

클러스터링을 이용한 표면 유한 요소망의 재구성 FE Surface Mesh Reconstruction by Using Clustering

*조남정¹, 박정민², 채수원³

*N. J. Cho¹, J. M. Park², #S. W. Chae(swchae.korea.ac.kr)³

¹ 고려대학교 기계공학과 대학원, ² 한국과학기술원 기계공학과, ³ 고려대학교 기계공학과

Key words : Face Clustering, Surface Meshing Algorithm

1. 서론

일반적으로 CAD 시스템과 CAE 시스템 사이 모델변환을 위해 IGES 파일 포맷이 많이 사용된다. 그러나 IGES 파일의 경우 각 CAD 시스템 고유의 솔리드 모델링 기법에 따라 모델링된 파일을 변환을 하는 과정에서 원래 데이터에는 없던 틈새나 중첩 현상이 종종 나타나게 되는데, 이로 인하여 요소망 생성에 문제가 될 수 있다. 이런 문제들로 인하여 상용프로그램에서 IGES 파일을 불러 들인 후에 메뉴얼 작업이 필요한 경우가 일반적이다. 이에 비해 STL 파일로 변환하면 IGES 파일 변환의 문제점인 틈새나 중첩 등의 문제가 없다는 것이 장점이다. 그러나 물체의 형상 정의에 사용되었던 해석적인 정보를 포함하지 않고 물체 형상을 대체한 삼각형 형상 품질이 매우 떨어지기 때문에 삼각형의 품질을 개선 시키는 작업이 필요하게 된다. 본 논문에서는 STL 파일 모델을 이용하여 유한요소 해석에 사용될 수 있을 정도의 품질을 가지는 요소망을 얻는 방법을 제안 하였다. STL 파일 모델과 같이 형상이 좋지 않는 삼각형 집합을 입력하여 FEM 모델을 만들고자 하는 시도와 연구는 다양하게 이루어져 왔다. 이들은 대체로 삼각형 요소망만을 다루거나 평면 문제만을 다루는 등의 부분적인 해결책들을 제시하고 있다.[1-4] 본 논문에서는 이산 다각형 집합을 입력으로 요소망을 생성하고자 할 때, 초기 품질에 영향을 받지 않고 삼각형, 사각형 요소망 생성이 모두 가능한 방법을 개발하였다.

2. 본론

본 논문에서 제안한 STL 파일로부터 유한 요소망을 재구성하기 위한 순서는 다음과 같은 방법으로 이루어진다.

- (1) 입력 삼각형 집합으로부터 클러스터, Arc 로 이뤄진 그래프 구조 작성
- (2) 반복적으로 Arc contraction 수행
- (3) 생성된 클러스터들을 이웃한 클러스터와 비교하여 작은 면적을 가진 경우 이웃한 클러스터와 병합
- (4) 클러스터 경계의 각이 좁은 부분을 없애기 위해 초기 삼각형을 이웃한 클러스터로 병합
- (5) 각 클러스터 마다 적합한 대표 평면을 구한 후 요소망 생성
- (6) 요소망을 다시 해당 클러스터에 투영하여 결과 요소망 생성

STL 파일 모델은 형식의 특징상 위상적으로 동일한 점점의 좌표가 여러 번 기록되어 있으므로, 동일한 점점에 대한 병합 작업이 필요하다. 또한 본 논문에서는 입력 모델로서 2 manifold 구조, 즉 삼각형의 절점은 다른 삼각형의 절점에서만 만나는 모델만 고려하고 있으므로 이에 대한 검사도 수행하도록 해야 한다. 이러한 과정이 끝난 후, 삼각형들을 조건에 따라 다수의 집합으로 분류하는 면(face) 클러스터링 작업을 수행한다. 각각의 삼각형을 클러스터 단위로 만든 인접성 그래프(adjacency graph)를 작성한다. 그래프의 각 절점(node)은 클러스터를 의미하며, 그래프의 arc 는 각 클러스터와 주위와의 연결 관계를 뜻한다. 각 arc 는

인접한 두 클러스터의 축약 비용(contraction cost)을 계산하여 저장하고 있다. Fig.1 은 연결성 그래프의 축약과정의 예를 간단히 나타내고있다. 축약비용 계산은 Garland, Heckbert[5]의 Quadric Error Metric(QEM)방법을 사용하였다.

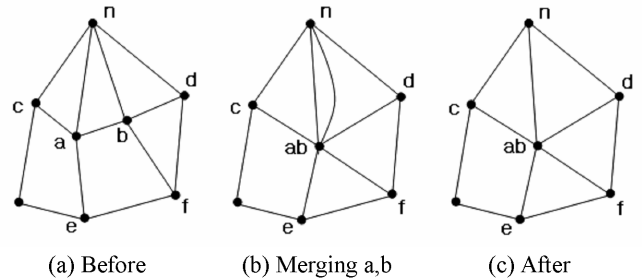


Fig. 1 Arc contraction

2.1 적합 오차 지수의 계산

각 클러스터에 포함된 k 개의 정점들과 한 평면과의 오차 값은 아래 식과 같이, 거리 제곱 합(squared distance sum)의 평균으로 나타낼 수 있다.

$$E_{fit} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^k (\mathbf{n}^T \mathbf{v}_i + d)^2$$

$$= \frac{1}{K} \sum_{i=1}^k \mathbf{n}^T (\mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^T) \mathbf{n} + 2d \mathbf{n}^T \mathbf{v}_i + d^2 \quad (1)$$

여기서 \mathbf{n} , d 는 해당 클러스터에 가장 적합한 평면 식을 나타내는 단위 법선과 평면 거리상수이며, \mathbf{v} 는 정점들이다. i 번째 정점의 Fit Quadric P_i 는 다음과 같이 정의된다.

$$P_i = (\mathbf{A}_i, \mathbf{b}_i, c_i) = (\mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^T, \mathbf{v}_i, 1)$$

$$P_i(\mathbf{n}, d) = \mathbf{n}^T (\mathbf{A}_i) \mathbf{n} + 2\mathbf{b}_i^T d \mathbf{n} + c_i d^2 \quad (2)$$

식(1)과 (2)에 의해 오차 값이 사용자가 설정할 수 있는 E_{max} 값에 도달하면 0 이 되도록 상대 비로 바꾸어 적합 오차 지수 값으로 저장한다. 이 계산과정에서는 클러스터의 최적 대표 평면이 필요하다. 따라서 정점 집합이 주어졌을 때 이에 대한 최적의 평면을 찾기 위해 본 연구에서는 주 성분 분석(principle component analysis) 방법을 이용하였다.

$$\mathbf{M} = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (\mathbf{v}_i - \bar{\mathbf{v}})(\mathbf{v}_i - \bar{\mathbf{v}})^T \quad (3)$$

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

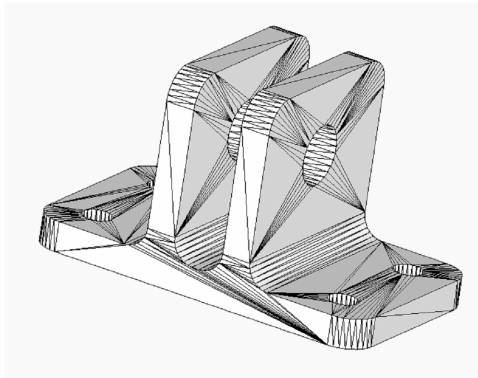
STL 파일은 초기에 조약한 삼각형을 가지고 있는 경우가 대부분이다. 이러한 삼각형으로 이루어진 클러스터의 경우 작은 면적을 가지고 있어 주변 클러스터와 비교하여 이웃한 클러스터와 합친다. 위의 작업이 끝난 후 클러스터의 경계에 각이 좁은 부분을 없애기 위해 이웃한 클러스터로 초기 삼각형을 넘겨 준다.

2.2 클러스터 경계의 간략화와 요소망 생성

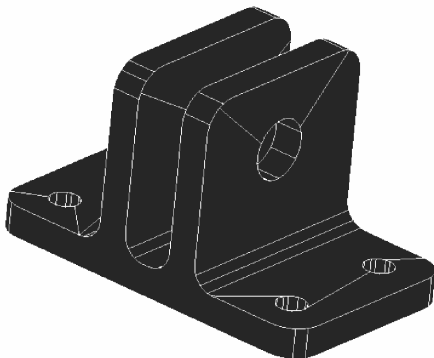
앞 장의 결과로 얻어진 클러스터와 클러스터의 대표 평면에 평면 요소망 생성 방법을 적용하였다. 그러나 클러스터가 가지고 있는 경계 정점들을 그대로 이용하는 것은 바람직하지 않다. STL 파일 모델의 특성상 클러스터의 경계 정점들의 간격은 그다지 균일하지 않고 국부적으로 간격의 차이가 심한 것이 일반적이다. 이와 같은 부분에 대한 처리 방안으로서, 초기에 주어진 경계 정점들 중 경계의 형상 특징을 나타낼 수 있는 몇 개의 정점들만 골라내어 사용하였다. 하지만 고정 절점들 사이에 사용자가 지정한 요소 크기에 따라 요소 절점들이 다수 배치되고, 배치된 절점들은 클러스터 원래의 경계선을 따라 좌표가 보간되어 결정되므로, 이러한 방법으로도 해당 클러스터의 경계 표현에는 큰 문제가 없었다. 요소망 생성을 위해 본 연구에서는 Chae[6]의 영역 분할에 기반한 요소망 생성 방법을 이용하였다. 이 방법은 평면 영역에 대해서 적용 가능하며 일반적인 곡면에 대해 이 방법을 적용하기 위해서는 적절한 변환 평면 또는 매개변수 평면이 필요하다. 각 클러스터 별로 요소망을 생성 할 수 있는 변환 평면에 요소망을 생성한 후 이를 다시 원래 공간에 투영시켜서 요소망을 생성하게 된다.

3. 적용 예

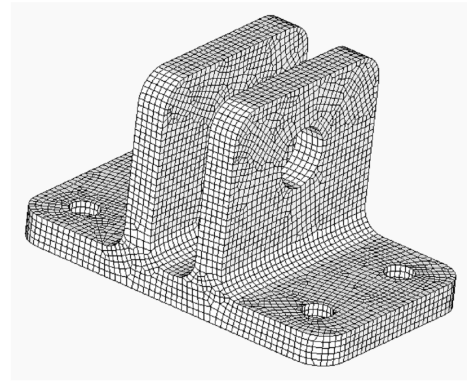
본 연구에서 제안한 방법으로 실제 모델에 적용해 보았다. 사용된 모델은 기계 부품인 *clevis* 모델이다. 모델은 493 개의 정점, 1509 개의 모서리 그리고 1006 개의 삼각형으로 이루어진 STL 파일 형식으로 되어 있다. Fig.2는 초기에 입력된 삼각형 모델, 구분된 영역이 표현된 클러스터링 결과 그리고 요소망이 생성된 결과를 각각 보여주고 있다. Fig.2 에서 보는 바와 같이 클러스터링을 이용함으로써 해석에 적합한 정도의 정확도를 가진 유한 요소망을 효율적으로 재구성할 수 있음을 알 수 있다.



(a) Initial STL file(1006 triangulars)



(b) Clustering result (109 clusters)



(c) Mesh reconstruction result (14 tri, 9648 quad)

Fig.2 A clevis model

4. 결론

본 연구에서는 STL 파일과 같이 개개의 형상이 좋지 않은 삼각형 집합 모델로부터 유한 요소 해석에 사용될 수 있는 요소망 생성 할 수 있는 방법을 제안하였다. QEM에 기반한 형상 오차 지수와 형상이 좋지 않는 초기 삼각형으로 인하여 생긴 좁은 각을 가진 클러스터와 면적이 작은 클러스터를 이웃한 클러스터와 병합 하는 방법을 이용하여 조금 더 경제적인 클러스터를 생성하였다. 생성된 클러스터에 영역 분할법에 기반한 요소망 생성 알고리즘을 적용하여 요소망 모델을 얻어낼 수 있었다.

후기

이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R11-2007-028-00000-0)

참고문헌

1. Bechet, E., Cuilliere, J.C. and Trochu, F., "Generation of a finite Element MESH from stereolithography (STL) files", *Computer Aided Design*, **34**, 1-17, 2002.
2. Sifri, O., Sheffer, A. and Gotsman, C., "Geodesic-based Surface Remeshing", *The Proceedings of the 12th International meshing round table*, 1988.
3. Frey, P. J., *Geodesic-based Surface Remeshing*, *The Proceedings of the 9th International meshing round table*, 2000.
4. Owen, S. J., Staten, M. L., Canann, S. A. and Saigal, S., "Q-MORPH: An Indirect Approach to Advancing Front Quad Meshing" *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, 1317-1340, 1999.
5. Garland, M. W. and Heckbert, P. S., 2001, "Hierarchical Face Clustering on Polygonal Surfaces", *Proceedings of the Symposium on Interactive 3D Graphics*, 49-58, 2001.
6. Chae, S. W. and Kwon, K. Y., "Quadrilateral Mesh Generation on Trimmed NURBS Surfaces", *KSME International Journal*, **15**, 592-601, 2001.