

< 논문 >

STL 파일 모델로부터 유한 요소망 자동 생성

박정민[†] · 권기연* · 이병채* · 채수원**
(2006년 12월 27일 접수, 2007년 6월 21일 심사완료)

Generating FE Mesh Automatically from STL File Model

Jung-Min Park, Ki-Youn Kwon, Byung-Chai Lee and Soo-Won Chae

Key Words : Meshing Algorithm(요소망 생성), Face Clustering(평면 분류), QEM(Quadric Error Metric), STL(Stereolithography File)

Abstract

Recently, models in STL files are widely used in reverse engineering processes, CAD systems and analysis systems. However the models have poor geometric quality and include only triangles, so the models are not suitable for the finite element analysis. This paper presents a general method that generates finite element mesh from STL file models. Given triangular meshes, the method estimates triangles and makes clusters which consist of triangles. The clusters are merged by some geometric indices. After merging clusters, the method applies plane meshing algorithm, based on domain decomposition method, to each cluster and then the result plane mesh is projected into the original triangular set. Because the algorithm uses general methods to generate plane mesh, we can obtain both tri and quad meshes unlike previous researches. Some mechanical part models are used to show the validity of the proposed method.

1. 서론

1.1 연구동기

제품 설계 과정에서 CAD/CAM 프로그램과 CAE 프로그램 사이의 모델 교환은 필수적이지만 교환 과정에서 모델 해석의 차이로 인해 곡면의 경계가 서로 맞지 않는 등의 여러 가지 문제가 발생하기도 한다. 특히 CAE에서 주로 쓰이는 CAD 파일 형식인 STEP, IGES의 경우, 모델에 대한 다양한 정보를 포함하고는 있지만 교환 과정에서의 오류가 자주 발생하여 해석을 위해서는 별도의 수작업이 필요한 경우가 일반적이다. 이에 비해 STL(Stereo Lithography) 파일 형식은 주로 역공학 분야에서 사용되던 것으로서 앞서 언급한 STEP, IGES와는 달리 CAD 모델에 대한 해석적인 정보

는 포함하지 않고 모델 가시화를 위한 점 군 좌표 정보와 삼각형 집합 정보만을 포함하고 있는 간단한 형식이다. 따라서 STL 파일을 이용한 모델 교환 과정에서의 오류는 다른 형식을 사용한 것에 비해 매우 적은 빈도로 나타난다. 이러한 특징 때문에 다양한 정보를 표현할 수 없다는 단점에도 불구하고, CAD 프로그램을 비롯한 FEM 해석 프로그램에서도 STL 파일 모델의 쓰임새가 증가하고 있다. 그러나 STL 파일 모델은 가시화에는 적합하지만 모델을 이루는 각 삼각형의 형상 품질이 매우 떨어지기 때문에 주어진 상태 그대로는 FEM 해석에 필요한 요소망으로 사용될 수 없다. 따라서 이러한 STL 파일 모델을 해석에 사용하기 위해서는 주어진 모델을 입력 받아 가공 처리하는 유한 요소망 생성 과정이 필요하다. 기존의 연구들에서도 이와 같은 문제를 다루고 있으나 삼각형 요소망만을 다루거나 평면 문제만을 다루는 등의 부분적인 해결책들을 제시하고 있다. 본 연구에서는 초기 형상 품질이 나쁠 수 밖에 없는 STL 파일 모델을 처리하여 유한 요소망을 얻는 방법을 제시하였다.

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : jungmin@casad.kaist.ac.kr
TEL : (042)869-5034 FAX : (042)869-3095
* 회원, 한국과학기술원 기계공학과
** 회원, 고려대학교 기계공학과

1.2 관련연구

STL 파일 모델 또는 기하 정보가 직접적으로 표현된 삼각형 집합을 입력으로 하여 FEM 모델을 만들고자 하는 시도와 연구는 이전부터 다양하게 시도되어 왔다. Becher⁽¹⁾는 주어진 모델을 인접 각도에 따라 몇 개의 영역으로 분류 한 후, 각 영역에 대해 수정된 2D Delaunay 삼각화 방법을 적용하였다. Sifri⁽²⁾는 Geodesic을 계산하여 이를 기준으로 영역을 분할한 후 Delaunay 삼각화를 수행하였다. Frey⁽³⁾는 전체 모델을 간략화 시킨 후, 다시 edge splitting 등을 사용하여 요소망 재생성을 수행하였다. 이상의 방법들은 특성상 삼각형 요소망 생성만이 가능하며 요소로서 성능이 더 우수한 사각형 요소망을 얻는데에는 어려움이 있다. 한편으로는 삼각형 집합 모델로부터 사각형 요소망을 생성해 내고자 하는 연구도 다수 이루어져왔다. Owen⁽⁴⁾과 Itoh⁽⁵⁾는 각 삼각형에 대해 병합과 위치 최적화를 통해 요소망을 얻어냈다. 하지만, 곡면 형상이 포함된 일반적인 모델에 대해서는 적용하기 곤란하다는 단점이 있다. 국부적으로 곡면을 근사하는 방법을 적용한 연구로서 Owen⁽⁶⁾의 연구는 위상정보와 기하정보를 이용하여 국부 근사 Bezier 곡면을 계산한 후, 요소망을 생성하는 방법을 제시하였다. 그러나 초기 형상이 좋지 않은 STL 파일 모델에는 적용하기 힘들다는 문제점이 있다. 한편 직접적인 요소망 생성을 다루고 있지는 않지만, Sheffer,⁽⁷⁾ Inoue,⁽⁸⁾ Garland⁽⁹⁾의 연구는 초기 삼각형 집합의 영역 분류 방법을 제시하고 있다. 저자들의 앞선 연구⁽¹⁰⁾에서는 영역 분류 방법을 적용한 후 요소망 생성 수행을 제안하여, 일부 모델에 적용하여 요소망을 얻을 수 있었다. 그러나 초기 삼각형 망의 영향으로 인한 필요 이상의 과도한 개수의 요소망을 생성한다는 문제점 또한 가지고 있었다.

이렇게 기존의 연구들은 주로 삼각형 요소망 생성만을 다루거나 영역 분류시 경계 형상에 대한 고려가 부족한 편이며, 특히 STL과 같은 초기 품질이 나쁜 모델에 대해서는 추가적인 개선이 필요한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 이산 다각형 집합(Discrete Polygons)을 입력으로 요소망을 생성하고자 할 때, 초기 품질에 영향을 받지 않고 삼각형, 사각형 요소망 생성이 모두 가능한 방법을 개발하였다.

1.3 개요

본 연구에서는 STL 파일 모델로부터 FEM 해석에 사용될 수 있는 삼각형 또는 사각형 요소망을

자동 생성하기 위하여 영역 분류 기법과 평면 요소망 자동 생성 방법을 이용하였다. 개략의 과정을 설명하자면 다음과 같다. 먼저 QEM에 기반한 오차 지수와 그 밖의 형상 지수에 따라 삼각형 집합 분류 작업을 반복적으로 수행한다. 이 과정 이후에 초기 입력 모델은 다수의 cluster로 나뉜다. 나뉘어진 영역에 대해 요소망 생성이 용이하도록 경계를 단순화 시킨다. 이 과정 이후 각각의 cluster에 대해 평면 요소망 생성 작업을 수행한다. 마지막으로 생성된 평면 요소망을 원래의 3 차원 다각형 표면에 투영한다.

본 논문의 내용은 다음과 같다. 2 장에서는 입력 모델의 전처리 과정과 영역 분류 방법, 분류 기준에 대해 설명한다. 3 장에서는 요소망 생성을 위한 대표 평면의 결정과 분류된 영역의 경계를 간략화하는 과정을 서술하였다. 4 장에서는 평면 요소망의 생성과 후처리 부분을 설명하였으며, 5 장에서는 제안된 방법을 3 가지 기계 부품 모델에 적용하고 그 결과를 나타내었다.

2. 모델의 영역 분류 작업

먼저 주어진 STL 파일 모델은 형식의 특징상 위상적으로 동일한 정점(Vertex)의 좌표가 여러 번 기록되어 있으므로, 동일한 정점에 대한 병합 작업이 필요하다. 정점 병합 작업을 먼저 수행하여 입력 모델의 자료구조를 작성한다. 또한 본 연구에서는 입력 모델로서 2 manifold 구조, 즉 삼각형의 절점은 다른 삼각형의 절점에서만 만나는 모델만 고려하고 있으므로 이에 대한 검사도 수행하도록 한다. 그 다음 단계로 초기 삼각형 집합으로부터 영역 연결성 그래프(Cluster Adjacency Graph)를 작성한다. 영역 연결성 그래프의 각 node는 cluster이며 그래프의 node를 연결하는 arc는 cluster와 그 주변 cluster에 대한 연결성을 의미한다. 처음 단계에서는 하나의 삼각형이 하나의 cluster이며 3 개의 arc를 갖게 된다. 각 arc는 두 cluster간의 병합 비용(Merging Cost) 값을 저장하고 있다. 따라서 여기에서의 병합 비용은 인접하는 cluster의 병합 가능 정도를 의미한다. 병합 비용의 계산은 다음 절에 설명하는 지수들로부터 계산된다. 병합 비용을 기준으로 모든 arc는 우선 순위 큐(Priority Queue)에 저장되고, 큐로부터 arc를 하나씩 꺼내어 cluster간의 병합 과정을 수행하게 하였다. 이 과정은 병합이 부적절한 arc만 남을 때까지 반복적으로 수행된다. 이 과정의 결과로 cluster 집합을 얻게 되며,

각 cluster는 다수의 삼각형 집합을 포함하고 있다. 이후에는 각 cluster 별로 대표 평면을 계산한 후, 이 평면위에서 요소망 생성 작업이 이뤄진다.

2.1 적합 오차 지수

적합 오차 지수(Fitting Error Index)는 병합 비용 계산에서 주요한 영향을 미치는 항목이다. 적합 오차 지수는 cluster에 포함된 초기 삼각형들의 절점들과 대표 평면과의 Euclidean 거리 오차 정도를 나타낸다. 적합 오차 지수의 계산은 Garland, Heckbert⁽⁹⁾의 Quadric Error Metric(QEM) 방법을 이용하였다. QEM에 의한 적합 오차 지수의 계산은 다음과 같다. \mathbf{n}, \mathbf{d} 를 해당 cluster의 대표 평면을 나타내는 법선 벡터와 상수 그리고 \mathbf{v} 를 cluster에 속한 절점들이라 하면, k개의 점들과 평면과의 거리 제곱합 E_{fit} 는 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 E_{fit} &= \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (\mathbf{n}^T \mathbf{v}_i + d)^2 \\
 &= \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \mathbf{n}^T (\mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^T) \mathbf{n} + 2d \mathbf{n}^T \mathbf{v}_i + d^2 \\
 &= \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \mathbf{n}^T \mathbf{A}_i \mathbf{n} + 2b_i^T d \mathbf{n} + c_i d^2
 \end{aligned} \tag{1}$$

where $\mathbf{A}_i = \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^T, \mathbf{b}_i = \mathbf{n}^T \mathbf{v}_i, c_i = 1$

Cluster내의 정점들을 이용하여 3 by 3 행렬 \mathbf{A} 와 3 by 1 벡터 \mathbf{b} 를 계산한다. Arc 병합시에는 병합될 두 cluster의 $\mathbf{A}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ 를 더해서 새로운 cluster에 할당한다. E_{fit} 값을 사용자가 지정한 E_{max} 값에 대한 상대 비로 바꾸어 적합 오차 지수값으로 저장한다. 그리고 이 계산과정에서는 cluster의 최적 대표 평면이 필요하다. Garland⁽⁹⁾에서와 마찬가지로 대표 평면은 주 성분 분석(Principal Component

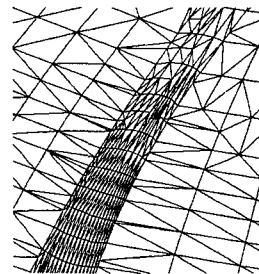
Analysis) 방법을 이용하여 계산하였다. 주 성분 분석 방법은 아래 표현된 식과 같이 k 개의 절점들에 대해 3 by 3 공분산 대칭 행렬을 구성한 후 고유 벡터를 찾는 것이다. 가장 작은 크기의 고유치에 대응하는 고유 벡터를 대표 평면의 법선으로 사용한다.

$$\mathbf{M} = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (\mathbf{v}_i - \bar{\mathbf{v}})(\mathbf{v}_i - \bar{\mathbf{v}})^T \tag{2}$$

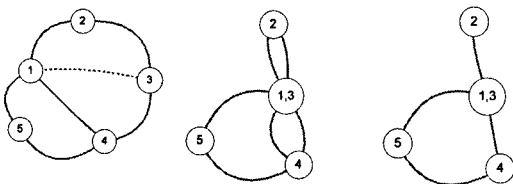
where $\bar{\mathbf{v}}$ is the mean of the vertices

2.2 공유 길이비와 접촉 각도비

Garland⁽⁹⁾는 병합 비용 계산시 E_{fit} 값을 주로 고려하였으며, 본 연구에서도 E_{fit} 가 가장 주요한 인자이다. 그러나 E_{fit} 에는 해당 cluster의 경계 형상에 대한 고려가 들어 있지 않다. 따라서 적합 오차만을 고려할 경우 결과로 얻어지는 cluster들의 경계 형상이 좋지 않은 경우가 발생한다. 예를 들어 cluster의 경계가 얇은 삼각형처럼 형성되는 경우, 그 위에서 생성된 요소망, 특히 사각형 요소망의 품질 저하가 심각해 지는 것을 발견할 수 있었다. Fig. 2(b)의 경우 적합 오차 지수만을 고려하였을 때 얻어지는 cluster들의 모습이다. Fig. 2(b)에 보이는 바와 같이 cluster의 경계에 얇은 형상으로 돌출된 형상들이 자주 발견된다.



(a) Original triangle set



(a) Before (b) Merging 1,3 (c) After

Fig. 1 Merging arc in cluster adjacency graph



(b) Only E_{fit} used (c) Use all indices

Fig. 2 Clustering method

따라서 경계 형상을 보다 완만하게 하기 위한 과정이 필요하다. 본 연구에서는 병합 비용 계산 시에 cluster의 경계 형상을 고려할 수 있도록 Sheffer⁽⁷⁾가 제안한 경계 공유 길이비와 접촉 각도비를 계산하여 반영하도록 하였다. 여기에서는 Sheffer⁽⁷⁾가 제안한 내용 중 최소, 최대 제약과 방향성에 관한 항목을 제외한 보다 단순한 형태를 이용하였다.

경계간의 공유 길이비는 (3)과 같이 정의할 수 있다.

$$R_{share} = \max \left\{ \frac{l_{share}}{Perimeter(C_i)}, \frac{l_{share}}{Perimeter(C_j)} \right\} \in [0, 1] \quad (3)$$

l_{share} 는 C_i, C_j 두 cluster의 공유 경계선의 길이이다. 지수값은 1에 가까울수록 형상이 우수하다. Fig. 3에 공유 길이비에 대한 간략한 예를 나타내었다. Fig. 3 좌측의 경우에서는 한 cluster가 다른 cluster에 완전히 포함되었기 때문에 지수값이 1이 된다.

공유 접촉 각도비의 계산은 식 (4)와 같다. 여기서 N 은 두 cluster가 접촉하는 절점 수이며 α, β 는 접촉하는 절점에서의 두 cluster 각각의 내각, ϕ 는 외각이다.

$$R_{angle} = \frac{1}{2\pi N} \sum_i \frac{(\phi_i - \alpha_i) + (\phi_i - \beta_i)}{2} \in [0, 1] \quad (4)$$

Fig. 4에서 두 cluster는 4곳의 절점에서 만나고 있으며, 각 절점에서 내각 α, β 와 1개의 외각 ϕ 가 존재하며 이들을 모두 측정하여 공유 접촉 각도비를 계산하는 것이다.

마지막으로 앞서 계산된 적합 오차 지수와 공유 길이비, 접촉 각도비에 가중치를 적용하여 합산한 값으로 병합 비용을 계산한다.

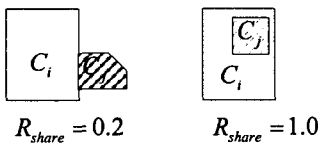


Fig. 3 Ratio of shared boundary length

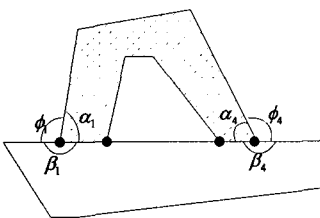


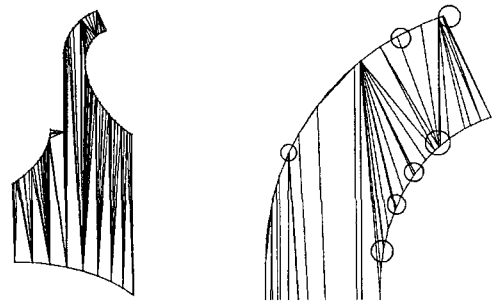
Fig. 4 Contact angle

3. Cluster 경계의 간략화

2장의 과정을 거쳐 얻어진 cluster와 cluster의 대표 평면에 평면 요소망 생성 방법을 적용한다. 그러나 cluster가 가지고 있는 경계 정점들을 그대로 이용하는 것은 바람직하지 않다. STL 파일 모델의 특성상 cluster의 경계 정점들의 간격은 그다지 균일하지 않고 국부적으로 간격의 차이가 심한 것이 일반적이다. 이러한 상태의 절점들을 모두 고려하여 요소망을 생성하게 된다면, 초기에 작은 간격의 요소망 크기를 생성할 수 밖에 없기 때문에 사용자가 원하는 것보다 훨씬 작은 크기의 요소와 과도한 개수의 요소망을 얻을 수 밖에 없게 된다.

위의 Fig. 5(a)는 주어진 cluster의 내부 삼각형과 경계 정점들을 모두 표시한 것이다. 특히 문제가 되는 윗부분을 확대하여 Fig. 5(b)에 나타내었다. Fig. 5(b)에서 원으로 표시한 부분은 2개 이상의 경계 점들이 가까이 몰려있는 것을 나타낸다.

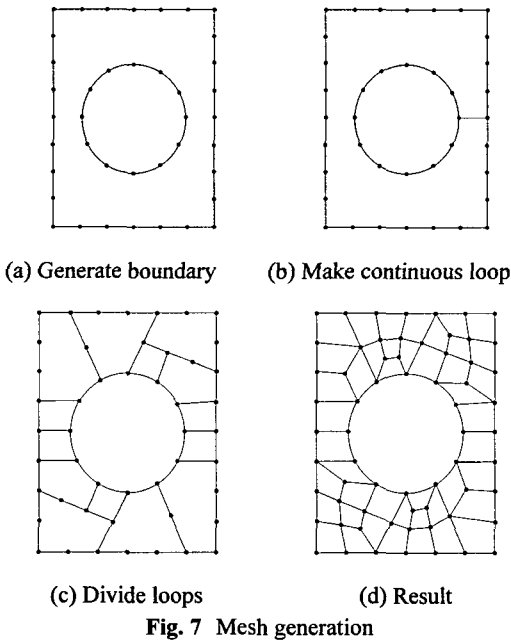
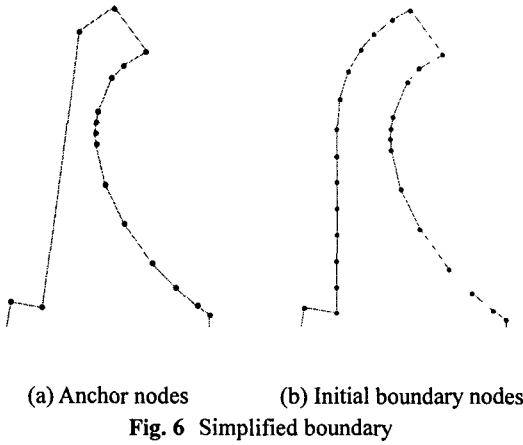
이와 같은 부분에 대한 처리 방안으로서, 초기에 주어진 경계 정점들 중 경계의 형상 특징을 나타낼 수 있는 몇 개의 정점들만 골라내어 사용하였다. 정점들 중 이웃 정점들과의 각도 차이가 30°가 넘는 정점들을 고정 절점으로 사용하고, 경계를 따라서 이전에 결정된 고정 절점과의 누적된 각도 차이가 20°가 넘게 되는 정점들 또한 고정 절점으로 결정되도록 하였다. 여기에서 사용된 각도 값들은 경험적으로 결정된 것이다. 하지만 고정 절점들 사이에 사용자가 지정한 요소 크기에 따라 요소 절점들이 다수 배치되고, 배치된 절점들은 cluster원래의 경계선을 따라 좌표가 보간되어 결정되므로, 이러한 방법으로도 해당 cluster의 경계 표현에는 큰 문제가 없었다. Fig. 5에서의 모델에 대해 Fig. 6(a)에 결정된 고정 절점들을 표시하였다. 알아보기 쉽도록 고정 절점들 사이를 편의상 선으로



(a) Original cluster

(b) Dense boundary region

Fig. 5 Original boundary



로 이어서 표시하였다. Fig. 6(b)에는 사용자가 입력한 초기 요소 크기를 고려하여, 최종적으로 요소망 생성에 쓰일 요소망의 경계 절점들을 표현하였다. 이렇게 결정된 cluster의 경계 절점들은 주변 cluster와 서로 공유된다.

4. 요소망 생성

이 단계에서는 평면과 경계 절점 정보가 주어지므로 이를 이용하여 평면 요소망을 생성할 수 있는 요소망 생성 알고리즘은 어떤 것이라도 이용 가능하다. 본 연구에서는 요소망 생성을 위해

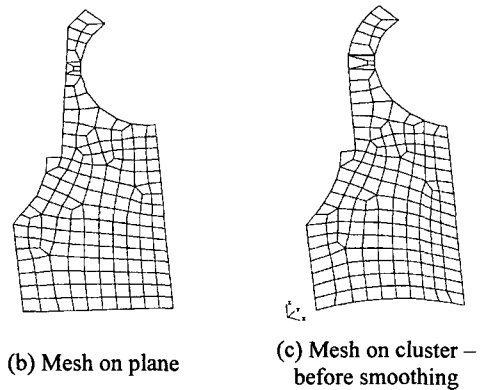
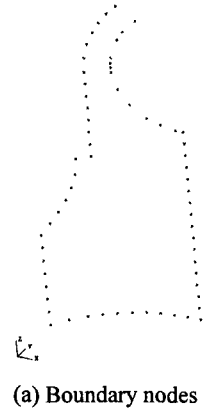


Fig. 8 Mesh process on a cluster

Chae⁽¹¹⁾에서 제시된 방법을 사용하였다. Chae⁽¹¹⁾에서의 입력 모델은 기본적으로 NURBS 곡면 모델이지만, 평면으로 변환한 후 요소망을 생성하는 방법에 해당하므로 본 연구에 적용이 가능하였다. 또한 Chae⁽¹¹⁾의 알고리즘은 삼각형 요소망 뿐만 아니라, 사각형 요소망의 생성도 가능하다는 이점이 있다. 다만 제안된 방법을 이용하여 사각형만으로 이뤄진 요소망을 생성하고자 할 때, 초기 경계 절점 개수가 짝수개 이어야만 한다는 제한 조건이 있다. 조건을 만족시키지 못하면, 중간 중간에 천이 요소로서 적은 개수의 삼각형 요소가 포함되게 된다. 본 연구에서는 초기 절점 개수의 제한 조건을 이용하지 않고 있으므로, 사각형 요소망 생성시 삼각형 요소도 일부 포함된다. Fig. 7에 사용된 평면 요소망 생성방법의 개요를 나타내었다.

먼저 대상 cluster의 대표 평면 위에 간략화 과정을 거친 초기 경계 절점들을 투영시킴으로써 (a)에서와 같이 요소망 생성 영역의 초기 경계 절점들을 구성한다. 그 다음으로 (b)에서와 같이 절점들은 하나의 루프로 구성된다. 이후 미리 규정된

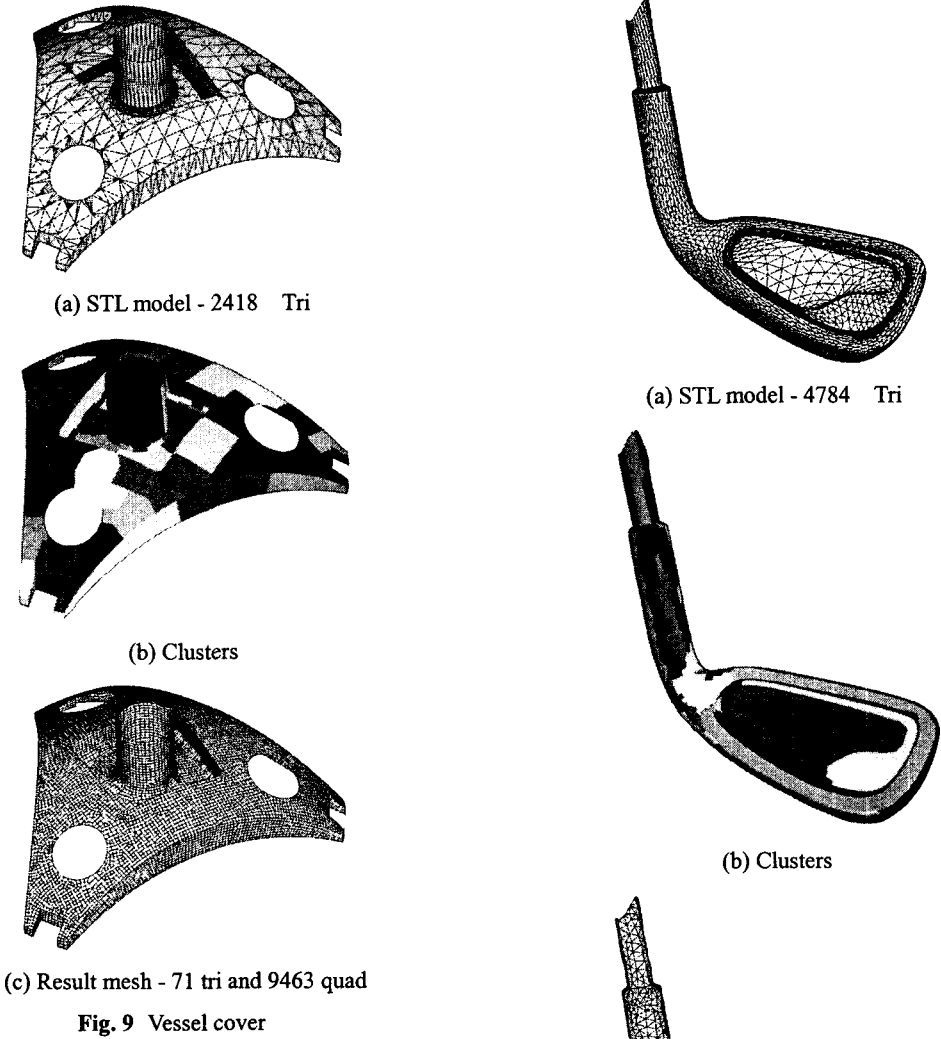


Fig. 9 Vessel cover

Fig. 10 Club head

루프 형상 조건에 따라 루프를 계속 분할해 가면서 최종 요소망을 얻게 된다. 얻어진 요소망의 절점들의 좌표는 해당 cluster의 실제 삼각형 집합으로 투영된다. Cluster 경계 절점들의 좌표는 3 절에서 설명한 바와 같이 미리 계산되어 있으므로 따로 투영작업을 거치지 않는다. Fig. 8에 Fig. 5에서 사용된 cluster의 초기 절점, 평면에서의 요소망 생성 결과 그리고 원래의 cluster에 투영된 요소망 형상을 나타내었다.

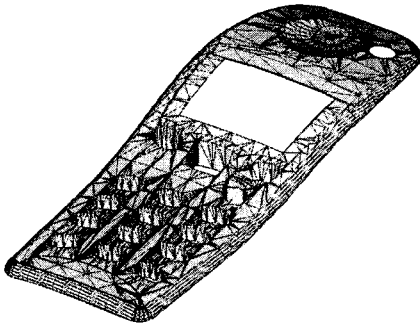
이렇게 생성된 요소망에 대해 품질을 높이기 위해 추가로 평활화 작업을 수행한다. 본 연구에서는 Laplacian 평활화를 적용하였으며 최종 평활화된 절점 좌표 역시 원래의 cluster에 투영된다.

사용자가 설정하는 요소망의 기본 크기와 관련하여 기본 요소 크기가 큰 경우 삼각형 요소중에서 형상비가 좋지 않은 경우도 발생한다. 이런 경

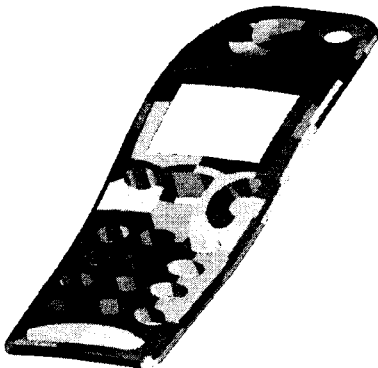
우에는 무리하게 사각형 요소 형상을 유지하지 않고, 두 개의 삼각형으로 분리하였다.

5. 적용 예

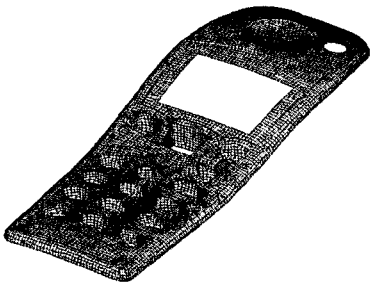
제안된 방법을 기계 부품 모델들에 실제로 적용해보았다. Fig. 9, 10, 11에 각 모델의 초기 모습,



(a) STL model - 4784 Tri



(b) Clusters



(c) Result mesh - 325 tri and 9072 quad

Fig. 11 Phone cover

영역 분류 작업 후의 모습 그리고 최종 요소망 생성 결과를 나타내었다. 첫번째와 세번째 모델은 사각형 요소망을 생성하도록 하였으며, 사면체 요소망 모델 생성에 필요한 삼각형 요소망 생성을 살펴보기 위해 두번째 모델에는 삼각형 요소망만을 생성하도록 하였다. 코드의 최적화가 되어 있지 않고, 시간 측정에 곤란한 측면들이 있지만, 예제에 쓰인 모델에 대해서는 전체 처리 시간은 대략 10여 초 안에 모두 수행되었다.

제안된 방법에서 사용자가 입력하는 인자로는, 허용 가능 최대 적합 오차 E_{max} 값과 사용된 3가지 지수 각각에 대한 가중치 그리고 요소망의 기본 크기 값이다. E_{max} 값을 크게 잡을수록 결과 cluster의 개수가 줄어들게 된다. Cluster의 개수가 줄어들고 각 cluster의 영역이 넓을수록 전체적인 관점에서의 요소망 생성 시간은 줄어들게 된다는 이점이 있다. 그러나 이 경우 사용자 입력 요소망 크기가 큰 경우에는 원래 모델에 투영된 요소망이 부분적으로 왜곡되는 현상이 발생할 가능성이 높다. 실제 여러 모델에 대해 적용해 본 결과 요소망 품질이 나빠질 수 있는 경우는 비교적 큰 E_{max} 값과 큰 기본 요소망 값이 동시에 적용된 경우였다. 여기에 사용된 예제는 모두 E_{max} 값으로서 각 모델의 대각선 길이에 대한 절반 값을 입력하였다. 결과 cluster의 모양을 좀 더 개선하기 위해 가중치 값을 모델별로 바꾸어 적용할 수도 있으나, 여기에서는 적합 오차 지수에 0.5, 공유 길이비와 접촉 각도비에 각각 0.3과 0.2를 모든 모델에 동일하게 적용하였다. 실제 적용 과정에서 확인한 바로는 결과 요소망의 품질은 가중치의 변화에 대해 둔감한 편이었다.

6. 결론

본 연구에서는 기존 연구들에서 제한적으로 다루었던 STL 파일 모델에 대한 유한 요소 생성 방법을 제시하였다. 초기 품질이 나쁠 수 밖에 없는 STL 파일 모델로부터 요소망을 얻기 위해 영역 분류와 경계 간략화 과정을 제안하였다. 이 같은 방법을 통해 일반적인 평면 요소망 알고리즘을 적용할 수 있었으며 삼각형 뿐만 아니라 해석에 널리 쓰이는 사각형 요소망을 생성할 수 있었다.

과정은 주어진 삼각형 집합을 다수의 영역으로 분류하는 작업과 각 영역에 대한 요소망 생성 작업으로 이루어진다. 영역 분류 작업은 cluster의 연결성 그래프를 작성하고, 병합 가능 비용 값을 계산하여 그래프를 병합하는 과정을 통해 이루어진다. 병합 비용 계산은 주로 QEM에 의거한 적합 오차 지수와, 경계의 형상을 고려하기 위한 공유 길이, 접촉 각도비의 계산으로 구성되어 있다. 분류된 영역을 요소망 생성이 용이하도록 경계 절점들을 단순화 시킨 후, 초기 경계 절점을 배치한다. 이후 영역 분할법에 기반한 요소망 생성 방법을 적용하여 최종 요소망 결과를 얻게 된다. 이 과정에서 경험적으로 결정된 몇 가지 결정 식 값들이

사용 되는데 최종 요소망의 품질에 가장 큰 영향을 갖는 것은 사용자 입력 기본 요소 크기 인 것으로 추정되나 이를 좀 더 명확히 하기 위해서는 별도의 영향도 분석 평가 작업이 필요하다. 마지막으로 제시된 방법을 기계 부품 모델에 적용하여 방법의 유효성을 확인하였다.

본 연구에서 제시한 방법을 이용하여 CAD 모델로부터 얻어진 STL 파일 모델에 대해 작업자의 많은 수작업 없이 FEM 해석 모델을 얻을 수 있다. 이는 기존의 CAD 파일로부터 사용자가 직접 요소망을 생성하는 과정에 비해 작업 생산성을 높여줄 것으로 기대된다. 또한 여기에서는 Chae⁽¹¹⁾에서 제시된 방법을 이용하여 평면 요소망을 생성하였으므로 균일한 크기의 요소망을 얻게 하였으나, 여타 다른 요소망 생성 방법을 이용하여 적응적 요소망 또는 anisotropic 특성을 갖는 요소망을 얻을 수도 있을 것이다. 그리고 실제 유한 요소 해석에서는 작업자가 모델의 특정 관심 영역을 더 세분화 시켜서 보는 것이 일반적이므로 영역 분류 이후에 관심 영역에 대한 요소망 크기를 따로 지정할 수 있는 방법을 추가적으로 제공한다면 제시된 방법의 실용성이 더욱 높아질 것으로 예상된다.

참고문헌

- (1) Bechet, E., Cuilliere, J.C. and Trochu, F., 2002, "Generation of a Finite Element MESH from Stereolithography (STL) Files," *Computer Aided Design*, Vol. 34, No.1, pp.1~17.
- (2) Sifri, O., Sheffer, A. and Gotsman, C., 2003, "Geodesic-Based Surface Remeshing," *The Proceedings of the 12th International Meshing Round Table*.
- (3) Frey, P. J., 2000, "About Surface Remeshing," *The Proceedings of the 9th International Meshing Round Table*.
- (4) Owen, S. J., Staten, M. L., Canann, S. A. and Saigal, S., 1999, "Q-MORPH: An Indirect Approach to Advancing Front Quad Meshing," *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol. 44, pp.1317~1340.
- (5) Itoh, T. and Shimada, K., 2002, "Automatic Conversion of Triangular Meshes Into Quadrilateral Meshes with Directionality," *International Journal of CAD/CAM*, Vol.1, No. 1, pp. 11~21.
- (6) Owen, S. J., 2003, "Mesh-Based Geometry," *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol. 58, pp. 375~395.
- (7) Sheffer, A., 2001, "Model Simplification for Meshing Using Face Clustering," *Computer-Aided Design*, Vol.33, No. 13. pp. 925~934.
- (8) Inoue, K., Ioh, T., Yamada, A., Furuhashi, T. and Shimada, K., 1999, "Clustering a Large Number of Faces for 2 Dimensional Mesh Generation," *The Proceedings of the 8th International Meshing Round Table*.
- (9) Garland, M. W. and Heckbert, P. S., 2001, "Hierarchical Face Clustering on Polygonal Surfaces," *Proceedings of the Symposium on Interactive 3D Graphics*, pp. 49~58.
- (10) Park, J. M., Kwon, K. Y., Lee, B. C., and Chae, S. W., 2006, "An Indirect Quadrilateral Mesh Generation Using Background Triangular Elements," *Proceedings of KSME Spring Annual Meeting*, pp. 199~193.
- (11) Chae, S. W. and Kwon, K. Y., 2001, "Quadrilateral Mesh Generation on Trimmed NURBS Surfaces," *KSME International Journal*, Vol. 15, No. 5, pp. 592~601.