

有限要素網의 自動生成

高 鉉 武

서울대학교 土木工學科 教授

1. 머리말

유한요소법은 구조물 해석의 한 방법으로 개발된 이래 그 이론적 배경과 전산기의 계속적인 발전으로 응용이 확산되고 있으며, 이에 따른 해석 및 계산방법도 급격히 발전하고 있다. 이러한 발전은 종래 불가능했던 문제에 대한 해를 가능하게 하며, 복잡하고 다양한 공학적인 문제들을 빠른 시간내에 해결해 주고 있다. 그러나 해석대상의 문제에 대한 기하학적 자료와 그 부속자료를 입력시키는 전처리(preprocessing) 과정에서 아직 많은 시간을 소비해야하는 일종의 병목현상 때문에 전반적인 유한요소해석 모델링의 응용 효율성은 이에 미치지 못하고 있는 실

정이다.

유한요소해석의 전처리 기능은 해석영역의 기하학적 형상 및 유한요소망(finite element mesh)에 대한 기하학적 자료와 유한요소의 성질, 경계 및 하중 조건에 대한 부속 자료를 만드는 기능이 주이며, 자료의 저장영역과 계산시간을 극소화하기 위해 절점번호(nodal number)를 조정할 수 있는 bandwidth 최적화 기능도 포함하고 있다(그림 1). 이 중 유한요소망의 생성기능은 유한 요소모델이 해의 정도(accuracy)에 미치는 영향이 크며, 전문가의 공학적 판단이 필요한 가장 중요한 부분이라 할 수 있다. 최근까지 대부분의 경우 사용자가 문제의 특성에 적합한 유한요소망을 직접 만들고 이 자료를 일일이 입력시키게 되어 많은 시간과 노력을 요하고 있으며,

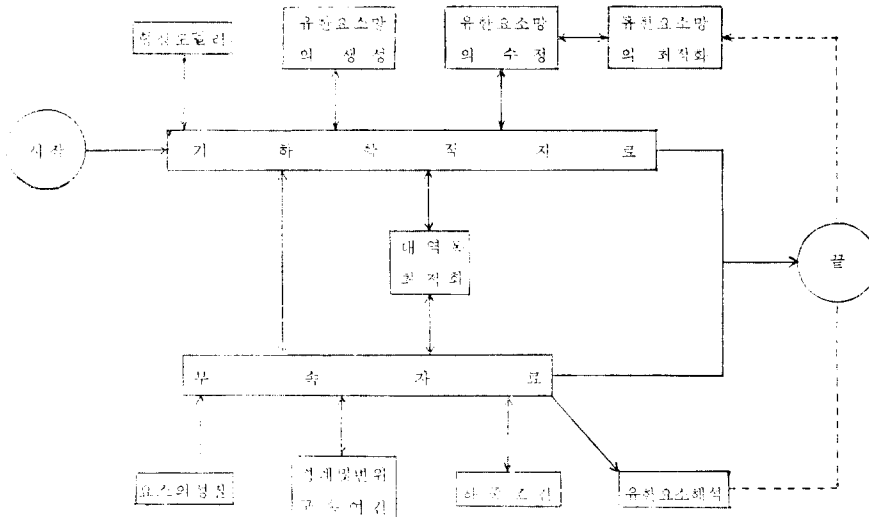


그림 1 유한요소법의 전처리 기능

단순하고 반복적인 입력작업의 성격상 쉽게 오류를 범할 수 있다. 이러한 점들은 비전문가들에 의한 유한요소법의 이용을 어렵게 하고 있고, 유한요소해석 모델링의 궁극적인 목표인 완전 자동화를 위해서도 필히 해결해야 할 과제가 되고 있다.

유한요소망의 자동생성에 대한 필요성은 최근 설계능률을 높이는 데 크게 기여하고 있는 형상모델러(geometric modeler)의 개발로 인하여 더욱 가중되고 있다. 형상모델러는 빠른 시간에 다양한 방법으로 기하학적 형상을 생성시키기 때문에, 이에 맞추어 유한요소망의 생성과정에서의 병목현상을 해결한다면 실제의 자동화에 대한 유한요소법의 영향을 극대화시킬 수 있을 것이다. 다행히 이러한 유한요소의 생성시간은 컴퓨터 그래픽스를 이용한 여러가지 모델방법의 출현에 따라 점차 단축되고 있다. 아직 미흡하지만 유한요소망 생성의 완전 자동화를 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 학술회의(ASCE National Convention in Boston, Oct-1986)의 한 분야로 다루어야 될 만큼 학계 및 산업계의 관심이 고조되고 있다.

이 글에서는 해석결과나 오류치 평가(error estimate)에 의한 유한요소망의 자체조정(adaptive) 기법을 제외한, 유한요소망의 자동 생성 방법에 대한 개념과 분류, 그리고 연구활동에 관하여 전반적으로 소개하고자 한다. 각 방법의 원리에 대한 자세한 설명은 되도록 피하고 대신 관련근원을 인용함으로써 특별한 분야에 관심이 있는 독자가 참고할 수 있도록 한다. 우선 2절에서는 그 출현으로 인하여 종래의 유한요소망의 자동 생성기법에 대한 개념을 수정시킨 형상 모델링에 관해 간략히 설명하고, 유한요소망의 생성기법과의 상관관계를 밝힌다. 3절에서는 현재 쓰이고 있는 유한요소망의 자동 생성기법들을 분류하고, 이에 따른 대표적인 기법들을 소개한다. 끝으로 앞으로 해결되어야 할 문제점과 연구방향에 대한 의견을 제시한다.

2. 형상모델링과 유한요소망의 자동 생성

공학적 환경의 급격한 변화와 심각한 산업경쟁에 대응하기 위해서 종래의 단순히 기능과 강도를 만족시키는 정도의 설계개념으로는 이제 충분하지 못하다. 많은 비용을 들이지 않고 생산성 및 제품의 질을 향상시킬 수 있는 방법에 더 많은 관심을 쏟지 않으면 안되며, 이러한 것들을 해결해야 하는 것이 설계의 자동화가 안고 있는 문제점이다.

현재로서 설계개념에 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 분야는 형상모델링과 유한요소법의 응용이라 할 수 있다. 형상모델러는 요구되는 기능에 알맞는 형상을 생성시키고 그것을 3차원으로 가시화시킬 수 있는 당장의 이점이 있지만, 더욱 중요한 것은 생성된 기하학적 자료를 설계 및 생산의 자동화 과정에 직접 응용할 수 있다는 점이다. 실제로 형상모델러에 의해 생성된 형상 자료를 공유하여 유한요소모델링과 NC(Numerical Control) 프로그래밍에 이용함으로써, 설계에서 생산에 이르기까지의 과정을 일체화시킬 수 있는 방법에 대한 연구가 관심을 끌고 있다. 유한요소법은 설계의 초기단계에 적용되어 원하는 대상물의 거동을 미리 예측함으로써 설계의 기본적인 수정을 빠른 시간에 저렴한 비용으로 가능하게 한다. 따라서 사용자가 수시로 상황에 따른 대책을 세우기 위해 간섭해야 하는 시간과 노력을 극소화시키기 위해서는 유한요소망의 자동 생성기법이 형상모델러에 의해 생성된 형상자료의 형태에 알맞도록 개발되어야 한다.

형상모델러는 그 대상물체를 기술하는 방법, 즉 형상자료의 형태에 따라 대략 다음과 같이 분류할 수 있다^(1,2).

(1) 뼈대 모델러(Wireframe Modeler)

대상물체를 그 가장자리(edge) 선분으로 나타낸다. 예를 들면 6면체의 경우 21개의 가장자리 선분으로 나타낸 뼈대구조물의 형태로 표시

하고 그 선분 자체와 연결성(connectivity)의 자료를 저장한다. 따라서 표면이 꼭면인 경우 그 정의를 정확히 내릴 수 없으며 이 형상자료에 의해 생성된 유한요소망의 타당성은 불확실하다.

(2) 표면 모델러(Surface Modeler)

대상물체를 그 물체의 표면의 집합으로 표시한다. 꼭면을 나타낼 수 있지만, 내부에 대한 정보의 부재 때문에 부피나 질량을 계산해 낼 수 없어 일반적으로 유한요소망의 자동 생성에는 부적당하다. 그러나, 박벽 구조물 혹은 내압에 의한 인장력으로 그 형상이 수시로 변화하는 섬유재질의 지붕구조물과 같은 경우 적절히 사용될 수 있다.

(3) 고체 모델러(Solid Modeler)

가장 대표적인 형상모델러로서 대상물체에 대한 정의가 명확하다. 형상자료를 만들어 내기 위해서 대체적으로 다음 두 가지의 방법이 쓰이고 있다.

(가) CSG(Constructive Solid Geometry)방법 : 미리 정의된 기본적인 모양, 즉 블럭, 원통, 원추, 구등을 그 크기와 위치를 지정하고 부울리안 작업(boolean operation: union, difference, intersection)을 통하여 대상물체를 나타낸다.

(나) bRep(Boundary Representation) 방법 : 대상물체를 경계면, 경계선등을 이용하여 조직적으로 나타낸다. 형태, 크기 및 위치가 지정된 표면의 연결로 대상물체를 정의하고, 다시 각 표면은 가장자리 선분의 연결로 나타낸다.

이 두 가지 방법은 표면과 가장자리 선분을 수학적으로 명확히 나타낼 수 있으며, 서로의 장점을 취하여 혼용하는 경우도 있다. 이 외 대상물체를 기본요소, 즉 정 6면체나 블럭등의 집합체로 나타내는 요소분해법(cell decomposition)등도 쓰이고 있다.

형상모델러에 의한 이러한 형상자료에 근거하여 유한요소망을 생성하기 위해서는, 유한요소망의 생성 자체가 기하학적인 연산작업이므로 형상모델링에 쓰이는 모든 기능이 필요함은 물론이다. 따라서 적당한 유한요소망의 생성방법을 선택하기 위해서 먼저 어느 형태의 형상 모

델러가 사용되었는지, 또 이 모델러가 어떤 기능을 가졌으며 이들의 사용이 가능한 지에 대한 판단이 필요하다. 또한 사용자가 원하는 유한요소망의 세분화 정도나 문제의 특성에 적합한 유한요소의 형태에 따라서 생성방법의 선택이 달라질 수 있다. 어느 특정한 생성방법은 항상 밀집된 유한요소망만을 생성시키며, 특정한 형태의 유한요소만을 생성시키기도 한다. 끝으로 이 글에서는 취급하지 않은 유한요소망의 자체조절이나 개선기능을 쉽게 연결시킬 수 있는지에 따라 그 선택이 달라질 수 있다. 이러한 복잡성 때문에 아직 형상모델러와 유한요소망의 자동생성 기법의 통합은 어려움을 겪고 있다. 두 기능의 통합문제에 관심이 있는 독자는 참고문헌 (3)과 (4)를 참고하기 바란다. 지금까지 언급한 점들을 배경으로 다음 절에서는 현재까지 보편적으로 쓰이고 있는 대표적인 유한요소망의 생성기법에 대하여 소개한다.

3. 유한요소망의 자동생성 방법

유한요소법의 자동생성 기법의 개념은 크게 매핑 혹은 좌표변환에 의한 생성과, 주어진 대상물체의 형상을 바람직한 유한요소로 분해해가는 기하학적인 작업에 의한 생성으로 대별할 수 있다. 이러한 구별은 1970년대 후반 강력한 기능을 갖춘 컴퓨터 그래픽스의 등장에 힘입은 형상모델러의 급격한 개발로 더욱 뚜렷해졌다. 비록 그 응용에 따라 차이가 있지만, 최근의 연구 추세는 유한요소망의 자동 생성기법을 형상모델러와 연결시키고 상호간의 기능을 공유, 또는 보완함으로써 유한요소망 생성의 완전 자동화를 이룩하려는 노력이 주를 이루고 있다.⁽³⁻⁵⁾

비록 그 개념이나 기법에 차이가 있지만 모든 유한요소망의 생성방법들에게 공통적으로 요구되는 사항들이 있다. 우선, 대상영역의 경계를 정확히 모델링하여, 유한요소법의 discretization에 의한 원천적인 오차 이외의 어떠한 기하학적 오차도 허용치 않아야 한다. 그리고 경계에서의 유한요소망과 내부의 유한요소망사이에 좋은 상

관관계를 유지할 수 있어야 한다. 이는 사용자가 원하는 형태로 내부의 유한요소망이 생성될 수 있도록 하는 동시에 요소망의 편집 및 수정을 쉽게 한다. 또한 유한요소망의 topology를 자동으로 생성시킬 수 있어야 한다. 즉, 사용자의 간섭없이 유한요소의 연결자료(connectivity)를 유한요소해석에 알맞는 형태로 구성할 수 있어야 한다. 이러한 사항들 이외에도, 그 응용의 일반성, 계산의 효율성, 절점 번호의 최적화 특정한 유한요소해석에 알맞는 형태를 가진 유한요소의 생성등도 유한요소 생성방법들이 갖추어야 할 점들이다.

위에서 언급한 이러한 사항들을 염두에 두고, 현재 사용되고 있는 대표적인 생성방법들을 편의상 다음과 같이 분류하여 살펴보기로 한다. 여기서 각 방법의 원리에 대한 자세한 설명은 되도록이면 참고문헌으로 대신하고, 필요한 경우 3차원 고체로의 그 기법의 연장이 명백한 것은 평면 또는 곡면문제로 간략히 설명한다.

3.1 Laplacian 방법

이 방법에서는 경계선 내부의 절점 i 에 대한 위치벡터 P_i 가 다음 식을 만족하도록 결정하고 이에 의해 유한요소를 생성시킨다.

$$P_i = \frac{1}{2N_i} \sum_{n=1}^{N_i} (P_{n_i} + P_{n_i}) \quad (1)$$

여기서 N_i 는 절점 i 에 연결된 요소 수이고, 그림 2에서와 같이 P_{n_i} 와 P_{n_i} 은 절점 i 에 연결되

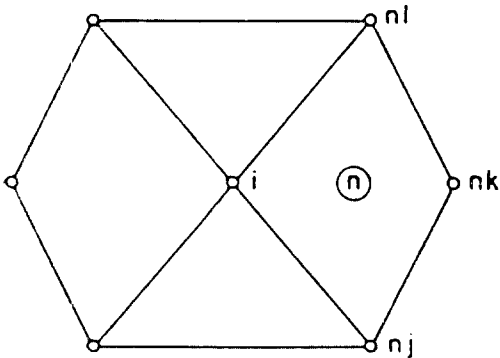


그림 2 Laplacian 방법

어 있는 요소 n 의 절점 n_j 와 n_l 에 대한 위치 벡터이다. 식 (1)은 미지수 P_i 에 대한 비선형 연립방정식이므로 Gauss-Seidel 혹은 Jacobi 반복법으로 풀 수 있으나 많은 계산량을 요한다. 이 방법에 의한 내부 절점의 결정은 경계에서의 절점간 거리와 곡률등의 기하학적 형상자료를 제대로 반영치 못하게 되는데, 이의 해결을 위하여 매개변수를 이용하여 변형된 형태의 식을 이용하기도 한다⁽⁶⁾. 또한 이 방법으로는 유한요소의 연결성(connectivity) 자료를 만들어낼 명확한 기법이 없기 때문에 매핑을 이용하여 자료를 만들어 내는 방법이 쓰이기도 한다⁽⁷⁾. Laplacian 방법에 의해 생성된 유한요소망은 대체로 균일한 분포를 보이며, 따라서 다른 방법에 의해 생성된 유한요소망을 매끄럽게(smooth) 하는 데 많이 사용되고 있다.

3.2 매핑(Mapping) 방법

주어진 대상영역을 형상함수를 이용하여 간단한 형태의 영역으로 매핑시키고, 이 영역에 유한요소망을 구성한 후 이를 다시 원래의 영역에도로 매핑시키는 방법이다. 대표적인 예는 잘 알려진 isoparametric 매핑을 이용하는 방법으로^(8,9) 절점의 위치를 명확히 정의된 함수에 의해 구해낼 수 있으며 경계와 내부의 유한요소망 사이의 상관관계가 좋기 때문에 바람직한 형태의 유한요소망을 생성시킨다. 반면에 대상영역의 마주보는 양 변에 같은 수의 요소를 배치해야 하는 제한이 있으며, 일반적으로 대상영역의 경계를 정확히 묘사할 수 없다. 평면상에서 주로 4변형 형태의 유한요소가 생성된다.

이와 다른 형태로, 3차원 곡면에 대한 유한요소망의 생성에 매우 효과적으로 쓰이고 있는 transfinite 매핑⁽¹⁰⁾을 이용하는 방법이 있다. 우선 경계의 형상을 정확히 함수로 표시하고, 매개변수를 이용한 보간법(interpolation)을 통해 내부영역을 이 함수를 사용하여 나타낸다. 유한요소망의 구성에 필요한 내부절점들은 미리 지정된 변수값을 갖는 곡선들의 교차점들로 선택한다. 이렇게 임의로 선택된 절점들은, 보간법

에 사용된 점들의 위치에서만 주어진 형상과 일치하게 되는 isoparametric 매핑과는 달리, 모든 절점이 주어진 형상과 정확히 일치하게 되어 기하학적인 오차를 상당히 줄일 수 있다. 이러한 성질 때문에 그 이름이 transfinite 매핑으로 명명되었던 것이다. 이론적으로는 어떠한 다각형 형태의 유한요소의 생성도 가능 하지만, 주로 사변형 혹은 삼각형의 요소가 만들어진다. 이 방법에서는 모든 경계를 연속함수로서 표시하게 되는데, 이는 그 형태에 따라 일반성을 잃을 우려가 있고 또한 전산기를 이용한 계산에 부적당하다. 이 때문에 discrete transfinite 매핑^(11,12)이 주로 쓰이고 있는데, 많은 양의 자료를 취급해야 하는 절점이 있지만 그 수행능력은 뛰어난 편이다.

이상과 같은 매핑 방법은 3차원 고체에 대한 유한요소망의 생성에도 CSG 모델러와 함께 성공적으로 이용되기도 한다⁽⁵⁾. 그러나 이 경우가 끝 overspill의 문제가 발생할 수 있기 때문에 복잡한 형상의 경우 간단한 형태의 작은 형상들로 분할한 후 이 방법을 적용한다. 이러한 점은 유한요소망 생성의 자동화를 막는 요인이 되고 있다.

3.3 3각 분할법 (Triangulation)

이 방법은 주어진 표면이나 부피를 여러가지 방법에 의해 세분화를 계속하여 유한요소를 만들어 내는 방법이다. 이는 마치, 미지의 길이나 위치를 3각법을 이용하여 정확히 측정하기 위해서 길이가 정해진 기준선으로부터 일련의 3각형망을 계속 형성해 나가는 3각측량의 원리와 같다고 할 수 있다. 입력자료로는 주어진 형상의 경계자료와 유한요소망의 밀도에 대한 자료 정도가 필요하며, 임의의 복잡한 형상을 취급할 수 있어 유한요소망 생성의 자동화가 상당히 쉬운 편이다. 대체로 bRep 방법의 형상모델러와 함께 쓰이나, 다른 형태의 형상모델러와도 같이 사용될 수 있다.

2차원에서의 3각분할방법의 대부분은 대상 영역의 경계를 요소의 가장자리 선분들로 분할

하고, 이에 따라 경계에 형성되는 다각형으로부터 3각 분할해 나간다⁽¹³⁻¹⁵⁾. 때로는 내부절점의 위치등의 내부영역에 대한 자료를 이용하기도 하며^(13,14) 정상적인 형태의 요소 모양을 유지하며 서로 크기가 다른 요소간의 전이과정을 매끄럽게 하면서 유한요소망을 더욱 세분화 시킬수 있는 기법이 함께 쓰이기도 한다⁽¹⁶⁾.

대표적인 3차원 방법중의 하나인 TRIQUA-MESH⁽¹⁷⁻¹⁹⁾의 경우, 우선 표면의 경계에서 입력된 밀도자료에 의해 절점을 선정하고 이에 따라 형성된 다각형을 적당한 절취선을 선정하여 3각형의 요소가 될 때까지 분할해 나간다. 이렇게 생성된 절점들은 Laplacian 방법등에 의해 매끄러운 요소망이 되도록 다시 그 위치를 조절하게 된다. 3차원의 경우 절취선의 루프(loop)로서 절취면을 이루고 이에 의해 다면체를 만든 후 같은 원리로 4면체의 요소로 분할해 나간다. 이 방법으로 4변형이나 6면체의 요소망을 생성시킬 수 있으나 대체로 심하게 뒤틀린 형태로 되기 쉽다. 다른 형태의 방법으로는⁽²⁰⁻²²⁾ 사용자가 입력시킨 경계 및 내부 절점들 중 자기 선택된 기준에 의해 4면체를 이루는 정점들을 선정, 혹은 수정하여 선정하는 방법이 있다. 이상 언급한 방법에서는, 유한요소해석에 타당한 모양의 요소를 만들기 위해서 인접한 두 평면이 이루는 각이나 aspect ratio 등의 기하학적인 구속조건에 대한 검증이 필요하며, 대체로 사용자의 간섭등이 필요하다.

3.4 요소 분해법 (Cell Decomposition)

주어진 형상을 4변형이나 6면체등의 기본적인 형태의 요소로 분해해가는 방법으로, 가장 대표적인 방법으로 2차원의 Quadtree 방법과 3차원의 Octree 방법이 있다⁽²³⁻²⁶⁾.

Octree 방법의 기본적인 단계는, 우선 대상영역에 정수(integer) 좌표계를 설정하고 이에 따라 6면체 요소로 대상영역을 분해한다. 경계면을 포함하는 요소는 다시 더 작은 크기의 6면체 요소로 분해하며, 최종적으로 경계에 위치하는 요소의 정점들을 대상영역의 경계에 이동시

키거나 요소를 절단함으로써 대상물체의 기하학적 형상을 정확히 모델링한다. 이 요소들을 유한요소해석에 알맞은 4면체 혹은 6면체 요소로 분할하며, 절점의 위치는 원래의 좌표계로 변환 함으로써 얻어진다.

이 방법은 대체로 CSG 형태의 형상 모델러와 같이 쓰이며, 형상 모델러와 연결하여 사용하기 위해서는 절점을 경계의 가장자리 선분이나 표면에 옮길 수 있고 절점이 대상물체의 내부 혹은 외부에 있는지를 검증할 수 있는 기본적인 기하학적 연산기능이 필요하다. 비록 이 방법의 원리는 복잡한 편이지만, 형상 모델러의 사용과 병행한 이러한 기능을 통하여 유한요소생성의 완전 자동화에 보다 더 접근한 방법이라 할 수 있다. 그러나 대상물체의 내부에서 크기가 큰 요소를 생성시키거나 경계에서 필요이상으로 많은 작은 크기의 요소를 생성시킬 위험이 있으며, 따라서 경계와 내부의 유한요소망사이의 상관관계가 좋지 않을 경우가 있다.

CSG 형태의 형상 모델러에 알맞는 다른 형태의 방법으로는 절점을 생성시킨 후 이에 의해 유한요소망을 만드는 point-based 방법⁽²⁷⁾이 있으며, 고체 내부에 공동이 존재하는 경우를 위하여 4면체 요소를 생성시키는 방법도 있다⁽²⁸⁾.

4. 맺음말

지금까지 유한요소망의 자동생성 방법에 대하여 현재 보편적으로 쓰이고 있는 것을 중심으로 살펴 보았다. 특히 최근 유한요소해석을 포함한 설계의 완전자동화에 대한 연구 추세에 의해 형상 모델러의 기능이 중요하게 됨에 따라 유한요소망의 자동생성과 형상 모델러의 관계를 기술하였다.

유한요소망의 자동생성에 대한 현재 상황은, 3차원 곡면의 경우까지는 거의 완벽한 자동생성이 가능하지만, 3차원 고체의 경우 모든 가능한 상황에 대처할 수 있는 일반적인 자동생성 방법을 위해서는 더 많은 진전이 이루어져야 할 것이다. 특히 이 경우, 2차원 문제와는 달리

해석전에 미리 사용자가 필요한 유한요소망의 밀도를 쉽게 예측할 수 없기 때문에 해석결과나 오류치 평가에 따라 유한요소망을 조절해가는 자체조절 기능이 더욱 중요하게 된다. 이 기능이 충분히 발달되면 자동생성의 문제점이나 그 원리의 복잡성등을 직접 해결할 필요성이 없어질 것이다.

끝으로, 이 글에서는 되도록 참고문헌을 가능한 한 많이 인용하도록 노력했으며 이 중 필자가 검토하지 못한 문헌도 독자의 편의를 위해 인용했음을 밝힌다.

참 고 문 헌

- (1) Requicha, A.A.G. and Voelcker, H.B., 1982, "Solid Modeling: A Historical Summary and Contemporary Assessment", IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.3, pp.9~24.
- (2) Requicha, A.A.G. and Voelcker, H.B., 1983, "Solid Modeling: Current Status and Research Directions", IEEE Computer Graphics and Applications, pp. 25~37.
- (3) Shepard, M.S., 1985, "Finite Element Modeling Within an Integrated Geometric Modeling Environment: Part I-Mesh Generation", Engineering With Computers, Vol. 1, pp.61~71,
- (4) Shepard, M.S., 1985, "Finite Element Modeling Within an Integrated Geometric Modeling Environment: Part II-Attribute Specification, Domain Differences, and Indirect Element Types", Engineering With Computers, Vol. 1, pp.73~85.
- (5) Chavez, P.F., 1986, "Automatic Mesh Generation and Optimization from the Solids Model Data Base", Modern Methods for Automating Finite Element Mesh Generation, ASCE, pp.29~42.
- (6) Herrmann, L.R., 1976, "Laplacian-Isopar-

- ametric Grid Generation Scheme”, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 102, pp.749~756.
- (7) Denayer, A., 1978 “Automatic Generation of Finite Element Meshes”, Computers and Structures, Vol.9, pp.359~364.
- (8) Zienkiewicz, O.C., and Phillips, D.V., 1971, “An Automatic Mesh Generation Scheme for Plane and Curved Surfaces by Isoparametric Co-ordinates”, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 3, pp.519~528.
- (9) Cooks, W.A., 1974, “Body Oriented (Natural) Co-ordinates for Generating Three-Dimensional Meshes”, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 5, pp.27~43.
- (10) Gordon, W.J., and Hall, C.A., 1973, “Construction of Curvilinear Co-ordinate Systems and Applications to Mesh Generation”, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 7, pp.461~477.
- (11) Haber, R.B., Shepard, M.S., Abel, J.F., Gallagher, R.H., and Greenberg, D.P., 1981, “A General Two-Dimensional, Graphical Finite Element Preprocessor Utilizing Discrete Transfinite Mappings”, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.17, pp.1015~1044.
- (12) Haber, R.B., and Abel, J.F., 1982, “Discrete Transfinite Mappings for the Description and Meshing of Three-Dimensional Surfaces Using Interactive Computer Graphics”, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 18, pp.41~66.
- (13) Cavendish, J.C., 1974, “Automatic Triangulation of Arbitrary Planar Domains for the Finite Element Method”, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 8, pp.679~697.
- 14) Bykat, A., 1976, “Automatic Generation of Triangular Grid: I-Subdivision of a General Polygon into Convex Subregions, II-Triangulation of Convex Polygon”, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 10, pp.1329~1342.
- (15) Sadek, E.A., 1980, “A Scheme for the Automatic Generation of Triangular Finite Elements”, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 15, pp.1813~1822.
- (16) Cecilia Rivara, M., 1984, “Algorithms for Refining Triangular Grids Suitable for Adaptive and Multigrid Techniques”, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.20, pp.745~756.
- (17) Jain, A., 1986, “Generating FE Meshes on Geometry from a Solid-Modeller”, Finite Element Methods, Modelling, and New Applications, ASME CED, Vol.1, pp.1~4.
- (18) Rudd, B.W., 1986, “Impacting the Design Process Using Solid Modeling and Automated Finite Element Mesh Generation”, Finite Element Methods, Modelling, and New Applications, ASME CED, Vol.1, pp.5~9.
- (19) Jain, A., 1986, “Modern Methods for Automatic FE Mesh Generation”, Modern Methods for Automating Finite Element Mesh Generation, ASCE, pp.19~28.
- (20) Van-Phai, N., 1982, “Automatic Mesh Generation, with Tetrahedron Elements”, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 18, pp.273~289.
- (21) Cavendish, J.C., Field, D.A., and Frey, W.H., 1985, “An Approach to Automatic Three Dimensional Finite Element Mesh Generation”, International Journal for Nu-

- merical Methods in Engineering, Vol. 21, pp.329~347.
- (22) Cavendish, J.C., Field, D.A. and Frey, W.H., 1986, "Automating Three-Dimensional Finite Element Mesh Generation", Modern Methods for Automating Finite Element Mesh Generation, ASCE, pp.61~72.
- (23) Shepard, M.S., 1984, "Automated Analysis Model Generation", Proc. of First Symposium on Computer Aided Design in Civil Engineering, ASCE, pp.92~99.
- (24) Yerry, M.A. and Shepard, M.S., 1984, "Automatic Three-Dimensional Mesh Generation by the Modified-Octree Technique", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.20, pp.1965~1990.
- (25) Yerry, M.A. and Shepard, M.S., 1985, "Automatic Mesh Generation for Three-Dimensional Solids", Computers and Structures, Vol.20, pp.31~39.
- (26) Shepard, M.S., Grice, K.B. and Georges, M.K., 1986, "Some Recent Advances in Automatic Mesh Generation", Modern Methods for Automating Finite Element Mesh Generation, ASCE, pp.1~18.
- (27) Lee, Y.T., De Pennington, A. and Shaw, N.K., 1984, "Automatic Finite-Element Mesh Generation from Geometric Models-A Point-Based Approach", ACM Transactions on Graphics, Vol. 3, No. 4, pp. 287~311.
- (28) Woo, T.C. and Thomasma, T., 1984, "An Algorithm for Generating Solid Elements in Objects with Holes", Computers and Structures, Vol. 18, No.2, pp.333~342.



국제학술대회 개최 안내

제 23 차 학회간 에너지 전환공학 학술대회

—23rd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference—

주관 : 미국기계학회 (ASME)

후원 : 미국기계학회를 포함한 7개 참여학회 및 3개 협동학회

분야 : 대체연료, 바이오매스, 브레이튼 사이클, 열병합발전, 화석연료, 연료전지, 전기추진, 전기화학적에너지, 에너지절약, 에너지저장시스템, 지열동력, 수소에너지시스템, 원자핵분열, 원자핵융합, 광전지, 랭킨사이클, 태양에너지전환, 태양열가열 및 냉각, 스팀링사이클, 열전기동력, 풍력등.

일시 : 1988년 7월 31일~8월 5일

장소 : 미국 Colorado 주 Denver 시 Denver Marriott Hotel

일정 : 1987년 12월 1일 초록 4부 제출

1988년 2월 15일 초록 채택 및 논문작성 지침

1988년 4월 25일 최종 원고를 ASME 에 제출