 일반적으로 형상 특징형상을 가법 특징형상(additive feature)와 감법 특징형상(subtractive feature)의 두 가지 유형으로 볼륨 특징형상으로 분류하는 경우가 많다. 이를 위해서 천이 특징형상은 구공 형상에 빠지거나 더해진 체적만큼의 볼륨 특징형상으로 변환시키고, 더해지고 빠지는 것에 따라 가법과 감법 특징형상으로 분류한다. 또한 특징형상 패턴은 패턴의 결과 형상에 해당하는 볼륨 특징형상으로 변환시키고, 패턴이 적용되는 대상 특징형상이 더해지는 것이면 가법 특징형상으로 빠지는 것

이면 감법 특징형상으로 분류한다. 그 다음 이들 특징형상을 주어진 LOD 판단기준에 따라 재배열하여 중간단계의 LOD 모델을 생성시키는 방법을 사용하고 있다. LOD 판단 기준은 감법 특징형상의 볼륨만 고려한 것과 감법/가법에 상관없이 모든 유형의 특징형상에 대한 볼륨을 고려한 것으로 대별할 수 있다. 설계 특징형상을 사용하는 방식은 다중해상도 모델이 설계자의 직관과 일치하는 장점이 있으나 동일한 최종 형상에 대해서도 설계를 어떤 과정을 거쳐서 했는가에 따라 서로 다른 중간 단계의 다중해상도 모델을 만들어 낼 수 있는 단점이 있다.

대상 솔리드 모델로부터 특징형상을 인식하는 기법을 통하여 특징형상을 얻는 방법은 최종 모델로부터 차이가 최소화되는 특징형상을 탐색하여 이를 제거함으로써 한 단계 낮은 LOD 모델을 얻고 다시 이 모델을 기준으로 다음 수준의 LOD 모델을 얻는 순차적인 방법을 보통 취하고 있다. 이때 탐색되는 특징형상은 가법 특징형상을 모두 사용하는 경우^[9]와 감법 특징형상만 사용하는 경우^[27]로 나눌 수 있다. LOD 모델을 생성하기 위해서 Kim *et al.*^[9]은 특징형상인식 방법을 도입하고 인식된 특징형상을 추출할 수 있는 3가지 작업자를 제안하였다. 이들은 wrap-around, smooth-out, thinning operation이다. 이들을 이용하면 부품뿐만 아니라 조립체 모델에 대한 LOD 모델도 얻을 수 있다. 한편, 우윤환^[27]은 Maximal Volume Approach를 이용하여 감법 특징형상을 추출하고 이를 이용하여 다중해상도 모델을 생성하였다. 설계 특징형상을 이용한 방법에 비해 특징형상 인식을 이용하는 방법은 설계 과정과 관계없이 일관된 다중해상도 모델을 만들어 낼 수 있으며, 대상 모델이 특징형상 정보가 없는 순수한 기하학적 모델인 경우에도 적용 가능하며, 설계 이외의 여타 응용분야의 용도에 맞는 다중해상도 모델링 방법을 만들어 낼 수 있다는 장점이 있다. 하지만 Kim *et al.*^[9]의 경우 제안한 방법의 다중해상도 특징형상이 완전한 집합인지, 복잡한 모델에 대해서 추출 작업자가 충분히 강건한 지를 확실히 보여 주고 있지 못하며, 우윤환^[27]의 방법은 Kim *et al.*^[9]보다 일관된 알고리즘을 제시하고 있어 안정적이나 특징형상이 감법만 가능하다는 한계를 가지고 있다.

4. 특징형상의 재배열 시 유효한 모델의 생성

이 장에서는 설계 특징형상을 사용하는 다중해상도

모델링 방식에서 LOD 모델을 만들어내기 위하여 특징형상들을 재배열시켰을 때 발생하는 문제점 및 이를 해결하기 위한 연구들에 대해서 소개하도록 하겠다.

4.1 특징형상 재배열 문제

특징형상 기반 모델링 과정은 일련의 불리언 작업으로 표현할 수 있다. 그런데 다중해상도 모델링을 위해서는 특징형상들이 상세수준 판단조건에 따라 재배열될 필요가 있다. 일반적으로 중요도가 큰 특징형상일수록 낮은 LOD에서 나타나고, 중요도가 적은 특징형상은 높은 LOD에서 나타나게 된다. 그러나 불리언 합집합과 차집합 연산 사이에는 교환법칙이 성립하지 않기 때문에 만일 특징형상들이 LOD 판단 기준에 따라 재배열되면 그 최종 결과 형상은 원래의 부품 형상과 달라지게 된다. 예를 들어, Fig. 4(a)의 특징형상들이 $F_0 \rightarrow F_2 \rightarrow F_1 \rightarrow F_4 \rightarrow F_3$ 의 순서로 재배열되면 Fig. 4(b)와 같이 원래와 다른 최종 형상 및 불합리한 중간단계의 LOD 모델들이 발생할 수 있다. 따라서,

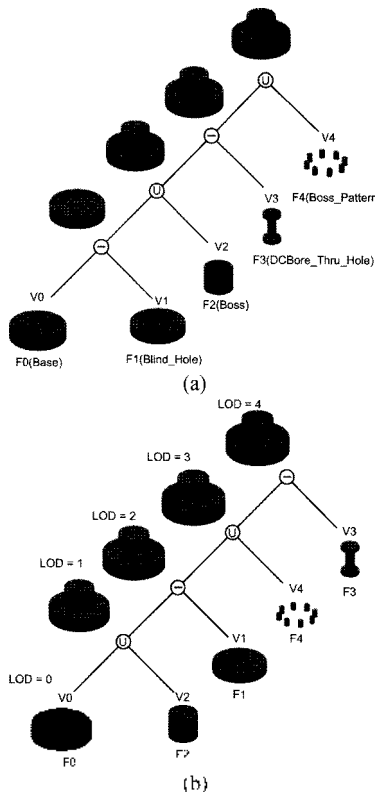


Fig. 4. Feature rearrangement problems: (a) an example of feature-based solid modeling, (b) a rearranged feature tree and its results^[4].

특징형상의 임의의 재배열에 대해서 최종형상이 원래의 형상과 동일하고, 중간단계의 LOD 모델이 합리적인 형상을 가질 수 있는 방법을 찾는 것이 반드시 필요하다. 또한, 다양한 CAD 시스템에서 구현되기 위해서는 어떤 특정한 자료구조에 의존하지 않는 알고리즘을 개발하는 것이 필요하다. 이러한 문제를 통상 특징형상 재배열 문제(feature rearrangement problem) 이라고 부른다^[4].

4.2 델타 볼륨 방법

최동혁 등^[2]과 Lee et al.^[11]은 특징형상 재배열 문제를 해결하기 위한 알고리즘을 각각 제안하였다. 여기에서는 가법 특징형상들이 감법 특징형상들보다 더 높은 우선순위를 갖고 먼저 등장하며 그 다음에 감법 특징형상들이 내림차순의 부피순으로 배열된다. LOD - 0인 가장 낮은 해상도의 LOD 모델은 가법 특징형상의 합집합으로 구해지며, 그 이상의 높은 해상도의 모델은 감법 특징형상들을 내림차순으로 직용함으로써 얻어진다. 이를 구현하기 위해서는 가법 특징형상과 겹침이 발생하는 감법 특징형상의 분류들이 재정의될 필요가 있다. 이 재정의된 분류를 델타 볼륨(delta volume)이라고 부른다. 어떤 LOD에 해당하는 모델은 가장 낮은 해상도의 LOD 모델부터 이 델타 볼륨들을 뺄으로써 얻을 수 있다. 그러나 이들에 의해 제안된 알고리즘들은 자신들이 제안한 LOD 판단 기준 및 특징형상 재배열 방식 하에서만 유효하다는 한계를 지니고 있다. 만일 가법과 감법 특징형상들이 뒤섞여 임의로 재배열될 경우에는 유효한 LOD 모델들을 제공해 줄 수 없으며 최종 부품 형상도 원래의 것과 달라지는 문제점이 있다. 따라서 앞에서 언급한 특징형상 재배열 문제에 대한 일반적인 해답을 계속 찾기 위한 노력이 필요하다.

4.3 특징형상 유효볼륨 방법

특징형상 재배열 문제를 해결하기 위하여, Lee^[11]은 특징형상의 유효볼륨이라는 개념을 제안하였다. 불리언 작업을 살펴보면 그 직용순서를 변경할 경우 각 불리언 작업에 영향을 받는 영역이 초기와 달라졌다는 것을 발견할 수 있다. 이러한 현상 때문에 가법과 감법의 불리언 작업 순서를 바꾸었을 때 서로 다른 결과가 나오게 된다. 따라서 특징형상 재배열 후에도 원래와 동일한 부품 형상을 얻기 위해서는 특징형상의 볼륨을 원래의 것과 다르게 직용할 필요가 있다. 즉, 특징형상 볼륨의 일부를 제외시키도록 해야 한다. 이렇게 수정된 특징형상의 볼륨을 특징형상의 유효볼륨

(effective volume of a feature)이라고 부른다. 이에 대한 수학적인 정의를 좀더 자세히 살펴보면 다음과 같다.

만일 V_j 가 특정형상 F_j 의 솔리드 기본입체의 볼륨이라고 하고, \otimes_j 가 불리안 작업 \cup 또는 $-$ 라고 하며, M_n 이 $n-1$ 개의 솔리드 모델들에 대해 n 개의 불리안 작업을 적용한 결과 모델이라고 한다면,

$$M_n = \prod_{i=0}^n \otimes_i V_i$$

여기서

$$\otimes_0 V_0 = \phi \otimes_0 V_0 = \begin{cases} V_0 & \text{if } \otimes_0 = \cup \\ \phi & \text{if } \otimes_0 = - \end{cases} \quad (1)$$

만일 j 번째 불리안 작업 $\otimes_j V_j$ 이 m 번째 위치로 이동한다면, M_n 은 다음과 같이 표현된다.

$$M_n = \left(\prod_{i=0, i \neq j}^m \otimes_i V_i \right) \left(\otimes_j \left(V_j - \sum_{l=1}^{m-j} \varphi(\otimes_p, \otimes_{j+l}) V_{j+l} \right) \right) \left(\prod_{i=m+1}^n \otimes_i V_i \right)$$

여기서

$$\varphi(a, b) = \begin{cases} 0 & \text{if } a = b \\ 1 & \text{if } a \neq b \end{cases} \quad (2)$$

위 식에서 $V_j - \sum_{l=1}^{m-j} \varphi(\otimes_p, \otimes_{j+l}) V_{j+l}$ 이 F_j 의 유효볼

륨이라고 할 수 있다.

이 방법은 기법과 감법이 혼합된 특정형상들을 임의로 재배열할 경우에도 원래와 동일한 결과 형상 모델을 보장해준다. 이러한 특성은 다양한 LOD 판단기준을 수용할 수 있어 특정형상기반 다중해상도 모델링 기법이 다양한 응용분야에 적용될 수 있도록 해준다. 또한, 특정형상 유효볼륨은 모델의 자료구조와는 무관하기 때문에, 알고리즘이 기존의 경계표현 방식의 솔리드 모델이나 비다양체 표현방식의 모델 공히 적용될 수 있는 장점을 가지고 있다.

4.4 연혁기반 선택적 불리안 작업

특징형상의 유효볼륨 방식은 특정형상들을 임의로 재배열시키더라도 초기 형상과 동일한 최종 부품 형상과 합리적인 중간 단계의 LOD 모델들을 제공해 줄 수 있는 토대를 제공하였다. 그러나 이 방식에서는 특징형상을 옮기는 순서에 따라 같은 LOD에 대해서도

다른 형상의 LOD 모델이 나올 수 있으며 경우에 따라서는 불합리한 형상의 LOD 모델이 생성될 수 있다는 문제점이 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 Lee et al.^[17]은 연혁기반 불리안 작업(history-based selective Boolean operations)을 제안하였다. 그 정의를 잠시 살펴보면 다음과 같다. 먼저, 특정형상을 F 로 나타내고, F 는 초기 모델링시 j 번째 특징형상으로서 현재의 위치는 임의의 위치인 경우, F_j 는 현재 배열상태에서 j 번째 특징형상으로서 원래의 위치는 임의의 위치인 경우, 그리고 F_j^i 는 원래는 초기 모델링시 j 번째인데 현재 배열상태에서 j 번째에 위치한 특징형상이라고 하자. 그리고 특징형상 F 의 유효영역을 Z 라고 하자. \otimes 은 특징형상 F 의 불리안 연산자로 합집합(+) 또는 차집합(-)을 나타내고, P 는 특징형상 F 의 기본입체(primitive)를 나타낸다고 하자. 원래 초기 모델링시 j 번째 적용된 불리안 작업이나 재배열 이후 현재는 j 번째 위치로 옮겨간 연혁기반 선택적 불리안 작업을 $\hat{\otimes}_j^i P^i$ 로 표시하도록 하면 이는 아래 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

HBS-Boolean Operation:

$$\hat{\otimes}_j^i P^i = \otimes_j^i Z_j^i = \otimes_j Z_j^i \quad (3)$$

여기서 $Z_j^i = P_j^i - \sum_{l=0}^{j-1} \varphi(j, l) \gamma(i, k) P_l^k$

이며, $\varphi(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{if } \otimes_i \neq \otimes_j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \gamma(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{if } i < j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$,

이고 k 는 특징형상 모델링시의 초기 순서에서의 위치를 나타낸다.

일반적인 불리안 작업에서는 합집합과 차집합 작업 사이에 교환 법칙이 성립하지 않기 때문에 특징형상 적용 순서를 임의로 바꾸게 되면 그 최종 결과가 달라지며 그 때문에 특징형상 재배열 문제가 야기되었다. 그러나 연혁기반 선택적 불리안 작업은 불리안 작업의 순서가 바뀌더라도 각 불리안 작업이 적용되는 순간 그 영향이 미치는 영역이 어디인지를 고려함으로써 차집합과 합집합 작업들 사이에도 교환법칙이 성립되도록 하였다. 따라서 연혁기반 불리안 작업을 사용하면 원래 모델링된 형상과 동일한 최종 형상을 얻을 수 있으며, 특징형상의 재배열 시에도 특징형상을 어떤 순서로 옮기는지에 상관없이 항상 합리적인 중간단계의 LOD 모델을 얻을 수 있다. 실제로 어떤 LOD 모델에 대한 연혁기반 선택적 불리안 작업을 이용한 정의와 그 결과는 작은 특징형상부터 차례로 제

배치하는 특징형상 유효분류 방식의 재배치 알고리즘의 수행 결과와 언제나 같으며, 또한 LOD 모델을 정의하기 위해 사용된 일련의 불리안 작업들을 원래의 불리안 작업 순서대로 배열시켜 적용했을 때 얻어지는 결과와 같다는 것을 발견할 수 있다. 한편, 연혁기반 불리안 작업은 수학적으로 정의되는 것이기 때문에 모델의 자료구조와는 독립적이며, 대상 모델의 범위는 비단 솔리드 모델뿐만 아니라 비다양체 모델에 대해서도 적용 가능하다. 또한, 기존의 연구에서와 같이 비다양체 병합체 모델을 이용하고 인접 LOD간의 차이를 추가로 저장하여 사용할 경우 LOD 모델의 제정도 신속히 할 수 있다.

5. 상세수준(LOD) 판단기준

상세수준(LOD) 판단 기준은 어떤 모델이 최종 형상에 보다 가까운 상세 모델인지, 어떤 특징형상 배열 순으로 적용했을 때 이러한 상세한 모델을 얻을 수 있는지에 대한 판단 기준을 뜻한다. LOD에 대한 판단 기준은 응용 분야에 따라 다르다. LOD 판단 기준으로 널리 사용된 것은 감법 특징형상의 분류와 일반적인 특징형상의 분류이며, 그밖에 사용자가 직접 지정하는 방식도 가능하다. 이 장에서는 널리 사용되는 LOD 판단 기준에 대해서 설명하도록 하겠다.

5.1 가법 특징형상의 분류

특징형상의 분류는 가장 그럴듯한 LOD 판단 기준 가운데 하나라고 할 수 있다. 최동혁 등^[22]과 Lee et al.^[11]이 제안한 방법에서는 특징형상 가운데 특히 감법 특징형상의 분류를 LOD 판단 기준으로 사용하였다. 여기에서는 가법 특징형상이 모든 감법 특징형상보다 우선하고, 그 다음 감법 특징형상들을 분류의 내림차순으로 배열하는 방법을 사용하였다. 따라서 가장 낮은 해상도의 LOD 모델은 모든 가법 특징형상들의 합한 결과이고, 그보다 높은 해상도의 LOD 모델들은 감법 특징형상들의 분류를 내림차순으로 차례로 빼면서 구한다. 이 방법은 주로 솔리드 모델의 렌더링이나 스트리밍과 같은 응용 분야에 적용되어 왔다.

빈일 Fig. 4의 예제 모델에 이 판단 기준을 적용시킨다면 특징형상들은 $F_0 \rightarrow F_2 \rightarrow F_4 \rightarrow F_1 \rightarrow F_3$ 의 순서로 재배열된다. 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 $M_0 = V_0 \cup V_2 \cup V_4$, $M_1 = M_0 - (V_1 - V_2 - V_4)$, $M_2 = M_1 - (V_3 - V_4)$ 이 된다. 이들에 대한 결과가 Fig. 5에 나타나 있다.

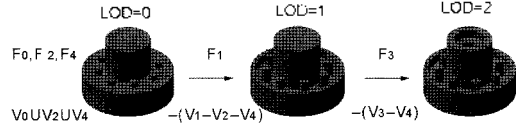


Fig. 5. Three LOD models for the reordered features according to the subtractive volume^[11].

이 방법에 사용된 LOD 판단 기준은 감법 특징형상의 전체 분류이다. 그러나 특징형상의 전체 분류를 일반적인 LOD 판단 기준으로 사용되기에는 다음과 같은 문제점들을 가지고 있다. 첫째, 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. 둘째, 단일 부품이 단지 가법 특징형상들만으로 모델링된다면 이 방식으로는 단지 하나의 LOD만 가능하게 된다. 셋째, 현재는 감법 특징형상의 전체 분류를 LOD 판단 기준으로 하고 있으나 부품 모델로부터 특징형상을 빼낼 때 감법 특징형상의 전체 분류가 사용되지 않을 수도 있다. 실제로는 $V_k \cap (M_0 - M_k)$ 에 해당하는 분류만이 불리안 작업 과정에 기여한다. 따라서 이 교차 분류가 특징형상 전체 분류보다 더 합리적인 LOD 판단 기준이 될 수 있다.

5.2 특징형상의 분류

감법 특징형상의 분류를 LOD 판단 기준으로 채택한 기존 방식의 문제점들을 극복하기 위하여 특징형상이 가법이나 감법이나에 관계없이 특징형상의 분류 자체를 판단 기준으로 하는 방식이 개발되었다^[11]. 이 방식은 어떤 분류를 측정하느냐에 따라 다양한 기준으로 세분화시킬 수 있다. 가장 간단한 경우는 특징형상의 전체 분류를 사용하는 경우이다. 그러나, 앞 절에서 언급한 것과 같이, 그것은 최종 부품 형상에 기여하지 않는 분류를 포함할 수 있다. 이러한 문제들 해결하기 위해 Lee^[11]는 다음과 같은 방법을 제안하였다. 먼저 전체 특징형상들 가운데 가장 작은 특징형상을 찾는 작업을 수행한다. 특징형상 F_i 를 제외한 나머지 특징형상들을 적용시켜 얻은 모델을 M_i 로 나타낼 때, 만약 M_i 가 기준 모델 M_0 (원래 부품 모델 또는 비로 이전 단계의 LOD 모델)에 가장 가깝다^[11] 하던

특징형상 F_i 가 주어진 범위의 특징형상 중에서 가장 작은 특징형상이 된다. 이 가장 작은 특징형상을 n 번째 위치로 이동시킨다. 다음, 두번째로 작은 특징형상을 찾아 $n-1$ 번째의 위치로 이동시킨다. 이러한 방법을 0번째의 위치의 특징형상을 결정할 때까지 계속 반복한다. 만일 이 알고리즘을 Fig. 2의 예제에 적용한다면, 특징형상들은 $F_0 \rightarrow F_2 \rightarrow F_1 \rightarrow F_4 \rightarrow F_3$ 의 순으로 재배열될 것이다. 특징형상 F_0, F_1, F_2, F_3, F_4 의 유효영역은 각각 $V_0, V_1-V_2, V_3, V_3-V_4, V_4$ 가 되며, 다섯 개의 LOD 모델들은 Fig. 6에 나타난 것과 같이 된다.

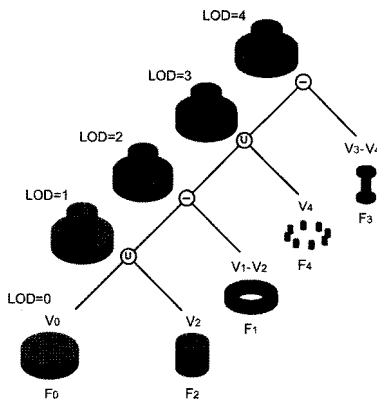


Fig. 6. The LOD models for the reordered features according to the volume^[14].

6. 부품과 조립체

특징형상기반 다중해상도 모델링이 적용되는 대상은 부품과 조립체 두 가지로 대별될 수 있다. 기존의 연구는 대부분 부품에 초점이 맞추어져 있었으나 조립체를 위한 연구들 또한 진행되었으며 궁극적으로는 조립체에 대한 다중해상도 모델링 기술이 완성되어야 본 기술을 현업에 제한없이 적용할 수 있게 될 것이다. 본 장에서는 부품과 어셈블리를 대상으로 한 기존의 연구들을 각각 정리해 보았다.

6.1 부품들 대상으로 한 다중해상도 모델링

이 분야의 대표적인 접근 방법들이 Table 1에 나타나 있다. 이들 방법들에 대해서는 이미 대부분 앞의 단원에서 다루었기 때문에 여기에서는 상술하지 않도록 하겠다. 자료 구조는 그물망 솔리드, 셀 구조, 비다양체 자료구조의 3가지 방법이 제시되었으며 이 가운데 비다양체 자료구조가 많은 기억 장소를 사용하기는 하나 표현 범위가 가장 넓고 신속히 다중해상도 모

델을 제공해 줄 수 있다는 장점을 가지고 있다. 대상 특징형상은 실제로 사용된 특징형상을 다중해상도 모델링에 그대로 사용하는 방식과 다중해상도 모델링을 위해 새로운 특징형상을 정의하고 이에 해당하는 특징형상을 설계된 형상 모델로부터 인식하여 사용하는 방식의 두 가지가 있다. LOD 판단기준은 초기의 연구에서는 빼기 특징형상의 볼륨을 사용하다가 이후에는 더하기나 빼기의 구분없이 모든 특징형상을 볼륨 순서대로 나열하는 것으로 발전하였다. 단순화 방법에 있어서 초기에는 불리안 작업을 그대로 수행하는 방식을 사용하였으나 이는 다중해상도 모델을 추출하는데 많은 시간을 소요하므로 이후 이를 극복하기 위한 국부 모델링 작업을 개발하거나 형상의 일부 위상 요소를 선택하는 방법이 개발되어 속도 문제를 크게 개선하였다. 기억장소 사용량 및 다중해상도 모델 추출 시간이라는 두 요소는 서로 교환(trade-off) 관계에 있는데 다중해상도 모델링 특성상 기억장소 저장량은 많아지더라도 모델 추출시간이 즉각 이루어져 사용자에게 신속히 모델이 제공될 필요가 있을 것으로 보인다. 이를 위해 비다양체 자료구조를 선택하고 ‘병합 및 선택’과 같은 알고리즘이 채용되기도 하였다.

6.2 조립체를 대상으로 한 다중해상도 모델링

이 분야의 대표적인 접근 방법들이 조립체(assembly)의 경우는 다중해상도 모델링 알고리즘 개발 시 부품 하나인 경우와 달리 추가적으로 고려해야 할 사항들이 발생한다. 조립체를 대상으로 한 다중해상도 모델링 기법에 대한 대표적인 연구는 다음과 같다.

Koo *et al.*^[10]는 wrap-around operation을 사용하여 부품과 조립체 모델의 다중해상도 모델을 제공하는 방법을 개발하였다. 이 방법은 두 단계로 이루어져 있는데 첫번째 단계에서는 부품 수준의 wrap-around operation을 수행하고, 두번째 단계에서는 조립체 수준의 wrap-around operation을 수행한다. 첫번째 단계에서는 각 부품의 오목한 공간을 찾아서 없애고 부품의 외부로부터 보이지 않는 면들을 제거한다. 다음 단계에서는 조립체 모델의 외부에서 보이지 않는 면들을 그래프 선회 방법을 이용하여 찾아서 제거한다. 이 방법의 장점은 Parasolid라는 상용 CAD 커널을 이용하여 구현되었다는 점이며, 단점은 부품의 오목한 공간을 찾을 때 불룩한 내부 루프를 기준으로 찾으므로 완벽하지 않다는 것과 여러 개의 면을 뚫고 지나가는 관통 구멍은 처리할 수 없다는 것과 wrap-around operation으로 간략화된 조립체 모델은 솔리드와 박판 모델이

Table 1. Current feature-based multiresolution modeling techniques for parts

Approach	Data structure	Objective	LOD criterion	Simplification method	Storage	Time	Advantages/Disadvantages
Delta volume approach ^[28]	Solid	Design feature	Volume of subtractive feature	Boolean operations on delta volumes	Small	Long	(+) Implemented on a commercial cad system (-) Applicable to only subtractive features (-) Low speed for extraction of LOD models
Cellular-topology based approach ^[11]	Cellular	Design feature	Volume of subtractive feature	Selection of volumes	Large	Short	(+) High speed for extraction of LOD models (-) Applicable to only subtractive features
Integrated B-rep approach ^[9]	Solid	Recognized feature	Area of feature	Wrap-around, smooth-out, and thinning operations	Small	Medium	(+) Medium speed of extraction of LOD models (-) No clear and consistent criteria for model simplification
Selective feature volume approach ^[14]	Non-manifold	Design feature	Volume of feature	Selection of topological entities	Large	Short	(+) High speed for extraction of LOD models (+) Applicable to additive and subtractive features (-) Inconsistent intermediate LOD models depending on feature relocation process
Maximal volume approach ^[27]	Cellular	Recognized feature	Volume of subtractive feature	Selection of volumes and Boolean operations	Large	Medium	(+) Independent LOD models from part modeling process (-) Applicable to only subtractive features (-) Machining features irrelevant from design
History-based selective(HBS-) Boolean operation approach ^[7, 9]	Non-manifold	Design feature	Volume of feature	Selection of topological entities using HBS-Boolean operations	Large	Short	(-) High speed for extraction of LOD models (-) Applicable to additive and subtractive features (-) Consistent intermediate LOD models depending on feature relocation process

혼재되어 있는 불완전한 모델이라는 점이다.

Cera *et al.*^[5]는 다수의 사용자가 네트워크 상에서 동시에 작업할 수 있는 협업 3차원 조립체 설계 환경에서 역할에 따라 모델의 가시 범위가 다르게 설정되는 소위 role-based viewing을 위한 새로운 프레임워크를 개발하였다. Role-based viewing에서는 각 사용자가 3D 조립체 모델을 볼 때 사용자의 접근 권한에 따라 서로 다른 상세수준의 모델을 볼 수 있도록 하였으며 간략화된 모델을 얻기 위하여 다면체 기하와 특징형상 기반의 다중해상도 모델링 방법을 혼용하여 사용하고 있다. 즉, 먼저 감법 특징형상을 제거하고, 그 다음 다면체를 감소시켜 낮은 수준의 LOD 모델을 얻는 방법을 취하고 있다. 하지만 이 방법은 특징형상의 제거 단계에서 LOD 개념을 전혀 적용하지 않고 한 번에 모두 없애며 또한 오직 감법 특징형상만 제거

할 수 있다고 하는 단점을 가지고 있다.

7. 용 용

7.1 공학 해석 분야

과거와 달리 최근에는 제품 설계시 반드시 해석단계를 기치도록 제품개발 프로세스를 정립함으로써 CAE 시스템 사용한 해석 작업이 과거와 달리 제품 설계 과정의 필수 단계로 자리 잡아가고 있다. 이에 따라 CAE 단계가 제품개발의 병목이 되지 않기 위해서는 CAD와 CAE 시스템을 긴밀히 통합시킬 필요가 있다. 특히 아직까지도 CAD모델로부터 해석용 모델 준비 및 매쉬 생성에 CAE 작업자의 대부분의 시간을 소비하고 있기 때문에 이를 줄이는 노력이 절대적으로 필요하다.

설계 단계에서 만들어진 제품 모델이 설계 이후 해석을 포함한 여러 응용 분야에 사용될 때는 상세한 형상 모델보다 해석 목적 및 방법에 따라 부품의 형상을 이상화시킨 단순한 형상 모델을 더 필요로 한다^[11]. 최근 컴퓨터 성능이 미약적으로 발전함에 따라 솔리드 모델 상태에서 바로 해석을 하는 경우가 많아지고 있다. 그러나 해의 정확도를 크게 떨어뜨리지 않는다면 간략화된 솔리드 모델을 사용하거나 나아가 솔리드를 박판이나 와이어프레임 형태로 축약시킨 모델을 쓰는 것이 바람직하다. 이 경우 FEA를 위한 해석 모델을 얻기 위해서는 상세 제거(detail removal)와 차원 감소(dimensional reduction)를 포함한 적절한 이상화(idealization) 과정이 필요하다^[12].

이러한 요구 조건들을 만족시키기 위하여 Lee^[13]는 Fig. 7에 나타난 것과 같은 비다양체 모델링 기법 및 다중해상도와 다중축약도 기법에 바탕을 둔 통합 CAD/CAE 방식(CAD/CAE-integrated approach)을 제안하였다. 이 방법에서는 매 특징형상 모델링 작업이 수행될 때마다 설계와 해석을 위한 서로 다른 유형의 기하학적인 모델들이 동시에 생성된 후 바로 비다양체 부품 마스터 모델(part master model)에 병합된다. 이 마스터 모델로부터 다양한 LOD에 대한 솔리드 모델들이 즉각 추출될 수 있으며, 또한, 어떤 LOD에 대하여 다양한 수준의 LOA에 대한 비다양체 축약

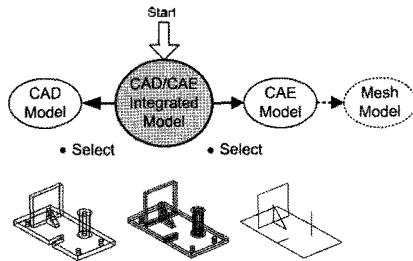


Fig. 7. CAD/CAE-integrated approach^[13].

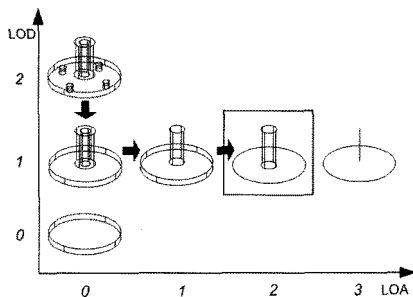


Fig. 8. Idealized models obtained by feature-based multiresolution and multi-abstraction techniques^[13].

모델들도 이 마스터 모델로부터 신속히 추출되어 CAE 시스템에 전달될 수 있다. 설계 변경시 이 마스터 모델을 수정하는 방식을 채택함으로써 설계와 해석 모델들이 동시적이고 일관성있게 수정되는 효과도 누릴 수 있다. [15]는 이 방식을 사출성형 제품 설계에 적용한 사례를 보여주고 있다. Fig. 8은 Fig. 3의 모델에 대해 다양한 LOD와 LOA에 대한 해석용 모델을 추출한 예를 보여주고 있다.

7.2 네트워크 기반 분산협업설계 분야

분산 설계 환경에서는 효율적인 협업 설계 및 생산을 위해서 네트워크를 통한 솔리드 모델의 보다 효율적인 전송이 필요하다^[14,15,20,25]. 그러나, 대부분의 CAD 시스템에서 사용하는 솔리드 경계 표현 방식은 대단히 복잡하며 네트워크의 대역폭 또한 제한적이기 때문에 이러한 요건을 충족시키는 것은 쉽지 않다. 이러한 제약을 극복하기 위해서 솔리드 모델을 주요 형상으로부터 세부 형상까지 점진적으로 전송하는 방식의 도입과 엔지니어링 작업에 따라 적절한 LOD의 제품 모델을 공유하는 것이 필요하다. 이 경우 전송 및 단순화의 단위로는 보서리나 면과 같은 하위 수준의 위상 요소보다는 설계 단위의 보다 상위 수준의 특징형상이 보다 적절하다고 할 수 있다.

따라서 다양한 LOD에 대한 형상 모델을 신속히 얻기 위한 특징형상 기반 다중해상도 모델링 및 스트리밍(streaming)에 대한 연구가 필요하며 Fig. 9에 이를 위한 시스템 구조와 특징형상기반의 스트리밍에 대한 예가 나타나 있다. Lee et al.^[16]은 셀구조 모델을 기반으로 한 다중해상도 모델링 기법을 개발하여 이를 솔리드 모델의 스트리밍에 적용하였다.

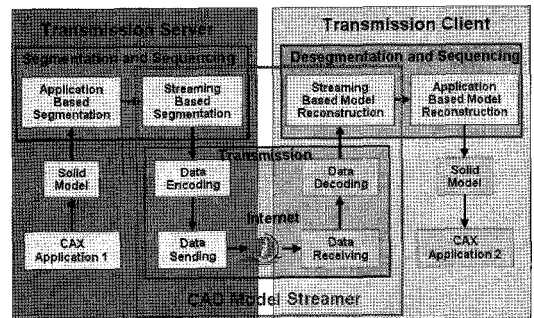


Fig. 9. System architecture and data flow for CAD model streaming over network.

7.3 가상 프로토타이핑 및 생산 분야

가상 프로토타이핑에서는 조립체의 가시화 및 조립

과정의 적합성을 검증하기 위하여 각 부품을 3차원 형상 모델로 표현하고 이들을 조립한 디지털 목업(digital mock-up(DMU)) 또는 가상 시제품(virtual prototype)을 생성시키는 작업이 필요하다. 또한 최근 각광받고 있는 가상 생산 분야에서는 가상 공장의 시뮬레이션과 가시화를 위해서 Fig. 10에서와 같이 공장의 모든 설비, 예컨대, 로봇, 컨베이어, 지그 및 고정구, 머피, 도크, 워크 셀 등이 3차원 모델로 모델링되어야 한다. 디지털 목업과 가상 공장은 엄청난 양의 형상 정보를 포함하고 있기 때문에 렌더링, 충돌 검사, 그리고 갖가지 엔지니어링 해석과 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 다중해상도 모델링 기술이 필수적이다. 특히, 주어진 LOD에 따라 제품이나 설비의 형상을 단순화시킬 때, 전체 형상 및 시뮬레이션의 정밀도를 유지하기 위해 구멍이나 라운딩과 같은 세부 특징형상을 제거하는 방법이 권장되고 있다. 따라서 특징형상을 단위로 LOD 모델을 생성시키는 특징형상기반 다중해상도 모델링 기법은 이러한 엔지니어링적인 목적과 빠른 렌더링과 같은 그래픽적인 목적을 동시에 달성하는 데 유효한 도구가 될 수 있다.

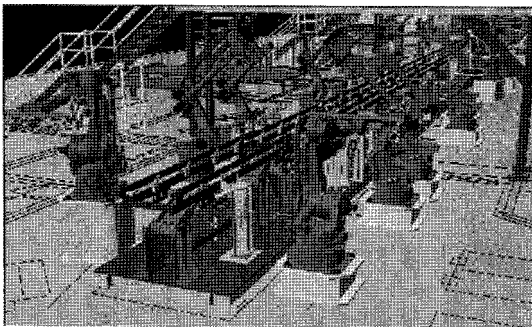


Fig. 10. CAD models for virtual manufacturing.

특징형상기반 다중해상도 모델링 기법은 또한 혼합 프로토타입(mixed prototype)에도 적용될 수 있다. 혼합 프로토타입이란 실물 프로토타입(real prototype)과 가상 프로토타입(virtual prototype)의 중간형태로 실물로 된 일부 시작품상에 증강현실(augmented reality: AR)기술을 이용하여 가상 모델을 덧붙인 혼합 형태의 시작품을 뜻한다^[21]. 실세계와 가상세계가 결합된 형태인 혼합 프로토타입은 가상 시작품에 비하여 직접 손으로 만져볼 수 있다는 장점을 가지고 있어 외과의료 수술용, 엔터테인먼트, 교육 훈련 등에 일찍이 도입되어 활용되었다. 특히 혼합 프로토타입은 증강현실 장비를 이용하여 실시간으로 대화식 작업을 수행

해야 하므로 시스템의 반응 속도가 중요하다고 할 수 있다. 따라서 다중해상도 모델링 기법은 자동차 생산 라인의 설계 및 검증과 자동차 운전석 설계용 자동차 산업 분야에 필요한 대용량의 혼합 프로토타입 모델 구축 및 응용에 이용될 수 있다.



Fig. 11. CAD models for mixed prototype.

8. 결 론

본 논문은 특징형상기반 다중해상도 모델링 기법에 대한 최근 연구동향을 소개하였다. 즉, 이 기법이 무엇을 대상으로 하며, 어떤 표현 방법을 채용하고 있으며, 어떻게 여러 상세수준에 해당하는 모델들을 생성시키며, 상세수준의 기준으로 어떤 것들이 사용되며, 이를 어디에 응용하고 있는지에 대한 개괄적인 내용을 소개하였다. 전술한 바와 같이 이 기술은 컴퓨터 그래픽스뿐만 아니라 해석과 같은 공학적 용도로 사용될 수 있는 폭넓은 응용 분야를 가지고 있으며, 최근 이 기술에 있어 괄목할만한 연구 성과를 보여주고 있다. 그러나 이 기술이 완성되어 실제 현업에 사용되기 위해서는 다음과 같은 연구들이 계속 수행될 필요가 있다.

- 실용적인 용도를 위한 보다 신속한 다중해상도 모델링 기술: 현재의 방법들은 대용량의 CAD 모델에 대해 여전히 많은 계산 시간을 필요로 한다. 하지만, CAD 시스템에 앉아있는 사용자들은 시스템의 느린 반응에 인내하지 않는 경향이 있으므로 보다 빠른 다중해상도 모델링 기법을 개발할 필요가 있다.
- 설계와 동시병행 다중해상도 모델링: 다중해상도 모델은 기본적으로 설계가 완료된 모델에 대해서 적용하는 기술이다. 그러나 설계자의 입장에서는 설계를 수행하는 중간에 언제든지 원하면 작업중인 CAD 모델에 대한 다중해상도 모델을 보거나 활용하고 싶을 것이다. 이를 위해서는 대 모델링 작업시마다 다중해상도 모델 데이터베이스가 능동적으로 갱신되어 설계자가 원하면 언제든지 원 단계의 CAD 모델에 대한 다중해상도 모델들을 즉각 보여줄 수 있는 동시적인 다중해상도 모델

- 링 방법을 개발하여 설계자의 요구사항을 충족시킬 필요가 있다.
- 새로운 응용 분야 발굴 및 LOD 판단조건 발굴: 다중해상도 모델링 기법은 공학용 해석뿐만 아니라 가시화, 네트워크 기반 협업설계, 가상 프로토타이핑 및 생산과 같은 다양한 응용분야에 적용될 수 있다. LOD 판단조건은 통상 그 적용 분야에 따라 다르므로 적용 범위의 확장과 더불어 더 많은 LOD 판단조건이 발굴 수용되어야 한다.
 - 조립체 모델에 대한 특징형상기반 다중해상도 모델링: 이것은 가상 프로토타이핑 및 생산에 특히 유용하나 현재의 기술 수준은 여전히 좀더 개선된 새로운 방식을 요구하고 있다. 단, 조립체 모델에 대한 다중해상도 모델을 생성시킬 때에는 부품간의 간섭방지, 부품간의 만남조건 고려, 보안 고려가 이루어져야 한다.
 - CAD와 CAE의 보다 강건하고 긴밀한 통합: 현재 설계 특징형상을 이용한 다중해상도 모델링 방법은 특징형상기반 설계의 한계를 공유하고 있으므로 이를 극복하기 위해서는 특징형상 인식 및 MAT 기법의 도입이 필요하다. 또한, 부품 모델 내에 설계와 해석 모델을 동시에 표현할 수 있는 보다 강력한 방법의 개발이 필요하며, CAD 모델에 지정된 해석용 경계 조건들을 CAE 모델로 적절히 전달하는 방법도 연구할 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2006-311-D00015).

참고문헌

1. Armstrong, C. G., "Modeling Requirements for Finite-element Analysis", *Computer-Aided Design*, Vol. 26, pp. 573-578, 1994.
2. Armstrong, C. G., McKeag, R. M., Ou, H. and Price, M. A., "Geometric Processing for Analysis", *Proceedings of Geometric Modeling and Processing*, pp. 45-56, 2000.
3. Belaziz, M., Bouras, A. and Brun, J. M., "Morphological Analysis for Product Design", *Computer-Aided Design*, Vol. 21, pp. 377-388, 2000.
4. Bidarra, R., Kranendonk, N., Noort, A. and Bronsvort, W. F., "A Collaborative Framework for Integrated Part and Assembly Modeling", *Proceedings of the 7th ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*, Saarbrücken, Germany, pp. 389-400, 2002.
5. Cera, C. D., Kim, T., Han, J. and Regli, W. C., "Role-based Viewing Envelopes for Information Protection in Collaborative Modeling", *Computer-Aided Design*, Vol. 36, No. 9, pp. 873-86, 2004.
6. Cignoni, P., Montani, C. and Scopigno, R., "A Comparison of Mesh Simplification Algorithms", *Computers & Graphics*, Vol. 22, No. 1, pp. 37-54, 1998.
7. Crocker, G. A. and Reinke, W. F., "An Editable Non-manifold Boundary Representation", *IEEE Computer Graphics & Applications*, Vol. 11, pp. 39-51, 1991.
8. Dunn, M., *Industrial Automation Systems and integration - Product Data Representation and Exchange - Part 48: Integration Generic Resources: Form Features*, Second edition. ISO/WD 10303-48.
9. Kim, S. C., Lee, K., Hong, T., Kim, M. and Jing, M., "An Integrated Approach to Realize Multi-resolution of B-rcp Model", *Proceedings of the 2005 ACM Symposium on Solid and Physical Modeling*, pp. 153-162, 2005.
10. Koo, S. and Lee, K., "Wrap-around Operation to Make Multiresolution Model of Part and Assembly", *Computers & Graphics*, Vol. 26, No. 5, pp. 687-700, 2002.
11. 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, pp. 217-229, 2004.
12. Lee, K., *Principles of CAD/CAM/CAE Systems*, Addison Wesley Longman, Inc., 1999.
13. Lee, S. H., "A CAD-CAE Integration Approach Using Feature-based Multi-resolution and Multi-abstraction Modeling Techniques", *Computer-Aided Design*, Vol. 37, pp. 941-955, 2005.
14. Lee, S. H., "Feature-Based Multiresolution Modeling of Solids", *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 24, No. 4, pp. 1417-1441, 2005.
15. Lee, S. H., "Feature-based Non-manifold Modeling System to Integrate Design and Analysis of Injection Molding Products", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 23, No. 5, 2009.
16. Lee, 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, pp. 356-365, 2001.
17. Lee, S. H., Lee, K. and Kim, S. C., "History-based selective Boolean Operations for Feature-based Multi-resolution Modeling", *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 3980, pp. 459-468, 2006.
18. Lee, S. H., Lee, K.-Y., Woo, Y. and Lee, K.-S.,

"Feature-based Multi-resolution Modeling of Solids Using History-based Boolean Operations-Part I: Theory of History-based Boolean Operations", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 19, No. 2, pp. 549-557, 2005.

19. Lee, S. H., Lee, K.-Y., Woo, Y. 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", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 19, No. 2, pp. 558-566, 2005.

20. Li, J., Gao, S. and Zhou, X., "Direct Incremental Transmission of Boundary Representation", *Proceedings of the 8th ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*, Seattle, Washington, USA, pp.298-303, 2003.

21. Masuda, H., "Topological Operators and Boolean Operations for Complex-based Nonmanifold Geometric Models", *Computer-Aided Design*, Vol. 25, No. 2, pp.119-29, 1992.

22. Regenbrecht, H., Baratoff, G. and Wilke, W., "Augmented Reality Projects in the Automotive and Aerospace Industries", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 25, No. 6, pp. 48-56, 2005.

23. Schröder, W. J., Zerge, J. A. and Lorensen, W. E., "Decimation of Triangle Meshes", *Proceedings of SIGGRAPH '92, Computer Graphics*, Vol. 26, No. 2, pp. 65-70, 1992.

24. Shah, J. J. and Mäntylä, M., *Parametric and Feature-based CAD/CAM*, John Wiley & Sons, Inc., 1995.

25. Wu, D., Dhargava, S. and Sarma, R., "Solid Model

Streaming as the basis for a Distributed Design Environment", *Proceedings of the 2000 ASME Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, 26th Design Automation Conference*, Baltimore, Maryland, DETC2000/DAC-14250, 2000.

26. 김성찬, 이진우, 김태완, "다중해상도 모델 생성을 위한 Feature Tree Pruning Operation의 개발", 2002 한국CAD/CAM학회 학술발표회 논문집, pp. 397-402, 2002.

27. 우윤환, "볼류분해를 이용한 절삭가공부품 슬리드 모델의 단순화", 한국CAD/CAM학회 논문집, 제12권, 제2호, pp. 101-108, 2007.

28. 최능혁, 김태완, 이진우, "특징형상 변환을 이용한 B-rep 모델의 다중해상도 구현", 한국CAD/CAM학회논문집, 제7권, 제2호, pp. 121-130, 2002.



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 교수
 관심분야: CAD/CAM, Human-centered CAD, Computer-Aided Automotive Design, 3D Geometric Modeling, Die & Mold Design