

# 유한요소해석을 위한 CAD모델 단순화

글 이한민 | 한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부 | hmlee@kimrn.re.kr

## 1. 머릿말

3차원 CAD(Computer Aided Design) 시스템에서 만들어진 형상모델은 대개 CAE(Computer Aided Engineering) 해석 과정에 불필요한 세세하고 복잡한 형상을 포함하고 있기 때문에 이를 단순화하는 작업이 필요하다. 복잡한 CAD 모델의 경우 지나치게 많은 메쉬가 생성되거나 생성된 메쉬의 품질이 좋지 않아 해석에 소요되는 시간이 너무 많이 증가되거나 해석결과에 직접적인 영향을 주게 된다. 모델 단순화나 메쉬 생성 등의 해석 전처리 작업은 전체 해석 시간의 상당부분을 차지하고 있기 때문에 이를 자동화하는 기술이 요구되고 있다. 본 논문에서는 CAD 모델로부터 유한요소해석을 위한 단순화된 모델을 생성하는 연구에 대해서 살펴보고, 그 중의 하나인 중립면 모델 생성 방법에 대해서 알아본다.

2장에서는 솔리드 모델로부터 해석 모델을 생성하기 위해 필요한 단순화 작업들에 대해서 간략히 살펴보고, 3장에서는 이러한 단순화 작업들 중 하나인 중립면 모델 생성 기법에 대해서 구체적으로 알아본다. 4장에서는 향후 연구 방향을 진단해보며 끝맺음을 한다.

## 2. 솔리드 모델로부터 해석 모델 변환

솔리드 모델로부터 해석 모델을 생성하는 과정에는

세부형상 제거(detail removal), 차원 감소(dimensional reduction), 대칭성 인식(symmetry recognition)과 같은 작업들이 있다<sup>1)</sup>. 세부형상 제거란 해석 결과에 영향을 미치지 않는 작거나 복잡한 형상을 삭제하여 모델을 단순화하는 작업을 말한다. 차원 감소란 두께가 얇은 솔리드 모델(3D)을 두께 정보를 지닌 셸 모델(2D)로 변환하거나, 길고 얇은 부위의 형상(3D 또는 2D)을 단면 정보를 지닌 빔 모델(1D)로 변환하여 더 낮은 차원의 단순화된 모델을 생성하는 것을 말한다. 한편, 기하적으로 대칭인 형상이 하중경계조건에 대해서도 대칭인 경우, 대칭인 형상 중 일부 형상에 대해서만 해석을 수행하므로 솔리드 모델로부터 대칭성을 인식하는 작업이 필요하다.

## 3. 중립면 모델 생성

본 장에서는 2장에서 살펴본 모델 단순화 작업 중 차원 감소 과정에 해당하는 중립면 모델 생성에 대해서 알아본다. 중립면 모델 생성은 두께가 얇은 솔리드 모델에 대하여 중립면을 추출하여 셸 모델로 변환시키는 작업이다. 솔리드 모델로부터 중립면 모델을 생성하는 이유는 해석 결과의 신뢰도를 잃지 않으면서 유한요소모델의 복잡도를 줄여주기 때문에 해석 시간을 단축할 수 있기 때문이다.

그림 1은 솔리드 모델로부터 중립면 모델을 생성하

는 일반적인 순서를 보여준다. 모델 분할 단계는 솔리드로 해석할 부분과 중립면으로 변환하여 해석할 부분을 나누거나, 중립면 추출을 보다 쉽게 하기 위해서 여러 개의 단순한 모델로 분할하는 과정이다. 중립면 추출 단계에서는 중립면으로 치환될 face-pair를 탐색하고 각각의 face-pair에 해당하는 중립면을 생성한다. 중립면 연결 단계는 따로 생성된 중립면들을 서로 연결하거나, 모델 분할 단계에서 나누어진 솔리드와 중립면 추출 단계에서 생성된 중립면을 서로 연결하는 과정이다.

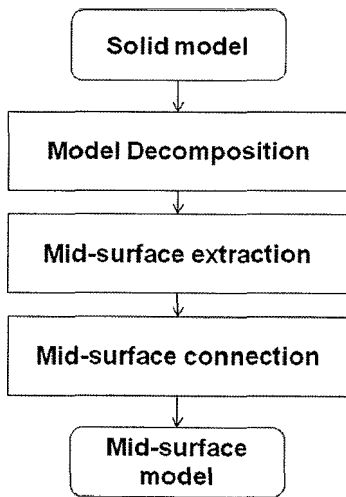


그림 1. General procedure of mid-surface model generation

상의 모든 오목한 엣지를 검색한다. 오목한 엣지들이 검색되면, 이들을 공유하고 있는 면들을 찾고, 이들 면들을 확장한다. 이렇게 확장된 면들을 원래의 솔리드 모델과 교차시키면 비다양체 모델이 생성되고, 이 비다양체 모델로부터 셀들을 생성한다. 생성된 셀들을 맥시말 볼륨의 조건에 맞게 셀들을 병합하여 맥시말 볼륨을 생성하게 된다. 그림 2는 맥시말 볼륨 분해 예를 보여준다. 이와 같이 분해된 맥시말 볼륨 각각에 대해 중립면 추출을 수행하고 서로 연결함으로써 중립면 모델을 생성한다.

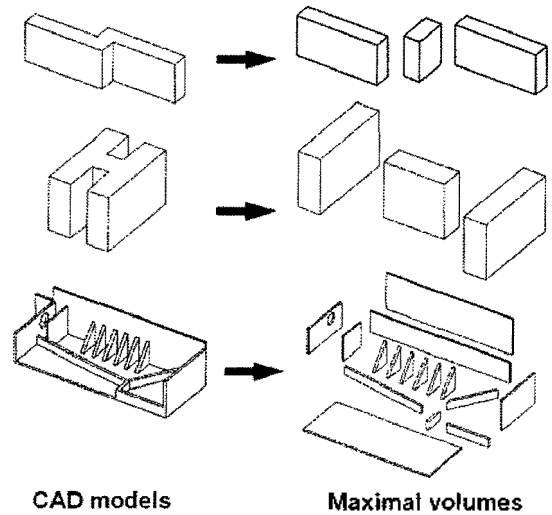


그림 2. Examples of maximal volume decomposition<sup>[12]</sup>

### 3.1 모델 분할

모델 분할 방법에는 맥시말 볼륨 분해방법<sup>[12]</sup>, ToolEdge를 이용한 분할방법<sup>[6]</sup>, CLoop을 이용한 분할방법<sup>[8]</sup> 등이 있다.

맥시말 볼륨 분해방법은 하나의 솔리드 모델을 여러 개의 단순한 모델로 나눔으로써 중립면 추출을 보다 용이하게 한다. 먼저 분해하고자 하는 솔리드 모델

ToolEdge를 이용한 분할 방법은 ToolEdge를 기준으로 모델을 분할함으로써 중립면으로 추출할 부분과 솔리드로 남겨둘 부분을 나누는 방법이다. ToolEdge란 이러한 분할의 기준이 되는 모서리를 말하는데, face-pair와 side-face에 해당하지 않는 면에 포함된 오목한 모서리 중 face-pair와 공유하는 모서리를 말한다. 그림 3과 같이 face-pair와 side-face를 탐색한 뒤, 나머

지 면에서 ToolEdge를 검색하면 이를 기준으로 모델을 분할한다.

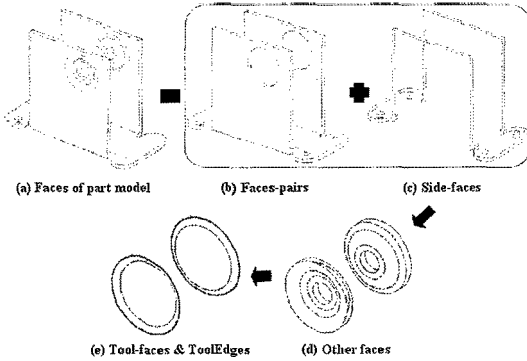


그림 3. ToolEdge identification process [9]

CLoop란 같은 볼록도(convexity)를 가진 연결된 에지들의 집합을 말한다. CLoop을 이용한 분할 방법은 솔리드 모델로부터 CLoop을 찾고 이들을 서로 합치고 교차시켜 분할자(separator)를 생성하여 이를 기준으로 모델을 분할하는 방법이다. 그림 4는 CLoop을 이용한 모델 분할 과정을 나타낸다.

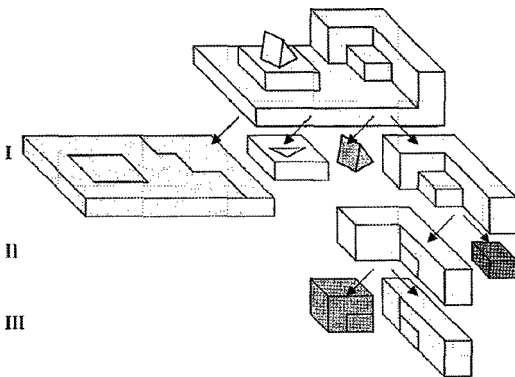


그림 4. Decomposition using CLoop [9]

## 3.2 중립면 추출

중립면 추출 단계는 크게 face-pair 탐색 단계와 중립면 생성 단계로 나눌 수 있다.

일반적인 face-pair 탐색 방법은 두 면이 face-pair가 되기 위한 조건으로 평행 조건, 두께 조건, 교차 조건 등을 사용한다[4,10]. 평행 조건에서는 두 면의 법선 벡터가 서로 평행하거나 사잇각이 사용자 입력 각보다 작아야 하고, 두께 조건에서는 두 면간의 거리가 사용자 입력 두께보다 작아야 하며, 교차 조건에서는 한 면을 다른 면에 투영했을 때 서로 교차하는 면이 존재해야 한다. 그림 5는 두 면 사이의 평행 조건과 두께 조건을 통해 face-pair 검사를 수행하는 그림이다.

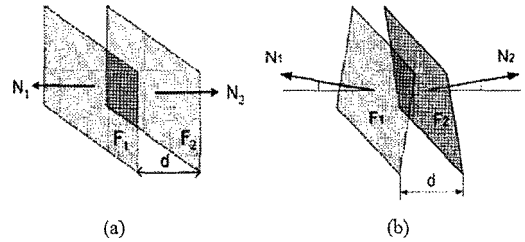


그림 5. Parallel and thickness check. (a) parallel pair, (b) draft pair [10]

점진적인 face-pair 탐색 방법은 두께면을 먼저 찾고 두께면의 edge-pair를 기준으로 점진적으로 face-pair를 찾아나가는 방법이다[11]. 입력 솔리드 모델이 얇은 판(sheet)을 가공하여 만든 형상이라고 가정하면, 두께면은 판재의 두께 부위에 해당하는 면이다. 두께면의 경계를 이루는 변들 중 서로 인접하지 않으면서 거리가 가까운 두 변은 edge-pair로 등록된다. 두께면 탐색 과정에서는 MAT(Medial Axis Transform)[12]를 이용하여 솔리드를 구성하는 면들 중 두께면을 찾고 각 두께면의 edge pair 리스트를 생성한다. 그림 6은 MAT 방법을 통해 두께면 여부를 판단하는 과정을 보여준다.

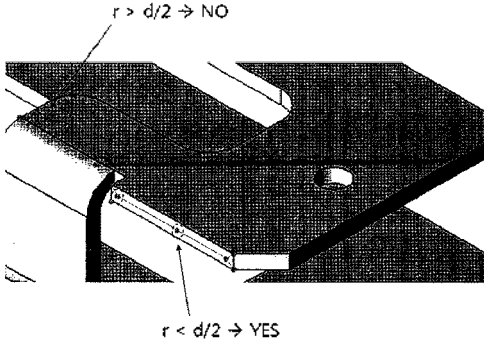


그림 6. Lateral face identification based on MAT

Face-pair 탐색 과정에서는 두께면의 edge-pair를 통해 두께면과 연결된 솔리드의 두 면을 찾아 거리 계산을 통해 face-pair 검사를 수행한다. 선택된 두 면이 face pair로 판단되면 두 면을 구성하는 변들간의 거리 계산을 통해 두 면에 대한 edge-pair 리스트를 생성한다. 이렇게 face pair로 등록된 두 면으로부터 그들의 edge pair를 통해 연결된 또 다른 두 면을 찾아서 face pair 검사를 수행하고, 위와 같은 과정을 face

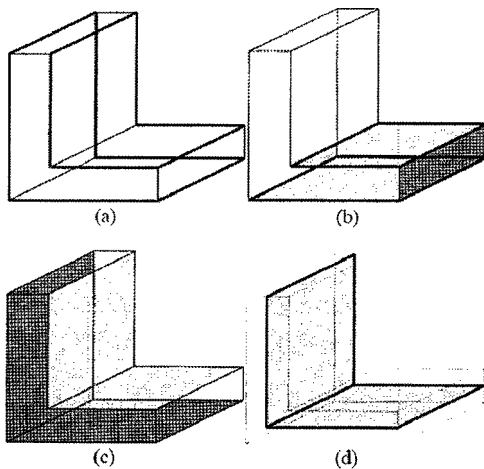


그림 7. Incremental search for face-pairs<sup>[11]</sup>

pair가 더 이상 발견되지 않을 때까지 반복적으로 수행하여 모든 face pair를 찾는다. 그림 7은 위와 같은 방법으로 face-pair를 점진적으로 탐색하는 과정을 나타낸다.

### 3.3 중립면 연결

중립면을 연결하기 위해서는 두 중립면을 기준이 되는 변을 따라 확장하여 서로 교차시킨 후, 불필요한 부분을 제거함으로써 서로 연결된 중립면 모델을 생성한다<sup>[4]</sup>. 그림 8은 이와 같은 방법을 이용한 세가지 중립면 연결 타입을 나타낸다.

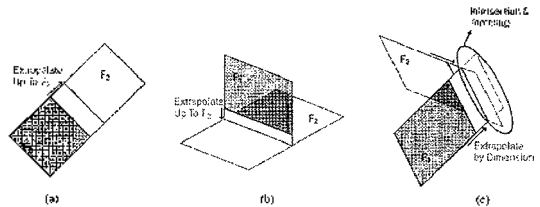


그림 8. Extending and stitching operation<sup>[10]</sup>

한편, 그래프를 이용하여 중립면 간에 연결 기준이 되는 변을 찾는 연구가 수행되었다<sup>[8]</sup>.

입력된 솔리드 모델의 면의 인접 관계에 따라 FAG(face adjacency graph)를 생성하고, 쌍을 이루는 면이 검색되면 FAG에 면의 쌍(pair) 정보를 추가한 FAPG(face adjacency & pair graph)를 생성한다. Face-pair로부터 중립면이 생성되면, face-pair에 속하는 변과 중립면에 속하는 변 사이의 매핑 관계를 찾아서 PMMG(pair face & mid-surface mapping graph)를 생성한다. PMMG에는 입력 솔리드에서 어떤 면들이 서로 쌍을 이루는지에 대한 정보와 쌍을 이루는 면들 중, 어떤 두 면이 어떤 변을 공유하며 서로 연결되어 있는지에 대한 정보, 쌍을 이루는 면의 어떤 변이 그들

로부터 생성된 중립면 조각의 어떤 면에 대응되는지에 대한 정보를 담고 있다. 솔리드 상에서 두 면이 서로 연결되어 있으면 그 면들로부터 생성된 중립면도 서로 연결되어야 하며, 두 면을 연결시키는 변으로부터 생성된 중립면 조각의 변은 서로 연결되어 하나의 변으로 만들어져야 한다. 이를 위해 PMMG의 솔리드 면들간의 인접 관계와 부모 면과 중립면과의 대응 관

계를 이용하여 중립면 조각의 연결 작업을 수행하게 되는 것이다. 그림 9는 PMMG를 이용하여 중립면 사이에 연결되어야 하는 변을 찾고 이를 기준으로 중립면을 연결하는 과정을 나타낸다.

## 4. 맺음 말

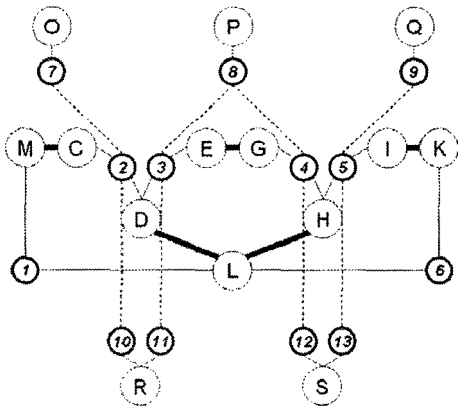
본 논문에서는 CAD 모델로부터 유한요소해석을 위한 단순화된 모델을 생성하는 연구에 대해서 살펴보았고, 그 중의 하나인 중립면 모델 생성 방법에 대해서 각 단계 별로 기술적인 방법을 알아보았다.

하드웨어와 컴퓨팅 기술의 발전으로 3차원 CAD 모델로부터 직접 3차원 요소망을 생성하여 해석을 수행하기도 하지만, 컴퓨터 성능이 높아질수록 해석 대상체도 더욱 커지고 복잡해지므로 유한요소해석을 위한 CAD 모델 단순화 작업은 간과할 수 없는 중요한 과정이다. 특히 얇은 솔리드 모델은 3차원 요소망을 이용하였을 때 해석의 효율성은 물론 정확성에 있어서도 문제가 발생할 수 있으므로 중립면 추출이 꼭 필요하다.

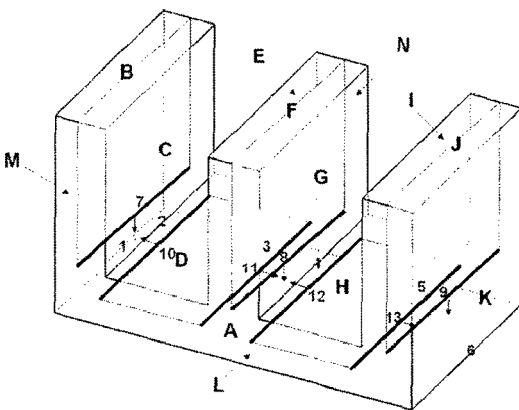
지금까지의 중립면 추출 연구는 평면과 같은 단순한 형상에 대해서 주로 연구가 이루어져왔다. 향후에는 복잡한 곡면 형상에 대한 중립면 추출, 중립면 모델과 솔리드 모델 간의 연결 등에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

## 참고문헌

1. Blum H., A Transformation for Extracting New Descriptors of Shape, Models for the Perception of Speech and Visual Forms, MIT Press, Cambridge, MA, pp.362~380, 1967.
2. Armstrong, C. G., "Modelling Requirements for Finite-Element Analysis", Computer-Aided Design, Vol. 26, No.7, pp.573~578, 1994.
3. Sakuri, 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.
4. Rezayat, M., "Midsurface abstraction from 3D solid models:



(a)



(b)

그림 9. (a) Pair face and mid-surface mapping graph, (b) connecting mid-surfaces using the graph [8]

〈특집 1〉 유한요소해석을 위한 CAD모델 단순화 · 이한민

- general theory and applications”, *Computer-Aided Design*, Vol.28, No.11, pp.905-915, 1998.
5. Lu, Y., Gadh, R. and Tautges, T. J., “Feature based hex meshing methodology: feature recognition and volume decomposition”, *Computer-Aided Design*, Vol.33, pp.221-232, 2001.
  6. 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, pp.1357-1369, 2004.
  7. Lee, S. H., “A CAD-CAE Integration Approach Using Feature-Based Multi-Resolution and Multi-Abstraction Modelling Techniques”, *Computer-Aided Design*, Vol. 37, pp. 941~955, 2005.
  8. 이한민, 남용윤, 이종원, 박성환, 김은기, 구진영, “유한요소 해석을 위한 중립면 자동 추출”, 2006 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp.176~181, 2006.
  9. 김민철, 이권우, 김성찬, “다중해상도 알고리즘을 이용한 자동 해석모델 생성”, *한국CAD/CAM 학회 논문집*, 제11권, 제3호, pp.172~182, 2006.
  10. Sheen, D., Son, T., Ryu, C., Lee, S. H. and Lee, K., “Dimension Reduction of Solid Models by Midsurface Generation”, *International Journal of CAD/CAM*, Vol. 7, No. 1, pp. 71-80, 2007.
  11. 이한민, 남용윤, 한순홍, “중립면 생성을 위한 효율적인 Face Pair 탐색법”, 2008 한국 CAD/CAM학회 학술발표회 논문집, pp.427-431, 2008.
  12. 우윤환, 주창업, “최대볼륨분해 방법을 이용한 중립면 모델의 자동생성”, *한국 CAD/CAM학회 논문집*, 제 14권, 제 5호, pp.297-305, 2009.