

# 개선된 진화론적 구조최적화에 의한 트러스 구조물의 형태결정

## Topology Decision of Truss Structures by Advanced Evolutionary Structural Optimization Method

정 세 형\*                      편 해 완\*\*  
Jeong, Se-Hyung              Pyeon, Hae-Wan

### Abstract

The purpose of this study is to improve convergence speed of topology optimization procedure using the existing ESO method and to deal with topology decision of the truss structures according to a boundary condition, such as cantilever type. At the existing ESO topology optimization procedure for the truss structures, the adjustment of member sizes according to target stress has been executed by increasing or reducing a very small value from each member size. In this case, it takes too much iteration till convergence. Accordingly, it is practically hard to obtain optimum topology for a large scale structures. For that reason, it is necessary to improve convergence speed of ESO method more effectively. During the topology decision procedure, member sizes are adjusted by calculating approximate solution for member sizes corresponding to the target stress at every step, the new member sizes are adjusted by such method are applied in FEA procedure of next step.

*keywords : Evolutionary Structural Optimization Method, Topology Optimization, Topology Decision*

## 1. 서 론

### 1.1 구조형태 최적화의 개념

위상(Topology)이란 용어는 원래 수학에서의 위상수학 또는 위상기하학이란 분야에서 나온 말이다. 이 말의 기원은 J. B. 리스팅이 1847년 출판한 저서 '토폴로지의 기초연구(Vorstudien zur Topologi)'에서 유래한다.<sup>[7]</sup>

구조물에서의 위상최적설계는 구조물 내의 hole의 개수와 위치, 영역간의 연결과 같은 형상결정의 문제로 정의될 수 있다. 이러한 문제는 구조물의 거동에 큰 영향을 미치므로 지난 몇 십 년 간의 학자들의 관심을 집중시켰던 문제이다.

위상이라는 용어와 유사한 구조형태에서 형태의

단어적 의미로는 모양을 나타내는 형(形)과 상태를 나타내는 태(態)로서 구성되어진다. 즉, "형"은 구조물의 기준선이나 기준면의 형상두께, 경계형상 등의 기하학적인 의미로서의 형상을 의미하고, "태"는 트러스의 위상, 자기 응력, 스페이스 프레임의 단층, 복층 등과 같은 구조물의 내부에 가지고 있는 시스템을 나타내고 있다.

결국, 형태는 "형상+시스템"을 표현하는 의미를 가지고 있으므로 단순히 형상이라는 개념과는 구별되어진다. 따라서 형태해석은 「형상해석+시스템해석」으로 개념정립이 되고 있다. "형"의 변화는 변위, 모드(좌굴이나 진동 등) 등의 변화를 동반하고, "태"의 변화는 응력 분포, 부재의 판단(또는 삭제)에 따른 위상의 변화 등이 따르게 된다. 구조최적화 문제는 크기결정 문제와 형상 및 위상결정문제로 나뉘어져 있다. 크기결정 문제에서는 구조체의 부재 단면적이나 구조물의 크기 등을 목적으로 하고, 형상 및

\* 정회원 · 경북대학교 건축공학과 박사수료

\*\* 정회원 · NTRAS구조연구소 소장, 공학박사

형태결정 문제에서는 부재의 결합방법이나 구조형식, 구조물 전체의 형상을 목적으로 하여 최적화를 수행한다.

형태결정 문제에 있어서는 미리 공간상에 규칙적인 고정된 절점을 배치하고 그 절점 간을 결합하는 직선의 조합문제로 하여 트러스의 위상을 결정하는 원구조법(Ground Structure)이라 불리는 기법이 많이 적용되어 왔으며, 그 적용방법이 선형부재 요소의 조합방식으로 매우 단순하지만 범용성이 높아 널리 적용되어 왔다. 그러나 절점 수가 증가함에 따라 미지량이 폭발적으로 증가하므로 대규모의 구조문제에서는 그 해법이 매우 어려워지는 단점이 있다.

진화론적 구조최적화(Evolutionary Structural Optimization, 이하 ESO법이라 한다)기법은 1997년 Xie<sup>[4]</sup> 등에 의해 제안된 구조최적화 기법이며, 자연계의 생물진화를 모방하여 조금씩 진화해 가는 방법이다. 기존의 ESO법은 구조물의 진화과정에서 요소 응력과 von Mises응력과의 비에 따라 비효율적인 요소를 삭제해 나가는 방법을 이용하였지만, 등치선(等値線) 이론을 도입하여 요소의 삭제는 물론 증가도 허용함으로써 기존의 ESO법보다 그 효율성을 높이고 쌍방진화가 가능한 개선된 ESO법이 제안<sup>[8]</sup>되었다.

### 1.2 연구목적

본 연구에서는 최적형태를 구하는 과정에서 기존의 ESO법에서 채택하고 있는 최적해의 수렴방법을 개선하여 수렴속도를 훨씬 단축시킬 수 있는 새로운 방법을 제안하며, 유전알고리즘기법(GA)을 이용한 형상최적을 통한 결과와 비교·고찰하여 평면 트러스 구조에 적용이 가능하도록 하는 최적형태결정 프로그램을 개발하는 것을 목적으로 한다. 또한, 상태 변화에 따른 형태결정문제를 다루기 위해 본 연구에서는 지지조건(켄텔레버 형식)에 의한 원구조 구성 방식의 최적형태결정에 관하여 연구하는 것을 목적으로 한다.

## 2. 진화론적 최적기법(ESO법)

### 2.1 기존의 ESO법

ESO법에서의 삭제기준은 응력, 변위 등 여러 가지가 있을 수 있으며, 본 연구에서는 응력을 기준으로 하여 진행해 나간다.

본래 ESO법에는 유한요소해석을 수행할 때 구조체를 작은 요소의 연속체로 두고 해석하면 개개의 요소가 분담하는 응력의 크기가 달라지며, 이 때 다른 요소에 비하여 상대적 중요도가 낮은 비효율적인 요소를 삭제한다.

이때 사용하는 응력은 각 요소의 응력으로부터 계산되는 von Mises응력<sup>[4]</sup>이며 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma^{vm} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_x$  : x방향의 기준응력

$\sigma_y$  : y방향의 기준응력

$\tau_{xy}$  : 전단응력

설계영역 내에서 각 요소의 응력레벨은 원구조체의 최대 von Mises응력  $\sigma_{max}^{vm}$  에 대한 각 요소의  $\sigma_{ele}^{vm}$  의 비로서 결정되며, 다음의 조건을 만족하는 모든 요소는 삭제된다.

$$\frac{\sigma_{ele}^{vm}}{\sigma_{max}^{vm}} < RR_i \quad (2)$$

여기서,  $RR_i$ 는  $i$ 단계의 삭제율이다.

전 요소에서 이 비교를 마치고 안정상태에 도달할 때까지 현재의 삭제율을 가지고 요소삭제 과정이 반복된다. 이 단계에서 진화율(Evolutionary Ratio, ER)이 도입되며 다음과 같이 삭제율에 더해진다.

$$RR_{i+1} = RR_i + ER \quad (3)$$

진화과정에서는 삭제율( $RR$ )과 진화율( $ER$ )의

두 파라메타가 요구된다. 일반적으로  $RR_0=1\%$ ,  $ER=1\%$ 의 값을 가지고 많은 예제에 사용되어졌다. 그러나 너무 많은 부재가 한 번의 반복으로 삭제된다면 이 값들을 더 작게 할 필요가 있다.

기존의 골조나 트러스 요소로 구성된 원구조(Ground Structure)로부터 시작하는 골조 및 트러스 구조의 형태결정 문제는 먼저, 부재응력이 목표응력에 도달할 때까지 설계변수의 미소변량 만큼을 증가 또는 감소시켜 나간다. 이 때 설계변수의 값이 매우 작은 값이 되면 그 부재의 효율성은 매우 낮아지므로 해당부재의 응력을 0으로 함으로서 부재를 삭제한다.

### 2.2 개선된 ESO법

기존의 ESO법에서 트러스 요소로 구성되는 원구조를 사용하여 트러스 구조물에 대한 위상결정 문제에서는 각 부재의 조합응력이 목표응력에 도달하도록 단면치수를 미소량 만큼씩 증가 또는 감소시켜 나간다. 이럴 경우에는 최종수렴까지의 반복회수가 너무 많아지게 되어 방대한 구조문제의 형태결정 문제에 적용하기가 매우 어려워진다.

따라서 본 연구에서는 수렴속도를 개선하기 위하여 치수를 조정할 때, 기존의 ESO법에서는 전 단계의 단면 치수에 미소량을 증가 또는 감소시켜서 목표응력에 도달하도록 하였으나, 본 연구에서는 현 단계에서 목표응력에 대응하는 부재의 단면치수를 직접적인 해법을 통하여 구하는 개선된 ESO법을 제안한다.

#### 2.2.1 부재의 단면치수 조정방식

원형강관을 사용한 트러스 부재의 예를 들어 볼 때, 단면적  $A$ 는 강관의 외경  $D$ 와 살두께  $t$ 로 표현하면 다음과 같이 나타내어진다.

$$A = \frac{\pi[D^2 - (D-2t)^2]}{4} \tag{4}$$

한편, 살두께  $t$ 와 외경  $D$ 와의 직접적인 관계는 없으며 그 비율도 부재의 국부좌굴 허용범위 내에서

무수히 많지만 수식의 단순화를 위해 편의상  $t = \frac{D}{60}$ 으로 가정하여 식(4)를 전개하면 다음과 같이 단면적  $A$ 를  $D$ 에 대한 일변수로 나타낼 수 있다.

$$A = \frac{\pi[D^2 - (D - 2(\frac{D}{60}))^2]}{4} = \pi[\frac{59}{3600}D^2] \tag{5}$$

$$\approx 0.051487212D^2 = C_1D^2$$

여기서,  $C_1$ 은 상수이다.

트러스의 부재응력  $\sigma_i$ 가 목표응력  $\sigma_T$ 에 도달할 조건은 부재력  $P$ 와 단면적  $A$ 로 나타내어 다음과 같이 된다.

$$\sigma_i = \frac{P}{A} \approx \frac{P}{C_1D^2} \approx \sigma_T \tag{6}$$

식(6)을 외경  $D$ 에 대하여 나타내면 다음과 같다.

$$D \approx \sqrt{\frac{P}{C_1\sigma_T}} \tag{7}$$

따라서 식(7)에서와 같이 매 단계마다 목표응력에 대응하는 트러스 부재의 외경을 직접 구할 수 있다. 원형단면 이외의 다른 단면형태도 같은 방법으로 부재력과 목표응력에 대응하는 단면크기를 구할 수 있다. 이와 같이 직접적으로 목표응력에 대응하는 단면치수를 구하는 수식을 부재단면의 형상과 설계조건에 따라 달리 설정하여 계산할 수가 있다.

#### 2.2.2 개선된 ESO 파라메타

본 연구의 개선된 ESO법에서 사용된 각종 파라메타들은 다음과 같다.

부재  $i(=1, 2, 3, \dots, m)$ 에 대한 부재응력의 여유율  $(RES)_i$ 는 부재응력  $\sigma_i$ 와 목표응력  $\sigma_T$ 의 관계로 표현된다.

$$(RES)_i = \left| \frac{\sigma_i}{\sigma_T} \right| \tag{8}$$

$$(DR)_i = \sum_{i=1}^m [(DR)_{i-1} + |(RES)_i - 1.0|] \quad (9)$$

$$(RMS)_i = \sum_{i=1}^m [(RMS)_{i-1} + (DR)_i^2] \quad (10)$$

$$RMS = (RMS)_{i=m} \quad (11)$$

여기서,  $RES$  : 부재응력의 여유율

$RMS$  : Error에 관한 편차누계

위 식(8)~식(11)로 부터 모든 부재 조합응력이 목표응력에 완전히 도달하면  $RMS=0$ 이 된다.

한편, ESO진행율을  $ESORATIO$ 라 하여 다음과 같이 정의한다.

$$ESORATIO |_{Iter=k} = \frac{RMS |_{Iter=0} - RMS |_{Iter=k}}{RMS |_{Iter=0}} \quad (12)$$

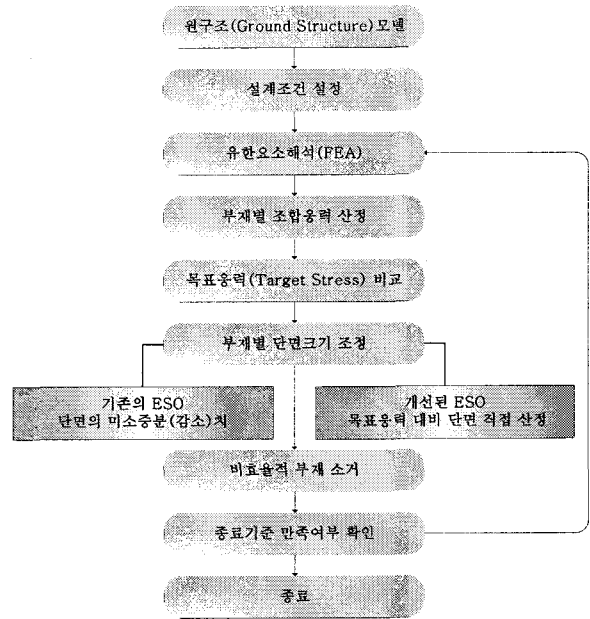
여기서,  $k=1, 2, 3, \dots, Iter$ 이고,  $Iter$ 은 최대 반복회수이다. 모든 부재에서 부재응력이 완전히 목표응력에 도달하게 되면  $ESORATIO=1.0$ 이 되며, 최적화를 수행하기 전 초기상태인 원구조에서는  $ESORATIO=0$ 이다. 전술한 여러 파라메타들은 구조체의 해석결과로부터 매 단계마다 구해진다.

한편 목표응력은 최적화 과정에서 부재응력이 지향하는 최종목표이며, 일반적인 구조설계 시에 적용하는 허용응력의 개념과는 다소 차이가 있어서 문제의 성격에 따라 매 단계마다 달라질 수도 있으며 일정한 기준치를 부여하여 전 단계에서 동일하게 할 수도 있다.

### 2.2.3 ESO법의 해석절차

본 연구에 적용된 개선된 ESO법의 해석절차를 요약하면 <그림 1>과 같다.

여기서, 비효율적 부재를 소거하는 단계에서는 부재 조합응력과 목표응력의 응력비에 따라 비효율적인 부재의 응력을 "0"으로 할 뿐이지 완전히 삭제한다는 의미는 아니다. 왜냐하면, 비효율적인 부재를 완전히 삭제하게 되면 최적형태 결정과정에서 불안정 구조형태가 발생할 수 있으므로 단지 무응력 상



<그림 1> 개선된 ESO법의 해석흐름도

태로만 동결시키는 것으로만 한다.

또, 반복회수가 상한치에 도달하거나 체적변화량이 허용오차 이내가 되면 ESO과정을 종료하고 그렇지 않으면 변경된 단면의 강성으로 해석과정을 반복하게 한다.

## 3. 형태결정을 위한 트러스 모델

본 연구에서는 개선된 ESO법을 통한 형태최적화를 참고논문<sup>[1]</sup>의 형상최적화와 비교·검토하였으며 기존의 ESO법과 비교하여 개선된 ESO법의 특성을 연구하였다. 이러한 연구를 하기 위하여 비교논문의 예제와 같은 형상을 초기에 가지는 캔틸레버 형식의 12부재 평면트러스 구조물 형태최적화의 예제로 선택하였다.

선택된 예제의 해석과 최적형태 결정을 위하여 기존의 ESO법과 개선된 ESO법은 다음의 설계조건을 가지고 실행된다.

- 1) 목표응력은  $\sigma_T = 1600 \text{ kgf/cm}^2$ 로 한다.
- 2) 개선된 ESO법에 의한 결과를 기존의 ESO법에 의한 결과와 비교하기 위하여 기존의 ESO법에 적용된 원형강관 직경의 초기치  $D = 5 \text{ cm}$ ,  $D$ 의 미소증분치  $\Delta = 0.01 \text{ cm}$ 로 한다.
- 3) 부재의 좌굴은 고려하지 않는다.

### 3.1 기존의 형태결정 방법과 개선된 ESO법에 의한 형태결정

기존의 ESO법과 개선된 ESO법의 차이를 평면트러스 모델의 예제를 통하여 비교하고, 평면 모델을 초기의 원구조(Ground Structure)로 구성하여 주어진 설계조건으로 하는 최적형태 결정문제의 결과를 참고논문<sup>[1]</sup>에 의한 최적형상과 비교·검토하여 개선된 ESO법의 특성을 알아보았다.

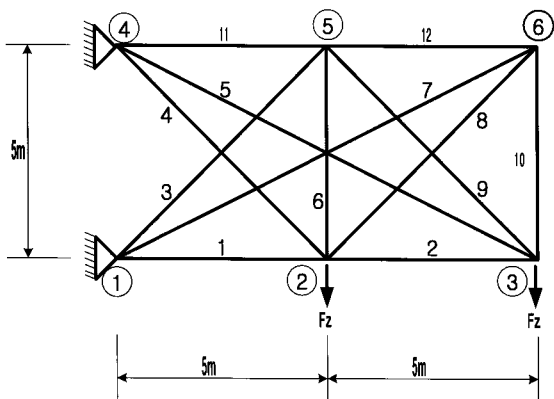
최적화를 위한 12부재 평면트러스 모델은 <그림 2>와 같은 캔틸레버 형식이며, 물성치는 <표 1>에서 보여주고 있다. 주어지는 하중은 참고문헌<sup>[1]</sup>과 비교·검토하기 위해 같은 조건으로 절점 2, 3번에 Z축 방향으로 주었으며, 경계조건은 절점 1, 4번을 고정시키고 나머지 절점은 자유로 하였다.

기존의 ESO법과 개선된 ESO법의 차이를 비교하기 위하여 <그림 2>의 모델을 같은 설계조건에서 해석하고 형태결정을 하였다. 최적형태결정 후 형상은 <그림 3>에서 보여지는 것처럼 기존의 ESO법과 개선된 ESO법이 동일하였다.

<표 2>의 기존의 ESO법과 개선된 ESO법의 형태결정 후 결과 비교에서 볼 수 있는 것처럼 최적형태가 결정된 후 체적 값은 거의 일정하게 나타났다.

<표 1> 12부재 평면트러스 모델의 설계조건

하 중		초기 외부직경 (cm)	탄성계수 E (kgf/cm <sup>2</sup> )
절 점	z축하중 (kgf)		
2, 3	-1000.0	5	2.1×10 <sup>6</sup>



<그림 2> 캔틸레버형식 12부재 평면트러스모델

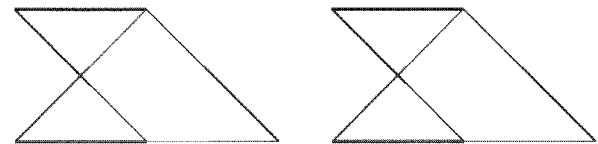
기존의 ESO법은 단면적의 증감으로 인한 RMS값이 0값에서 약간의 오차를 가지고 있는 것을 알 수 있다. 수렴하기까지의 반복횟수는 550회가 되어야 최적형태를 찾고 있음을 알 수 있다. 그러나 개선된 ESO법은 RMS값이 0에 떨어지며 수렴하기까지 반복횟수도 60회 정도에서 최적형태를 찾고 있음을 알 수 있었다.

기존의 ESO법에 RMS값이 0값에 가깝게 오차를 줄이려면 미소증분치 Δ의 값을 Δ=0.01cm보다 훨씬 작게 하면 된다. 그러나 그럴 경우에는 최종 수렴까지의 반복횟수가 무한정 커지게 되는 단점이 있다.

<그림 4>는 12부재 평면트러스의 단계별 진화상태를 나타내는 RMS값과 ESO율인 ESORATIO값을 나타내고 있다. 개선된 ESO법에 의한 경우에 최적

<표 2> 12부재 평면모델의 기존의 ESO법과 개선된 ESO법 결과 비교

	Final Iteration	RMS Value	Volume (cm <sup>3</sup> )
기존의 ESO법	550	0.0004	3430.0878
개선된 ESO법	60	0.0000	3437.5005

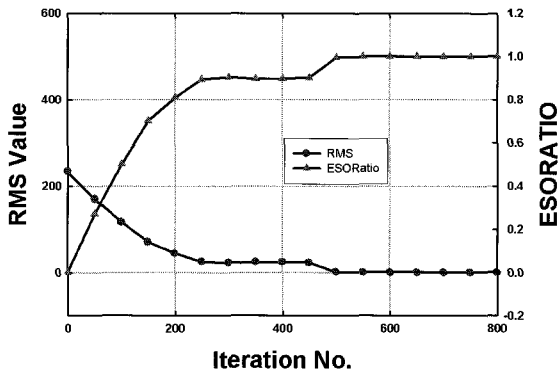


(a) 기존의 ESO법 (b) 개선된 ESO법

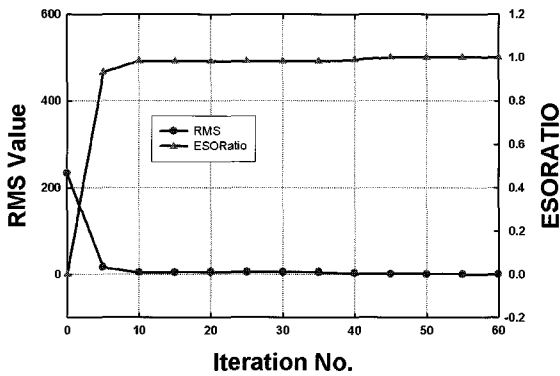
<그림 3> 12부재 평면트러스 모델의 최적형태

<표 3> 12부재 평면트러스 구조의 ESO법 형태결정 후 남은 부재의 결과값

최적 후 남은 부재	부재응력 (kgf/cm <sup>2</sup> )		외부 지름 D (cm)	
	기존의 ESO법	개선된 ESO법	기존의 ESO법	개선된 ESO법
1	-1604.72	-1600.00	4.930	4.927
2	-1603.77	-1600.00	3.490	3.484
3	-1602.56	-1600.00	4.150	4.143
4	1602.56	1600.00	4.150	4.143
9	1602.56	1600.00	4.150	4.143
11	1604.72	1600.00	4.930	4.927



(a) 기존의 ESO법



(b) 개선된 ESO법

〈그림 4〉 12부재 평면트러스 모델의 최적형태 결정을 위한 진화과정을 위한 진화과정

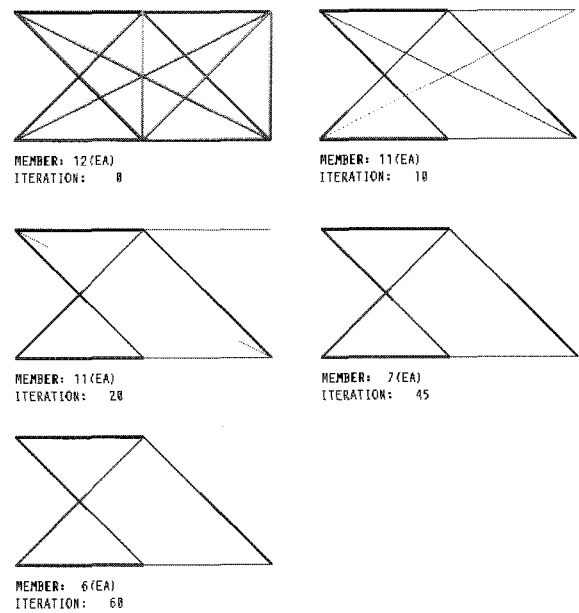
화가 시작된 후 몇 회 지나지 않아 매우 빠르게 최적해에 근접함을 알 수 있는데, 이는 종래의 ESO법을 사용할 때 보다 부재응력이 목표응력에 훨씬 빨리 대응함을 알 수 있다.

다음으로 개선된 ESO법 최적형태결정의 신뢰성을 위해 참고문헌<sup>[1]</sup>의 유전알고리즘(GA)를 통한 형상최적 결과와 비교·검토하였다.

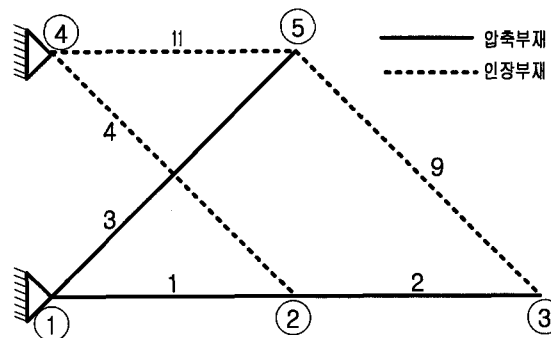
본 연구에서는 개선된 ESO법에 의한 원구조로 구성하여 형태최적화를 하였다. 그 최적형태결정과정은 〈그림 5〉에서 보여주고 있으며 반복수가 증가되면서 불필요한 부재는 삭제되고 필요한 부재로 구성되어지고 있음을 알 수 있다.

〈그림 5, 6〉에서 보여지듯이 참고문헌<sup>[1]</sup>의 GA에 의한 최적형상과 본 연구의 개선된 ESO법에 의한 최적형태가 같은 것을 알 수 있다. 참고문헌<sup>[1]</sup>의 형상 결정 후 남아 있는 부재는 본 연구와 동일하지만 부재각각의 응력상태는 다르다.

본 연구의 개선된 ESO법은 목표응력을 설정함으



〈그림 5〉 12부재 평면트러스 구조물의 최적 형태결정 과정



〈그림 6〉 참고문헌<sup>[1]</sup>의 형상최적결과

로써 모든 부재의 응력이 그 값에 도달할 때 최적이 된 것으로 한다. 즉 형상 결정 후 부재 내부의 응력상태가 일정하게 유지되면서 최적형태를 결정하고 있으며 그 결과는 <표 3>에 나타내었다. 〈그림 5〉는 12부재 평면트러스 구조에 대한 개선된 ESO법에 의한 최적형태결정 과정을 나타내고 있다.

### 3.2 캔틸레버형 평면 트러스 구조물의 형태결정

본 절에서는 신뢰성이 검증된 개선된 ESO법을 통하여 최적 형태결정 연구를 위해 캔틸레버형 트러스 구조물을 세로길이(b)와 가로길이(a)의 비( $R=a/b$ )에 따라 알아본다.

〈그림 7〉에서 처럼 세로의 길이 b는 일정하게 고

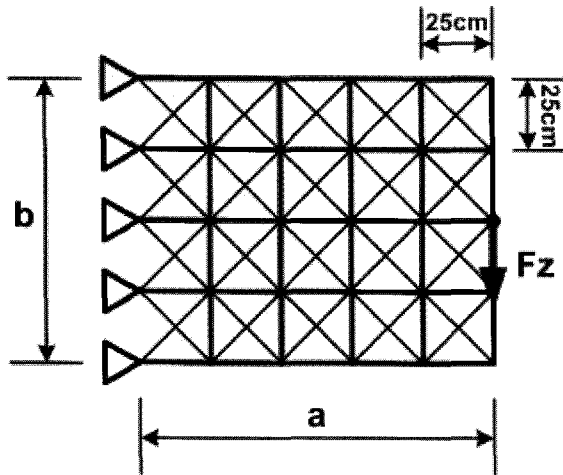
정시키고 가로 길이  $a$ 를 변화시키면서  $R$ 값을 변화시켰다.  $R$ 이 커지더라도 원구조를 구성하는 간격은 각각 일정( $25\text{cm} \times 25\text{cm}$ )하게 하였으며, 연결 가능한 절점은 두 번 겹치지 않게 하여 부재를 구성하였다.

원구조를 구성하기 위한  $R$ 의 값은 0.5~2.5까지 변화시켰으며, 주어진 하중은 같은 동일한 절점에 일정한 수직하중을 주었다. <표 4>는 트러스 구조물을 위한 설계조건을 보여주고 있다.

개선된 ESO법에 의하여 주어진 설계조건에 따라 해석한 결과, 형태는 <그림 8>에서 보여지고 있는 바와 같다.

<그림 8>은 캔틸레버형 트러스 구조물의 사각형 원구조 구성이 다른 비율( $R$ )에 따른 다양한 형태를 보여주고 있다. 본 예제의 경우를 통해서 최적형태 결정은 구조최적 lay-out의 적절한 선택에 따라 다른 형태가 나타날 수 있으며, 길이비가 클수록 응력의 분포양상이 다양하게 나타남을 알 수 있었다.

이번에는 캔틸레버형 트러스 구조물의 최적형태



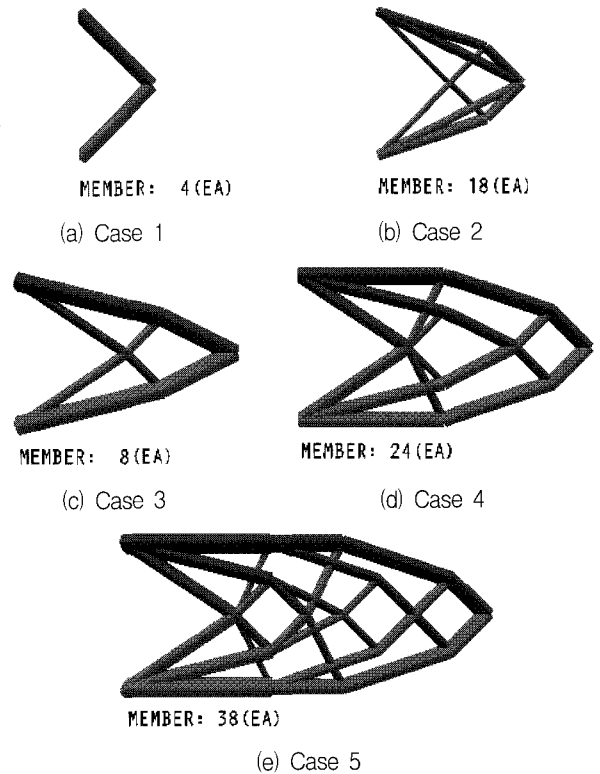
<그림 7> 캔틸레버형 트러스 구조물의 기본모듈

<표 4> 트러스 구조물 해석을 위한 설계조건

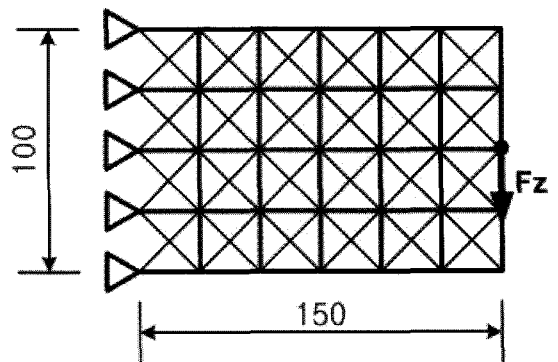
	하중 $F_z$ (kgf)	$R$	가로길이 $a$ (cm)	세로길이 $b$ (cm)
Case 1	3000	0.5	50	100
Case 2		1.0	100	100
Case 3		1.5	150	100
Case 4		2.0	200	100
Case 5		2.5	250	100

연구를 위하여  $R$ 값을 일정하게 유지하고, 요소분할을 달리하여 원구조를 구성하였다. 요소분할에 대하여 가로분할 수를  $n$ , 세로분할 수를  $m$ 이라 하고, 요소분할에 따른 트러스 구조물은  $n \times m$ 으로 표현하였다. 원구조 구성은 연결 가능한 모든 절점에 대하여 겹쳐지지 않게 부재를 구성하였다.

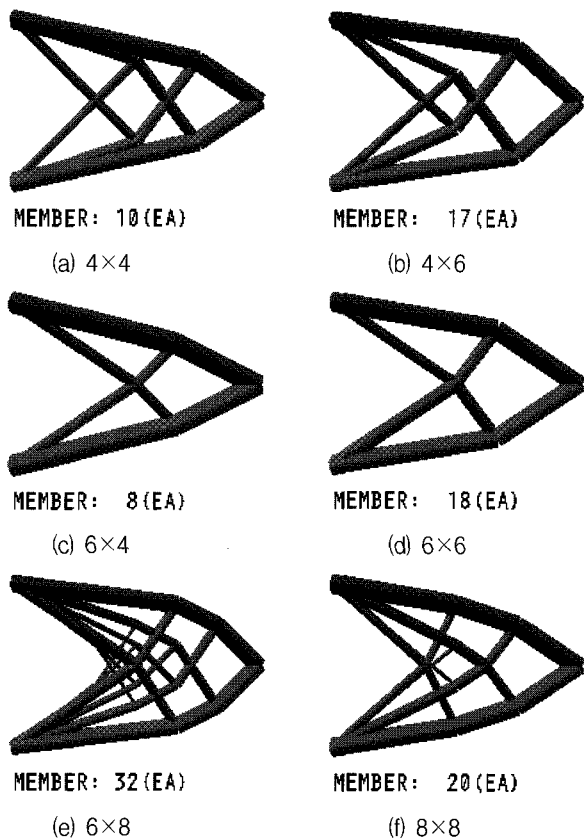
가로길이와 세로길이 비인  $R$ 값은 1.5로 고정하였으며, 하중은  $R$ 값의 변화에 따른 예제에서와 같이 동일한 절점에 일정 수직하중을 주었다. <그림 9>는



<그림 8>  $R$ 값의 변화에 의한 최적형태결정



<그림 9> 요소분할( $n=6, m=4$ )에 따른 캔틸레버형 트러스 구조물의 기본모듈



〈그림 10〉 원구조 구성에 따른 최적형태결정

6×4 캔틸레버식 트러스 구조물이며 기본 절점만 연결한 상태에서의 부재만을 보여주고 있다.

〈그림 10〉은 요소분할에 따른 개선된 ESO법의 최적형태 결정 후 그 형태를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 요소의 분할 수가 증가할수록 그 형태가 응력의 분포형태와 유사함을 알 수 있으며, 이러한 형태는 분할 수를 다양하게 함으로서 기존의 문헌<sup>[4]</sup>에서 볼 수 있는 연속체 모델을 원구조로 하여 형태결정한 문제와 유사한 형태를 보여주고 있다.

#### 4. 결 론

개선된 ESO법에 의한 캔틸레버형 트러스 구조물의 형태결정 예제에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 개선된 ESO법에 의한 최적형태 수립속도가 기존

의 ESO법보다 향상되었음을 예제를 통해 확인하였고, 그 최종 결과인 최적형태도 더 정확한 형태를 나타내고 있는 것을 확인하였다.

2. 길이비(R)에 따른 캔틸레버형 트러스 모델의 분석결과, 최적형태 결정은 구조최적 lay-out의 적절한 선택에 따라 다른 형태가 나타날 수 있으며, 길이비(R)가 클수록 형태는 응력의 분포형태와 유사함을 알 수 있었다.
3. 길이비(R)를 일정하게 하고 요소의 분할 수에 따른 예제에서는 분할 수를 많이 하여 부재의 구성을 조밀하게 했을 경우, 선택 요소를 사용한 형태 결정결과도 연속체 모델에 의한 형태와 비슷한 양상을 가짐을 알 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. 日本建築學會, “構造形態の解析と創生”, 應用力學 5, 1998, pp.137~144.
2. M. Ohsaki, “GENETIC ALGORITHM FOR TOPOLOGY OPTIMIZATION OF TRUSSES”, Computers & Structure, Vol.57, No.2, 1995, pp. 219~225.
3. S. D. Rajan, “Sizing, Shape, and Topology Design Optimization of Trusses Using Genetic Algorithm”, Journal of Structural Engineering, Vol.121, No.10, October, 1995.
4. Y.M. Xie, G.P. Steven, “Evolutionary Structural Optimization”, Springer-Verlag Limited, 1997.
5. Dorn. W. S., R.E. Gomory, and H.J. Greenberg, “Automatic Design of Optimal Structures”, Journal de Mecanique, Vol.3, 1964, pp.25~52.
6. Martin P. Bendsoe, “Optimization of Structural Topology, Shape, and Material”, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1995, pp.139~180.
7. 유정훈, “구조물의 위상 최적설계에 관한 고찰”, 전산구조공학, 제16권, 제1호, 2003, pp.77~85.
8. 崔昌禹, “擴張ESO法による構造形態創生”, 博士學位論文, 日本名古屋大學, 2001, p.105.