

다중해상도 알고리즘을 이용한 자동 해석모델 생성

김민철*, 이건우**, 김성찬***

Automatic Generation of Analysis Model Using Multi-resolution Modeling Algorithm

Kim, M.C.*, Lee, K.W.** and Kim, S.C.***

ABSTRACT

This paper presents a method to convert 3D CAD model to an appropriate analysis model using wrap-around, smooth-out and thinning operators that have been originally developed to realize the multi-resolution modeling. Wrap-around and smooth-out operators are used to simplify 3D model, and thinning operator is to reduce the dimension of a target object with simultaneously decomposing the simplified 3D model to 1D or 2D shapes. By using the simplification and dimension-reduction operations in an appropriate way, the user can generate an analysis model that matches specific applications. The advantage of this method is that the user can create optimized analysis models of various simplification levels by selecting appropriate number of detailed features and removing them.

Key words : Multi-resolution, Simplification, Dimension-reduction, Analysis model

1. 서 론

컴퓨팅 기술이 발달함에 따라 CAD 시스템에서 디자인된 복잡한 형상의 해석모델을 상용화된 유한 요소 생성기를 사용하여 손쉽게 얻어내고 있다. 그러나 유한 요소 생성기의 자동메쉬 생성 알고리즘을 사용하는 경우 모델의 복잡한 정도와 요소(tetrahedral/hexahedral)의 선택에 따라서 같은 모델임에도 불구하고 다양한 해석결과를 내거나 엄청난 컴퓨팅 시간을 필요로 하게 된다. 그러므로 CAD 시스템에서 디자인된 복잡한 형상의 3D CAD 모델로부터 유한요소해석에 적합한 해석 모델을 생성하기 위해서는 모델의 형상에 따라 그에 적합한 모델의 간략화 및 차원 감소(dimension reduction)과정이 필요하다. 대부분의 경우, 복잡한 형상이나 작은 형상은 유한요소 생성 단계에서 적절한 메쉬를 생성하지 못하거나 너무 많은 작은 메쉬 요소를 만들어 계산 시간을 증가시키는 등

지 않은 역할을 한다. 이러한 관점에서 블렌드, 챔퍼, 페시지, 보스, 오목한 영역 등의 작은 특징형상은 해석모델을 생성하는데 적절하지 못한 형상이 될 수 있으므로 용력, 변형, 열 해석 등의 응용 분야에 따라 적절하게 제거해야 한다. 또한 3D 모델의 형상에 따라 직관적으로 두께가 얇은 부분의 3D 형상을 1D 빔이나 2D 셸 혹은 플레이트 등으로 차원을 줄이게 되면, 부분적으로 2D나 1D 요소를 사용하게 되어 전체적으로 3D 요소를 사용하는 것보다 적은 수의 메쉬와 노드를 생성하므로 해석시간을 절감할 수 있을 뿐만 아니라 정확성을 향상시킬 수 있다.

따라서 본 논문에서는 대부분의 상용 3D CAD 시스템에서 사용하고 있는 boundary representation(B-rep) 데이터 구조로 이루어진 3D CAD 모델에 대하여, 3D CAD 모델을 간략화한 후 차원을 낮추는 알고리즘을 사용하여 최적화된 해석모델을 생성하는 방법을 개발하였다. 모델의 간략화를 위해서는 다중해상도 모델 생성을 위해 기존 연구결과인 wrap-around 및 smooth-out operator를 적용하고 차원 감소 과정을 위해서는 thinning operator를 적용하였다.

본 논문의 나머지 부분은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 관련연구에 관한 내용을 개략적으로 설

*현대자동차 연구개발총괄본부

**중신회원, 서울대학교 기계항공학부

***교신저자, 학생회원, 서울대학교 기계항공학부

- 논문투고일: 2005. 07. 20

- 심사완료일: 2005. 12. 08

명하고, 3장에서는 해석모델을 생성하기 위한 방법론 및 각 단계의 자세한 알고리즘을 설명하였다. 4장에서는 본 논문에서 제시한 알고리즘을 적용하여 구현한 결과물을 보여주며, 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

2. 관련연구

현재까지 해석모델의 생성에 관한 많은 연구들이 있었다. 이 장에서는 해석모델 생성에 사용되는 여러 알고리즘 및 아이디어에 관해서 개략적으로 설명하겠다.

2.1 Medial Axis Transform (MAT)

MAT는 초기에 생물학적 형상 해석을 위하여 Blum^[2]에 의해서 제안되었으며, 물체의 내부를 내접하면서 움직이는 최대지름을 가진 구의 중심 궤적을 나타낸 것으로 medial axis와 radius function으로 표현된다. MAT는 물체의 정보를 유지한 상태로 차원 감소 과정을 수행할 수 있고 물체를 유일하게 표현할 수 있으며 모든 물체에 대해서 차원 감소가 가능하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 MAT를 적용하게 되면 해석에 적합하지 않은 여러 가지 형상을 생성하게 되고, 물체의 경계부분에서의 작은 변화가 medial axis에서 큰 영향을 주게 되는 문제가 있으며, 수학적으로 구현하기 힘들다는 단점이 있다. 이후 이를 보완하기 위한 많은 연구들^[3-6]이 이루어졌다.

2.2 Mid-surface extraction

Rezayat^[6]이 제안한 방법은 MAT에서 발생하는 해석모델에 적합하지 못한 기하학적 형상을 생성하는 문제를 해결하였다. 임의의 한 면에서 두께 방향으로 레이(ray)를 발사하는 방법을 이용하여 모델의 면들을 짝 지우고, 면의 면적과 위상 정보에 기초하여 인접관계 그래프(adjacency graph)를 생성하게 된다. 이렇게 생성된 인접관계 그래프를 이용하여 2차원 불리언(boolean) 과정 및 형상 보간(geometric interpolation)에 의해서 중간면(mid-surface)를 생성한 후에, 인접 정보에 따라 각 조각을 붙이는 방법을 설명하고 있다. 그러나 L, RIB, LRIB 그리고 RAMP와 같은 몇 가지 형상들의 조합으로 이루어진 모델에 대해서만 적절한 중간면을 생성할 수 있다는 한계점을 가지고 있다.

2.3 Edge-pairing method

Chong^[10]은 다양체의 3D CAD 모델을 volume

decomposition 및 dimension reduction, stitching의 3단계를 적용하여 다양체의 해석모델 생성에 관한 방법을 제안하였다. 이 논문에서는 3D CAD 모델의 모든 모서리들을 검색하여 사용자가 입력한 임의의 두께 값 "T" 사이에 존재하는 두 개의 모서리들을 하나의 쌍으로 구성하게 되고, 각각의 모서리 쌍들은 하나의 모서리로 합쳐 median이라고 명명된 6가지 종류로 분류된다. 이런 median들은 각 종류에 따라 3D CAD 모델을 여러 개의 하위 모델로 나누는 중요한 역할을 한다. 이렇게 median에 의해 나누어진 두께가 얇은 부분을 가진 하위 모델들은 1D 빔이나 2D 셸, 플레이트 형태의 중간면으로 만들어지며, stitching 알고리즘을 사용하여 두께가 두꺼운 부분과 결합함으로써 해석 모델을 생성하게 된다.

2.4 Multi-abstraction non-manifold modeling method

Lee^[11]는 3D CAD 모델의 디자인 단계에서 설계에 특화된 형상으로부터 해석에 특화된 형상을 생성하고, 이 둘을 모두 포함하는 NMT(non-manifold topological) merged-set을 구성한다. 이렇게 구성된 merged-set은 특징형상의 유효 체적(effective volume) 계산방법을 이용하여 LOD(level of detail) 모델로 특징형상, 트리를 재구성하게 된다^[12]. 이러한 재구성 과정이 끝난 후, 각 LOD단계에 해당하는 해석에 특화된 형상을 이용하여 LOA(level of abstraction)를 구성하게 되고, 사용자의 해석목적에 적합한 LOD와 LOA의 단계를 임의로 선택하여 해석모델을 생성하게 된다.

3. Methodology

본 논문에서 제시한 다중해상도 생성 알고리즘을 적용하여 사용자가 원하는 적절한 해석모델을 생성하기 위해서는 Fig. 1과 같이 크게 두 단계의 과정을 거쳐야 한다. 첫 번째는 작은 특징형상을 인식하고 제거하는 간략화 단계이며 두 번째는 간략화된 모델을 1D 빔이나 2D 셸 혹은 플레이트 등의 비다양체 모델로 차원 감소 과정을 수행하는 이상화 단계이다.

간략화 단계에서는 wrap-around 및 smooth-out을 사용하여 해석모델을 생성하는데 적절하지 못한 블렌드, 챔피, 패시지, 보스, 오복한 영역등과 같은 형상을 제거하는 단계이다. 그리고 이상화 단계는 간략화 단계를 통하여 간략화된 모델에 대해 ToolEdge 인식 알고리즘을 사용하여 volume decomposition이 필요한지

를 결정한 다음, decomposition이 필요한 경우 thinning 과정을 통해 2차원 시트(sheet)로 생성 가능한 부분과 불가능한 부분으로 모델을 나누게 된다. 이렇게 나누어진 각 하위 모델들은 차원 감소 과정을 수행하게 되고, 각 하위 모델들을 결합(sewing)하여 최종적으로 해석모델을 생성하게 된다.

그러나 최종결과가 사용자의 해석의도에 맞지 않는 경우, Fig. 1에서와 같이 단순화된 모델 및 해석 모델을 되돌리는 복원(reconstruction) 과정을 두어서 사용자가 만족할만한 결과를 얻을 때까지 간략화 과정 및 이상화 과정 그리고 복원 과정을 반복적으로 수행할 수도 있다.

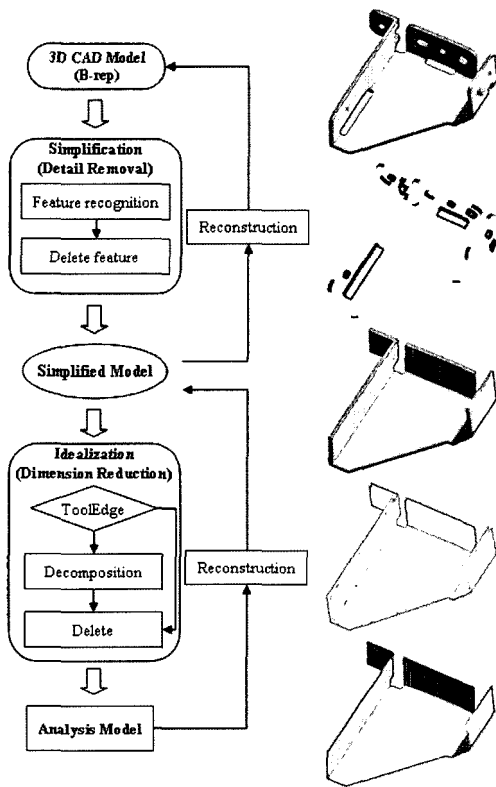


Fig. 1. Process to generate analysis model.

3.1 간략화

간략화 과정은 Fig. 1과 같이 3단계로 나누어져 있다. 첫 번째는 작은 특징형상을 인식하는 단계이고, 두 번째는 인식된 특징형상을 제거하는 단계이며, 세 번째는 간략화된 형상을 복원하는 단계이다. 이완 관련된 내용은 Kim^[13]에 자세하게 설명이 되어 있으므로 간략하게 설명하겠다.

3.1.1 정의된 특징 형상

특징 형상에는 블랜드, 챔퍼, 패시지, 보스, 오목한 영역 등이 있으며, 이들의 정의는 Fig. 2의 (a), (b), (c), (d), (e)와 같다.

(a) Concave-region feature

오목한 특징 형상은 오목한 모서리(concave edge)를 갖고 있는 형상을 말한다. 어떤 모서리를 매개로 만나는 두 면들이 이루는 내각이 180도 보다 큰 경우 그 모서리를 오목한 모서리라고 말한다. 실제 모델에서 오목한 특징 형상은 오목한 모서리로 연결된 여러 개의 면들로 이루어진다. 이 경우 최초로 검색된 오목한 면들로부터 연결 관계를 따라가면서 반복적으로 오목한 영역 전체를 찾아 나가게 된다.

(b) Passage feature

패시지 특징 형상은 모델을 관통하는 형상을 말한다. 본 연구에서 사용한 알고리즘은 단순 관통구명뿐만 아니라 여러 면에 걸쳐 있는 관통 형상 역시 제거와 복원이 가능하다.

(c) Fillet/round feature

두 경우 모두 블랜드 특징형상이다. 필렛(fillet)은 오목 모서리에 라운드(round)는 볼록 모서리에 위치한다.

(d) Chamfer feature

챔퍼 특징 형상을 이루는 면을 챔퍼 면이라고 부른다. 챔퍼 면은 특정 모서리에 삽입되어 그 모서리의 내각을 증가시키는 역할을 한다.

(e) Smooth-out feature

Smooth-out 과정에서 제거되는 형상으로 리브(rib)나 보스(boss) 등과 같이 돌출된 부분이다. 전체 모델에 비하여 부피가 매우 작다.

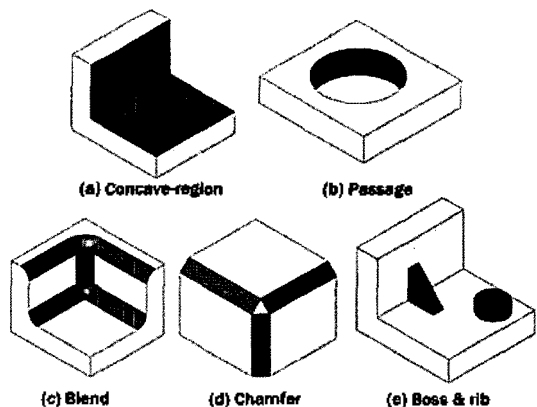


Fig. 2. Features defined for multi-resolution.

3.1.2. 단순화 및 복원

Fig. 2와 같은 특징 형상들은 각 종류에 따라 wrap-around 및 smooth-out을 이용하여 각각 Fig. 3의 (a), (b)와 같은 방법으로 제거, 복구된다.

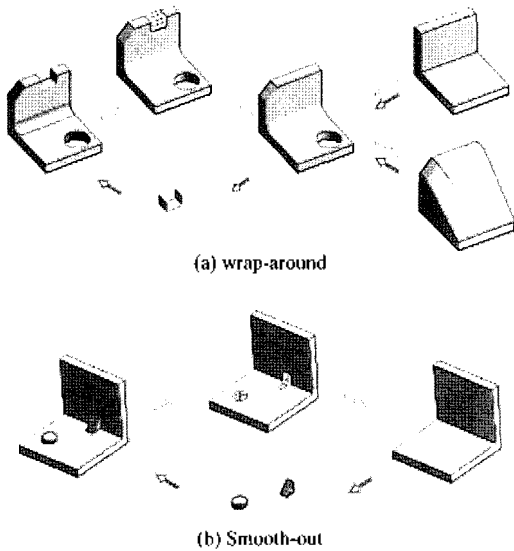


Fig. 3. Simplification and recovery process of wrap-around and smooth-out.

3.2 이상화

이상화는 위에서 언급했듯이 대용량의 3D 조립체 모델을 CAD 시스템에서 CAE 시스템으로 넘겨주는 경우, 보다 적은 수의 메쉬를 생성하기 위해서 간략화된 파트 모델을 차원 감소하는 단계로, thinning 과정을 적용하여 모델을 이상화하게 된다. 물론 Fig. 4와 같이 차원 감소를 수행하는데 문제가 발생하는 블렌드와 보스만을 제거하고 페이스지, 오목한 영역 등과 같은 형상을 남겨두더라도 정상적으로 이상화된 모델을 생성할 수 있다. 그러나 Fig. 4와 같이 두께가 얇은 부분으로만 이루어져있는 모델의 경우 차원 감소를 쉽게 수행할 수 있지만, Fig. 5과 같이 두께가 두꺼운 부분과 두께가 얇은 부분이 공존하고 있는 모델의 경우 추가적인 작업을 수행 하지 않는다면 이상화를 곧바로 수행할 수 없다. 따라서 간략화된 모델에 대해 차원 감소를 정상적으로 수행하기 위해서는 Fig. 5 (b)와 같이 두께가 두꺼운 부분과 두께가 얇은 부분으로 나누는 volume decomposition이 필요하게 되며, 이를 위해 추가적인 계산 시간이 필요하게 된다. 그러나 차원 감소를 수행한 후에 CAE 시스템으로 넘겨서 자동으로 메쉬를 생성하는 경우와 차원 감소를 수행

하지 않고 메쉬를 생성하는 경우를 비교했을 때, CAE 시스템에서 보다 적은 계산 시간 및 정확한 결과를 보장한다고 볼 수 없다.

따라서 이 논문에서는 CAE 시스템에서 보다 효율적으로 해석결과를 얻는 방법으로 ToolEdge 인식 알고리즘을 제안한다. 즉, ToolEdge 인식 알고리즘은 간략화된 모델에 대해서 차원 감소 과정을 수행할 것인가를 판단하게 된다. 그리고 decomposition에 상당한 계산 시간이 필요한 모델은 Fig. 5(a)와 같이 간략화 과정만을 수행하고, decomposition에 비교적 적은 계산 시간이 필요한 모델의 경우 Fig. 5(b)와 같이 차원 감소과정까지도 수행하여 대량의 3D CAD 데이터를 3D/2D 요소로 나누어 해석하는 방법을 채택하여, 보다 정확하고 효율적인 해석결과를 얻을 수 있게 된다.

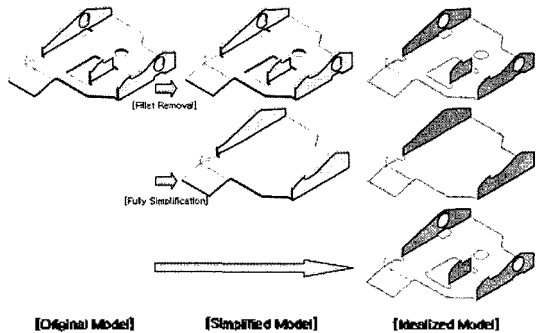


Fig. 4. Idealization process.

이와 같은 관점에서 간략화와 차원 감소 과정은 설계 단계에서 빠르고 정확한 해석 결과를 얻을 수 있는 하나의 해결방법으로 생각될 수 있다. 그러나 간략화와 이상화의 결과로 얻어지는 모델은 Fig. 5(c)의 과정을 통해서 비다양체 모델이 될 가능성이 높다. 그러나 비다양체 모델 생성은 피할 수 없는 문제가 아니므로, 비다양체 모델을 지원하는 유한요소 생성 프로그램을 사용해야만 해결할 수 있다. 즉, 현재 이 논문에서 구현된 wrap-around, smooth-out, thinning 방법을 사용하여 해석에 적합한 해석 모델을 생성한 후, 비다양체 모델을 지원하는 유한요소 생성 프로그램을 통해서만 적합한 해석 모델이 얻어지게 된다.

이상화 단계는 크게 네 단계로 나누어진다. 첫 번째는 decomposition을 효율적으로 수행하기 위해 필요한 보서리를 찾아내는 ToolEdge 인식 단계이고, 두 번째는 첫 번째 단계에서 찾아낸 ToolEdge를 이용하여 3D의 파트 모델을 여러 개의 하위 모델로 나누는

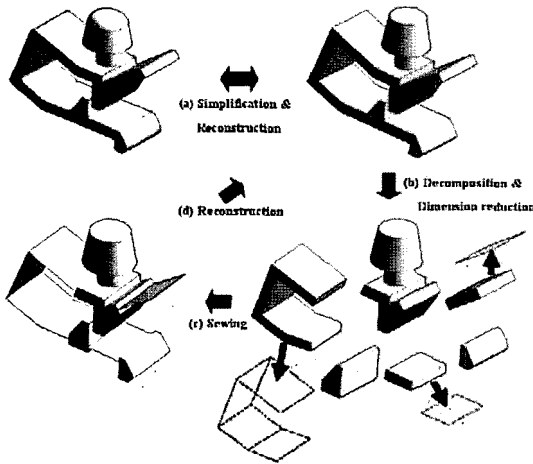


Fig. 5. Idealization process by decomposition of model.

decomposition 단계, 세 번째는 각 하위 모델들 중 두께가 얇은 것들에 대해서 2D나 1D로 차원 감소한 후, 2D나 1D로 이상화된 파트 모델의 하위 모델들을 결합(sewing)하여 하나의 비다양체로 생성하는 것이다. 마지막으로 Fig. 5(d)와 같이 앞에서 수행했던 모든 과정을 이상화가 이루어지기 전으로 되돌리는 재구성 단계가 있다.

3.2.1 ToolEdge 인식

ToolEdge 인식 알고리즘은 Fig. 6과 같이 크게 네 단계로 나누어진다. 첫 번째는 B-rep으로 구성된 파트 모델의 위상 정보 및 형상 정보를 이용하여 Fig. 6(a)와 같이 차원 감소가 가능한 면들의 쌍(face-pair)을 찾아내는 단계이다. 두 번째는 Fig. 6(b)와 같이 검색된 면들의 쌍이 공동으로 볼록한 면을 찾아내는 단계로 면들의 쌍의 side-face를 찾아내는 단계이다. 세 번째는 Fig. 6(c)와 같이 모델의 모든 면들에서 면들의 쌍 및 side-face를 제외한 나머지 면들을 찾고 그 면들 가운데 볼록한 모서리를 갖는 면을 찾아서 오목한 모서리를 공유하는 면이 임의의 면들의 쌍에 속해 있는지를 확인하는 단계이다. 여기서 검색된 면을 tool-face로 정의한다. 그리고, Fig. 6(d)와 같이 tool-face에 속해있는 오목한 모서리를 ToolEdge라고 한다. 만약 모델에서 ToolEdge가 존재한다면 decomposition을 수행해야 한다. 그러나 복잡한 형상의 ToolEdge나 수많은 ToolEdge들이 존재한다면, decomposition 과정에서 복잡한 계산 과정 때문에 많은 계산시간이 필요하므로 decomposition을 수행하지 않고 바로 해석모델을 생성하게 된다.

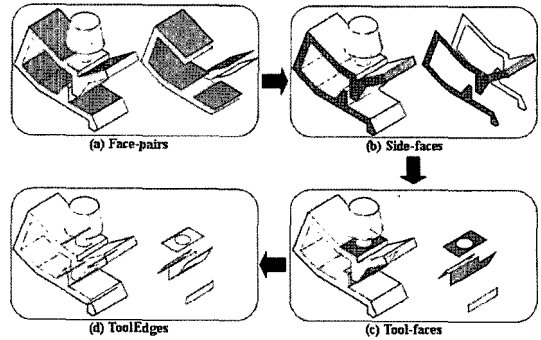


Fig. 6. ToolEdge identification process.

3.2.1.1 Search face-pair

검색 단계에서는 파트 모델의 모든 면들을 검색하여, 차원 감소 과정에 필요한 면들의 쌍을 구성하게 된다. 그러나 대용량의 3D CAD 데이터를 실시간으로 조작하기 위해서는 다음과 같은 제한 조건을 만족하는 것들만 고려하여 작업을 수행하게 된다.

- 임의의 두 면들은 동일한 종류(plane, cylinder, sphere, cone, torus, offset face 등)를 가진다.
- 임의의 두 면들은 평행하다.
- 위와 같은 조건들을 기본으로 하여 다음과 같이 각 면들의 종류에 따라 면들의 쌍을 구성하게 된다.

(가) Plane인 경우

Plane의 경우 Fig. 7과 같이 많은 인자들을 고려하여 면들의 쌍을 검색하게 된다. 특히, 곡면의 법선 벡터와 높이(H)두께(t) 및 폭(W)두께(t)에 해당하는 값은 면들의 쌍을 구성하는데 중요한 역할을 하게 된다.

- (a) 곡면(surface)의 법선벡터 방향이 반대인지 확인한다.
- (b) 곡면의 법선벡터 방향이 서로 마주보는 방향인지 확인한다.
- (c) 녹색으로 표시된 두 면들의 두께에 해당하는 거리와 두 면들에 속한 위상 요소(topological entity)들 사이의 최단 거리가 같은지 확인한다. 만약, 두 거리가 같지 않다면 두 면들은 적절한 중간면을 생성하지 못하므로 제외시킨다.
- (d) Plane의 경우 중간면을 생성할 때 변의 가로(W) 및 세로(H) 길이를 face1과 face2 사이의 거리(두께 t)로 나눈 값이 일정한 값 X보다 커야 한다는 조건이 필요하다. 즉, 면들의 파라메트릭 도메인(parametric domain)에서 u, v 값의 최소/최대 크기의 사각형을 구하여 각 면들의 폭과 높이를 거리로 나눈 값을 비교한다. 따라서 다음과

같은 식을 만족하는 면들의 쌍만을 유효하게 생각한다.

$$\min(W, H)/t > X$$

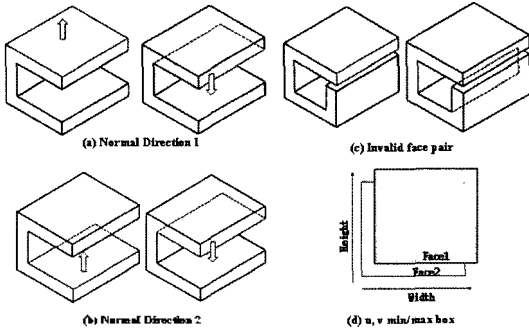


Fig. 7. Face-pair in plane.

Fig. 7(d)에서 설명한 조건은 직관적인 면을 강조한 것으로, 두께 t보다 작은 범위에 들어오는 면들의 쌍을 검색하는 방법보다는 적절하고 안정적인 중간면을 생성할 수 있다.

(나) Cylinder인 경우

Cylinder에서 고려해야 할 인자는 Fig. 8과 같이 반경, 축, 두께이다.

- (a) 반지름 Radius1과 Radius2가 달라야 한다.
- (b) 두 곡면들의 축의 방향이 같거나 반대 방향이어야 한다.
- (c) 두 곡면들의 축은 동일 직선상에 있어야 한다.
- (d) 두 곡면들의 반지름 차이와 두께 t가 같아야 한다.

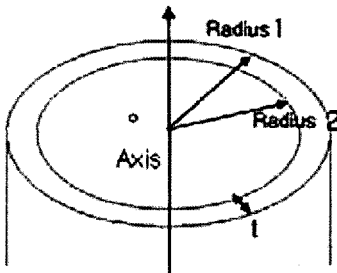


Fig. 8. Face-pair in cylinder.

(다) Cone인 경우

Cone에서 고려해야 할 인자는 Fig. 9와 같이 위치(P1, P2), 축, 면과 축 사이의 각도이다.

- (a) Face1과 Axis1사이의 각도와 Face2와 Axis2사

이의 각도가 같아야 한다.

- (b) 두 곡면의 축 방향이 같거나 반대 방향이어야 하고 동일 직선상에 있어야 한다.
- (c) Face1과 position P1까지의 거리와 Face2와 position P1까지의 거리를 뺀 값은 두 곡면의 반지름의 차이와 같다는 조건을 적용할 수 있다. 즉, face1의 position P1과 face2의 position P2는 같은 축 상에 위치하고, 두 면들은 평행하다는 조건에서 face1의 P1에서 face2까지의 거리와 face1의 P1에서 face2까지의 거리를 뺀 거리는 두 면들의 두께 거리와 같다는 것을 알 수 있다.

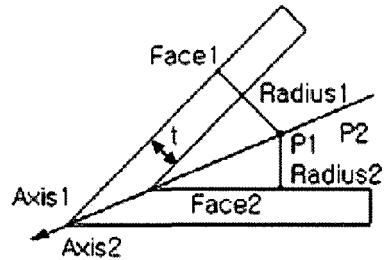


Fig. 9. Face-pair in cone.

(라) Sphere인 경우

Sphere에서 고려해야 할 인자는 Fig. 10과 같이 위치와 반경이 중요한 인자가 된다.

- (a) 두 곡면의 중심 위치(P)가 동일해야 한다.
- (b) 두 곡면의 반지름의 차이(Radius2-Radius1)는 두께(t)와 같아야 한다.

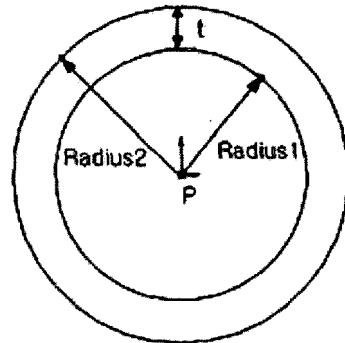


Fig. 10. Face-pair in sphere.

(마) Torus인 경우

Torus의 경우 고려해야 할 인자는 Fig. 11에서와 같이 중심의 위치(C), 축(A), Major_Radius, Minor_

Radius이다.

- (a) Face1의 position 및 axis는 face2의 position 및 axis와 같다.
- (b) Face1의 Major_Radius과 face2의 Major_Radius는 같다.
- (c) Face1의 Minor_Radius1과 face2의 Minor_

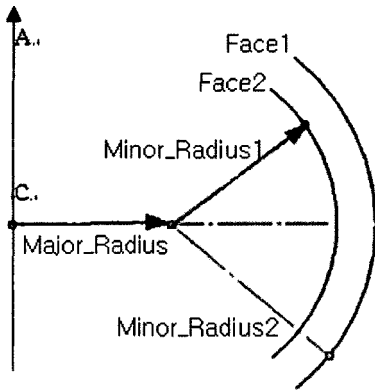


Fig. 11. Face-pair in torus.

Radius2의 차이는 두께(t)와 같다.

(바) Offset인 경우

Fig. 12와 같이 오프셋(offset) 방법으로 생성된 노란색의 오프셋 면은 녹색으로 표시된 오프셋 면의 underlying surface를 찾아내는 방법을 사용하여 면들의 쌍을 구성하게 된다.

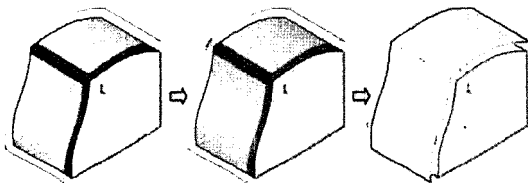


Fig. 12. Face-pair in offset face.

위와 같이 다양한 형태의 면을 임의로 선택하고 각 면의 속성을 검색하는 방법을 사용하여, 각 종류에 해당하는 적절한 면들의 쌍을 검색한다. 그리고 검색된 면들의 쌍들 가운데 이상화 과정에서 해석에 적합하지 않은 중립면을 생성하는 경우, 면들의 쌍을 제거하는 추가적인 과정을 수행하게 된다. 만약 검색 과정에서 적절한 면들의 쌍들이 검색되지 않는다면 차원 감소 과정을 수행하는데 적합하지 않은 모델로 간주하고 thinning을 수행하지 않는다.

3.2.1.2 Search side-face

- 일단 면들의 쌍들이 검색되면, Fig. 13과 같이 다음과 같은 단계를 통해서 side-face들을 검색하게 된다.
- (a) 면들의 쌍의 각 면에 해당하는 루프(loop)들을 검색한다.
 - (b) 각 루프의 모서리를 검색해서 공통으로 오목한 관계에 있는 면을 찾는다.
 - (c) 중복되는 오목한 면들을 제거한 뒤, side-face들로 결정한다.

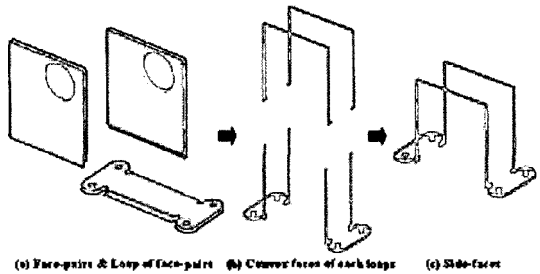


Fig. 13. Search side-faces.

3.2.1.3 Search tool-face/ToolEdge

Tool-face 및 ToolEdge는 Fig. 14과 같이 검색된 면들의 쌍들과 side-face들을 이용하여 찾게 되고 다음과 같은 과정이 필요하다.

- (a) 파트 모델의 모든 면들을 검색한다.
- (b), (c)의 면들의 쌍과 side-face들을 제외한 나머지 면들(d)을 찾는다.
- (e) 나머지 면들 중 임의의 면들의 쌍과 공유하고 있는 오목한 모서리가 존재하는지 확인한다. 즉, (d)에서 찾아낸 면에서 오목한 모서리를 검색한 후, 그 모서리가 면들의 쌍으로 검색된 임의의 면과 공유하는지 확인하여 공유한다면 ToolEdge가 된다.

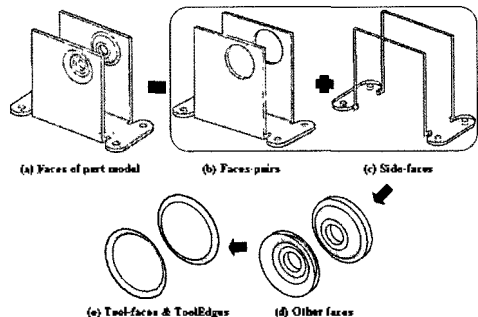


Fig. 14. Search tool-face & ToolEdge.

3.2.2 Decomposition

Decomposition 과정은 Fig. 15(a)와 같이 ToolEdge 인식 과정에서 검색된 ToolEdge (Fig. 15(a)의 붉은색) 및 target-face(Fig. 15(a)의 면들)를 이용하여 tool-sheet(Fig. 15(b)의 아래 그림)를 생성한 다음, Fig. 15(b)와 같이 모델과 tool-sheet의 subtract 연산을 이용하여 Fig. 15(c)와 같이 decomposition을 수행한다. 면들의 쌍들 중에서 ToolEdge를 공유하는 면과 대응되는 면이 target-face가 되고 tool-sheet는 ToolEdge를 target-face까지 프로젝션(projection)하여 생성하게 된다.

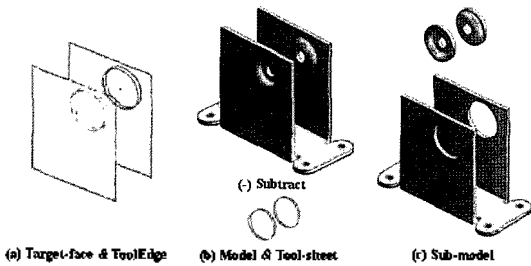


Fig. 15. Decomposition process.

3.2.3 이상화 과정

이상화 과정은 Fig. 16과 같이 세 단계로 이루어져 있다. 첫 단계는 차원 감소가 가능한 하위 모델에 대해서 검색 알고리즘을 수행하여 면들의 쌍을 검색하는 단계이고, 두 번째는 면들의 쌍의 중간면을 생성하는 단계이고, 세 번째는 모든 하위 모델을 하나로 결합(sewing)하는 단계이다.

면들의 쌍을 이용하여 중첩면을 생성하는 과정에서는 다음과 같은 추가 작업이 필요하게 된다.

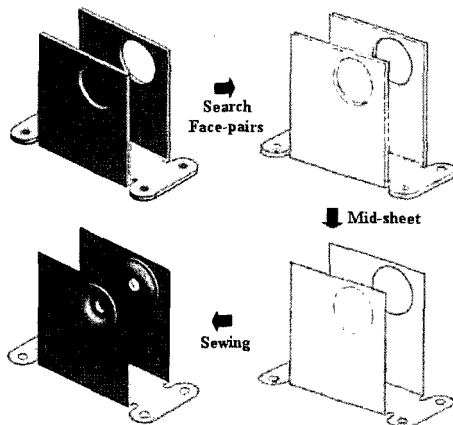


Fig. 16. Idealization process.

- (a) 검색 단계에서 검색된 면들의 쌍들을 이용해서 파트 모델의 bounding-box 크기와 같은 시트를 생성한다.
- (b) 여러 개의 시트를 파트 모델 및 면들의 쌍을 고려하여 trimmed-sheet를 생성한다.
- (c) trimmed-sheet에 복원 과정에 필요한 두께 정보를 삽입한다.

3.2.4 복원 과정

복원 과정에서는 이상화 과정에서 차원 감소 과정을 수행한 후, 중간면에 입력해 놓았던 두께 정보를 이용하여 두께를 회복하고, 차원 감소가 적용되지 않은 나머지 하위 모델과 결합(union) 연산을 통해서 Fig. 17와 같이 원래의 간략화된 모델로 되돌린다.

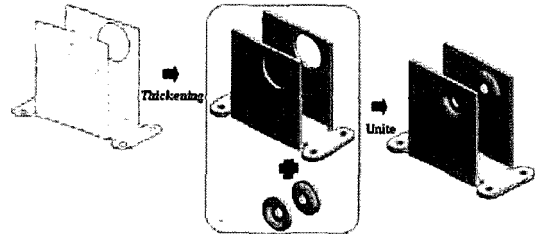


Fig. 17. Reconstruction process.

4. 구현결과

4.1 Test-bed Program

현재 구현된 multi-resolution modeler(MRModeler) 프로그램은 Kim^[14]에서 설명되어있는 것과 같이 Fig. 18과 같은 시스템 구조로 되어 있다. 또한, MRModeler는 SolidWorks 및 Unigraphics와 같은 상용 3D CAD 시스템에서 사용하고 있는 Parasolid 커널의 API를 이용하여 구현되어 있으며, 이 논문에서

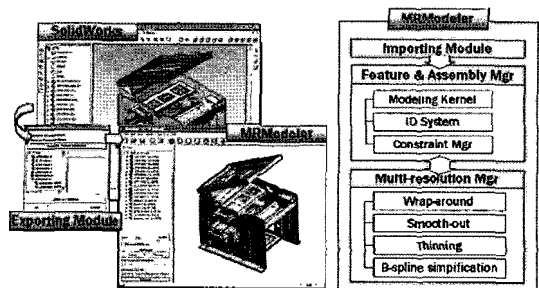


Fig. 18. System structure of MRModeler.

제안한 thinning 알고리즘을 적용한 해석모델 생성 모델이 추가되어 있다.

4.2 예제

Fig. 19는 문의 빗장 중 일부를 모델링한 파트로 해석모델이 생성되는 과정을 보여주고 있다. Fig. 19(a)의 모델에 간략화를 수행하여 Fig. 19(b)와 같이 간략화된 모델을 생성하고, Tool-sheet를 이용하여 파트 모델을 여러 개의 하위 모델로 decomposition하여 Fig. 19(c)와 같은 모델을 생성한다. 마지막으로 Fig. 19(d)의 결합(sewing)과정을 거쳐서 Fig. 19(e)와 같은 해석모델을 생성하게 된다.

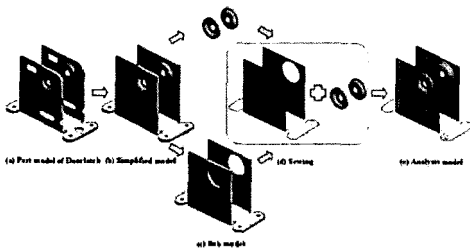


Fig. 19. Example.

Fig. 20은 간략화 과정에서 어떤 특징형상을 제거하느냐에 따라서 해석모델이 달라지는 것을 보여준다. Fig. 20(a)는 간략화를 수행하지 않고 바로 dimension reduction을 통해 해석모델을 생성한 결과이고, Fig. 20(b)는 블랜드, Fig. 20(c)는 패시지, Fig. 20(d)는 블랜드와 패시지를, 그리고 Fig. 20(e)는 블랜드, 패시지, 오목한 영역을 제거한 후에 생성되는 해석모델을 보여 준다.

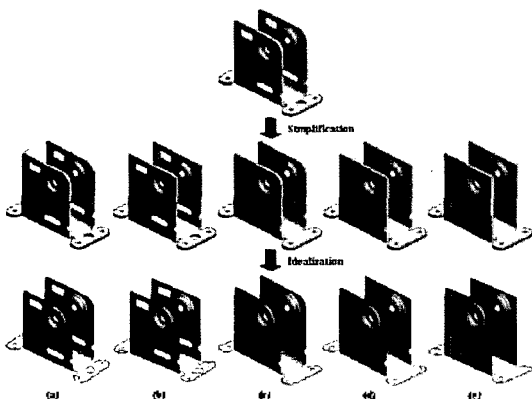


Fig. 20. Multi-resolution models for analysis.

MIRModeler에서는 자동으로 decomposition을 수행할 수 있을 뿐 아니라 사용자가 원하는 부분만을 별도로 decomposition하는 것도 가능하다. Fig. 21과 같이 비교적 단순한 형상의 모델인 경우 자동으로 decomposition을 수행할 수 있지만, 복잡한 형상의 모델은 사용자가 수동으로 ToolEdge 및 target-face를 선택하는 방법을 사용하여, 자동 decomposition의 한계점을 보완하도록 하였다. Fig. 21의 모델은 자동으로 decomposition하여 정상적인 해석 모델을 생성하지만, Fig. 21에서 붉은 색으로 표시한 값들을 조절하여 적합한 해석모델을 생성할 수도 있다.

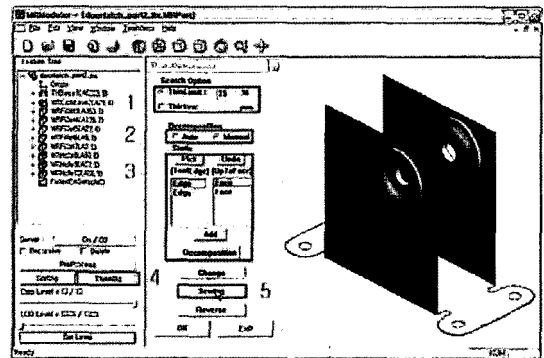


Fig. 21. Manual operation of decomposition.

5. 결 론

이 논문은 기존의 유한 요소 생성기에서 생성한 해석 모델을 이용한 해석 결과보다 더욱 정확한 값을 얻을 수 있도록 가장 CAD 모델에 근접하면서도 해석에 적합한 모델을 생성하는 방법을 제시하고 있다. 이 논문은 기존의 방법과는 달리 CAD 시스템에서 CAE 시스템으로 데이터를 변환하는 과정에서, 사용자가 해석의 종류에 따라 적합한 추가 조건을 선택하면 자동으로 가장 적합한 해석모델을 생성하는 방법을 제시하고 있다. 또한, 자동으로 생성된 해석 결과가 만족스럽지 못한 경우에는 초기 조건을 변경하는 방법을 통해서 새로운 해석 모델을 쉽고 빠르게 생성할 수 있으며, 복잡한 형상모델의 경우에는 수동으로 decomposition을 수행하는 방법으로 보다 적합한 해석 모델을 생성할 수 있다. 그러나 이 논문에서 제안한 decomposition 알고리즘은 복잡한 형상의 ToolEdge를 처리하지 못하는 한계가 있다. 따라서 추후에 decomposition 알고리즘을 개선한다면 보다 정확한 해석모델을 생성할 수 있을 것이다.

감사의 글

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

참고문헌

- Blum, H., "A Transformation for Extracting New Descriptors of Shape", In: Whalen-Dunn, W. editor. *Models for the Perception of Speech and Visual Forms*. Cambridge, MA: MIT Press, pp. 362-380, 1967.
- Blum, H., "Biological Shape and Visual Science (Part 1)", *J. Theor. Biol.*, Vol. 38, pp. 205-287, 1973.
- Armstrong, C. G., "Modeling Requirements for Finite-element Analysis", *Computer-Aided Design*, Vol. 26, pp. 573-578, 1994.
- Armstrong, C. G., Robinson, D. J., McKeag, R. M., Li, T. S., Bridgett, S. J. and Donaghy, R. J., "Applications of the Medial Axis Transform in Analysis Modeling", *Proceedings of the Fifth International Conference on Reliability of FE Methods for Engineering Applications, NAFEMS*, pp. 415-426, 1995.
- Li, T. S., Armstrong, C. G. and McKeag, R. M., "Automatic Partitioning of Analysis Models Using the Medial Axis Transform", *Adv. Parallel Vector Process Struct. Mech.*, pp. 165-171, 1994.
- Sheehy, D. J., Armstrong, C. G. and Robinson, D. J., "Computing the Midsurface of a Solid from a Domain Delaunay Triangulation", *ACM/IEEE Symposium on Solid Modeling and Applications*, Salt Lake City, 1995.
- Sheehy, D. J., Armstrong, C. G. and Robinson, D. J., "Numerical Computation of Midsurface Vertices", *The Mathematics of Surfaces VI, Oxford: Clarendon Press*, pp. 549-569, 1996.
- Foskey, M., Lin, M. C. and Manocha, D., "Efficient Computation of a Simplified Medial Axis", *ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*, pp. 96-107, 2003.
- Rezayat, M., "Midsurface Abstraction from 3D Solid Models: General Theory and Applications", *Computer-Aided Design*, Vol. 28, No. 11, pp. 905-915, 1998.
- Chong, C. S., Lee, K. H. and Senthil, K. A., "Automatic Solid Model Decomposition and Reduction for Non-manifold Geometric Model Generation", *Computer-Aided Design*, Vol. 36, pp. 1357-1369, 2004.
- Lee, S. H., "A CAD-CAE Integration Approach Using Feature-based Multi-resolution and Multi-abstraction Modelling Techniques", *Computer-Aided Des.*, Vol. 37, No. 3, pp. 941-955, 2005.
- Lee, S. H., "Feature-Based Multi-resolution Modeling of Solids", *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 24, No. 4, pp. 1417-1441, 2005.
- Kim, S., Lee, K., Hong, T., Kim, M., Jung, M. and Song, Y., "An Integrated Approach to Realize Multi-resolution of B-rep Model", *ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*, pp. 153-162, 2005.



김민철

2003년 한국항공대학교 항공기계공학과
학사
2005년 서울대학교 기계항공공학부 석사
2005년~현재 현대자동차 연구개발총괄본
부 연구원
관심분야: CAD/CAE Integration, Di-
mension Reduction, Volume
Decomposition



김성찬

1999년 서울대학교 기계항공공학부 학사
2006년 서울대학교 기계항공공학부 박사
2006년~현재 서울대학교 정밀기계설계공
동연구소 연구원
관심분야: CAD, 3D Geometric Model-
ing, Plastic Injection Mold
Design, Multi-resolution Mod-
eling



이건우

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