

셸 구조물에서 육면체 요소망의 자동 생성

권기연*, 이병채**, 채수원***

Automatic Generation of Hexahedral Meshes in Shell Structures

Kwon, K. Y.*, Lee, B. C.** and Chae, S. W.***

ABSTRACT

This paper describes hexahedral mesh generation for various shell structures, such as automobile bodies, plastic injection mold components and sheet metal parts by using chordal surfaces. After generating one-layered tetrahedral mesh by an advancing front algorithm, the chordal surfaces are constructed by cutting of tetrahedral elements. Since the choral surfaces are composed of tri/quad elements with poor quality, they are transformed into quadrilateral elements with good quality. Hexahedral elements are then generated by offsetting these quadrilateral elements. The boundary nodes of hexahedral elements are generated on the outer surfaces of the original shell structures. Sample models including non-uniform thickness have been tested to validate the proposed algorithm.

Key words : CAT(Chordal Axis Transform), Hexahedron, Offset

1. 서 론

일반적으로 CAD 시스템에서 솔리드 모델링이 셸 모델링보다 편리하여 자동차 바디, 사출성형 및 판금 제품 등과 같이 두께가 얇은 제품이라도 솔리드로 모델링하게 된다. 사면체 요소망 생성기법은 복잡한 형상에 대해서 일반적으로 적용가능 하도록 많은 연구가 진행되어 있어 이러한 형상에 많이 사용되고 있다. 유한요소 해석에서 요소의 품질 및 종류는 해석 결과에 많은 영향을 미치고 있으며, 정확한 해석결과를 많은 시간을 소요하지 않고 얻을 필요가 있다. 사면체 요소는 셸 및 육면체 요소보다 해석 결과가 부정확하여 더 정확한 해석결과를 얻기 위해서는 많은 수의 요소를 필요로하고, 이에 따라 오랜 시간의 해석 과정이 요구된다. 반면에 셸 및 육면체 요소는 적은 수의 요소를 가지고 사면체 요소보다 더 정확한 해석 결과를 얻을 수 있어 많이 선호되고 있다. 그러나 유한 요소 모델링에서 셸 요소는 단면특성에서 두께 정

보를 참조하여 모델이 균일한 두께를 가지고 있지 않을 경우 이를 모두 각 요소에 반영해주는 작업이 필요해 사용자의 노력이 많이 소요된다. 이에 반해 솔리드 요소는 요소 자체가 모든 정보를 가지고 있어 별도로 단면특성을 입력할 필요가 없다. 해석의 정확성을 높이고 유한요소 모델링을 편리하게 하기 위해서는 육면체 요소가 적합하고, 이를 자동으로 생성시키는 방법이 필요하다.

얇은 두께를 가지는 형상에서 셸 요소를 생성하기 위해서는 솔리드로부터 중립면(mid surface)을 추출하는 것이 필요하고, 육면체 요소는 셸 요소를 엮어서 생성하거나, 영역을 분할하여 스윙핑 방법을 이용하여 생성한다.

솔리드로부터 가운데 면을 생성하는 것은 MAT (medial axis transform) 용어로 사용되며 1967년 Blum에 의해 제안되었다^[1]. 이는 형상의 내부에 최대 크기의 원(2D) 또는 구(3D)가 굴러다니는 중심 자취로써 MAT가 표현된다. 특히 Prasad는 3D 형상의 골격을 표현하기 위해 삼각형 요소의 중심을 잇는 CAT (chordal axis transform)을 제안하였고^[2], Quadros^[3]는 얇은 형상을 가지는 두께에 육면체 요소를 생성하기 위해 CAT를 이용하였고(Fig. 1), Kwon^[4]은 이러한 형상에 CAT를 이용하여 셸 요소망을 생성하였다.

*교신저자, 학생회원, 한국과학기술원 기계공학과

**비회원, 한국과학기술원 기계공학과

***중신회원, 고려대학교 기계공학과

- 논문투고일: 2005. 02. 07

- 심사완료일: 2005. 09. 26

Quadros는 사면체 요소의 절단면을 중립면(chordal surface)으로 이용하고, 생성된 삼각형/사각형 요소를 양질의 사각형 요소로 변환한 후 이를 읍셋시켜 균일한 두께를 가지는 형상에 대해서 육면체 요소를 생성하였다. 구조물에 육면체 요소만을 생성시키는 방법은 스위핑 및 읍셋을 이용하여 2.5차원 입체에 적용시키는 방법과 일반적인 형상에 적용시키는 4가지 방법 (1) grid-based⁵⁾, 2) medial surface⁶⁾, 3) plating⁷⁾, 4) whisker weaving⁸⁾)으로 나눌 수 있다.

본 연구에서는 CAT를 기본으로하여 얇은 두께를 가지는 형상에 중립면을 생성하고, 이의 품질을 개선시켜 읍셋 방법을 이용하여 균일하지 않은 두께를 가지는 얇은 형상에 육면체 요소를 생성시킬 수 있도록 하였다.

2. 개요

솔리드 형상에 셀 요소 및 육면체 요소를 생성하기 위해 Quadros가 제안한 방법을 기본으로 사용하였다. 얇은 두께를 가지는 형상에서 기본적인 용어는 Fig. 1과 같으며 상/하위 곡면(top/bottom surface) 및 측면 곡면(lateral surface)으로 분류된다. 여기서 측면 곡면은 상하위 곡면에 비해 상대적으로 면적이 좁은 영역을 나타내며 구(sphere)와 같은 형상에서는 측면 곡면이 분류되지 않아 본 연구의 알고리즘이 적용 불가능하다. 또한 초기 입력으로는 삼각형 요소를 사용하였는데(Fig. 2(a)), 측면으로 분류되는 곡면에는 내부 절점이 존재해서는 안된다.

CST에 의해 중립면을 생성하는 방법은 다음과 같다.

1. Top/Bottom/Lateral 곡면을 분류한다.

사면체를 절단해서 중립면을 구성하게 되는데, 어떤 방향으로 절단해야할지 기준을 정하는 것이 필요하다. 그래서 초기작업으로 상/하위/측면 곡면을 분류하게 되고, 사면체에서 6개의 에지 및 4개의 면이 어떤 곡면에 속해있는지를 판단해서 절단 방향을 정하게 된다.

2. 삼각형 패치로부터 사면체 요소망을 생성한다(Fig. 2(b)).

사면체의 절단면이 형상의 가운데 면이 되기 위해서는 내부에 절점이 생성되어서는 안된다. 또한 불필요한 절단면이 생성되지 않도록 사면체 요소망 생성시 한 요소의 4절점이 같은 곡면(상/하위)에 속하지 않도록 해야한다. 사면체 요소망 생성기법은 기본적으로 전진경계법(advancing front method)을 사용하였

으며, 내부에 절점이 생성되지 않도록 디깅(digging) 오퍼레이터를 제외한 트리밍(trimming), 웨징(wedging), 스플리팅(splitting), 리어런징(rearranging), 피니싱(finishing) 오퍼레이터를 사용하였다⁹⁾.

3. 사면체의 절단면을 이용하여 삼각형 또는 사각형 요소를 생성한다(Fig. 2(c)).

사면체는 절단 방향에 따라 삼각형/사각형 요소가 생성되며 어떤 방향으로 절단될지는 타입을 정해서 분류한다. 사면체 요소의 절점과 면이 어떤 곡면(상/하위/측면)에 속하는지를 판단해서 기본, 수정 그리고 내부 절점 타입을 적용시킨다.

4. 생성된 삼각형/사각형 요소의 품질을 개선시킨다(Fig. 2(d)).

사면체의 절단면으로 구성된 삼각형/사각형 요소의 품질은 매우 떨어져서 이를 개선시키는 작업이 필요하다. 우선 모두 삼각형 요소로 만들기 위해서는 사각형 요소를 삼각형 요소로 분할하고, 품질이 매우 떨어지는 요소의 삭제 및 요소의 에지를 변경함으로써 품질을 개선시킬 수 있다. 사각형 요소로 변경시키는 작업은 모든 요소의 중앙 에지를 분할함으로써 모두 사각형 요소로 변경시킬 수 있지만 요소의 품질이 다소 떨어지는 경향이 있어 삼각형 요소를 배경으로 해서 새롭게 사각형 요소를 생성시키는 작업이 필요하다.

5. 육면체 요소를 생성한다(Fig. 2(c)).

육면체 요소를 생성시킬 경우 단계 4에서 생성된 사각형 요소를 이용한다. 이 경우 초기의 외곽형상과 생성된 육면체 요소가 정확하게 일치시키는 작업이 필요하다.

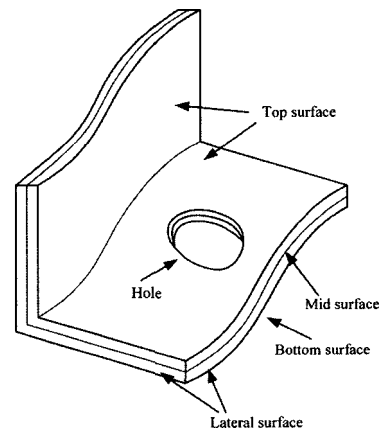


Fig. 1. Thin section object with hole.

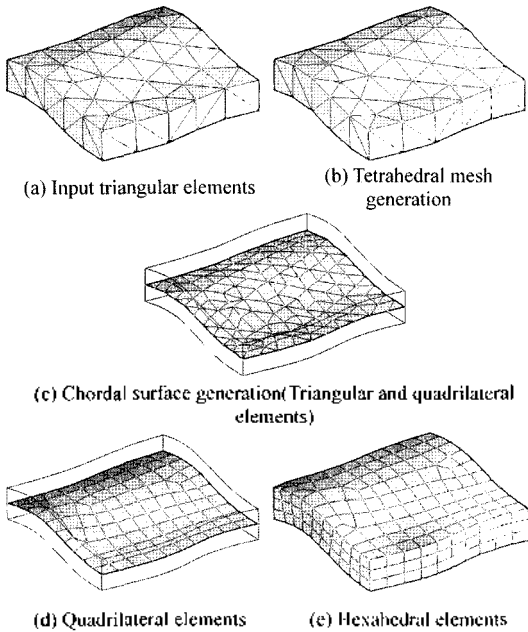


Fig. 2. Overview of hexahedral mesh generation.

3. 사면체 요소망 생성

3.1 곡면 분류

초기에 입력받은 삼각형 요소를 서로의 면이 이루는 각도를 고려하여 상/하위/측면 곡면으로 분류한다. 이를 위해서 우선 입력받은 삼각형 요소의 법선 방향을 모두 밖으로 향하게 일치시키는 작업이 필요하다. 두 요소가 이루는 각도를 0~360도 기준으로 요소의 법선 방향을 이용하여 계산하고, 기준각(225도) 보다 크면 서로 다른 곡면으로 분류한다¹⁾. 또한 사면체 요소의 절단면이 형상의 가운데면이 되기 위해서는 측면 곡면의 내부에는 절점이 존재해서는 안되는 조건을 이용해서 분류된 곡면에서 내부에 절점이 존재하지 않는 것을 측면곡면으로 정의한다. Fig. 3(b)는 각도를 기준으로 해서 곡면을 분류한 예를 나타내고 있으며 상/하위 곡면이 4개, 측면 곡면이 4개로 분류된다. 측면 곡면 분류가 완료되면 상/하위 곡면을 곡면에 포함된 요소와 주변 곡면의 연결성을 고려해서 분류한다(Fig. 3(c)).

3.2 사면체 요소망 생성

사면체 요소를 생성하기 위해 전진경계기법(advancing front method)을 이용하여 내부에 새로운 절점이 생성되지 않도록 수정 보완하였다. 3차원 오퍼레이터(트리밍, 웨징, 디깅, 로컬 피니싱, 스플릿팅,

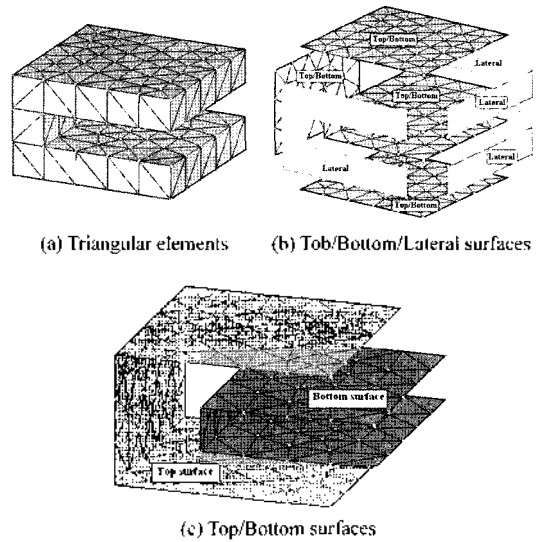


Fig. 3. An example of surface classification.

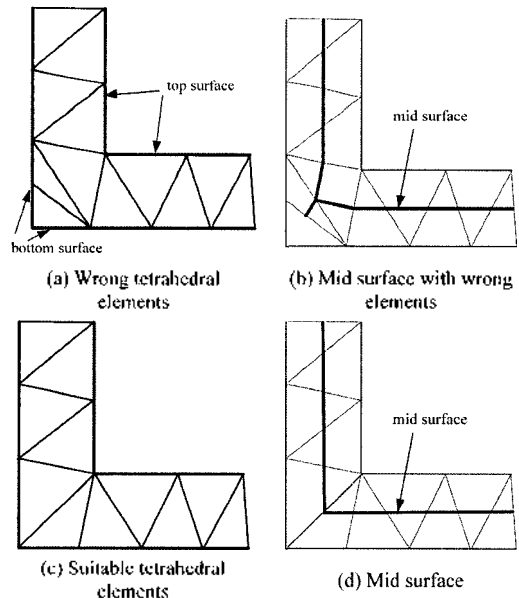


Fig. 4. Tetrahedral meshing for mid surface generation.

리어레인징²⁾에서 새롭게 절점을 생성시키는 디깅, 퍼레이터를 제외시켜 내부 절점 생성 없이 얇은 두께를 가지는 형상에 사면체 요소를 생성시키도록 하였다. 여기서 나머지 오퍼레이터는 내부에 절점 생성 없이 하나의 사면체 요소를 생성시키고, 스플릿팅 오퍼레이터는 하나의 사면체 요소를 생성시키면서 영역이 분할된다. 또한 Fig. 4(b)와 같은 경우가 발생하지 않도록 초기 요소망 생성시 생성되는 요소의 4절점이 한

곡면(상/하위)에 포함되지 않도록하고, 더 이상 요소를 생성할 수 없는 경우에 기존 방법을 적용시킨다. 사면체 요소망 생성 특성상 내부에 절점 생성 없이 더 이상 요소망 생성을 진행할 수 없는 경우가 발생한다. 이런 경우 로컬 피니싱(local finishing) 오퍼레이터를 적용시키고 작업을 종료한다.

요소망 생성 순서는 트라밍/스프릿팅 오퍼레이터를 적용시키고, 요소의 품질을 개선시키기 위해 리어레인지 오퍼레이터를 적용시킨다. 초기에 사면체 요소의 4절점이 모두 한 곡면에 포함되지 않도록 체크하고, 더 이상 요소를 생성시킬 수 없는 경우 절점 체크 없이 요소를 생성한다.

4. 중립면 생성

곡면 분류 및 사면체 요소망 생성이 완료되면 사면체 요소의 절단면을 이용하여 중립면을 생성한다. 사면체 요소는 절단면이 삼각형일 경우는 4개의 방향으로 절단 가능하고, 사각형인 경우는 3개의 방향으로 가능하다. 따라서 어떤 방향으로 분할하는 것이 형상의 가운데 면이 될지 지정해 줄 필요가 있는데, 상/하위/측면 곡면이 이의 기준이 된다. 상하위 곡면에 3개의 에지가 존재하고 하나의 면이 존재하면 삼각형 요소가 생성되고, 두개의 에지가 상하위 곡면에 존재하고 이 두 에지가 연결되어 있지 않으면 사각형 요소가 생성된다(Fig. 5).

BASIC TYPE 1 : 3 top/bottom edges + 1 external face → tri element

BASIC TYPE 2 : 2 top/bottom edges without shared node → quad element

그러나 이와 같이 2개의 타입만을 이용했을 경우에는 적용되지 않은 사면체 요소가 발생하고, 때로는 2개의 절단면을 구성할 필요가 있다. 이를 해결하기 위해 Fig. 6과 같이 3개의 수정 타입(Modified type)이

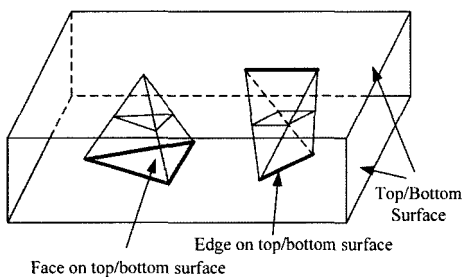


Fig. 5. Basic types of a medial surface generation.

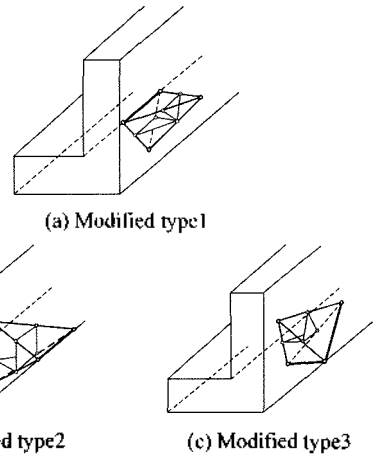


Fig. 6. Modified types of a medial surface generation.

이용된다. 수정타입 1,3은 삼각형 요소 두개를 생성시키고, 수정타입 2는 삼각형 요소 한 개와 사각형 요소를 한 개를 생성시킨다. 여기서 분류 기준은 기본 타입에 의해 이미 분할되어 있는 정보를 이용해서 정한다.

Fig. 7(b)는 기본 타입만을 적용시킨 것이고, Fig. 7(c)는 수정 타입을 함께 적용시킨 모습이다. 모든 영역이 채워진 것을 확인할 수 있으나 요소에지의 중앙이 중립면과 일치하지 않아서 새롭게 채워진 영역이 매끄럽지 않음을 확인할 수 있다. 따라서 수정타입에

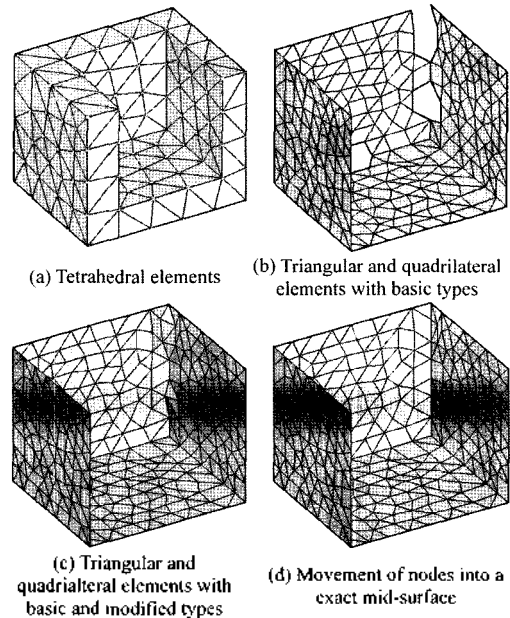


Fig. 7. Chordal surface generation.

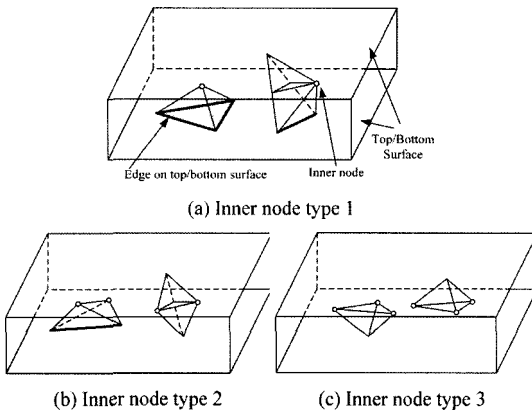


Fig. 8. Inner node types.

의해 절점을 새롭게 생성할 때는 절점의 위치를 수정할 필요가 있다. Fig. 7(d)는 절점을 중립면으로 이동시킨 것을 나타낸다. 새롭게 생성된 절점을 정확히 중립면으로 이동시키기 위해서는 기본타입에 의해 생성된 절점과 주변요소의 정보를 이용하게 된다.

내부에 절점이 존재하는 경우 기존 방법을 이용해서는 중립면을 생성할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 사면체 요소의 절점이 1개, 2개 또는 3개가 존재하는 경우 중립면을 생성할 수 있도록 내부 절점 타입 (Inner node type)을 제안하였다. 사면체 요소에서 내부 절점이 한 개인 경우는 상/하위 곡면에 하나의 에지가 존재하면 삼각형 요소가 생성되고, 세개의 에지가 존재하면 분할되지 않는다(Fig. 8(a)). 내부에 절점이 두 개인 경우는 상/하위 곡면에 에지가 존재하지 않는 경우 삼각형 요소가 생성되고, 그렇지 않은 경우 분할되지 않는다(Fig. 8(b)). 그리고 세 개의 절점이 존재하는 경우는 세 절점을 삼각형 요소를 생성한다(Fig. 8(c)).

5. 육면체 요소망 생성

5.1 요소 품질 개선

사면체의 절단면으로 구성된 삼각형/사각형 요소의 품질은 매우 떨어져서 이를 개선시키는 작업이 필요하다. 요소를 삭제하거나, 요소의 에지를 변경시킴으로써 품질을 개선한다. 그리고 모두 삼각형 요소로 만들기 위해서는 하나의 사각형 요소를 두 개의 삼각형 요소로 분할하는 것이 필요하다. 사각형 요소로 변경시키는 작업은 모든 요소의 중앙 에지를 분할함으로써 모두 사각형 요소로 변경시킬 수 있지만 요소의 품질이 다소 떨어지는 경향이 있어 삼각형 요소를 결합

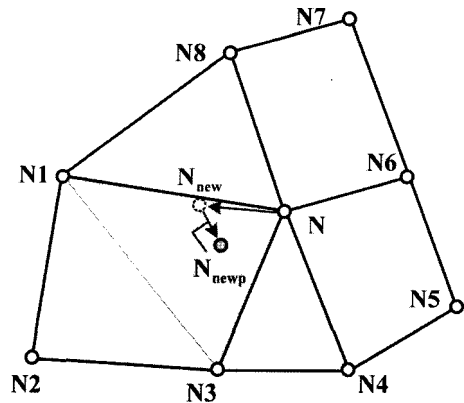


Fig. 9. New node position of smoothing process.

시키나 삼각형 요소를 배경으로 해서 새롭게 사각형 요소를 생성시키는 작업이 필요하다^{10,11)}. 본 연구에서는 우수한 품질의 사각형 요소를 생성하기 위해서 삼각형 요소를 배경으로 사각형 요소를 생성시키는 방법을 채택하였다. 이를 위해 두드께 요소층(zero thickness layer)과 외부에서 내부로 요소망을 생성해 나가는 전진경계법을 이용하였다.

형상이 곡면인 경우 요소 평활화에 의해 이동된 절점은 실제 곡면에서 벗어날 수 있다. 따라서 이동된 절점을 다시 곡면위로 이동시키는 작업이 필요하다. 이를 위해서 각 절점에 주변 요소 정보 및 초기 좌표들을 저장한다. 절점이 이동된 후에는 초기 좌표들을 이용해서 요소위로 절점을 투영시킨다. Fig. 9에서 살펴보면 평활화가 이루어지고 있는 절점 N에서 인접 요소를 이용해서 평면(N, N1, N3)을 구성하고, Laplacian 방법에 의해 이동된 절점 N_{new} 를 평면위로 투영시켜 평활화된 위치(N_{newp})를 얻는다.

5.2 육면체 요소망 생성

솔리드 요소는 중립면에 생성된 삼각형 사각형 요소를 읍셋방법을 이용해서 생성한다. 요소 읍셋 방법에는 꼭지점(vertex) 읍셋과 꼭지점의 다중 방향(multiple normal)을 고려한 읍셋이 있다¹²⁾. 꼭지점 읍셋 방법은 RP(Rapid Prototyping)과정과 FEM에 이용되며, 면 읍셋은 NC가공에 마지막 방법은 RP와 NC가공에 이용된다. 본 연구에서는 FF해석에 적합한 솔리드 요소를 생성하므로 첫번째 방법을 이용하였다. 솔리드 요소 생성에서 사각형 요소에 대해서는 육면체 요소가 생성되고, 삼각형 요소에 대해서는 프리즘 요소가 생성된다(Fig. 10). 이를 위해서 우선 중립면에 생성된 절점들을 이용해서 윗면 아랫면에 절점

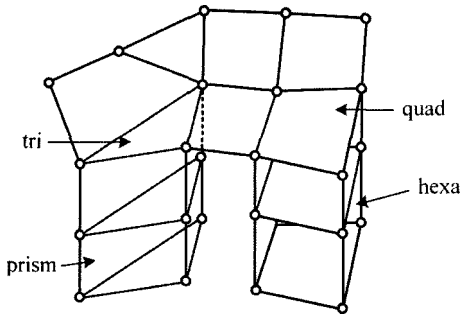


Fig. 10. Prism or hexahedral mesh generation by offsetting.

들을 새롭게 생성시키는 작업이 필요하다.

두께가 균일하지 않은 형상에 대해서도 솔리드 요소를 생성하기 위해서는 오프셋 거리는 각 절점마다 다르게 구성하는 것이 필요하다. 또한 형상의 경계면과 정확히 일치시켜야 하므로 오프셋 방향으로 절점을 경계면에 투영시키는 방법을 이용하였다. 각 절점의 오프셋 방향은 인접한 요소의 법선 방향의 평균을 이용해서 계산한다. 솔리드 요소를 생성시키는 방법을 간략하게 정리하면 다음과 같다.

1. 오프셋 방향 계산

모든 요소의 법선 방향을 일치시킨 후, 각 절점에 대해서 인접한 요소의 법선 방향을 평균해서 오프셋 방향을 계산한다.

2. 외부 절점 생성(Fig. 11(b))

중립면의 절점을 뺀, 아랫면에 오프셋 방향으로 투영시켜 외부 절점을 생성한다.

3. 외부 절점 평활화(Fig. 11(c))

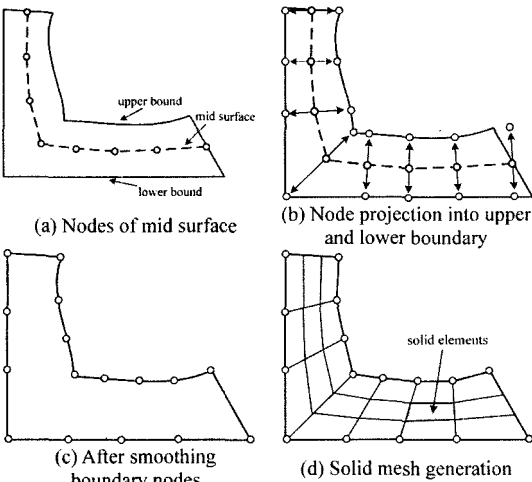


Fig. 11. Solid mesh generation using offset.

요소 평활화 과정을 통해서 오프셋 후 꼬인 형상을 풀어주고, 모서리 부분의 절점을 정확히 주어진 형상과 일치하도록 이동시킨다.

4. 내부 절점 생성(Fig. 11(d))

여러 층일 경우에 뒀면, 아랫면의 절점을 이용해서 내부에 절점을 생성시킨다.

5. 솔리드 요소망 생성(Fig. 11(d))

생성된 절점을 연결시켜 솔리드 요소를 생성한다.

6. 적용 예

Fig. 12는 두께가 균일하지 않은 형상을 이루는 삼각형 요소 2168개를 입력받아 사면체 요소망을 생성한 후, 육면체 요소망을 생성한 것이다. Fig. 12(b)는 사면체 요소로부터 생성된 형상의 중립면이며, Fig.

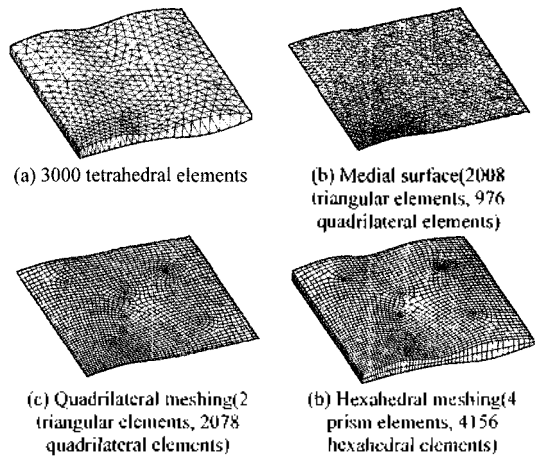


Fig. 12. Hexahedral meshing at a non-uniform thickness model.

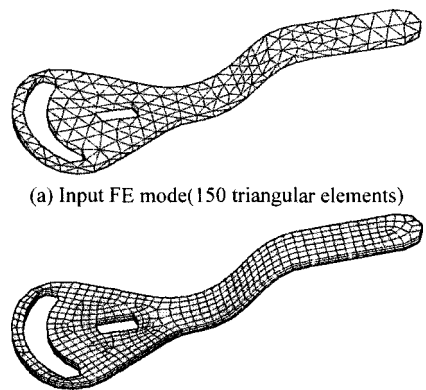


Fig. 13. A handle model.

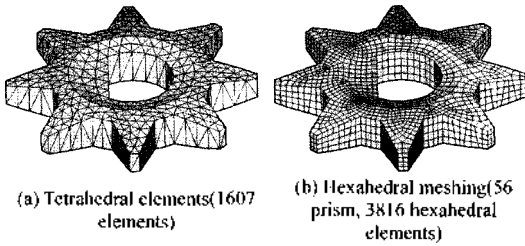


Fig. 14. A gear model with non-uniform thickness.

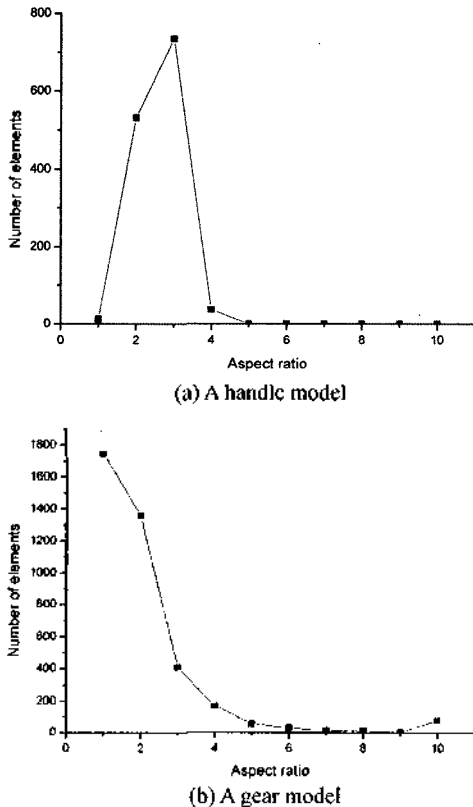


Fig. 15. Mesh quality(aspect ratio) distributions.

12(c)는 이를 사각형 요소로 변환한 것이다. 육면체 요소는 증립면에 해당하는 사각형 요소를 양방향으로 읍셋시켜 두 층을 생성하였다(Fig. 12(d)). Fig. 13은 삼각형 요소 630개를 입력받아 사면체 요소를 생성한 후 솔리드 요소를 생성한 것이다. 세 층의 솔리드 요소를 생성시켰으며 24개의 프리즘 요소와 1290개의 육면체 요소가 생성되었다. Fig. 14는 균일하지 않은 두께를 가지는 기어 모델에 적용시킨 예제이며 56개의 프리즘요소와 2816개의 육면체 요소가 생성되었다. Fig. 15는 생성된 육면체 요소의 품질을 길이를

이용하여 보여주고 있다. 길이비(aspect ratio)는 요소의 에지의 최대값과 최소값의 비를 나타내면 1에 가까울수록 정육면체에 가깝다. 본 논문에서는 몇 층의 육면체 요소를 생성시키는 것에 따라 길이비가 달라지므로 전체적으로 균일한 값을 얻는 것이 우수한 품질의 육면체 요소를 생성시켰다고 볼 수 있다. 핸들 모델은 2~3정도의 값을 얻었고, 기어 모델은 1~2정도에서 균일한 값을 얻어서 우수한 품질의 육면체 요소가 생성되었음을 확인할 수 있다.

7. 결 론

본 연구에서는 얇은 두께를 가지는 형상에 증립면을 추출한 후 솔리드 요소를 생성시키는 방법을 제안하였다. 이는 증립면에 생성된 삼각형/사각형 요소의 품질을 개선시킨 후 읍셋 방법을 이용하여 생성한다. 불균일 두께를 가지는 형상에 솔리드 요소망 생성이 가능하도록 하기 위해서 읍셋 방법을 이용할 때 각 절점에 대해서 초기 읍셋 방향만을 지정하고, 이동거리인 형상에 위면 아랫면에 투영시켜 자동으로 설정되도록 하였다. 육면체 요소의 품질 및 밀도는 변환된 사각형 요소에 의해 전적으로 좌우된다. 따라서 우수한 품질의 육면체 요소를 생성시킬려면 증립면에 우수한 품질의 사각형 요소를 생성시키는 것이 필요하며, 국부적으로 조밀한 요소망을 생성하려면, 이 부분에 조밀한 사면체 요소를 이용하여 사각형 요소를 생성시켜야 한다. 본 연구에서는 단순한 형상에 대해서만 적용시켰는데, 추후 연구를 통하여 림(rib)이 있는 다양한 형상에 적용시키는 것이 필요하다.

후 기

본 연구는 산업자원부 공학용 해석 소프트웨어 기술 개발 사업의 연구비 지원에 의해 수행된 것입니다.

참고문헌

- Blum, H., "A Transformation for Extracting New Descriptors of Shape", Models for the Perception of Speech and Visual Form (Wcinant Wathen-Dunn, Ed.), MIT Press, Cambridge, MA, pp. 362-381, 1967.
- Prasad, L., "Morphological Analysis of Shapes", in <http://cnls.lanl.gov/Highlights/1997-07/>, Los Alamos National Laboratory, 1997.
- Quadros, W. R. and Shimada, K., "Hex-layer: Layered All-hex Mesh Generation on Thin Section Solids

- Via Chordal Surface Transformation", *11th International Meshing Roundtable*, 2001.
4. 권기연, 박성민, 이병채, 채수원, "누조물에서 Chordal Axis Transform을 이용한 중립면 생성", 한국정밀공학회 추계 학술대회 논문집, 2004.
 5. Schneiders, R., Schindler, R. and Weiler, F., "Octree-based Generation of Hexahedral Element Meshes", *5th International Meshing Roundtable*, Sandia National Laboratories, pp. 205-216, October 1996.
 6. Price, M. A. and Armstrong, C. G., "Hexahedral Mesh Generation by Medial Surface Subdivision: Part II. Solids with Flat and Concave Edges", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 40, pp. 111-136, 1997.
 7. Blacker, T. D. and Meyers, R. J., "Seams and Wedges in Plastering: A 3D Hexahedral Mesh Generation Algorithm", *Engineering with Computers*, Springer Verlag, Vol. 2, No. 9, pp. 83-93, 1993.
 8. Timothy, J. T., "The Whisker Weaving Algorithm : A Connectivity-based Method for Constructing All-hexahedral Finite Element Meshes", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 39, 3327-3349, 1996.
 9. 권기연, 채수원, 이병채, "3-D 오퍼레이터를 이용한 사면체 요소망의 자동생성", 한국 CAD/CAM학회 논문집, Vol. 9, No. 1, pp. 27-34, 2004.
 10. Lee, Y. K. and Lee, C. K., "A New Indirect Anisotropic Quadrilateral Mesh Generation Scheme with Enhanced Local Mesh Smoothing Procedures", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 58, No. 2, pp. 3327-3349, 2003.
 11. Owen, S. J., Staten, M. L., Canann S. A. and Saigal S., "Q-MORPH: An Indirect Approach to Advancing Front Quad Meshing", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 44, pp. 1317-1340, 1999.
 12. Xiuzhi, Q. and Brent, S., "A 3D Surface Offset Method for STL-format Models", *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 9, No. 3, pp. 133-141, 2003.

권 기 연



1999년 고려대학교 기계공학과 학사
 2001년 고려대학교 기계공학과 석사
 2001~현재 한국과학기술원 기계공학과
 박사과정
 관심분야: Mesh generation, Geometric
 modeling, Computer graphics

이 병 채



1977년 서울대학교 기계공학과 학사
 1979년 한국과학기술원 기계공학과 석사
 1984년 한국과학기술원 기계공학과 박사
 1984~1988년 한국과학기술연구원 선임
 연구원
 1988~현재 한국과학기술원 기계공학과
 교수
 관심분야: 유한요소개발, 최적설계 및 신
 퇴성 해석, 내구성해석

채 수 원



1977년 서울공대 기계공학과 학사
 1979년 한국과학기술원 기계공학과 석사
 1988년 미국 M.I.T. 기계공학과 박사
 1979년~1991년 한국기계연구원 선임연
 구원, CAD/CAM실 실장
 1991년~1996년 홍익대학교 기계공학과
 부교수
 1996년~현재 고려대학교 기계공학과 교수
 관심분야: 유한요소해석, Mesh Genera-
 tion, 생체역학, 충돌해석