변위제약을 받는 평면트러스 구조물의 형태해석기법에 관한 연구

A Study on the Shape Analysis Method of Plane Truss Structures under the Prescribed Displacement

문 창 훈* Moon, Chang-Hoon
한 상 을** Han, Sang-Eul

요 약

본 논문은 변위제약모드를 갖는 트러스구조물의 형태해석을 목적으로 하였으며, 이를 위하여 해의 존재조건과 무어-펜로즈(Moore-Penrose) 일반역행렬을 이용하였다. 또한, 수치해석과정에서의 변위제약모드로는 호몰로지변형(homologous deformation)을 고려하여 해석하였고, 다음으로 다양한 변위제약모드와 절점에 작용하는 하중비를 만족하는 구조물의 형태를 구하였다. 본 논문에서의 형태해석문제는 지정된 변위를 만족하는 구조물의 형태를 찾는 일종의 역문제(inverse problem)로서 일반적인 구조해석과정과는 반대되는 입장에서 접근하였다. 또한, 본 논문에서는 수치해석과정에서 근사해의 정도를 향상시키게 위하여 뉴튼-랩슨법을 사용하였고, 수치해석예제로서 부재의 배열형태에 따라 3가지모델을 선택하였으며, 이들 모델을 통하여 적용한 해석기법의 정확성과 효율성을 검증하였다.

Abstract

The purpose of this study is to develop a technique for the shape analysis of plane truss structures under prescribed displacement modes. The shape analysis is performed based on the existence theorem of the solution and the Moore−Penrose generalized inverse matrix. In this paper, the homologous deformation of structures was proposed as prescribed displacement modes, the shape of the structure is determined from these various modes and applied loads. In general, the shape analysis is a kind of inverse problem different from stress analysis, and the governing equation becomes nonlinear. In this regard, Newton−Raphson method was used to solve the nolinear equation. Three different shape models are investigated as numerical examples to show the accuracy and the effectiveness of the proposed method.

Keywords : *shape analysis, Moore-Penrose generalized inverse, prescribed displacement mode, homo-logous deformation*

1. 서 론

일반적으로 구조물의 구조설계를 하는 경우, 구조해석의 수행과정은 어느 정도의 시행착오를 거쳐서 행해지게 되므로 상당한 시간과 노력이 수반된다. 특히 대공간구조물의 경우, 설계자가

* 정회원·인하대 건축공학과, 공학석사
** 정회원·인하대 건축공학과, 교수

• 이 논문에 대한 토론을 1998년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 1998년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

기존의 구조해석기법 및 경험에 준하여서는 구조시스템이나 재료의 능력을 충분히 발휘하게 할 수 없는 실정이므로 대공간구조물의 설계를 하기 위해서는 최적설계기법의 도입이 필요하다.

최적설계는 다음과 같이 크게 세 가지로 분류할 수가 있다. 첫 번째는 위상최적설계(topology optimal design)로 구조물을 구성하는 위치관계와 절점수 및 부재수의 결정문제이고, 두 번째는 단면최적설계(sizing optimal design)로 절점사이에 연결된 부재의 단면적의 결정문제이고, 마지막으로 형태최적설계(shape optimal design)로 형태변화를 받는 절점좌표의 위치결정문제이다.

대공간구조물의 형태에 관한 기존의 연구는 크게 두 가지로 분류된다. 첫 번째는 불안정구조물로부터 안정된 구조물의 형태를 구하는 형태탐색(shape finding)의 문제이고 두 번째는 주어진 제약조건을 만족하는 구조물의 형태를 구하는 형태해석(shape analysis)의 문제이다. 본 연구는 형태가 안정된 구조물에서 변위제약모드를 만족하는 구조물의 형태를 구하고자 하므로 형태해석에 속한다.

이 분야에 대한 연구로는 항가이(半谷裕彦)[2),4)]가 호몰로지변형을 만족하는 구조물과 변위제약을 갖는 구조물에서 변형제약모드를 만족하는 형태해석법을 제안하였다. 절점좌표만을 변수로 하는 경우에는 구조물의 형태에 따라서 호몰로지변형을 만족하는 해를 구할 수 없는 모델도 있었으나, 요시카와(Yoshikawa)[3)]와 퀴안(Qian)과 항가이(Y. Hangai)[5)]가 제시한 방법에 의하면 절점좌표뿐만 아니라 부재의 단면적도 함께 변수로 함으로서 해를 구할 수 있었다. 토사카(登坂宣好)[6)]는 유전자 알고리즘을 이용하여 호몰로지변형을 하는 트러스구조물에 관한 연구를 하였고, 유우(Z. You)[9)]는 프리스트레스된 구조물에 관해서 연구를 진행하는 등 이 분야에 대한 연구가 최근에 많이 진행되고 있다.

본 연구에서는 대공간구조물의 최적설계를 하기 위한 준비단계로서 변위제약을 받는 평면트러스 구조물의 형태해석을 하기 위한 해석기법을 제안한다. 또한 제안된 해석기법에 의하여 수치해석프로그램을 개발하고 주어진 조건을 만족하는 구조물의 형태를 구하는 것을 목적으로 한다.

2. 형태해석의 개념

2.1 형태해석과 구조해석

형태는 형(형상)+태(시스템)로 구성된다. 여기에서 형(形)은 기하학적인 의미로의 형상을 표시하고, 태(態)는 내부에 있는 시스템적인 구조를 표시한다. 형태=형상+구조를 의미하는 경우, 형태해석=형상해석+구조해석이 된다. 즉, 형태해석에서는 구조물의 형태를 설계하는 과정(형태설계과정)과 설계한 형태가 외부환경에 의해 변화하고 있는 과정(형태변화과정)을 고려한다.

시스템의 변형은 외부환경 등, 구조물에 영향을 주는 환경조건의 변화에 의하여 발생한다. 이러한 의미에서 종래의 구조해석은 형의 변화와 태의 변화에 대한 해석을 목표로 한다. 앞에서 설명한 것처럼 형태해석은 형상해석과 구조해석을 조합한 것이나, 본 논문에서 다루는 협의의 형태해석은 형태설계과정에 있어서의 수치해석법을 의미한다.

2.2 역문제

입력되는 원인에 따라 그에 대한 결과를 구하는 문제를 순문제라 한다면, 반대로 어떤 결과가 있을 때, 이러한 결과가 나오게 되는 원인을 추정하는 것을 역문제라 한다. 즉, 역문제는 어떤 것을 결정해야 할 필요가 있으나, 직접법에 의해서 해결되지 않을 경우 발생하게 된다.

부재의 크기, 절점의 위치 그리고 하중의 작용점과 크기가 주어졌을 때 이에 의하여 부재의 응

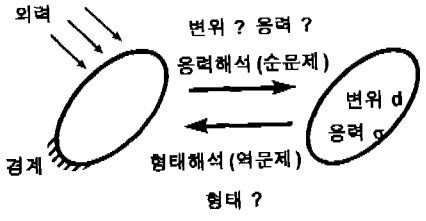


그림 1 역문제의 상관관계

력과 절점의 변위를 구하는 일반적인 구조계산은 순문제의 형태를 갖는다. 본 연구에서 다루는 문제는 구조물에서 일부 절점의 변위가 제한된 상태에서 변위제약을 받는 나머지 절점의 위치를 구하므로 이 경우는 역문제의 형태가 된다.

응력해석은 해의 존재조건과 유일성을 전제조건으로 하는 선형 기초 방정식의 해를 구하는 문제이지만, 형태해석은 특별한 경우를 제외하고는 기초방정식이 비선형 방정식이 되므로 해의 존재성과 유일성을 보장할 수 없는 비선형문제이다. 따라서, 이 문제를 해결하기 위해서는 비선형 해석기법의 도입이 필연적이며, 본 연구에서는 뉴튼-랩슨법을 사용하여 해결하였다. 또한 역문제는 순문제와는 달리 구하여진 근사해가 하나이상이 될 수 있으며, 해석결과 여러 개의 근사해가 존재함을 알 수있었다.

3. 기초방정식의 유도

3.1 평형방정식

구조형태를 표시하는 좌표매개변수를 x로 하고, 3개의 그룹으로 분리한다.

x_h : 변위모드가 지정된 좌표매개변수
x_f : 형태변화가 독립된 좌표매개변수
x_c : 형태가 변화하지 않는 고정된 좌표매개변수

구조물의 평형방정식은 다음과 같다.

$$f = K(x_f)\, d \tag{1}$$

여기서,

f : n차 하중벡터

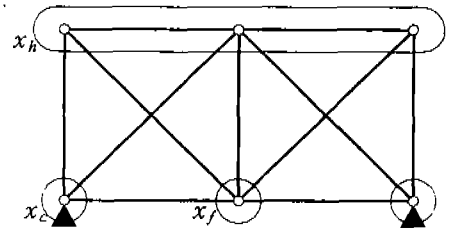


그림 2 절점의 분류

$K(x_f)$: 미지량 x_f를 포함한 강성행렬
d : n차 변위벡터
n : 전체자유도수이다.

변위모드지정을 받는 좌표매개변수 x_h와 형태변화를 받는 좌표매개변수 x_f에 대응하여 변위벡터 d를 d_h와 d_f로 분할한다. d_h와 d_f에 대응하여 강성행렬과 하중벡터를 식(2)와 같이 분할한다.

$$\begin{bmatrix} K_{hh} & \vdots & K_{hf} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ K_{fh} & \vdots & K_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_h \\ \cdots \\ d_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_h \\ \cdots \\ f_f \end{bmatrix} \tag{2}$$

변위모드를 d_0로 가정하여 미지의 매개변수 α를 도입하면 d_h는 식(3)으로 주어진다.

$$d_h = \alpha d_0 \tag{3}$$

식(3)을 이용하면, 식(2)는 식(4)가 된다.

$$\begin{bmatrix} h_h & \vdots & K_{hf} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ h_f & \vdots & K_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \cdots \\ d_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_h \\ \cdots \\ f_f \end{bmatrix} \tag{4}$$

변위모드가 d_0로 지정되어 변위의 미지량 h는 1개로 감소하고, 전체미지량은 $m = 1 + f$가 된다. 이때문에 식(4)의 계수행렬은 (n, m)형 장방행렬이 되며, 이 계수 행렬은 x_f의 함수가 된다. 식(4)를 정리하면 식(5)와 같다.

$$\overline{K}(x_f)\, \overline{d} = \overline{f} \tag{5}$$

3.2 무어-펜로즈(Moore-Penrose) 일반역행렬과 해의 존재조건

무어-펜로즈 일반역행렬이란 무어(Moore,1935)와 펜로즈(Penrose,1955)가 제안한 역행렬로서, 장방행렬의 역행렬을 구할 수 있다. K가 (m, n)형 장방행렬($m < n$)일 경우에 식(6)의 4개의 조건을 전부 만족하는 행렬 K^+를 K의 무어-펜로즈 일반역행렬이라고 정의한다.

$$(KK^{+})^{T}=KK^{+},\ (K^{+}K)^{T}=K^{+}K$$
$$KK^{+}K=K,\quad K^{+}KK^{+}=K^{+} \tag{6}$$

무어-펜로즈 일반역행렬는 K^{+}는 K의 계수에 의해서 구하는 식이 분류되며, m일 경우에는 $K^{+}=K^{T}(KK^{T})^{-1}$, $KK^{+}=I_{m}$이고, n일 경우에는 $K^{+}=(K^{T}K)^{-1}$, $K^{+}K=I_{n}$이다. x_{f}를 변화시킬 때, 식(5)가 해를 가질 필요충분조건은 $K(x_{f})$의 무어-펜로즈 일반역행렬 $K^{+}(x_{f})$를 이용하면 식(7)으로 주어진다.

$$[\overline{K}_{(x_{f})}\overline{K}^{+}_{(x_{f})}-I_{n}]f=0 \tag{7}$$

여기서, I_{n}은 $(n,\ n)$형 단위행렬이다. 식(7)의 좌변을 $g(x_{f})$로 치환하며, 식(8)과 같다.

$$g(x_{f})=[\overline{K}_{(x_{f})}\overline{K}^{+}_{(x_{f})}-I_{n}]f=0 \tag{8}$$

변위모드지정의 형태해석을 식(8)을 만족하는 좌표매개변수 $\overline{x_{f}}$를 구하는 문제이고 식(8)의 함수 $g(x_{f})$는 (이하에서 x_{f}를 x로 표기한다.) x에 관한 비선형방정식이 되므로 뉴튼-랩슨법에 의해 근사해를 구한다.

3.3 뉴튼-랩슨법

$x^{(r)}$을 근시해라 하고 $x^{(r)}$로 부터 미소거리 $\Delta x^{(r)}$만큼 떨어진 값을 $x^{(r+1)}$로 한다.

$$x^{(r+1)}=x^{(r)}+\Delta x^{(r)} \tag{9}$$

따라서, $x^{(r+1)}$의 좌표매개변수가 식(8)을 만족하는 것으로 가정하면, 식(9)와 같다.

$$g(x^{(r+1)})=0 \tag{10}$$

식(10)에 식(9)를 대입한 후, 테일러 전개하여 고차항을 생략하고 우변을 0벡터로 놓는다.

$$\left[\frac{\partial g}{\partial x}\right]\Delta x^{(r)}=-g(x^{(r)}) \tag{11}$$

식(11)의 계수행렬은 일반적인 계수행렬과는 달리 장방행렬이므로 무어-펜로즈 일반역행렬을 이용한다.

$$\Delta x^{(r)}=-\left[\frac{\partial g}{\partial x}\right]^{+}g(x^{(r)}) \tag{12}$$

식(8)을 미분하면 식(13)으로 된다.

$$\frac{\partial g}{\partial x_{i}}=\left[\frac{\partial \overline{K}}{\partial x_{i}}\overline{K^{+}}+\overline{K}\frac{\partial \overline{K^{+}}}{\partial x_{i}}\right]f \tag{13}$$

rank$(\overline{K})$=m인 경우의 무어-벤로즈 일반역행렬을 x_{i}로 미분하면 식(14)와 같고, 식(14)를 식(13)에 대입하면 식(15)가 된다.

$$\frac{\partial \overline{K^{+}}}{\partial x_{i}}=\frac{\partial[\overline{K^{T}}\,\overline{K}]^{-1}}{\partial x_{i}}\overline{K^{T}}+[\overline{K^{T}}\,\overline{K}]^{-1}\frac{\partial \overline{K^{T}}}{\partial x_{i}} \tag{14}$$

$$\frac{\partial g}{\partial x_{i}}=\left[(I_{n}-\overline{K}\,\overline{K^{+}})\frac{\partial \overline{K}}{\partial x_{i}}\overline{K^{+}}+\left[\frac{\partial \overline{K}}{\partial x_{i}}\overline{K^{+}}\right]^{T}(I_{n}-\overline{K}\,\overline{K^{+}})\right]f \tag{15}$$

4. 수치예제

전술한 이론의 정확성과 유효성을 검증하기 위하여 몇 가지 모델을 해석하였다. 해석모델은 2개의 지점과 나머지 절점간의 다양한 부재연결에 의하여 그림 3과 같이 3개를 설정하였다. 3개의 모델에 대하여 모두 4개의 문제를 4장에서 다루었다.

4.1 해석모델

부재들은 완전한 핀으로 접합되었으며, 각 부재들의 단면적과 재질은 동일하다고 가정하여 해석하였다. 좌표축과 부재의 길이는 그림 3과 같다(이하에서 절점 1의 Y축 좌표값은 Y(1)로 표시한다).

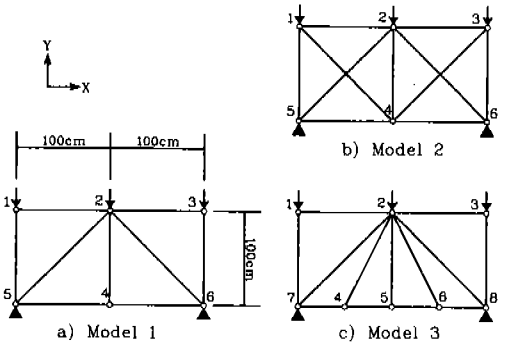


그림 3 해석모델의 종류

4.2 호몰로지변형을 고려한 해석결과

첫 번째 문제는 절점 1, 2, 3에서 Y축방향으로 동일한 크기의 하중이 작용하고 변위제약모드는 Y축으로만 1.0:1.0:1.0인 경우에 호몰로지변형을 만족하는 구조물의 형태를 찾는 것이다.

호몰로지변형을 하는 구조물의 해석은 커다란 원형 안테나와 같이 스팬이 큰 구조물에서 자중에 의해 변형이 발생하였을 경우 본래의 그 형태를 유지하기 위한 연구로서 시작되었다. 대공간 구조분야에서는 돔이나 볼트와 같이 기둥이 없이 공간을 형성하는 구조물의 규모가 커짐에 따라 이에 대한 연구가 진행되었다. 여기서 호몰로지 변형이란 구조물 또는 구조물의 일부가 변형전과 후에 지정된 형상과 똑같이 되는 것을 말하는 것으로 그림 4에서 호몰로지 변형을 설명하고 있다. 변형되기 전에 구조물의 형상은 실선으로 표시하였으며, 변형된 후에 구조물의 형상은 점선으로 표시되어 있다. 그림을 통하여 알 수 있듯이 변형 후에도 원래의 형상을 유지하는 변형을 호몰로지변형이라 한다.

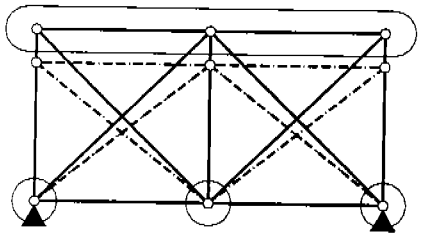


그림 4 호몰로지 변형

결과값을 나타낸 그래프에서 불평형력 g의 값이 0이 되는 절점 Y(4)의 위치가 구하고자 하는 구조물의 형상을 나타내는 좌표이다. 그림 5는 모델 1의 경우에 불평형력의 크기를 나타낸 것으로 곡선은 각각의 절점좌표에 따른 불평형력의 크기를 나타낸 것이고, 화살표로서 초기위치가 각각 -30과 20일 때 해가 수렴되는 과정을 표시하고 있다. 모델 1의 경우, 그림 5를 통하여 알 수 있듯이 48.70cm, -85.07cm, -100.00cm 에서 3개의 근사해를 구할 수 있다.

그림 6은 각 절점에서 불평형력 g(2), g(4), g(6), g(8)과 불평형력들의 합 g사이의 크기변화를 나타낸 그래프이며, 불평형력들의 크기증감형상이 전체적으로 일치함을 알 수 있다.

그림 7은 절점 1과 절점 2의 Y축으로 처짐량의

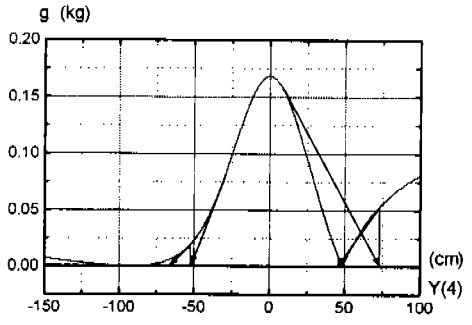


그림 5 모델1에서 Y(4)와 불평형력의 관계

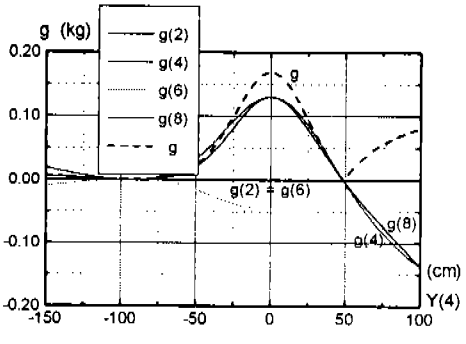


그림 6 모델1에서 g(2)~g(8)과 불평형력합의 관계

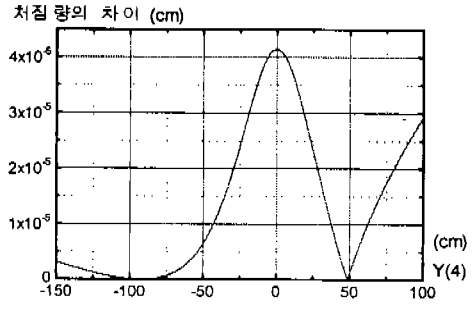


그림 7 모델 1에서 Y(4)와 처짐량차이의 관계

차이를 나타낸 그래프이며, 그림 5와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 역시, 처짐량의 차이가 0인 Y(4)가 호몰로지 변형을 만족하는 절점의 위치이다. 결국, Y(4)가 근사해 48.70cm, -85.07cm, -100.00cm 에서 모델 1이 호몰로지 변형한다는 결론을 내릴 수가 있었다.

그림 8은 형태해석결과 구하여진 호몰로지 변형을 만족하는 모델 1의 형상을 표시하고 있다. 절점 4의 Y축 좌표는 구조물의 사용성을 고려하여 해석전의 절점좌표위치로부터 -150cm ~ 100 cm 범위에서 변형하는 근사해들을 구하였다.

모델 2에서 해석을 통하여 구하여진 Y(4)와 불평형력 g의 관계는 그림 9로 나타내었다. 하나의 근사해 53.33cm를 구할 수 있었으며, 그림 10은 해석을 통하여 구하여진 모델 2의 형상을 표

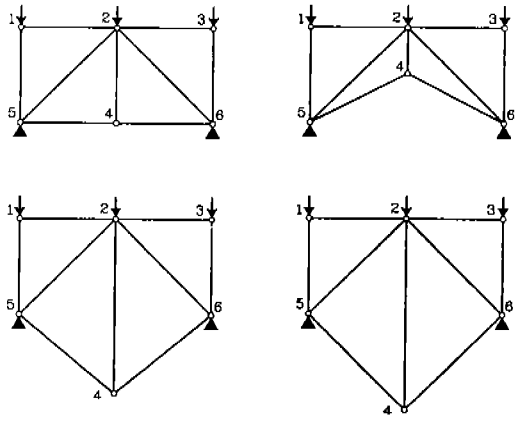


그림 8 모델 1에서 해석전·후의 구조물의 형상

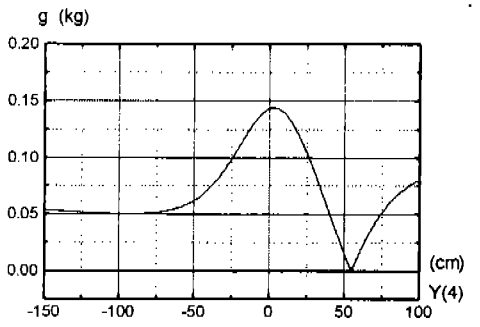


그림 9 모델 2에서 Y(4)와 불평형력의 관계

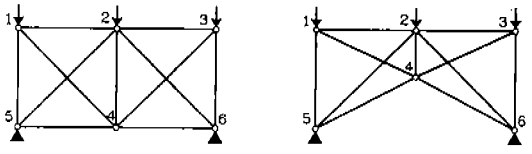


그림 10 모델 2에서 해석전·후의 구조물의 형상

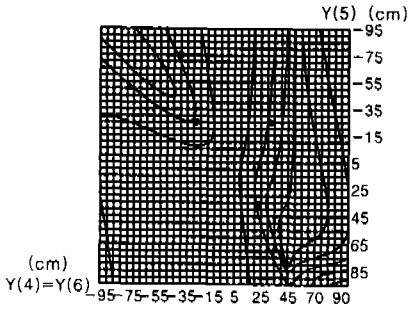
시하고 있다.

모델 3은 구조물의 대칭성을 고려하여 Y(4)와 Y(6)를 같게 놓았다. 모델 3과 같이 독립적인 변수가 2개 이상인 경우는 여기에서 제시하는 해석법으로는 정확한 해를 구할 수는 없고, 각각의 절점좌표에 대하여 불평형력의 크기를 구함으로서 대략적으로 구조물의 형상을 추측할 뿐이다.

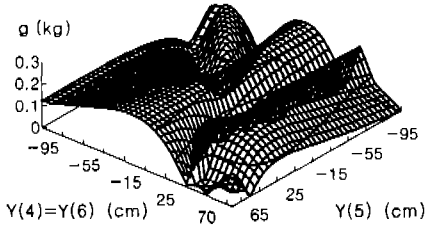
그림 11은 모델 3에서 절점의 위치와 불평형력의 관계를 나타낸 그래프이며, 그림 12는 대략적으로 구한 모델 3의 형상을 표시하고 있다.

본 연구에서는 오차한계를 1.0×10^{-6}로 하여 그 이하의 범위에서는 수렴하는 것으로 판단하였으며, 비선형수치해석법으로 뉴튼-랩슨법을 이용하여 수렴할 때까지 반복하여 해 $\overline{x_i}$를 구하였다. 모델 1에서 뉴튼-랩슨법을 이용한 근사해의 수렴과정은 그림 13과 14와 같다.

그림 13은 Y(4)의 초기위치가 각각 -30.0cm, 20.0cm, 80.0cm 인 경우에 Y(4)의 초기위치와 수렴도사이의 관계를 나타내었고, 그림 14는 모델 1에서 Y(4)의 초기위치와 불평형력 g사이의 관계를 나타내고 있으며, 각각 4번째 스텝전후로



(a) 평면적인 표현



(b) 입체적인 표현

그림 11 Y (4) =Y (6), Y (5)의 절점위치와 불평형력의 관계

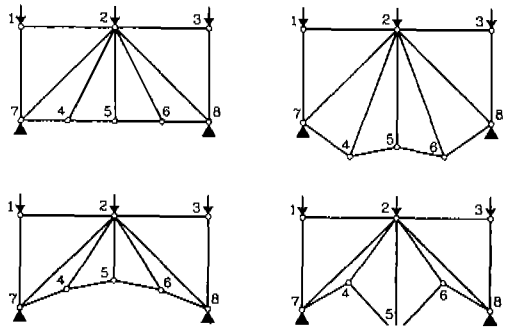


그림 12 모델 3에서 해석전·후의 구조물의 형상

수렴함을 알 수 있었다.

4. 3 변위제약을 고려한 경우

4.2절에서 변위제약모드로서 호몰로지 변형(1.0:1.0:1.0)을 고려하였으나, 4.3절에서는 절점 1부터 3에서 Y축으로의 변위제약모드를 1.0:x:1.0로 달리 주어 해석하였다(x=0.9, 0.95, 1.05, 1.1).

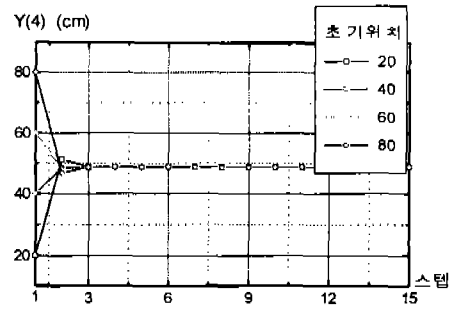


그림 13 모델 1에서 절점4의 초기위치와 수렴도의 관계

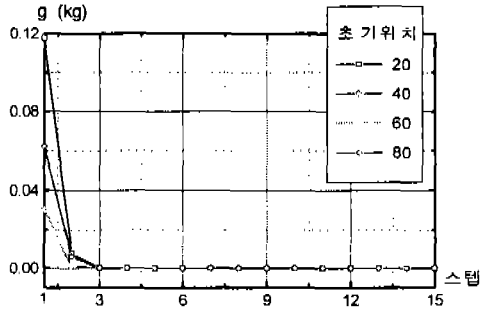


그림 14 모델 1에서 절점4의 초기위치와 불평형력의 관계

해석모델은 모델 2만을 고려하였고, 해석결과는 그림 15와 16과 같이 얻을 수 있다.

변위제약모드가 다르면 만족하는 절점위치가 변하기 때문에 구조물의 형상이 변위제약모드에 따라 변화함을 알 수 있었다.

4. 4 하중비를 달리한 경우

4.2, 4.3절에서는 변위제약모드를 달리 주었으나, 4.4절에서는 하중의 비를 달리 주어, 주어진 하중비를 만족하는 호몰로지 변형을 하는 위치를 구하였다. 즉, 4.2, 4.3절에서는 하중의 비가 1.0:1.0:1.0 이었으나, 4.4절에서는 하중의 비를 1.0:x:1.0 으로 하여 해석하였다(x=1.1, 0.9).

해석모델은 모델 2만을 고려하였고 해석결과는 그림 17과 18 같이 얻을 수 있었다.

하중비가 다르면 만족하는 절점위치가 변하기 때문에 구조물의 형상이 하중비에 따라 변화함을

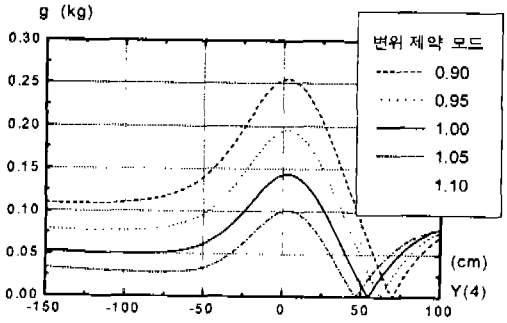


그림 15 모델 2에서 Y(4)와 불평형력사이의 관계

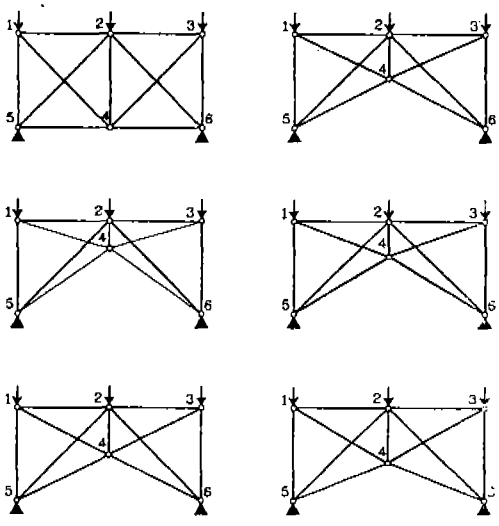


그림 16 모델 2에서 해석전·후의 구조물의 형상

알 수 있었다.

4.5 Y축과 X축을 동시에 변수로 고려한 경우

전 절에서는 절점의 위치를 X축은 고정하고 Y축을 변화시켜 해를 구하였으나, 본 절에서는 X축좌표도 함께 변수로 보고 호몰로지 변형을 만족하는 구조물의 형태을 구하였다. 여기에서 다루는 문제와 같이 독립적인 변수가 2개 이상인 경우는 본 논문에서 제시하는 해석법으로는 정확한 해를 구할 수는 없고, 각각의 절점좌표에 대하여 불평형력의 크기를 구함으로서 대략적으로 구조물의 형상을 추측할 뿐이다.

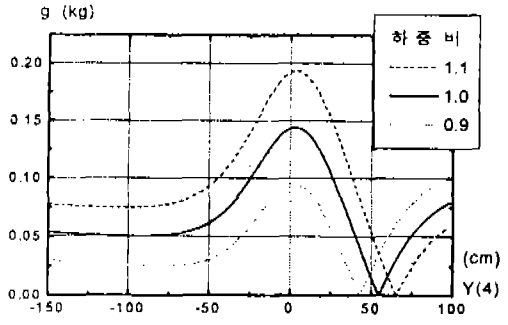


그림 17 모델 2에서 Y(4)와 불평형력사이의 관계

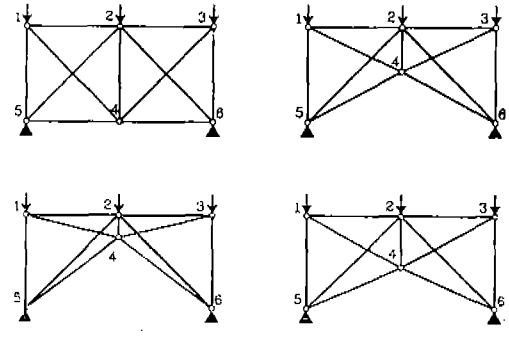
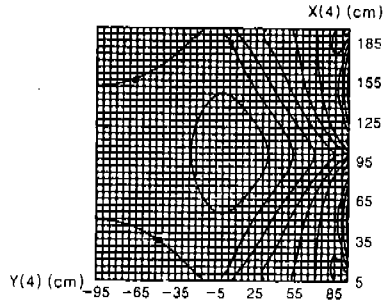


그림 18 모델 2에서 해석전·후의 구조물의 형상

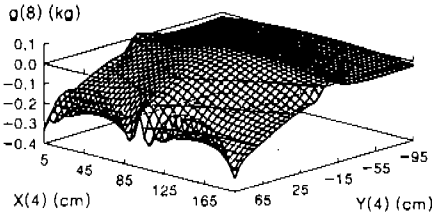
그림 19는 절대값으로 표현하지 않은 불평형력를 통하여 호몰로지 변형을 만족하는 절점의 위치를 대략적으로 구하였다. 구하고자 하는 정확한 절점의 위치를 구분할 수 없었으며, 제약조건을 만족하는 대략적인 구조물의 형상은 그림 20과 같다.

5. 결 론

본 연구에서는 단순한 평면트러스 구조물에서 호몰로지변형이 제약모드로 주어진 경우에 대하여 형태해석을 수행하였고, 다음으로 다양한 제약조건과 하중조건을 만족하는 구조물의 형태해석을 수행하였다. 본 연구는 형태해석에 대한 기초적 연구로서 절점의 위치를 변수로 하였으며, 수치해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수



(a) 평면적인 표현



(b) 입체적인 표현

그림 19 모델 2에서 X(4), Y(4)와 g(8)사이의 관계

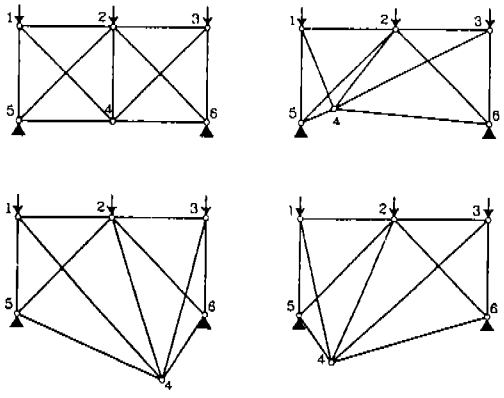


그림 20 모델 2에서 해석전·후의 구조물의 형상

있었다.

1) 본 논문에서는 트러스구조물의 형태해석에 관한 수식을 평형방정식이 해를 가질 존재조건으로부터 유도하였다.

2) 호몰로지 변형을 만족하는 평면트러스 구조물의 절점좌표를 구할 수 있었다.

3) 다양한 제약모드와 하중조건을 만족하는 평면트러스 구조물의 형상을 구할 수 있었다. 그러나, 변위제약모드나 하중비가 본 논문에서 제시된 것보다 크거나 작을 때에는 불평형력들중의 일부가 구하고자 하는 해와 2~3cm가량 오차를 보임을 알 수 있었다.

4) 본 논문을 통하여 트러스구조물의 형태해석에 관한 기초적인 이론을 제시하였고, 제시된 이론에 기초한 해석프로그램과 모델을 통하여 제시된 이론의 정확성과 유효성을 검증하였다.

5) 변수가 하나인 경우는 뉴튼-랩슨법을 이용하여 쉽게 구할 수 있었으나, 다변수인 경우에는 해를 정확히 구할 수 없었다.

향후 뉴튼-랩슨법을 이용한 결과, 초기치에 따라 수렴 또는 발산하는 단점과 변수가 여러개인 경우에 정확히 해를 구하지 못하는 문제를 해결하기 위한 연구가 더 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 초대형구조시스템연구센터와 97년도 인하대학교 교내연구비의 지원에 의한 연구결과의 일부이며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Topping, B. H. V., Shape Optimization of Skeletal Structures, A Review, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 109, No. 8, pp.1933-1951, 1983.
2. 半谷裕彦, 形態解析 一般逆行列の應用, 培風館, 1991.
3. N. Yoshikawa, S. Nakagiri, Homology Design of Flexible Structure by the Finite-Element Method, IUTAM Symposium, Zakopane, Poland, Aug. 31-Sep. 3, pp.148-157, 1993.
4. 半谷裕彦, 變位モード指定の構造形態解析法, 日本建築學會構造系論文報告集, 第453 , pp.95-

100, 1993, 11.
5. Z. Qian, Y. Hangai, Optimal Shape Design of Multi-Purpose Homologous Truss Structure, Proceedings of Asia-Pacific Conference on Shell and Spatial Structures in Beijing, pp.486-491, 1996.
6. 登坂宣好, 遺傳的アルゴリズムの空間構造形態解析への應用, 日本建築學會構造系論文報告集, 第484 , pp.75-83, 1996.
7. William Weaver Jr., James M. Gere, Matrix Analysis of Framed Structures, 지성출판사, 1996.
8. 田島 稔, 小牧和雄, 最小二乘法の理論とその應用, 東洋書店, 1996.
9. Z. You, Displacement control of prestressed structures, Comput. Methods Appl. Engrg., Vol. 144, pp.51-59, 1997.

(접수일자 : 1997. 10. 31)