

트러스의 형상 최적화에 관한 연구

An Evolutionary Procedure for Shape Optimization of Trusses

정 영 식* 김 태 문**
Chung, Young Shik Kim, Tae Mun

ABSTRACT

This paper proposes a method for shape optimization of trusses. The potential savings offered by shape optimization will certainly be more significant than those resulting from fixed-geometry optimization. On the other hand, difficulties associated with topology and geometry optimization are still in existence. Even with a known topology, the geometry optimization problem is still a difficult task. An evolutionary procedure to be adopted and improved in this work, however, offers a means to achieve optimization in topology and geometry together. A plane truss structure is modelled within a specified domain and made to include a great number of nodes and members. Then the structure is analyzed and those members with stresses below a certain level are progressively eliminated from the structural system. In this manner the structure evolves into a truss with a better topology and geometry by removing less important parts. Through the worked examples, we can see that the method presented in this paper shows much promise.

1. 서론

본 연구는 평면 트러스의 형상 최적화를 위한 효율적인 방법의 개발을 목표로하고 있다. 트러스와 같은 뼈대 구조물의 형상 최적화문제는 크게 두 영역으로 나누어지는데 Topology의 최적화와 기하학적 형상의 최적화이다. Topology 최적화 문제는 아직도 난해한 문제로 꼽히고 있으며 Topology가 미리 주어진 상태에서의 구조물의 기하학적 형상의 최적화(Geometry Optimization)문제 역시 부재치수 최적화와 맞물려서 쉽게 풀어 질 수 있는 일이 아니다.

본 연구에서는 Topology최적화와 기하학적 형상 최적화의 구별없이 형상 전체를 한번에 최적화하는 방법으로 생물학적 진화 과정과 유사한 Evolutionary Procedure를 사용하고자 한다. Truss를 Modelling함에 있어 이 구조물이 차지할 수 있는 공간을 전부 차지하면서 절점과 부재의 수를 될 수있는데로 많게하여 가급적 규모가 크고 요소가 많은 복잡한 구조물을 생성한다. 이제 이를 원시 구조물이라 칭하고 이 원시 구조물을 해석하여 각 부재의 응력의 수준이 어떤 정해진 기준 이하인 경우 해당 부재를 점진적으로 제거하면서 종국에는 가장 적절한 형상을 갖도록 하는 것이다. 이때 불필요하거나 불안정한 절점이 생기기도 하는데 이러한 절점도 때에 따라서는 연결된 부재와 함께 제거하게 된다. 또한 역으로 구조물이 불안정해질때는 부재를 추가하는 경우도 있게된다.

발전소나 화학 공장등에서 Tank, Drum, Column, Piping등 Plant 시설물을 지지하는 Supporting Structure를 설계할 때 지탱해야 할 하중과 차지할 수 있는 공간이 미리 정해져 있을 것이다. 그러면 주어진 하중을 지탱하는 그러나 차지할 수 있는 공간을 모두 차지하는 원시

* 울산 대학교 토목 공학과 교수

** 울산 대학교 토목 공학과 석사 과정 - 296 -

구조물을 먼저 생성하고 이것이 최적의 형상을 가지는 구조물로 진화해 가는 과정을 개발하는 것이 본 연구를 포함하는 일련의 연구의 목표이다.

2. 형상 최적화의 과제

연속체형 구조물의 형상 최적화 문제의 예로서 Shaft의 최적 형상 문제^[1], 기계 부품에 만들어질 Hole Shape의 최적화 문제^[2] 등을 들 수 있으며 이들 문제는 상당 부분 해석적 방법에 의해 해결될 수 있을 만큼의 규모의 문제들이다. 구조물의 형상 선정을 설계변수로 취급한 최초의 시도중 하나로서 참고 문헌[3]을 들 수 있다. 여기서 유한요소모델을 이용하여 형상 최적 설계문제를 정형화하였으며 유한 요소 모형의 절점의 위치를 설계변수로 놓았다. 또한 수치적 해법으로 순차 선형계획법(Sequential Linear Programming)을 이용하였다. 전형적인 문제로서 댐의 설계를 예로 했는데 외적 경계형상, 공동의 치수, 부벽의 두께 등을 설계변수로 취급하였다.

Truss와 같은 골조 구조물(Skeletal Structures)의 형상 최적화는 고정된 형상의 구조물의 최적설계(Fixed-geometry Optimization)보다 한 층 더 바람직하지만 그 만큼 난해한 문제로 후자처럼 큰 발전을 이루지 못했다. 이러한 형상 최적화문제는 크게 두 영역으로 나누어 생각할 수 있다. 그 하나는 Topology 즉 절점간 연결 부재 유무(Connectivity)의 최적화문제로서 구조 최적화에서 아직도 난처한 문제의 하나로 남아 있다. 나머지 하나는 Topology가 주어져 있는 상태에서 구조물의 기하학적 형상의 최적화(Geometry Optimization)로서 절점의 위치를 설계변수로 하는 문제등이 이에 해당 될 수 있다. 즉 Topology가 미리 정해져 있다고 가정하고 기하학적 형상 최적화문제를 비선형 계획 문제로 정형화하면 아래와 같이 나타내어 질 수 있다.^[4]

$$\text{Minimize } W(A, Q) = \sum \rho L_i A_i \quad (1)$$

$$\text{subject to } g(A, Q) \geq 0$$

여기서 W 는 트러스의 중량, A 와 L 은 부재의 단면적 및 길이의 벡터를 각각 나타내고 Q 는 절점 좌표의 벡터이다. 즉 절점의 좌표가 변수로 취급되는 것이다.

위의 문제에서 절점의 위치(좌표) 및 부재의 치수를 동시에 최적화 할 수 있었으면 좋겠지만 이것은 실로 쉬운일이 아니다. 따라서 현실적으로 가능한 방법은 별개의 두 설계 공간에서 최적화를 별도로 수행하고 이를 반복 시행하는 것이다. 즉 전 설계 공간을 두 부분 설계공간으로 구획하고 그 하나인 Sizing Space (Q 즉 Geometry가 고정)에서 A 를 최적화하고 다시 다른 하나인 Coordinate Space에서 Q 를 최적화하는 것이다.

구조 최적화와 관련한 연구의 궁극적인 목적은 지탱해야 할 하중이 주어지고 구조물이 차지할 수 있는 공간적 범위가 정해졌을 때 이에 가장 알맞은 구조물을 단순히 설계할 수 있는 방법을 찾는 일일 것이다. 그러나 최적의 설계를 찾는 일이 위에서 본 바와 같이 그렇게 쉬운일이 아니다. Topology-Geometry-Member Sizing의 세단계의 최적화를 거쳐야 함을 위에서 보았고 또한 이는 단번에 되는 일이 아니라 반복 시행에 의하여 이루어질 수 있는 일이다. 게다가 재료의 선택(Material selection)의 단계가 더 추가될 수도 있다.

위에서 든 여러 단계의 최적화 과정을 한 번에 시행할 수 있는 방법으로 Evolutionary Procedure를 들 수 있다.^{[5][6]} 생물이 오랜 세월을 두고 진화하는 동안 별 기능을 발휘하지 못하는 신체의 부분이 퇴화하는 것과 같이 구조물의 구성 요소중 큰 기능을 갖지 않는 부분 즉 발생하는 응력의 수준이 낮은 부분을 점차적으로 도태시켜나가는 방법을 생각 할 수 있다. 참고 문헌[5]에서는 Plane Stress Elements로 된 유한 요소 모형에서 von Mises Stress가 이 모형의 최대 von Mises Stress의 어떤 비율(RR, rejection ratio)이하로 되는 요소를 점차적으로 제거해나가는 방법을 제시하고 있다.

본 연구는 발전소나 화학 공장등 Plant에서의 Supporting Structure의 최적설계방법을 개발하고자 하는 것이다. 즉 Piping, Tank, Drum, Column 등 지지해야 할 시설물의 하중과 그 작용 위치가 정해지고 이를 지지하는 Supporting Structure가 들어설 수 있는 허용된 공간이 정해졌을 때 최적의 Supporting Structure를 설계하는 방법을 모색하는 것이다. 여기서 우선 허용된 공간내에 많은 수의 절점과 부재를 배치시키고 주어진 하중하에서의 구조해석 결과 응력의 수준(Stress Level)이 많이 떨어지는 부재를 우선적으로 제거하면서 불필요한 절점 또한 제거해나가는 방법을 생각해 볼 수 있을 것이다.

3. 평면 Truss의 형상 최적화의 한 방법

평면 Truss의 형상 최적화에는 여러 가지 방법이 있을 수 있겠지만 본 연구에서는 평면 Truss의 해석 후 각 부재들의 Stress를 검토하여 어떠한 기준 Stress이하의 부재들을 제거해 가는 방법을 이용하였다.

구조물 전체에서 어떤 수준(Level)이하의 Stress를 받는 부재들은 외부 하중에 대한 저항이 비효율적이라고 간주하고 이를 구조물에서 제거함으로써 보다 효율적인 구조물을 얻을 수 있을 것이다. 여기서, 외부 하중에 대한 저항이 비효율적이라고 간주되어지는 부재의 선정에 있어 기준이 되는 Stress Level을 Rejection Level (RL)이라하고 이는 구조물을 해석하여 얻은 부재의 Max.Stress값에 Rejection Ratio (RR)를 곱함으로써 결정되어진다. 구조물을 해석한 후 결정되어진 Rejection Level (RL)보다 Stress Level이 낮은 부재들은 외부 하중에 대한 저항이 비효율적이라고 간주하고 구조물에서 제거해 나간다. 부재의 Stress Level이 Rejection Level (RL)이하인 부재들을 제거한 후 구조물의 각 절점에 대하여 절점에 모이는 부재의 수를 계산한다. 절점에 모이는 부재의 수가 "Zero"인 경우 즉 부재가 모두 제거되어진 절점은 구조물로부터 제거하여 절점의 수를 줄여 간다. 부재와 절점을 제거한 후 구조물의 안정 여부를 판별하고 만약 구조물이 불안정하다면 구조물에서 제거되지 않은 절점을 대상으로 해석 이전 구조물에서 그 절점의 다른 절점과의 연결상태를 비교하여 다른 절점의 존재여부에 따라 새로운 부재를 추가하여 외부하중에 대한 새로운 형상의 구조물을 만든다. 이러한 과정을 마친후 Stress Level이 Rejection Level (RL)이하이기 때문에 제거되어지는 부재가 존재하였다면 구조물을 재해석하여 새로운 Rejection Level (RL)을 결정하고 위의 과정을 반복한다. 그리고 이 과정에서 Rejection Ratio (RR)는 변하지 않는다. 재해석 과정을 반복하는 동안 새롭게 결정되어진 Rejection Level (RR)에의하여 제거되어지는 부재가 더 이상 존재하지 않는다면 더 이상의 재해석은 하지 않는다. 새롭게 결정되어진 Rejection Level (RR)에의하여 제거되어지는 부재가 더 이상 존재하지 않았을 때 이 구조물이 수렴하였다고 하고 기존의 Rejection Ratio (RR)에 Evolution Rate (ER)을 더하여 새로운 Rejection Ratio (RR)를 결정하고 위 과정을 반복함으로써 구조물의 새로운 수렴 상태를 찾아간다.

3.1 원시 구조물의 모델링

일반적으로 형상 최적화의 문제는 대상 구조물을 유한 개의 요소로 나누어 해석하는 유한 요소 해석법을 사용하지만, 본 연구에서는 대상 구조물을 평면 트러스로 가정하였다.

본 연구에 사용되어진 그림 1.과 같은 평면 트러스 구조물은 User가 기준이 되는 절점의 절점 번호와 좌표 값을 입력하고 X방향과 Y방향으로 생성시킬 절점의 수와 각 방향으로의 마지막 절점의 좌표 값을 입력하면 그림 1.과 같은 평면 트러스 구조물이 만들어진다.

본 연구에서는 우선 X방향 절점 5개, Y방향 절점 4개, 경사 부재를 위한 절점 12개로 총 32개의 절점과 79개의 부재로 이루어진 트러스 구조물을 대상으로 하여 여러 경우의 지점 조건과 외부 하중 조건에 대하여 트러스 구조물의 형상 최적화에 대하여 연구하였다.

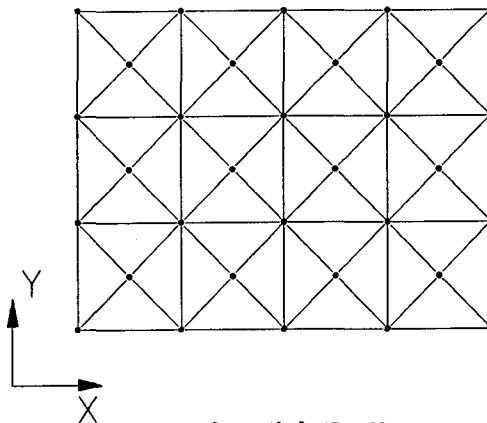


그림 1. 원시 구조물

3.2 구조물의 해석

3.1절에서 모델링한 원시 구조물에 지점 조건과 외부 하중을 적용하면 해석을 위한 기본 Data가 완성되어진다. 완성되어진 Data는 William Weaver, Jr과 James M.Gere의 Direct Stiffness Method에 의한 Plane Truss Program을 이용하여 해석하였다. 원시 구조물을 Plane Truss Program을 이용하여 해석한 후 각 부재들의 부재력과 단면적을 이용하여 Stress를 구한다. 이렇게 구하여진 부재들의 Stress중 가장 큰 값에 Rejection Ratio (RR)를 곱한 값을 Rejection Level (RL)로 정한다.

3.3 부재의 제거

원시 구조물에서 부재의 제거는 외부 하중에 대한 각 부재의 Stress값에 의해 결정되어진다. Plane Truss Program을 이용하여 평면 트러스 구조물을 해석하고 난후 결정되어진 Rejection Level (RL)이하의 Stress를 받는 부재들은 부재 번호를 "0"으로 바꾸어 줌으로써 원시 구조물에서 제거한다. Rejection Level (RL)이하의 Stress를 받는 부재들을 제거하고 난 후 각 절점에 모이는 부재의 수를 계산하여 절점에 모이는 부재가 하나뿐인 절점에 대하여 하중이 작용하고 있는 절점이거나 자유도가 구속되어진 절점인 경우가 아니면 비록 절점에 모이는 부재의 Stress값이 Rejection Level (RL)보다 크다 할지라도 부재 번호를 "0"으로 바꾸어 줌으로써 원시 구조물에서부터 부재를 제거한다.

3.4 절점의 제거

구조물에서 절점은 부재와 부재를 연결시키는 역할을 한다. 따라서 연결되어지는 부재가 없는 절점은 절점으로써의 의미가 없어지게 된다.

원시 구조물에서 Rejection Level (RL)이하의 Stress를 받는 부재를 제거한 후 각 절점에 모이는 부재의 수를 계산하여 절점에 모이는 부재의 수가 "Zero" 일 경우에는 그 절점의 번호를 "0"으로 바꾸어 원시 구조물에서부터 제거한다. 또 두 개의 부재가 한 절점에 모이는 경우에 대하여 두 부재가 경사 부재이고, 동일 선상에 있을 경우에만 절점을 제거하고 두 경사 부재를 하나의 부재로 만든다.

3.5 안정성 (Structural Stability)의 검토

구조물의 안정성은 원시 구조물에 대하여 부재와 절점을 제거한 후 판단하여야 한다. 평면 트러스의 안정 여부를 판정하기 위하여 원시 구조물에서 부재와 절점을 제거하고 난후 제거되어지지 않은 부재와 절점의 수를 계산하여 다음 식에 대입한다.

$$\text{Truss의 판별식} : \text{부재수} + \text{반력수} - 2 * \text{절점수} \quad (2)$$

판별식이 음의 값을 가지게되면 불안정한 구조물이므로 절점의 제거후에 제거되어지지 않은 절점을 대상으로 원시 구조물에서의 다른 절점과의 연결 상태를 비교하여 새로운 부재를 추가하여 구조물을 안정하게 만든다.

3.6 부재의 추가

만일 구조물이 불안정으로 판정되면 새로운 부재를 추가하여야 하며 이를 위해서 원시 구조물에서의 각 절점에 연결되어진 부재의 수와 어떠한 부재들이 연결되어져 있는 알고 있어야 한다.

부재와 절점을 제거하고 난후 제거되어지지 않은 i-번째 절점에서 수평, 수직 부재의 추가는 다음과 같은 단계를 따른다.

- 단계 1 : 원시 구조물에서 i-번째 절점에 모이는 부재의 번호를 확인한다.
- 단계 2 : 원시 구조물에서 i-번째 절점에 모이는 부재의 다른 쪽 절점의 번호를 확인한다.
- 단계 3 : 만일 부재의 다른 쪽 절점이 원시 구조물의 절점 제거 후에도 존재한다면 i-번째 절점과 다른 쪽 절점을 양단으로 하는 부재가 존재하는지 확인한다.
- 단계 4 : i-번째 절점과 다른 쪽 절점을 양단으로 하는 부재가 존재하지 않는다면 새로운 부재를 추가한다.

부재와 절점을 제거하고 난후 제거되어지지 않은 i -번째 절점에서 경사 부재의 추가는 다음과 같은 단계를 따른다.

- 단계 1 : 원시 구조물에서 i -번째 절점에 모이는 경사 부재의 번호를 확인한다.
- 단계 2 : 원시 구조물에서 i -번째 절점에 모이는 경사 부재의 다른 쪽 절점⁽¹⁾의 번호를 확인한다.
- 단계 3 : 만일 경사 부재의 다른 쪽 절점⁽¹⁾이 원시 구조물의 절점 제거후에도 존재한다면 i -번째 절점과 다른 쪽 절점⁽¹⁾을 양단으로 하는 부재가 존재하는지 확인한다.
- 단계 4 : i -번째 절점과 다른 쪽 절점⁽¹⁾을 양단으로 하는 부재가 존재하지 않는다면 새로운 부재를 추가한다.
- 단계 5 : 만일 경사 부재의 다른 쪽 절점⁽¹⁾이 원시 구조물의 절점 제거후에 존재하지 않는다면 원시 구조물의 다른 쪽 절점⁽¹⁾에서 i -번째 절점에 모이는 경사 부재와 동일선상에 있는 부재의 또 다른 절점⁽²⁾이 존재하는지 확인한다.
- 단계 6 : 만일 또 다른 절점⁽²⁾이 존재한다면 i -번째 절점과 또 다른 절점⁽²⁾을 양단으로 하는 새로운 부재를 추가한다.

3.7 수렴의 판정

원시 구조물을 해석한 후 Rejection Level (RL)이 결정되어지고 Rejection Level (RL)이하의 Stress를 받는 부재들은 제거되어진다. 부재와 절점의 제거후 구조물이 불안정하다고 판정되면 새로운 부재가 추가되어지고 구조물의 재해석이 이루어진다. 이때 Rejection Ratio (RR)는 변하지 않지만 구조물의 형상이 바뀌었기 때문에 새롭게 구하여진 Max.Stress에 의해 Rejection Level (RL)은 변하게 된다. 구조물을 재해석하여 새롭게 구한 Rejection Level (RL)과 각 부재의 Stress Level을 비교하여 Rejection Level (RL)이하의 Stress를 받는 부재가 존재하면 그 부재를 제거하고 구조물을 재해석하여 새로운 Rejection Level (RL)을 결정한다. 만약 부재들의 Stress Level과 Rejection Level (RL)을 비교하여 Rejection Level (RL)이하의 부재가 존재하지 않으면 그때 구조물이 수렴하였다고 하고 Rejection Ratio (RR)에 Evolution Rate (ER)를 더하여 새로운 Rejection Ratio (RR)를 결정하여 구조물을 재해석함으로써 새로운 수렴상태를 찾아간다.

4. 방법의 개선을 위한 방안

본 연구에 사용되어진 Program의 계산 시간은 Stiffness Matrix의 크기와 재해석 Algorithm에 의해 결정되어진다. Stiffness Matrix의 크기 조절과 계산 시간의 단축을 위해서는 다음과 같은 방법이 있을 수 있다.

4.1 Node Renumbering for Bandwidth Reduction

Matrix해법에서 계산 시간을 결정하는 것은 사용되어지는 Matrix의 크기일 것이다. 특히 Stiffness Matrix방법에서는 절점에 의해 결정되어지는 Stiffness Matrix의 크기가 Program의 계산 시간에 크다란 영향을 미칠 것이다. 따라서 Stiffness Matrix의 크기를 최소화하기 위해서는 절점번호를 적절히 배치하여야 한다. 절점을 재배치하여 Stiffness Matrix의 대폭을 조절하는 방법은 많이 개발되어져 있지만, 본 연구에서는 원시 구조물에서 부재와 절점을 제거하고 난후 Matrix의 대폭을 최소로 하기 위하여 “ The Reverse Cuthill-McKee Algorithm ” 사용 할 것이다.

4.2 Approximate Reanalysis

본 연구에서 사용되어진 Rejection Ratio (RR)는 재해석시에 Evolution Rate (ER)가 더하여져 개선되어지게 되는데 Evolution Rate (ER)는 일반적으로 User가 어떠한 값을 지정하게 된다. Evolution Rate (ER)의 값이 적으면 대상 구조물의 최적 형상을 찾는 데 시간이 너무 많이 소요되어진다는 단점이 있고, 값이 너무 크면 최적 형상에 도달하는 시간은 단축되지만 User가 만족할 만한 결과를 얻지 못할 수도 있다. 따라서, 짧은 시간에 User

가 만족할 만한 결과를 얻기위하여 Evolution Rate (ER)값의 결정에 있어서 진화의 초기 즉 Rejection Ratio (RR)가 낮은 단계에서 적절한 근사적 재해석 Algorithm을 사용하여 보. 짧은 시간에 최적 형상에 도달하게 하게 하고자 한다.

4.3 Parallel Processing

Single Processor System의 Computer가 아무리 성능이 뛰어나다 할지라도 Data의 처리 속도에는 한계가 있기 마련이다. 이런 문제를 인식하기 시작하면서 많은 시도와 노력이 이루어졌고 결국 Computer의 Data처리 속도를 향상시킬 수 있는 방법이 Single Processor의 Speed를 향상하는 것보다 여러 개의 Processor를 사용하는 것이 낫다는 결론을 얻었다. 이렇게 여러 개의 Processor를 사용하여 수많은 Data를 동시에 처리하는 방식을 Parallel Processing이라 한다.

구조물의 형상 최적화 문제에서도 수많은 부재와 절점 Data들을 처리하기 위하여 Single Processor System을 사용하는 것보다 여러 개의 Processor를 사용하여 많은 Data를 동시에 처리하는 병렬 처리 방식을 사용함으로써 계산 시간을 단축시킬수 있을것이다.

5. 적용 예

본 연구에서 사용되어진 해석 모델은 3.1절에서 설명한 32개의 절점과 79개의 부재로 이루어져있는 평면 트리스이다. 이와 같은 평면 트리스에 단위 하중($P=1$)을 가하고 지점 조건을 여러 가지로 바꾸어 다음과 같은 네가지 예제 구조물에 대하여 형상 최적화를 적용하였다.

예제 1. 절점 32개, 부재 79개,
단면적 0.02,
Rejection Ratio : 20%

예제 2. 절점 32개, 부재 79개,
단면적 ;
1~10 : 0.03 11~20 : 0.03
21~30 : 0.02 31~40 : 0.02
41~50 : 0.04 51~60 : 0.04
61~70 : 0.05 71~79 : 0.05
Rejection Ratio : 20%

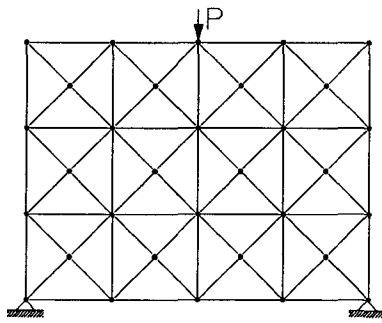


그림 5.1 원시 구조물

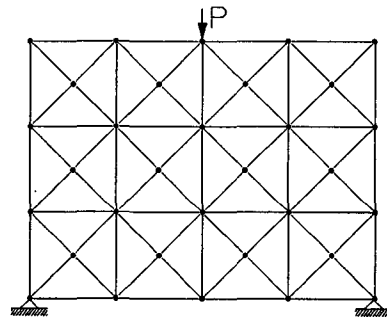


그림 5.4 원시 구조물

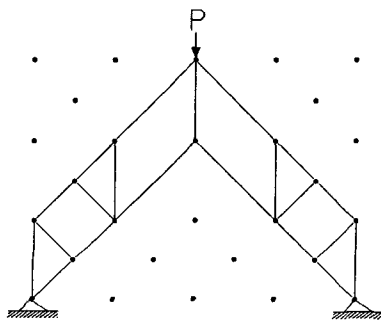


그림 5.2 부재 제거 후

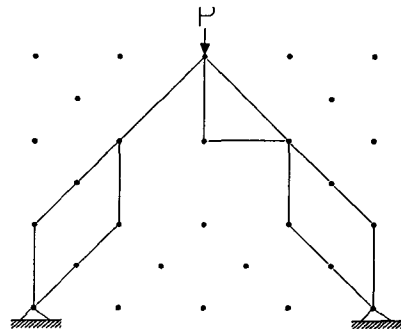


그림 5.5 부재 제거 후

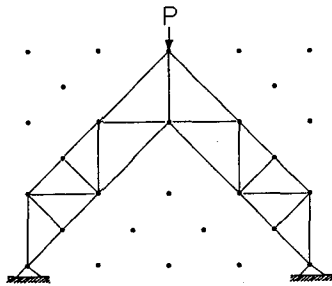


그림 5.3 부재 생성 후

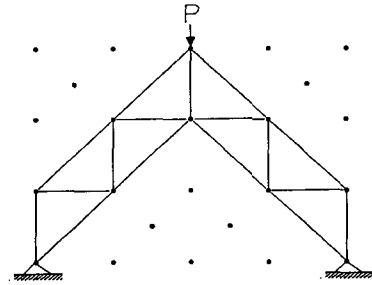


그림 5.6 부재 생성 후

예제 3. 절점 32개, 부재 79개,
단면적 ;
1~10 : 0.03 11~20 : 0.03
21~30 : 0.02 31~40 : 0.02
41~50 : 0.04 51~60 : 0.04
61~70 : 0.05 71~79 : 0.05
Rejection Ratio : 20%

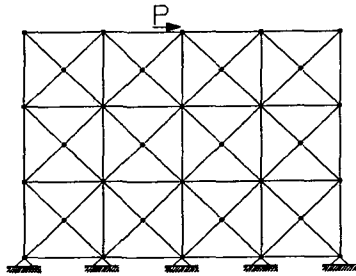


그림 5.7 초기 구조물

예제 4. 절점 32개, 부재 79개,
단면적 ;
1~10 : 0.03 11~20 : 0.03
21~30 : 0.02 31~40 : 0.02
41~50 : 0.04 51~60 : 0.04
61~70 : 0.05 71~79 : 0.05

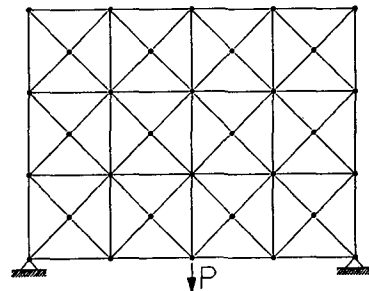


그림 5.10 초기 구조물

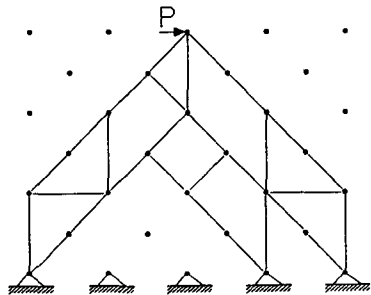


그림 5.8 부재 제거 후

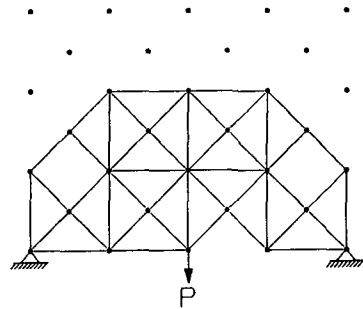


그림 5.11 Rejection Ratio 20%

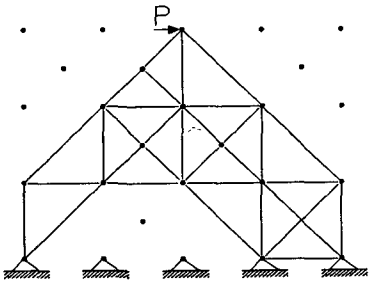


그림 5.9 부재 생성 후

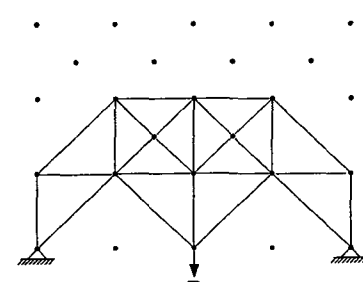


그림 5.12 Rejection Ratio 30%

	최종 부재 수 (개)	최종 절점 수 (개)	최종 Rejection Ratio (%)
예제 1.	25	14	20
예제 2.	17	10	20
예제 3.	32	15	20
예제 4.	26	13	30

표 1. 평면 트러스의 해석 결과

표 1에서 알 수 있듯이 대부분의 예제 구조물들이 Rejection Ratio 20~30%사이에서 형상 최적화가 이루어졌다. 예제 1과 예제 2는 Rejection Ratio (RR) 20%에서 유사한 형상이 나타났지만 부재의 단면적이 다르기 때문에 최종 부재 수와 절점의 수에는 차이가 있었다. 구조물 하단의 절점을 모두 구속한 예제 3의 경우에는 작용 하중에 대하여 구조물 상부의 부재들이 마치 하나의 큰 삼각형을 형성하여 저항하고 있고 역시 Rejection Ratio 20%에서 형상 최적화가 이루어졌다. 예제 4의 경우에는 Rejection Ratio 20%에서는 그림 5.11과 같이 구조물 상단의 부재들은 제거되었지만 아직 최적한 형상은 갖지 못하였고 Rejection Ratio가 30%이 되었을 때 최적 형상을 이루었다. 이 형상은 Michell type 구조물의 유한 요소해석시 나타나는 결과 형상과 유사한 결과이다.

6. 결론

본 연구에서는 미리 한정된 공간에 설치되면서 주어진 하중을 가장 효과적으로 지탱할 수 있는 평면 트러스 구조물을 설계하는 방법을 제시하고 있다. 이는 Topology의 최적화와 주어진 Topology하에서의 Geometry 최적화를 동시에 달성하는 적절한 형상 최적화의 방법이라 말할 수 있다. 또한 이 방법은 될 수 있는대로 넓은 공간을 차지하고 많은 절점과 부재를 갖는 원시 구조물로부터 점진적으로 비효율적인 부분을 제거해가는 Evolutionary Procedure를 근간으로 하고 있다.

본 연구는 중국적으로 발전소나 화학 공장에서의 Supporting Structure의 최적 설계 방법을 개발하려는 일련의 연구의 한 부분으로 그 완성도에서 다소 미흡한 부분이 없지 않으나 Evolutionary Procedure의 가능성을 입증하는 성과를 올렸다고 할 수 있다.

참고 문헌

- [1] A.S.Henry, The Analytic Design of Torsion Members, PhD Thesis, University of Iowa, 1971
- [2] N.V.Banichuk, 'Optimizing hole shape in plates working in bending', Soviet Applied Mechanics, 12, No.3, pp.72~78, 1977
- [3] O.C.Zienkiewicz and J.S.Campbell, 'Shape optimization and sequential linear programming', Optimum Structural Design, Chapter 7, R.H. Gallagher and O.C. Zienkiewicz (Eds) John Wiley, pp.109~126, 1973
- [4] O.E.Lev(Ed), Structural Optimization - Recent Developments and Applications, ASCE, pp.25~28, 1981
- [5] Y.M.Xie and G.P.Steven, 'A simple evolutionary procedure for structural optimization.' Computers & Structures, Vol.49, No.5, pp.885~896, 1993
- [6] D.N.Chu, Y.M.Xie, A.Hira and G.P.Steven, 'An evolutionary procedure for structural optimization with displacement constraints.' Proceedings of EASEC-5, Gold Coast, July 1995