

# 객체 지향 모델링 개념을 이용한 이차원 구조물의 유한요소 자동 생성에 관한 연구

A STUDY ON THE AUTOMATIC MESH GENERATION OF THE TWO DIMENSIONAL  
STRUCTURE USING OBJECT ORIENTED MODELING CONCEPT

장 창두<sup>1)</sup>  
Jang, Chang-Doo

심 우승<sup>2)</sup>  
Sim, Woo-Seung

---

## ABSTRACT

Recently many efforts have been made to improve the efficiency of design and production of the structures using the automation system. But, this work has been progressed as independent or partial system. And, the study on the integrated system is not sufficient in application for practical problems yet.

This paper deals with the fundamental concept of modeling system and application method on structural modeling. At first, the core of the integrated system is a shape modeling system that can represent the geometric and topological information. This system must be designed as an open system to be combined with each independent automation system. The appropriate concept to realize this system on structural modeling is object oriented modeling and this enables to integrate each automation system successfully.

This concept was applied to automatic mesh generation. For shape modeling system, half-edge data structure that is being used in solid modeling was modified to handle the plate structure in the plane. And, to generate the triangular meshes, direct node connection method was used. And, as a result, the integrated system that generate the meshes of two dimensional structure automatically was realized. And, programmed by C++, these systems can be combined with other systems easily and have good reusability.

---

## 1. 서론

최근 들어, CIMS(Computer Integrated Manufacturing System)를 이용하여 구조물의 설계 및 생산을 자동화하려는 노력이 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 CIMS의 구축을 위해서는 구조물의 형상을 정확하게 표현할 수 있는 형상 모델링 시스템이 필요하며, 이러한 형상 모델링 시스템과 설계 및 생산의 각 분야를 유기적으로 연결시키는 방법의 연구가 필요하다.

본 논문은 이차원 평면상에서 여러 개의 평판으로 이루어진 구조물의 유한요소를 자동으로 생성하는 시스템을 예로 들어 통합 시스템을 구축하기 위한 방법을 연구하였다. 이 통합 시스템에서

---

1) 서울대학교 조선해양공학과 교수  
2) 현대중공업 선박해양연구소 해양연구실 연구원

는 형상 모델링 시스템을 구축하기 위하여, 솔리드 모델링 시스템에서 많이 사용되어지는 반모서리 구조를 변형시켜 사용하였다. 그리고, 유한요소 자동 생성 시스템을 구축하기 위해서는 절점 연결법을 이용하여 삼각형 요소를 생성하였다. 그리고, 객체 지향 모델링 개념을 이용하여, 이러한 두 개의 시스템을 각각의 독립적인 클래스로 구축하였으며, 이 두 개의 시스템을 연결하기 위하여 상속과 가상함수의 개념을 이용한 관계형 클래스를 구축하였다. 이와 같은 통합 시스템은 독립성을 가진 클래스들로 구성되어 있으므로, 다른 각각의 분야와 결합이 용이하고, 높은 재사용성을 가진다. 본 시스템의 환경은 컴파일러로써 상속, 가상 함수, template 등 다양한 객체 지향 프로그래밍 기법을 제공하여 주는 gnu C++를 사용하였으며, X-Window 환경에서 Motif와 X-Lib를 이용하여 프로그래밍 되었다.

## 2. 형상 모델링 시스템

본 논문에서는 구조물의 형상 정보를 나타내기 위하여 Mantyla[9]가 사용한 반모서리 구조를 변형하여 사용하였다. 이 자료 구조는 솔리드 모델의 형상을 나타내기 위한 것이나, 약간의 변형만으로 이차원 평면상에서 여러 개의 평판으로 이루어진 구조물의 형상을 표현할 수 있다.

### 2.1. 이차원 평판 구조물을 나타내기 위한 반모서리 자료 구조의 변형

반모서리 구조는 솔리드 모델의 인접한 두 개의 면은 항상 한 개의 모서리를 공유한다는 사실을 착안하여, 공유된 모서리를 두 개로 쪼개 반모서리가 중심 개념이 되는 자료 구조이다. 반모서리 구조는 가장 상위 구조로 Solid라는 자료 구조를 가지고 있다. Solid는 그 하위 구조로써 Face의 리스트 구조와 Edge의 리스트 구조, 그리고 Vertex의 리스트 구조를 가지고 있다. 또한, 각각의 Face 구조는 Loop라는 자료 구조를 하위 구조로 가지고 있으며, 이 Loop 구조는 루프의 형상과 방향을 정의하는 HalfEdge의 리스트 구조를 보유한다. 루프란 Face의 외곽 형상은 물론, Face를 기준하여 부피 영역의 방향, 그리고, Face 내부에 구멍(hole)이 있는 경우를 처리하기 위하여 도입된 개념이다. 루프는 외곽 루프와 내부 루프로 구별되는 데, 외곽 루프는 면의 외곽 형상을 나타내며 반시계 방향으로 돌며, 내부 루프는 구멍을 가리키며 시계 방향으로 돈다. Figure 2-1에 솔리드 모델과 그것의 반모서리 자료 구조가 나타나있다.

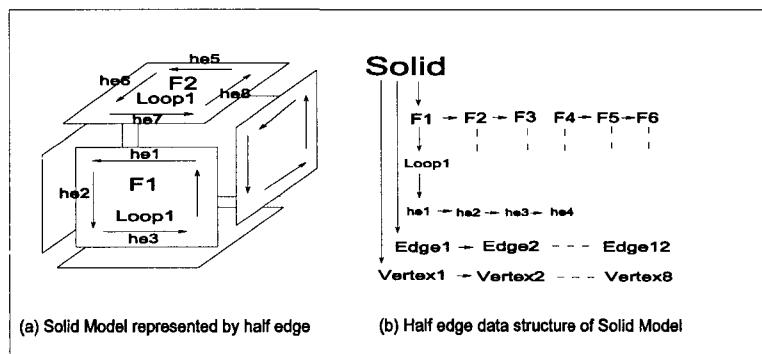


Figure 2-1 Representation of Solid Model using Half Edge Data Structure

본 논문의 시스템이 구현하고자 하는 평판 구조물의 경우 솔리드 모델이 아니므로, 위의 자료 구조 중 일정한 부피 영역을 둘러싼 Face 구조나 영역을 나타내는 Solid, 그리고 영역의 방향을 나타내는 Loop 구조는 개념이 다르게 해석되어야 한다. 먼저, Solid를 대신하는 Shape\_Model이란 구조는 각각의 판을 가리키는 Face구조의 집합체로서의 의미를 가지며, Loop 구조는 판의 외곽 형상과, 구멍(Hole)등의 정보만을 가지고 있을 뿐, 솔리드 모델에서 가지고 있던 부피 영역 방향 정보는 더 이상 가지고 있지 않다. 그러나, 여기서도 외곽 루프는 항상 반시계 방향으로 돌며 판

의 외곽 형상을 나타내는 역할을 하며, 내부 루프는 항상 시계 방향으로 돌며 판의 구멍을 나타낸다는 원칙에는 변함이 없다. 또한, 솔리드 모델은 항상 한 개의 모서리에 두 개의 면이 인접한다는 중요한 특징이 있는 데, 이것으로 인하여 Edge 구조는 항상 두 개의 반모서리로 구성되었다. 그러나, 본 시스템의 경우, Edge는 인접한 면이 있느냐 없느냐에 따라서 반모서리 한 개로 구성될 수도 있으며 반모서리 두 개로 구성될 수도 있다. 본 논문의 경우 이러한 경우를 고려하기 위하여, 인접한 면이 없는 경우 한 개의 반모서리만이 사용되며, 나머지는 영(0)으로 할당되게 된다.

### 3. 유한요소 자동 생성 시스템

구조물의 유한요소 해석을 자동화하기 위한 작업 중, 구조물을 기하학적으로 메쉬(mesh), 혹은, 유한요소라고 불리는 조각들로 자동 분해하는 것이 특히 중요한 가치를 인정 받았다. 왜냐하면, 메쉬 조각으로 구조물을 자동 분해하는 작업이 성공적으로 수행되었는가의 여부에 따라, 구조물 해석의 성패가 달려있기 때문이다. 이러한 유한요소 자동 생성 방법에는 여러 가지가 있으나, 본 논문에서는 개념이 간단하면서도, 임의의 형상에 대해서도 유한요소 생성이 가능한 절점 연결법을 사용하였다.

#### 3.1. 절점 연결법

절점 연결법(node connection method)은 물체의 경계 및 내부에 절점을 생성하는 단계와 이러한 절점들을 연결하여 요소를 생성하는 단계로 나눌 수 있다. 각 단계에 따라 여러 가지 방법이 있으나 본 논문에서는 Lo[6]의 방법을 사용하였다.

Lo의 방법은 먼저 물체의 경계를 원하는 개수만큼의 선분으로 나누는 방법에 의하여 경계에 절점을 생성시킨다. 이때, 경계선상에 형성된 절점들에 의해 분할된 각각의 선분으로 연결된 루프를 initial confront라고 한다. 이러한 confront는 방향성을 가지는데, 평면의 외곽선을 나타내기 위하여 반시계 반향을 가지며, 내부 구멍을 표현하기 위하여 시계 방향을 가진다. 그 후에, 일정한 간격을 가진 가상의 수평선들과 물체의 경계를 교차시키고, 그 결과로 물체 내부에 생성된 선분을 다시 일정한 간격으로 나누어 내부 절점(interior node)을 생성시킨다.

모든 내부 절점이 생성되었으면 절점끼리 연결하여야 한다. Initial confront는 임의의 한 절점에서 시작하는 선분으로부터 시작되어, 그 절점으로 끝나는 선분까지의 연속된 선분의 집합인데, 이러한 선분 중, 마지막으로 끝나는 선분을 여기서 '마지막 기준선'이라고 하자. 또한, initial confront상의 절점의 집합을 A, initial confront 내부에 있는 절점을 B, 이 두 집합의 합집합을 C라 하자. 그리고, 집합 C의 원소 중 initial confront의 마지막 기준선의 양 쪽지점과 연결되었을 경우, 가장 적합한 삼각형 유한요소를 생성하는 절점을 c라 하자. 이러한 점 c와 initial confront의 마지막 기준선을 연결하여 새로운 요소를 한 개 생성한다. 일단 요소가 한 개 생성되면 initial confront, 집합 A, 집합 B, 집합 C는 새롭게 변경된다. 이렇게 일단 변경이 일어난 initial confront는 이제부터는 그냥 confront라고 불린다. 변경된 confront의 마지막 기준선은 다시 변경된 집합 C중에서 적합한 c를 골라내어 삼각형 유한요소를 생성하고 또 다시 confront, A, B, C를 변경한다. 계속적으로 이러한 과정을 반복하면 confront가 변해 가는데, confront가 완전히 없어졌을 때가 요소가 모두 생성되었을 때이다. Figure 3-1은 위에서 설명한 방법에 의하여 confront가 전파되는 과정을 나타낸 것이다.

그리고, 절점연결법을 이용하여 삼각형 유한요소를 생성할 경우 생성된 유한요소의 모양은 가지각색으로 불규칙하다. 만약, 너무 편평한 삼각형이 생성되었다면 이것은 구조물의 해석에 나쁜 영향을 미칠 것이다. 이렇게 모양이 좋지 않은 삼각형 요소를 정삼각형에 가까운 삼각형 요소로 바꾸는 것을 smoothing이라 한다. Smoothing은 다음과 같은 방법으로 행해진다. 위에서 설명한 방법에 의하여 유한요소가 생성되었다면, 물체 내부에 있는 각각의 절점에 대해서, 그 절점의 위치를 절점을 둘러싸고 있는 삼각형이 이루는 다각형의 무게중심으로 이동시킨다. Figure 3-2은 절

점 연결법에 의하여 불규칙한 경계를 갖는 평면의 유한요소를 자동 생성한 결과와 smoothing의 효과가 나타나 있다.

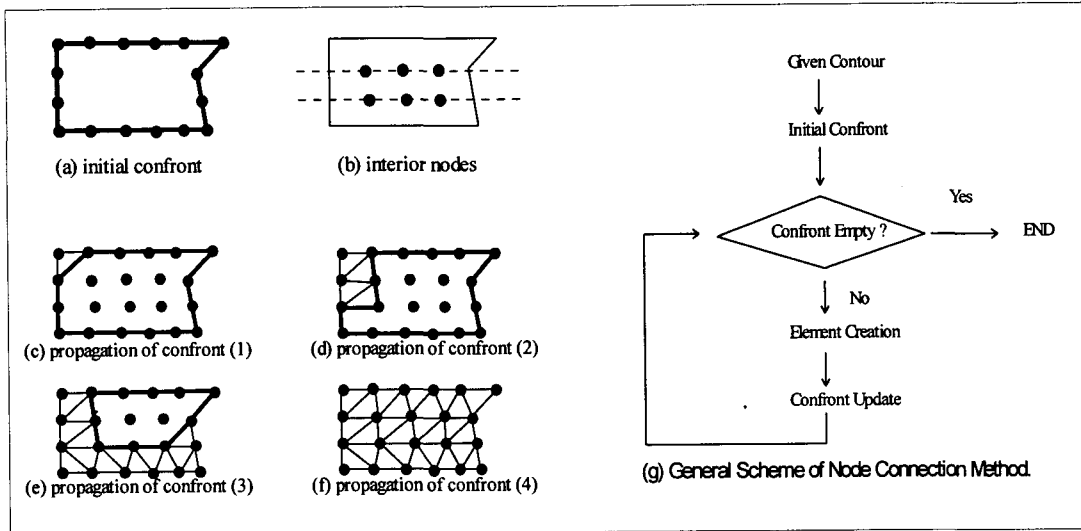


Figure 3-1 Node Connection Method & Propagation of Confront

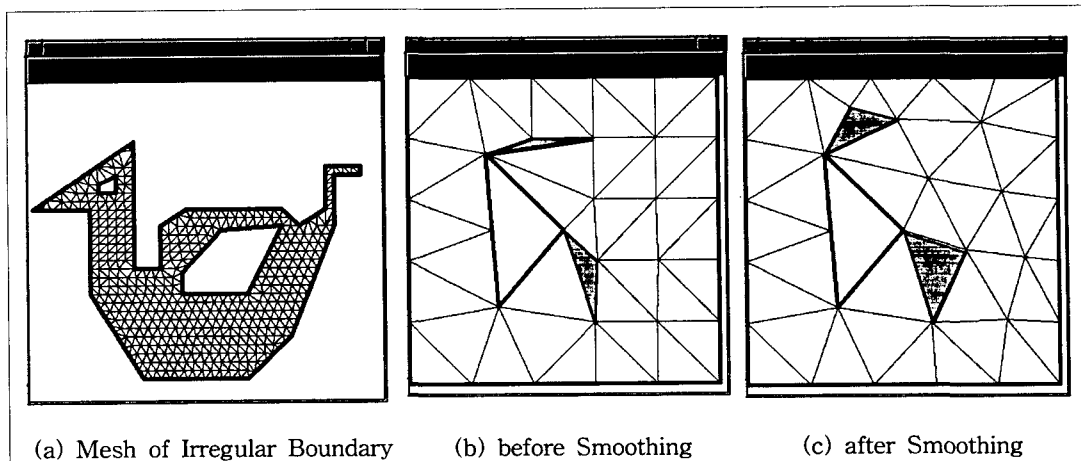


Figure 3-2 Examples of Node Connection Method & Smoothing

#### 4. 객체 지향 모델링 개념을 이용한 시스템의 결합

##### 4.1. 객체 지향 모델링의 개념

구조물의 모델링을 컴퓨터를 이용하여 하게 될 때, 구조물의 기하학적 정보와 물질적 특성은 컴퓨터내의 변수(variable)라는 형태로 전환되어지며, 구조물의 거동 양식은 일련의 연산의 조합, 즉, 프로시저(procedure)로 전환되어진다. 결국, 구조물은 변수와 프로시저라는 형태로 프로그래밍 된다고 할 수 있다. 전통적인 프로그래밍 기법은 변수와 프로시저가 서로 다른 영역으로 확연히 분리되어 둘 사이의 유기적인 연관 관계를 잘 표현하지 못하였다. 따라서, 실제로는 단일한 형태로 존재하는 구조물을 컴퓨터 내에서도 단일한 형태의 어떤 것으로 대응시키기가 힘들었다. 이러한 단점을 극복하고자 새롭게 등장한 프로그래밍 개념이 객체 지향 프로그래밍이다. 이러한 객체 지향 프로그래밍은 객체 지향 언어를 통하여 구현되며, 여기서는 그 중 하나인 C++를 예로 들어

설명하겠다. C++은 클래스라는 자료형으로부터 실제화되는 객체가 중심이 되는 언어이다. 클래스란 변수와 프로시저가 통합된 자료형이다. 정수형이나 실수형으로부터 하나의 변수가 실제화(instantiation)되듯이 클래스라는 자료형으로부터는 객체(object)가 실제화된다. 객체는 변수에 해당하는 데이터 멤버와 프로시저에 해당하는 멤버 함수로 구성된다. 즉, 객체는 구조물의 수치적 정보를 데이터 멤버의 형태로 저장하며, 거동 양식을 멤버 함수의 형태로 저장한다. 이러한 객체의 개념을 통해서 하나의 구조물이 하나의 객체로 변환되는 자연스러운 모델링을 할 수 있다. 이렇게 객체의 특징을 이용하여 모델링 하는 것을 객체 지향 모델링이라 한다. 또한, 클래스는 상속(inheritance), 프렌드(friend), 다형성(polymorphism), 연산자 중복(operator overloading), 템플릿(template), 예외 처리(exception handling) 등의 기능을 제공하므로, 모델링을 더욱 사실적이면서도 쉽게 하도록 도와준다.

#### 4.2. 각 시스템을 구성하는 클래스의 구축

앞에서 설명한 객체 지향 모델링의 개념을 이용하여 실제 구조물을 모델링 하는 방법을 살펴보자. 먼저 모델링 하고자 하는 시스템을 명확히 설정하여야 하는데, 본 논문에서 모델링 하고자 하는 시스템은 다음과 같다.

#### ‘이차원 평면상에서 여러개의 평판으로 이루어진 구조물의 유한요소를 자동 생성하는 시스템’

이제 이러한 시스템을 분석하여 클래스로 될 수 있는 것을 찾아내는 작업이 필요하다. 본 논문은 목적하는 시스템을 크게 하나의 클래스로 보고, 이것을 System 클래스라고 하였다. 이 System 클래스는 크게 구조물의 형상에 대한 정보를 갖고 있는 클래스와 평판들의 유한요소를 자동 생성할 수 있는 기능을 가진 클래스, 그리고 이 두 클래스를 연결시키는 관계형 클래스로 구분하였다. 각각의 클래스를 Shape\_Model, Mesh\_Model, SM\_Relation이라 하였다.

Shape\_Model은 앞에서 설명한 변형된 반모서리 자료 구조의 개념을 이용하여 구조물의 형상을 표현하였다. 반모서리 구조는 면, 모서리, 꼭지점, 루프, 반모서리 등으로 구성되었는데, 이를 클래스로 만든 것을 각각 Face, Edge, Vertex, Loop, HalfEdge라고 하였다. Mesh\_Model을 구성하는 클래스를 찾아내기 위하여 이에 대한 분석을 해보자. Mesh\_Model은 여러 개의 평판을 다루어야 한다. 그러나, 여기서 사용될 유한요소 자동 생성 방법인 절점 연결법은 한 개의 평판만을 처리하는 기능이 있으므로, 유한요소를 생성하는 단위가 되는, 한 개의 평판 모델의 개념인 Mesh\_Plate 클래스가 필요하다. 또한, 절점 연결법은 유한요소를 생성하기 위하여 평면 모델의 경우, 입력 자료로써 initial confront를 이루는 선분들의 꼭지점들의 집합만을 요구한다. 그리고, 결과 자료로써 평판 내부에 생성된 삼각형 유한요소들의 세 꼭지점을 알려준다. 여기서 외각선의 형상을 나타내는 꼭지점의 집합으로 구성된 클래스를 Plate라고 하자. 또한, 삼각형 유한요소의 세 꼭지점의 정보를 담을 수 있는 클래스를 Triangle이라고 하자. SM\_Relation을 구성하는 클래스를 찾아내기 위한 분석을 하기 전에 관계형 클래스에 대해서 알아보자. Plate를 구성하는 꼭지점의 집합을 생성하기 위해서는 Shape\_Model의 정보를 Plate가 볼 수 있어야 하는 데, 일반적으로 클래스는 은폐되어 있으므로 이것은 불가능하다. 이를 해결하기 위해서 이미 구현되어 있는 Shape\_Model과 Mesh\_Model의 소스 코드를 직접 건드리는 것은 클래스의 캡슐화(encapsulation) 정도를 저하시키며 많은 중복 작업을 필요로 한다. 이렇게 정보가 은폐되어 있어 발생하는 문제를 해결할 뿐만 아니라, 이미 구현된 클래스들의 독립성을 보장하기 위해 도입된 개념이 관계형 클래스이다. 이제, 본 시스템이 도입한 관계형 클래스인 SM\_Relation을 분석해 보자. SM\_Relation이 Plate와 Shape\_Model의 멤버를 모두 처리(access)할 수 있어야 하므로, Shape\_Model과 Plate를 모두 상속시켜 SM\_Relation을 생성한다. 이때, Plate 클래스에서 유한요소를 생성하는 함수는 실제로는 SM\_Relation에서 구현되므로, Plate 클래스에서는 가상 함수(virtual function)로 선언되어야 한다. Figure 4-1는 이러한 클래스의 관계를 계층 구조로써 보여 준다. Figure 4-2은 두 개의

평판으로 구성된 구조물을 예로 들어, System 클래스가 객체로 실체화되었을 때, 각각의 클래스들이 생성한 객체들간의 관계를 나타내었다.

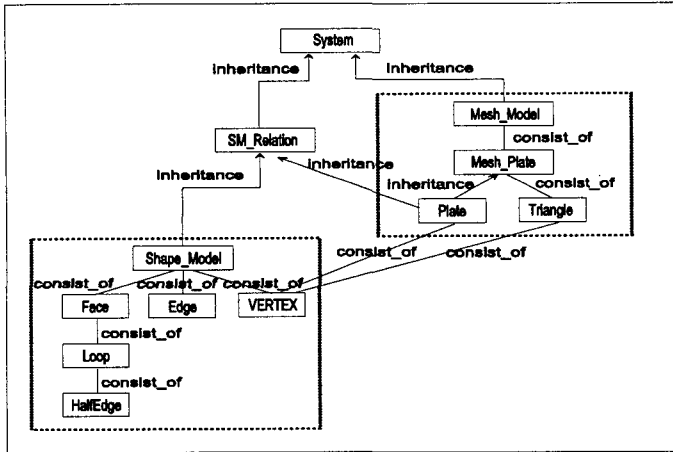


Figure 4-1 Hierarchical Relation of System Class

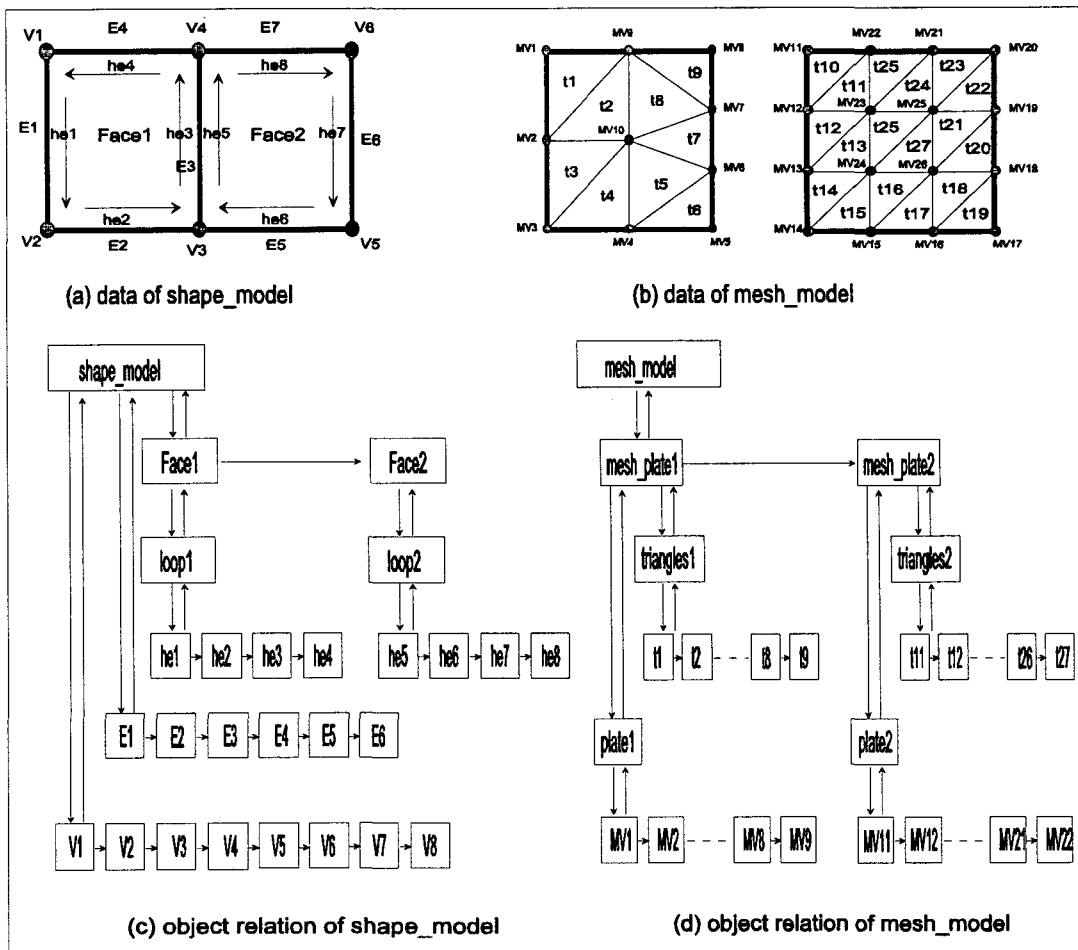


Figure 4-2 Object Relation of System Class composed of Two Plates

### 4.3. 형상 모델링 정보를 이용한 유한요소 자동 생성 시스템의 구현

한 개의 평판으로 이루어진 구조물의 경우에는 구조물의 외곽선을 표현하는 루프와 구멍(hole)을 표현하는 루프로써 구조물의 기하학적 형상을 쉽게 표현할 수 있다. 그러나, 이차원 평면상에서 여러 개의 평판으로 구성된 구조물의 경우에는, 평판들의 기하학적 정보뿐만 아니라, 평판간의 연결 관계, 즉, 위상 관계에 대한 정보 역시 존재하여야만 구조물의 형상을 정확히 정의할 수 있다. 평판들의 연결 관계에 대한 정보가 정의되지 않았을 때 발생하는 문제를 살펴보자. 어떤 평판의 유한요소를 생성하기 위해서는 initial confront를 생성하는 것이 필요하다. 이러한 initial confront는 평판의 기하학적 형상 정보만으로도 충분히 생성될 수 있으나, 인접한 평판의 유무를 고려하지 않을 경우 인접한 평판과 공유되는 모서리에서 변절점이 생긴다. 그러면, 반모서리의 개념을 이용하여 이러한 변절점을 없애는 방법을 알아보자. 어떤 판이든지 그것의 initial confront는 그 판을 이루는 외곽 루프와 내부 루프에 의해서 결정된다. 이러한 루프 정보는 방향을 갖는 반모서리들로 구성되는데, 만약 이러한 반모서리가 그 짝에 해당하는 반모서리를 갖고 있다면, 그 모서리는 또 다른 판과 연결되어 있는 것이다. 이럴 경우에는 두 판의 정보를 모두 고려하여, 두개의 반모서리가 기하학적으로 일치되는 initial confront를 가지도록 반모서리를 초기 분할한다. 이러한 방법으로 변절점이 생기는 것을 피할 수 있다. 이러한 개념이 Figure 4-3에 나타나 있다.

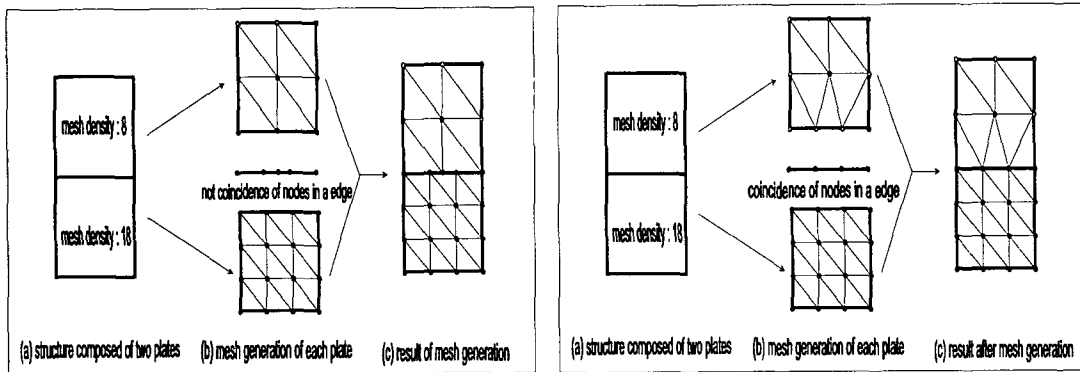


Figure 4-3 Mesh Generation of Structure using the Half Edge Data Structure

### 4.4. 실행 예제

Figure 4-4은 본 논문에서 구현한 시스템을 이용하여 유한요소의 밀도가 다른 평판으로 이루어진 구조물의 유한요소를 생성한 예제이며, Figure 4-5은 응력 집중이 일어나는 구조물의 유한요소를 생성한 결과이다

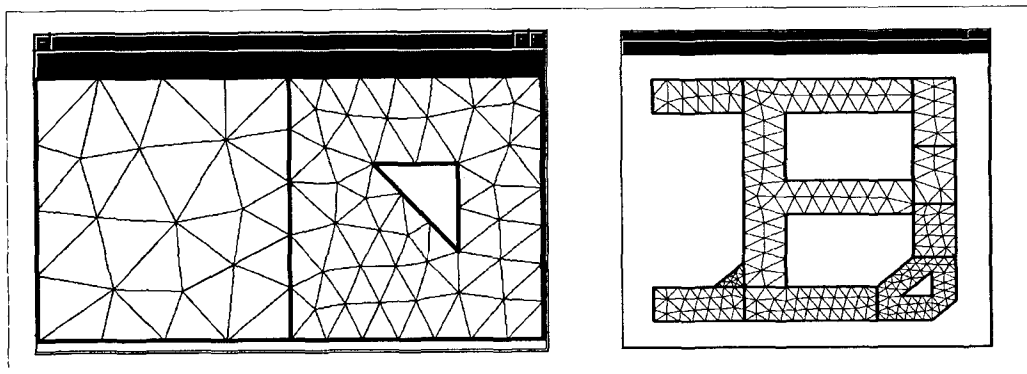


Figure 4-4 Mesh Generation of Plates having Different Mesh Density

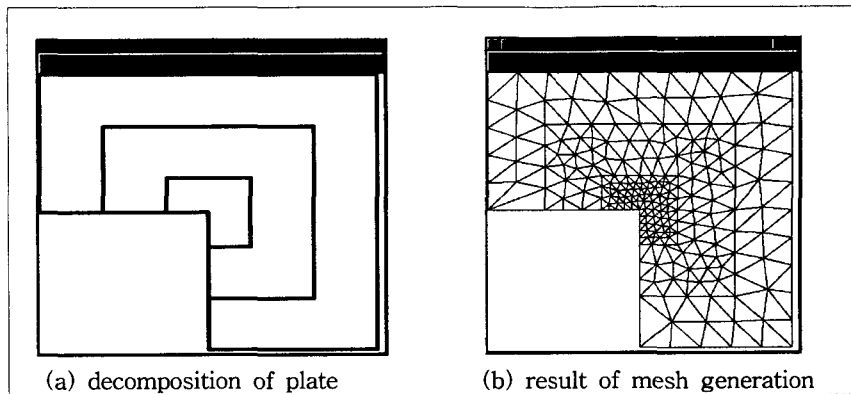


Figure 4-5 Mesh Generation of U-type Plate for Stress Concentration Analysis

## 5. 결론

본 논문은 구조물의 설계 및 생산의 통합 자동화 시스템을 구축하기 위한 기초 연구로서, 형상 모델링 시스템과 유한요소 자동 생성 시스템을 객체 지향 모델링 개념에 입각하여 통합시켰으며, 결과적으로, 이차원 평면상에서 여러 개의 평판으로 이루어진 구조물의 유한요소를 자동으로 생성하는 시스템을 구현하였다. 이러한 시스템의 구현을 위하여, 형상 모델링 시스템과 유한요소 생성 시스템을 객체 지향적으로 분석하여 클래스로 도출해 내었으며, 이러한 클래스를 이용하여 시스템의 통합을 이루어 내었다. 이후 연구 과제로는 유한요소 자동 생성뿐만 아니라, 설계 및 생산의 여러 분야를 객체 지향적 개념에 입각하여 클래스로 도출한 후, 형상 모델링 시스템과 결합하여, 종합적인 통합 자동화 시스템을 구축해 나가는 것이 필요할 것이다.

## 참고문헌

- [1] 염재선, 객체 지향 개념을 이용한 이중 선각 유조선의 모델링과 구조 해석 모델의 자동 생성에 관한 연구, 서울대학교 박사학위논문, 1995. 8.
- [2] 민경재, OBJECT개념을 도입한 형상 모델링과 FEM 모델링의 통합화 시스템의 구축 및 그에 의한 구조 해석, 서울대학교 석사학위논문, 1992.2.
- [3] 서승완, 강원수, 이규열, 이규옥, 객체지향 선체 모델링을 이용한 모델의 자료구조 및 내부처리 기법에 관한 연구, 조선학회 논문집, 제31권, 제3호, pp 1-11, 1994.
- [4] 심우승, 객체 지향 모델링 개념을 이용한 이차원 구조물의 유한 요소 자동 생성에 관한 연구, 서울대학교 석사학위논문, 1996.2.
- [5] Cavendish, J. C., Automatic Triangulation of Arbitrary Planar Domains for the Finite Element Method, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 8, pp 679-696, 1974.
- [6] Lo, S. H., A New Mesh Generation Scheme for Arbitrary Planar Domains, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 21, pp 1403-1426, 1985.
- [7] 이진우, 컴퓨터그래픽과 CAD, 영지문화사, 1994.
- [8] 김형주, 쉽게 배우는 C++, 교학사, 1993.
- [9] Mantyla, M., An Introduction to Solid Modeling, Computer Science Press Inc., 1988.
- [10] George, P. L., Automatic Mesh Generation; Application to Finite Element Methods, John Wiley & Sons Inc., 1991.
- [11] Mortenson, M. E., Geometric Modeling, John Wiley & Sons Inc., 1985.