

절점 탐색이 적용된 전진경계법에 의한 사면체 요소망의 자동생성

전성재*, 채수원#

Automatic Tetrahedral Mesh Generation Using Advancing Front Technique with Node Searching

Sung Jae Chun*, Soo-Won Chae#

ABSTRACT

An unstructured tetrahedral mesh generation algorithm has been presented. In order to construct better meshes in interior region by using an advancing front technique, a connecting operator and a local finishing operator Π have been developed in addition to the existing operators. Before applying digging operators that generate new nodes inside of a meshing region, a connecting operator is employed that uses existing nodes which satisfy certain conditions for producing well-conditioned elements. The local finishing operator Π is introduced to terminate the meshing process more flexibly on remaining subregions. With these new operators, tetrahedral meshing process becomes more robust and good quality of meshes are constructed.

Key Words : Advancing front technique (전진경계법), Tetrahedral mesh(사면체 요소망), Mesh generation (요소망 생성), Finite element method (유한 요소법)

1. 서론

유한요소법은 공학전반에 걸쳐 설계안에 대한 검증과 설계의 최적화 등에 많이 사용되고 있다. 최근들어 컴퓨터 하드웨어의 급속한 성능 향상과 더불어 3 차원 유한요소해석의 사용과 이에 필요한 요소수도 크게 늘어 났으며, 이로 인해 효율적인 요소망 생성에 대한 필요성도 매우 높아졌다. 삼차원 요소망의 자동 생성에 대한 연구는 그동안 많이 이루어져 왔으며, 특히 사면체 요소는 임의

의 형상에 대한 요소망 생성의 편리성과 효율성으로 인해 현업에서 가장 널리 사용되고 있다. 본 논문에서 다루는 사면체 요소망 생성기법에는 전진경계법² 과 Delaunay 삼각법^{3,4}, 옥트리(Octree)^{5,6,7} 를 기본으로 한 방법등을 들 수 있다. 그 중 전진경계법은 관심영역 외부에서 내부로 요소망을 생성시키는 방법으로 3 차원 물체의 표면영역에서 좋은 요소망을 생성할 수 있고 밀도의 조절도 쉬우나 내부 영역에서 요소망이 찌그러져 요소망 생성이 실패하는 경우가 있다.

접수일: 2003 년 7 월 28 일; 게재승인일: 2004 년 1 월 9 일

* 고려대학교 대학원 기계공학과

교신저자, 고려대학교 기계공학과

Email swchae@korea.ac.kr Tel. (02) 3290-3367

이와 같이 요소망 생성기법들은 각각 장단점을 가지고 있으므로 서로의 방법을 혼용해 좋은 요소망을 생성하고자 하는 기법들이 많이 연구되었다. 그 예로 표면에 요소망을 생성하고 내부에 미리 생성시킨 절점을 이용하는 전진 경계법과 Delaunay 삼각법을 혼용한 방법^{8,9,10} 과 내부영역에는 격자를 이용하여 균등한 요소품질을 생성하고 격자와 표면 사이의 영역은 전진경계법을 사용하여 처리하는 격자법과 전진경계법이 혼용된 방법¹¹ 등이 제시되었다.

기존의 전진경계법에서는 해석영역이 충분히 작아졌을 경우에도 새로운 절점을 계속 생성하여 좋지 않은 형상을 유발하고 요소망 생성에 실패하는 경우가 발생하기도 한다. 본 논문에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 커넥팅 오퍼레이터(connecting operator)와 로컬 피니싱 오퍼레이터Ⅱ(local finishing operatorⅡ)를 개발하였다. 커넥팅 오퍼레이터는 디깅 오퍼레이터(digging operator)를 적용하기 전에 적절한 절점을 탐색하여 적절한 절점이 발견되면 이를 이용하여 한 개의 사면체 요소를 생성하는 것이다. 본 연구에서는 적절한 절점의 탐색에 Delaunay 법을 응용하였다. 로컬 피니싱 오퍼레이터Ⅱ는 남은 형상에 더 이상의 오퍼레이터 적용이 어려울 경우 적용되며, 형상을 구성하는 삼각형 요소와 같은 수의 요소를 생성하고 남은 영역의 요소망 생성과정을 종료시킨다.

2. 형상 정보 입력과 표면 요소망 생성

요소망 생성을 위한 대상물체의 형상정보 입력은 여러 CAD 시스템에서 가장 널리 지원하는 IGES 형식을 입력받아 표면 요소망을 생성한다. IGES 형식은 기하정보들과 그 관계를 정의하는 위상정보로 나뉘어질 수 있다. 본 연구에서는 기하요소를 나타내기 위해서 NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline)형태의 곡면이나 곡선을 사용하였다. 먼저 NURBS 정보를 입력받아 3 차원 곡면의 경계곡선에 경계 절점을 생성한 뒤, 곡면의 형상에 따라 투영평면(projection plane), 근사전개평면(quasi-expanded plane), 매개변수평면(parametric plane)등의 형태로 변환시킨다. 이와 같이 변환된 2 차원 영역에 대해 영역분할법(domain decomposition)을 사용하여 삼각형 요소망을 생성한 후 이를 본래의 곡면으로 변환하는 방법^{12,13} 을

사용하여 표면 요소망을 생성하였다.

3. 사면체 요소망의 생성

표면 요소망 생성이 완료되면 모델의 내부로 전진경계법을 이용한 사면체 요소망 생성이 진행된다. 본 논문에서 사용된 전진경계법은 기존 오퍼레이터¹⁴ 와 새로 개발된 커넥팅 오퍼레이터, 로컬 피니싱 오퍼레이터Ⅱ를 함께 사용한다. Fig.1 은 요소망 생성의 순서도로 완성된 표면 요소망으로부터 기존 오퍼레이터와 커넥팅 오퍼레이터를 이용하여 요소망을 생성한다. 요소망 생성과정중 남은 형상이 다른 오퍼레이터를 적용하기 불가능한 형상일 경우 로컬 피니싱 오퍼레이터Ⅱ를 적용하여 요소망 생성을 마무리한다.

커넥팅 오퍼레이터와 로컬 피니싱 오퍼레이터Ⅱ는 전진경계법의 기본 오퍼레이터들과 함께 사용되므로 먼저 전진경계법의 기본 오퍼레이터들을 살펴보고 새로운 오퍼레이터들을 설명하도록 한다.

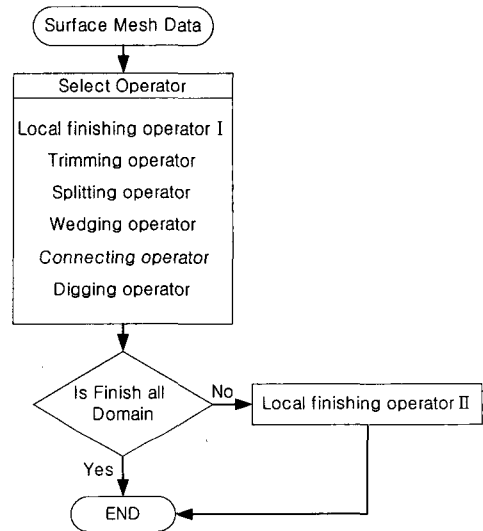


Fig. 1 Mesh generation process

3.1 기존 오퍼레이터

본 논문에서 사용한 기본 오퍼레이터는 로컬 피니싱 오퍼레이터 I(local finishing operator I), 트리밍 오퍼레이터(trimming operator), 스플리팅 오퍼레이터(splitting operator), 웨징 오퍼레이터(wedging operator), 디깅 오퍼레이터(digging operator)이다.¹⁴

여기서 기존의 연구에서 적용되었던 팔면체 오퍼레이터(octahedral operator)는 로컬 피니싱 오퍼레이터Ⅱ로 대체된다.

(로컬 피니싱 오퍼레이터 I)

로컬 피니싱 오퍼레이터 I는 국부적으로 남은 마지막 해석영역이 한 개의 사면체 모양일 때 사면체 요소 한 개를 생성하고 해당 해석 영역을 마무리 한다.

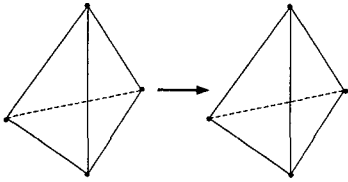


Fig. 2 A local finishing operator I

(트리밍 오퍼레이터)

트리밍 오퍼레이터는 Fig. 3 과 같이 하나의 사면체 요소를 생성하면서 세 개의 면, 세 개의 모서리와 한 개의 절점을 제거하고 한 개의 새로운 면을 생성한다.

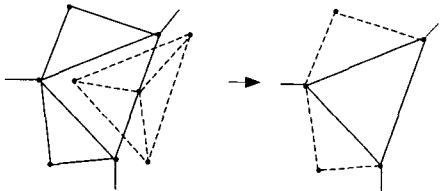


Fig. 3 A trimming operator

(웨징 오퍼레이터)

웨징 오퍼레이터는 Fig. 4 와 같이 하나의 사면체 요소를 생성하면서 두 개의 면, 한 개의 모서리를 제거하고 두 개의 면과 한 개의 모서리를 새로 생성한다.

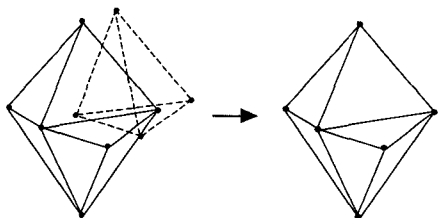


Fig. 4 A wedging operator

(스플리팅 오퍼레이터)

스플리팅 오퍼레이터는 웨징 오퍼레이터와 동일한 조건을 가지는 오퍼레이터로 Fig. 5 와 같이 하나의 사면체 요소를 생성하면서 해석 영역을 두 개 이상으로 나눌 수 있게 한다.

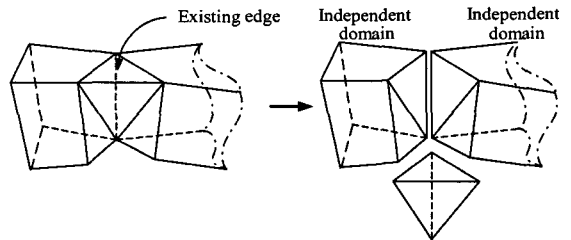


Fig. 5 A splitting operator

(디깅 오퍼레이터)

디깅 오퍼레이터는 경계 내부에 하나의 절점을 생성하면서 사면체 요소 두개를 동시에 생성한다.

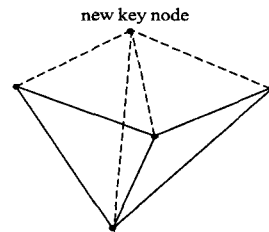


Fig. 6 A digging operator

3.2 새로운 오퍼레이터

본 연구에서는 기존 전진경계법의 단점을 보완하기 위하여 전진경계법 기본 오퍼레이터와 함께 적용되는 커넥팅 오퍼레이터와 로컬 피니싱 오퍼레이터Ⅱ를 개발하였다.

3.2.1 커넥팅 오퍼레이터와 절점 탐색법

커넥팅 오퍼레이터는 디깅 오퍼레이터에 앞서 적용되며 적절한 절점을 찾지 못하였을시에는 디깅 오퍼레이터를 적용하게 된다. Fig. 7 은 커넥팅 오퍼레이터의 순서도이다. 먼저 표면에 있는 기준 삼각형 요소와 사면체를 이루는 최적의 절점을 찾기 위해 탐색할 범위를 설정한다. 설정된 탐색범위 안에 절점이 존재하지 않을시에는 디깅 오퍼레이터를 적용하게되며, 한 개 이상의 절점이 존재

하는 경우에는 가장 적절한 절점을 선택하기위해 기준 삼각형과 절점으로 구성되는 사면체의 반지름비를 조사한다. 이와같이 찾아낸 절점과 주변 형상과의 교차검사를 실시한 후 주변과의 연결관계를 조사하여 적절한 방법으로 분류하여 사면체 요소를 생성하게 된다

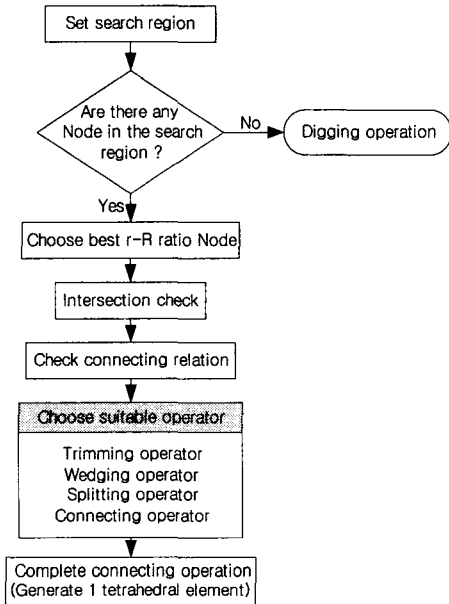


Fig. 7 Process of connecting operator

적절한 절점을 찾기 위한 탐색영역은 Fig. 8 과 같이 기준 삼각형 요소를 이용해 이루어지는 사면체 요소의 외접구를 사용하였다. 삼각형 요소와 임시절점은 공간상에 한 평면위에 위치하지 않으므로 유일한(unique) 구를 생성하기 위한 충분한 조건이 된다.

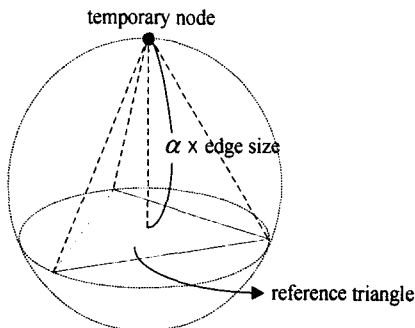


Fig. 8 Set temporary node

임시절점(temporary node)은 식(1)과 같이 기준 이 되는 삼각형 요소의 중심으로부터 요소망 생성이 진행되는 방향으로 기준 삼각형 요소의 에지의 길이에 α 배에 해당하는 길이만큼 떨어진 곳에 생성하였다. 여기서 α 는 탐색영역의 크기를 결정해 주는 값으로 요소망 생성 초기에는 0.8 로 시작하며 요소망 생성이 진행되면서 그 값이 변한다.

$$\begin{aligned} tX &= cen.X - normal.X \times \alpha \times length\ of\ edge \\ tY &= cen.Y - normal.Y \times \alpha \times length\ of\ edge \\ tZ &= cen.Z - normal.Z \times \alpha \times length\ of\ edge \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

tX, tY, tZ : 임시 절점의 좌표

$cen.X, cen.Y, cen.Z$: 삼각형 요소의 중심좌표

$normal.X, normal.Y, normal.Z$:

삼각형 요소의 normal vector

임시절점과 기준 삼각형 요소의 절점들로 구성되는 구가 탐색영역이 된다. 탐색영역이 정해지면 탐색영역 안에 존재하는 절점들을 선택하여야 한다. 공간상에 존재하는 절점들이 탐색영역 내부에 존재하는지의 여부는 식(2)를 이용하여 구한다.

식(2)에서 a, b, c, d 는 각각 삼각형 요소의 각 절점들과 임시 절점의 좌표값이며, e 는 검색하고자하는 절점을 나타낸다.

$$InSphere(a, b, c, d, e)$$

$$= \begin{vmatrix} a_x & a_y & a_z & a_x^2 + a_y^2 + a_z^2 & 1 \\ b_x & b_y & b_z & b_x^2 + b_y^2 + b_z^2 & 1 \\ c_x & c_y & c_z & c_x^2 + c_y^2 + c_z^2 & 1 \\ d_x & d_y & d_z & d_x^2 + d_y^2 + d_z^2 & 1 \\ e_x & e_y & e_z & e_x^2 + e_y^2 + e_z^2 & 1 \end{vmatrix} \quad (2)$$

여기서,

$InSphere(a, b, c, d, e) > 0$: in the Sphere

$InSphere(a, b, c, d, e) = 0$: on the Sphere

$InSphere(a, b, c, d, e) < 0$: out of the Sphere

이다.

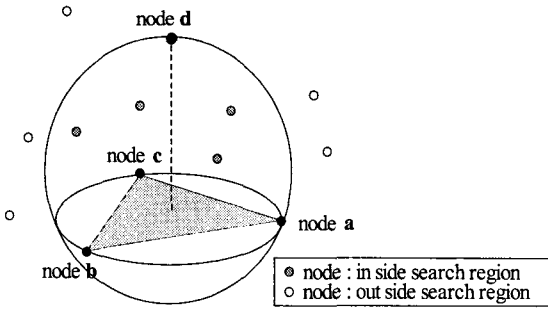


Fig. 9 Search region

탐색영역안에 존재하는 절점 중에서 최적의 절점을 선택하기 위한 기준으로 반지름 비를 이용하였다. 반지름 비는 사면체의 내접구와 외접구의 반지름의 비로 정의되며 정사면체의 경우는 1의 값을 갖는다.

$$r - R \text{ ratio} = \frac{3r}{R} \quad (3)$$

r : radius of an inscribed sphere
 R : radius of a circumsphere

선택된 절점과 기준 삼각형(reference triangle)의 절점으로 이루어진 예지들과 주변 경계 삼각형 요소와의 교차 검사를 실시한 후 다음 단계로 진행한다.

최적의 절점을 찾아내면 기준 삼각형 요소와 연결관계를 조사하여 적절한 요소망 생성과정을 거치게 된다. 기준 삼각형 요소와 최적 절점(optimum node)과의 연결관계는 Fig.10 과 같이 네 가지 종류로 나누어 볼수 있다. Fig.10 (a) 는 찾아낸 절점이 기준 삼각형 요소와 직접적인 연결관계가 없는 경우이다. 이 경우는 적절한 절점이 있음에도 불필요하게 절점을 생성하던 전진경계법의 단점을 해결하여주는 경우로 새로운 절점을 생성하지 않고 기존의 절점을 이용하여 사면체 요소를 만든다. Fig.10 (b) 는 찾아낸 절점과 기준 삼각형 요소의 한변으로 구성되어지는 인접한 삼각형 요소가 1 개 있는 경우이다. 이와 같은 경우에는 형상에 따라 기존 전진경계법 오퍼레이터 중 웨징 오퍼레이터나 스플리팅 오퍼레이터의 적용으로 분류하여 사면체 요소를 생성한다.

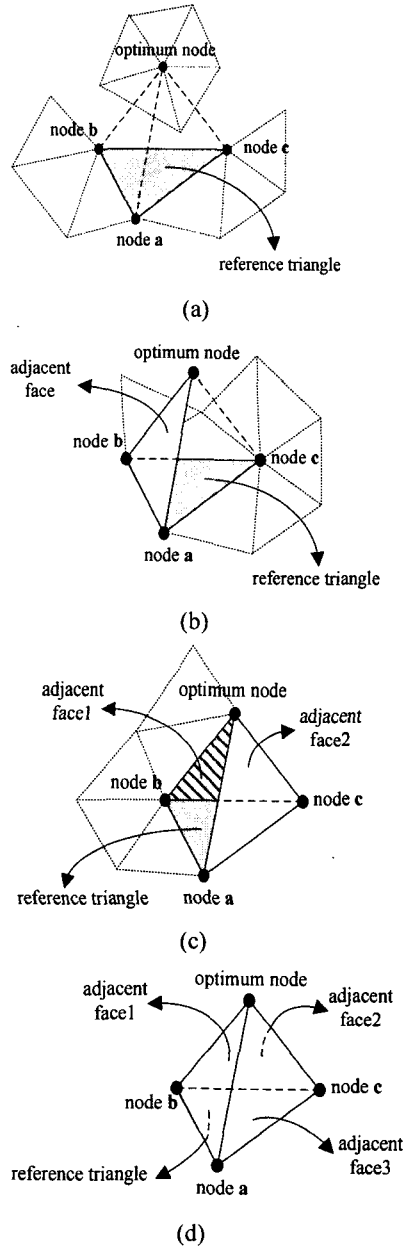


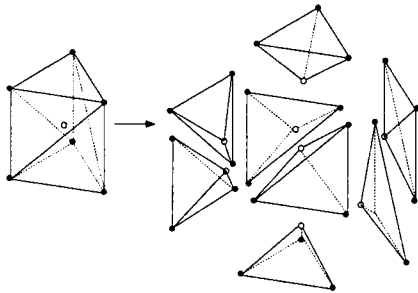
Fig. 10 Connection types

Fig.10 (c) 는 찾아낸 절점과 기준 삼각형 요소의 한변으로 구성되어지는 삼각형 요소가 2 개 존재하는 경우로 기존 전진경계법 오퍼레이터중 트리밍 오퍼레이터의 적용으로 사면체 요소를 생성할 수 있다. Fig.10 (d) 는 찾아낸 절점과 기준 삼각형 요소의 한 변으로 구성되어지는 삼각형 요소가

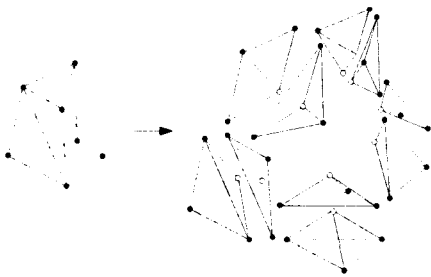
3 개 있는 경우로 그 자체만으로도 사면체 요소가 되는 경우이다. 실제 요소망 생성과정에서는 로컬 피니싱 오퍼레이터 I 이 먼저 적용되므로 나타나지 않았다.

3.2.2 로컬 피니싱 오퍼레이터 II

해석영역에 대한 요소망 생성을 마무리하기 위해서는 로컬 피니싱 오퍼레이터 I 과 로컬 피니싱 오퍼레이터 II 를 사용한다. 로컬 피니싱 오퍼레이터 II 는 요소망 생성과정에서 남은 형상에 요소망 생성이 어려운 경우, 즉 기본 오퍼레이터들로 더 이상 요소망 생성이 어려울 때 적용된다.



(a) Octahedron example



(b) Decahedron example

Fig. 11 Local finishing operator II

로컬 피니싱 오퍼레이터 II 는 기존 전진경계법의 팔면체 오퍼레이터를 개선한 것이라 볼 수 있다. 기존의 팔면체 오퍼레이터가 여섯 개의 절점으로 이루어지면서 여덟개의 삼각형 요소로 둘러싸여있는 형상에만 적용된 반면 로컬 피니싱 오퍼레이터 II 는 형상에 관계없이 남은 형상의 중심에 하나의 절점을 생성하고 형상을 이루는 삼각형 요소의 개수와 동일한 사면체 요소를 생성하면서 해석영역을 마무리 한다. 기존의 팔면체 오퍼레이터

가 기본 오퍼레이터와 함께 적용되었던 반면에 로컬 피니싱 오퍼레이터 II 는 모든 오퍼레이터가 적용된 후 더 이상 기본 오퍼레이터의 적용이 안되는 경우에만 적용하게 된다. 이때 남은 형상이 단일영역이 아닌 경우 각각의 영역으로 분리하는 과정을 거친다. 로컬 피니싱 오퍼레이터 II 가 적용되는 경우는 다른 오퍼레이터의 적용이 어려운 경우이므로 형상에 따라 요소의 품질이 좋지 않게 되는 경우가 있으나 이는 평활화 작업(smoothing)을 통해 개선한다.

4. 적용 예

본 연구에서 제시한 방법을 여러가지 형상에 대하여 적용시켜 보았다. 앞에서 언급된 바와 같이 기존의 전진경계법에서는 요소망 생성이 진행되어 충분히 작아진 해석영역에서도 디깅 오퍼레이터를 적용함으로써 해석영역이 더욱 복잡하게 되어 요소 품질이 나빠지거나 요소망 생성에 실패하는 경우도 많이 발생하였다. 그러나 본 연구에서 제안한 방법에서는 요소망 생성이 진행되어 작아진 해석영역에서는 주변 절점을 이용하여 요소망을 생성하므로 기존 전진경계법의 단점을 개선시켰다. Fig. 12 는 기존의 전진경계법을 이용한 방법¹⁴ 과 새로운 오퍼레이터를 추가한 현재의 방법을 비교하기 위한 것이며, 형상에 따른 영향을 배제하기 위해 정육면체 모델을 이용하였다.

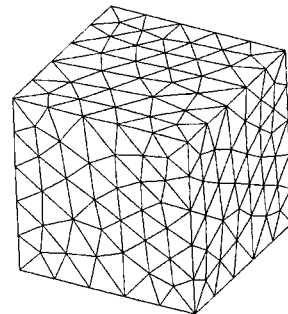


Fig. 12 Tetrahedral mesh of cube model

기존 방법에서는 총 1104 개의 사면체 요소가 생성되었고 새로운 방법에서는 총 1036 개의 사면

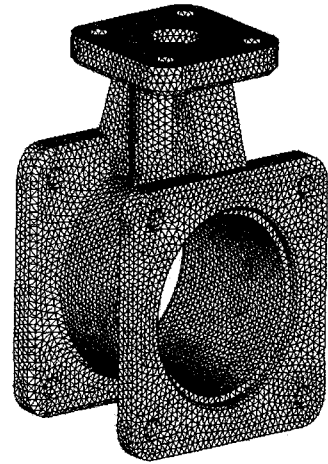
체 요소가 생성되었다. 이는 기존의 방법에서 디깅 오퍼레이터가 사용되어 새로운 절점이 생성되는 것과 달리, 새로운 방법에서는 커넥팅 오퍼레이터가 사용되어 주변의 절점을 이용함으로써 결과적으로 생성된 요소수가 줄어드는데 그 차이가 있다고 할 수 있다. Table 1 은 이와 같이 얻은 요소망 품질을 비교하기 위한 반지름비(r-R ratio) 분포를 나타내는 것으로써 본 연구에서 제안하는 방법에서는 반지름비가 0.3 이하인 경우가 3 개 발견된 반면 기존의 방법에서는 22 개로 매우 많은 것을 알 수 있으며, 전반적으로 새로운 방법에 의한 요소망의 품질이 더 우수함을 알 수 있다.

Table 1 r-R ratio distribution of a cube model

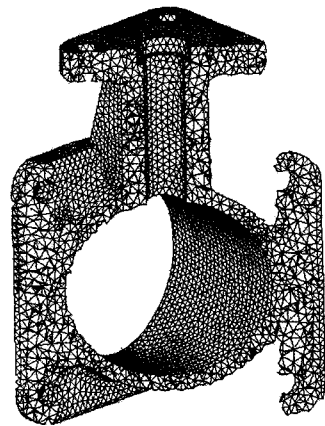
r-R ratio	previous work	present work
0-0.1	1	0
0.1-0.2	9	0
0.2-0.3	12	3
0.3-0.4	21	6
0.4-0.5	37	10
0.5-0.6	86	44
0.6-0.7	158	133
0.7-0.8	275	231
0.8-0.9	290	361
0.9-1	215	248
Total elements	1104	1036

Fig.13 는 기계부품의 몸체 모델에 대해 요소망 생성을 한것으로 형상 정보는 IGES 형식의 파일을 통해 입력받았다. 모델은 139 개의 곡면으로 이루어졌으며 총 84165 개의 사면체 요소를 생성하였다. Fig.14 은 헬리컬 기어 모델에 대해 요소망 생성을 한것으로, 모델은 136 개의 곡면으로 이루어져있고 총 44565 개의 사면체 요소가 생성되었다. Fig. 15 는 구멍이 있는 물체와 요크 모델에 요소망 생성을 한 것으로 각각 22690 개 및 26171 개의 사면체 요소가 생성되었다.

Fig.13 (c), Fig.14 (c), Fig.15 (c) 는 r-R ratio 를 나타낸 그래프로서 생성된 요소들이 0.8~1.0 에 분포하고 있으므로 대체로 좋은 요소품질을 가지고 있음을 보여준다.



(a) Perspective view



(b) Sectional view

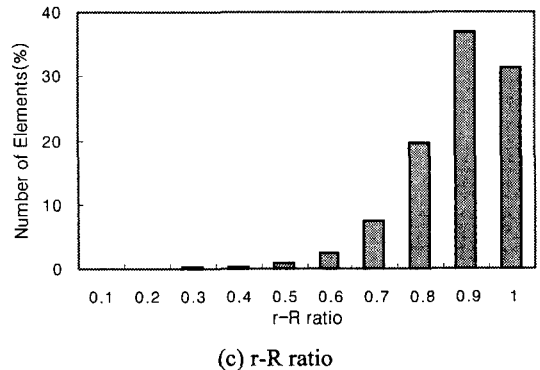
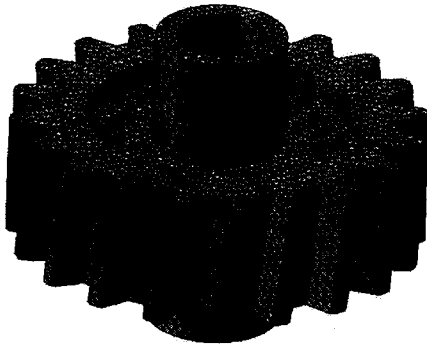
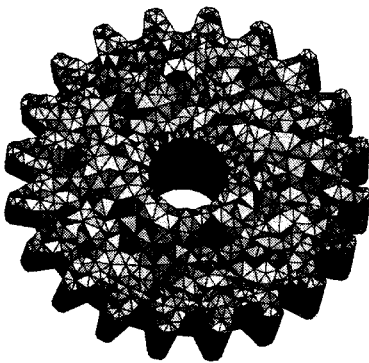


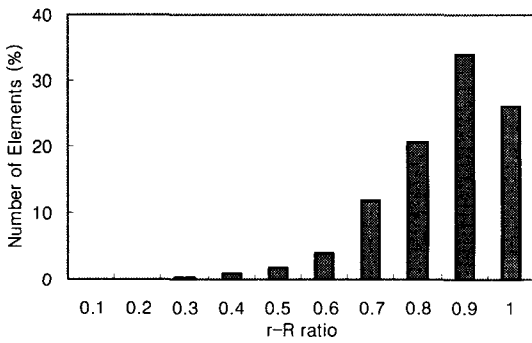
Fig. 13 A mechanical part model (84165 elements)



(a) Perspective view

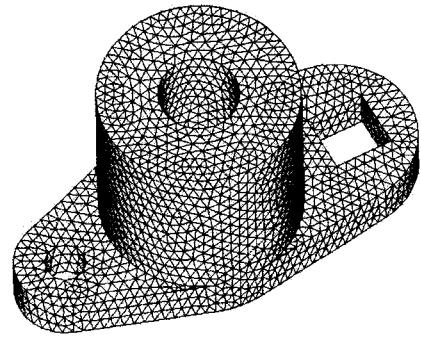


(b) Sectional view

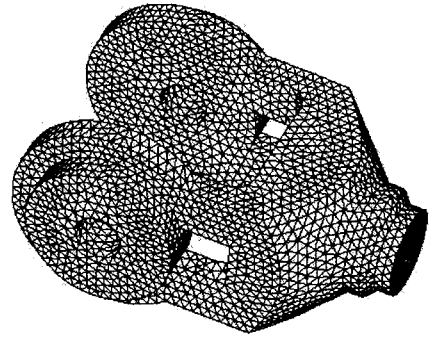


(c) r-R ratio

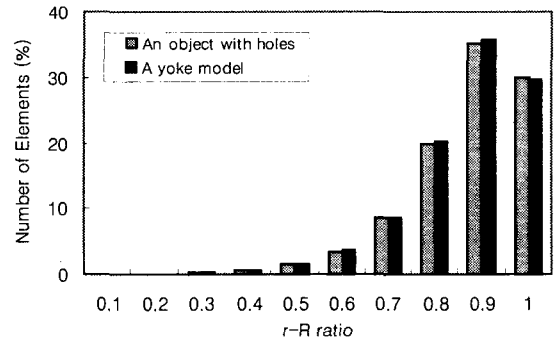
Fig. 14 A helical gear model (44565 elements)



(a) An object with holes (22690 elements)



(b) An yoke model (26171 elements)



(c) r-R ratio

Fig. 15 Example models

5. 결론

본 논문에서는 새로운 오퍼레이터를 추가함으로써 기존의 전진경계법을 개선하였다. 새로운 오퍼레이터는 커넥팅 오퍼레이터와 로컬 피니싱 오퍼레이터Ⅱ가 있다. 커넥팅 오퍼레이터는 기존의

전진경계법에서 해석영역이 작아졌을 경우에도 새로운 절점을 계속 생성하는 디깅 오퍼레이터의 단점을 해결하기 위한 것이다. 이는 새로운 절점을 생성하기 전에 기존의 적절한 점을 찾아 이용하는 것이다. 로컬 피니싱 오퍼레이터Ⅱ는 모든 오퍼레이터들이 적용된 후 남아있는 형상에 적용되며 남은 형상을 구성하는 삼각형 요소와 같은 수의 사면체 요소를 생성하면서 해석영역을 마무리한다.

이와 같이 기존의 전진경계법을 보완하고 커벡팅 오퍼레이터와 로컬 피니싱 오퍼레이터Ⅱ를 도입함으로써 보다 좋은 요소망을 생성할 수 있게 되었다.

참고문헌

1. K., Ho-Le, "Finite element mesh generation methods: a review and classification," *Computer-Aided Des.*, Vol. 20, No. 1, pp. 285-291, 1988.
2. Chae, S. W. and Bathe, K. J., "On automatic mesh construction and mesh refinement in finite element analysis," *J. Computers & Structures*, Vol. 32, No. 3/4, pp. 911-936, 1989.
3. Weatherill, N. P. and Hassan, O., "Efficient Three Dimensional Delaunay Triangulation with Automatic Point Creation and Imposed Boundary Conditions," *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol. 37, pp.2005-2039, 1994.
4. Borouchaki, H., George, P. L. and Lo, S. H., "Optimal Delaunay Point Insertion," *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol. 39, pp.3407-3437,1996.
5. Yerry, M. A. and Shephard, M. S., "Automatic three-dimensional mesh generation by the modified-octree technique," *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol. 20, pp.1965-1990, 1984.
6. Shephard, M. S. and George, M. K., "Automatic Three-Dimensional Mesh Generation by the Finite Octree Technique," *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol. 32, pp.790-749, 1991.
7. Jung, Y. H., Lee, K. W., "Automatic Generation of 3-D Finite Element Meshes: Part(II) -Mesh Generation from Tetrahedron-based Octree," *Transaction of the KSME*, Vol.19, No.3, pp. 647-660, 1995.
8. Fleischmann, P., Selberherr, S., "Three-Dimensional Delaunay mesh generation using a modified advancing front approach," *Proceeding 6th International meshing roundtable*, pp. 267-278, 1997.
9. Frey, P. J., Borouchaki, H., George, P. L., "3D Delaunay mesh generation coupled with an advancing-front approach," *Comput. Method Appl. Engng.*, 157, pp. 115-131, 1998.
10. Radovitzky, R., Ortiz, M., "Tetrahedral mesh generation based on node insertion in crystal lattice arrangements and advancing-front-Delaunay triangulation," *Comput. Methods Appl. Mech. Engng.* 187, pp. 543-569, 2000.
11. Kim, Y. W., Chun, S. J., Chae, S. W., "Tetrahedral mesh generation using a mixed method of a grid and an advancing front approach," *Society of CAD/CAM Engineers*, Vol. 8, No. 1, pp. 41-47, 2003.
12. Chae, S. W. and Kwon, K. Y., "Quadrilateral mesh generation on Trimmed NURBS surfaces," *KSME International Journal*, Vol. 15, No. 4, pp. 592-601, 2001.
13. Chae, S. W. and Park, J. M., "Automatic mesh generation on poorly parameterized NURBS surfaces," *J. KSPE*, Vol. 20, No. 6, pp. 189-196, 2003.
14. Kim, Y. W., Kwon, G. H., Chae, S. W., Shim, J. K., "Unstructured Tetrahedral Meshing by an Edge-Based Advancing Front Method," *KSME International Journal*, Vol. 16, No. 2, pp. 211-218, 2002.