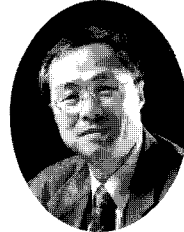


# 전개가능 구조물의 전개과정에 대한 비선형 해석

- Nonlinear Analysis for the Process of Deployment of Deployable Structures -



한 상 을\*  
Han, Sang Eul

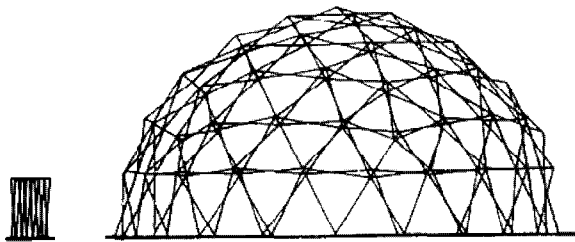


이 지 연\*\*  
Lee, Ji Yeon

## 1. 서 론

전개가능 구조물(Deployable Structures)은 접혀진 초기 형상에서 하중을 안정하게 지지하는 최종형상으로 전개될 수 있는 스페이스 프레임이다. 초기의 전개가능 구조물들은 구조물이 완전히 전개된 형태를 유지하기 위해서 구조물을 고정시킬 수 있는 추가적 고정 장치가 필요하였다. 하지만 Krishnappillai가 전개된 형상에서 응력이 발생하지 않는 구조물의 기하학적 형상을 제시한 이래로 전개가능 구조물에는 더 이상의 추가적 부재가 필요하지 않게 되었다. 따라서 전개가능 구조물은 외적인 고정 장치 없이 스스로 완성된 형태를 유지하는 구조물이라 정의할 수 있다.

이러한 구조물은 시공적 측면에서 설치, 조립, 이



〈그림 1〉 돔(dome)의 접히고, 전개된 형상

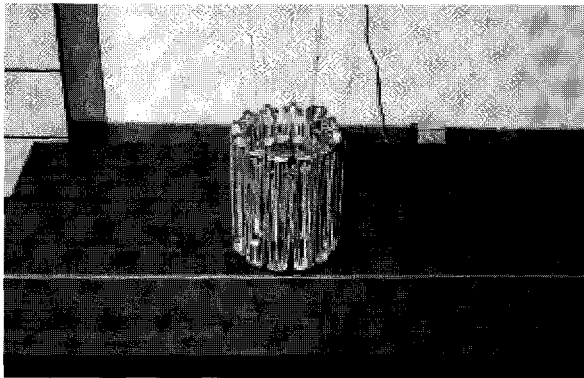
동 및 보관이 용이하고, 환경적 측면에서 재활용과 재사용이 가능하며, 다양한 이벤트(event)에 대처할 수 있는 유연성이 확보되는 장점이 있다. 이러한 장점에도 불구하고 전개가능 구조물은 변형에 비해 변위가 상당히 크고, 피봇(pivot)절점에 대한 해석상의 어려움으로 다른 연구 분야에 비해 많은 발전이 이루어지지 못한 실정이다.

또한, 전개가능 구조물은 여타의 구조물과는 달리 전개된 형상의 해석과 전개과정에 대한 두 가지의 해석이 필요하다. 전개된 형상에서 사용하중에 대한 해석은 선형해석으로 비교적 수월한 해석일 수 있으나, 전개과정에 대한 해석은 전개 시 큰 변위가 발생하므로 매우 복잡한 비선형해석을 요구한다. 이러한 해석상의 어려움으로 과거 전개가능 구조물의 연구들은 주로 건축가의 디자인적 관점에서의 형상 접근과 직관에 의한 구조해석이 대부분이었다.

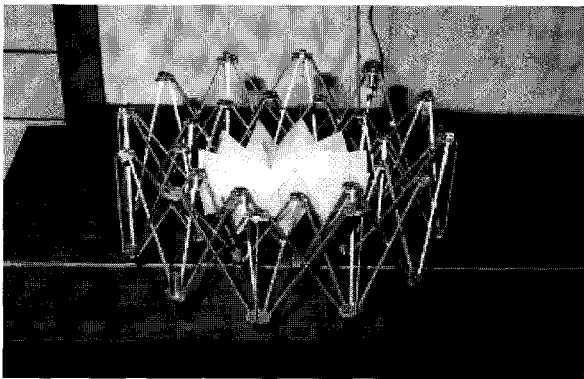
전개가능 구조물은 구조물이 접혀진 형상과 완전히 전개된 형상에서 외부의 고정 장치 없이 스스로 완성된 형태를 가질 수 있으며(self standing), 그러한 두 형상에서는 응력이 존재하지 않지만(stress free), 전개되는 과정에서 구조물은 스냅 스루(snap through)현상의 불안정한 구조 거동을 보이므로 전개과정에 대한 해석은 보다 신중한 비선형 해석이 고려되어야 한다. 따라서 전개가능 구조물에서 무엇보다 중요한 점은 전개를 가능하게 하는 복잡한 기

\* 인하대학교 건축학부 교수

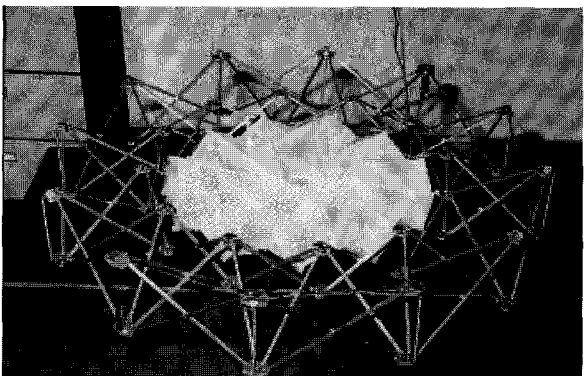
\*\* 인하대학교 건축공학과 석사과정



(a) 접혀진 상태



(b) 전개과정



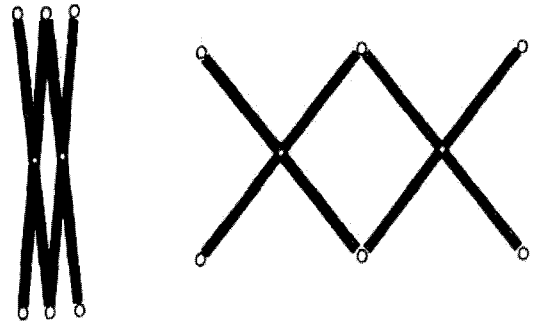
(c) 전개된 상태

〈그림 2〉 전개가능 구조물

하학적 구속조건(geometric constraints)을 고려한 구조물의 최적형상을 구하여 전개과정에 대한 거동을 해석하는 것이라 할 수 있다.

## 2. 연구의 동향

전개가능 구조물은 일반 구조물과는 다른 특별한 장점을 가지고 있기 때문에 그동안 많은 디자이너와 엔지니어들에 의해 설계되고 연구되었다. 하지만 그러한 노력에도 불구하고 몇 가지의 불리함으로 널리

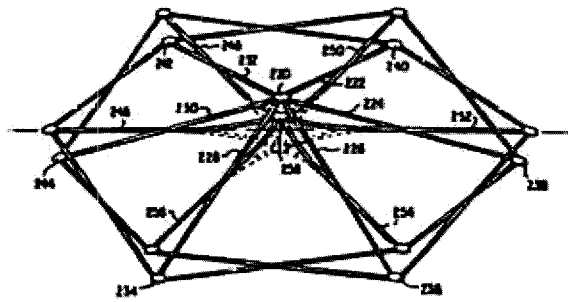


〈그림 3〉 팬토그래프의 원리

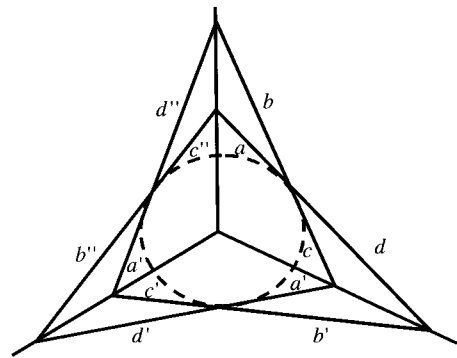
쓰이지 못하고 있는 실정이다. 최근에는 선행된 디자인의 결점들을 보완시킨 개선된 개념들이 소개되고 있다. 초창기 대부분의 전개가능 구조물에 대한 연구자들은 건축 디자이너들이었고, 그들의 연구는 대부분 공학적 개념이 고려되지 않은 건축적 디자인 부분에 치중되었다. 따라서 전개가능 구조의 앞선 연구의 고찰은 현재 연구의 위치에 있어서 무엇보다도 중요한 부분일 것이다.

1961년 스페인 건축가 Perez Pinero<sup>1)</sup>는 그림 3에서와 같은 팬토그래프(pantograph)의 원리\*를 사용하여 전개가능 구조물을 처음으로 소개하였다. 그 모델은 강봉(rigid bars)과 와이어 케이블(wire cables)로 구성된 접고 펼칠 수 있는 그물 모양의 이동식극장이었다. 같은 해에 런던에서 있었던 IUA 학술대회에서는 전개가능 구조물의 모델을 소개함으로써 건축상을 받았으며, 이러한 건축물로 1965년 미국 특허를 취득하기도 하였다. Pinero의 구조물에서 각각의 부재들은 고정하중을 제외하면 접히고, 전개된 두 형상에서 응력이 생기지 않을 뿐만 아니라 전개되는 과정에서 또한 응력이 생기지 않는 구조물이었다. 하지만 여기서 주목해야 할 점이 전개과정의 전과 후, 그리고 전개과정 모두에서 구조물에 응력이 발생하지 않는다는 점이다. 그러므로 구조물의 안정은 단지 부가적인 케이블과 같은 외적인 고정 장치에 의해서만 가능하였다. 일반적으로 구조물을 고정시키기 위해서는 최종형상으로 펼쳐진 구조물의 절점사이에 가운데 부재를 끼어 넣어야 했다. 하지만 이러한 방법은 구조물의 규모가 커지게

\* 님은 다각형의 작도법(作圖法)과 같은 원리로 도형을 축소하거나 확대하는 사도기(寫圖器)



<그림 4> Zeigler의 돔 단위모델



<그림 5> 3쌍의 가위모양 부재

되면 만족할만한 결과를 얻을 수 없는 단점이 있다. 따라서 구조물이 규모가 크면서도 안정하기 위해서는 많은 시간과 경비가 소요되므로 권장할 만한 방법이라 할 수 없다. 이러한 문제들이 전개가능 구조물이 널리 쓰이게 하는데 많은 어려움을 주었다. 하지만 Pinero는 전개가능 구조물을 전망있는 학문의 분야로 확립시켰으며, 무엇보다도 다른 여러 연구자들로 하여금 Pinero의 디자인의 한계를 극복하기 위한 유사한 구조물을 연구할 수 있는 동기가 되었다는데 큰 의의가 있다.

1974년 Theodore Zeigler는 Pinero의 구조물의 취약점을 보완하여 디자인한 모델로 특허를 받았다. 그의 구조물은 Pinero의 것과 같은 직선 부재들로 구성된 불완전한 구형 돔 형상이었다.<그림 4> Zeigler에 의해 소개된 구조물의 중요한 변화는 구조물이 완전히 전개된 형상에서 추가적인 부재나 외부 고정 장치 없이 지지될 수 있다는 점이었다. 이렇게 특별한 기하학적 형상을 갖는 구조물을 나타내기 위해서 Zeigler<sup>[2]</sup>는 다음과 같은 3가지의 구속조건을 제시하였다.

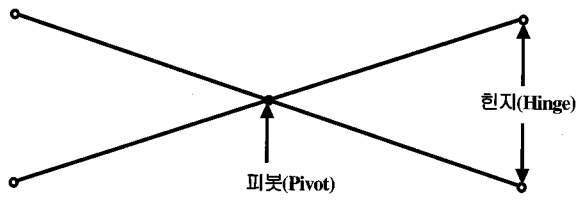
- 1) 구조물이 완전히 전개되었을 때, 안쪽 상, 하부 절점으로부터 사방으로 뻗어진 모든 부재들은 반드시 같은 평면에 있어야하며, 그 단부 절점에서는 이웃하는 바깥쪽 부재의 절점과 연결되어야 한다.
- 2) 안쪽 상부 절점과 연결된 부재들은 안쪽 하부 절점과 연결된 부재들의 길이보다 더 길어야한다.
- 3) 실제로 구조물이 접혀지기 위해서는 가위 부재들의 몇몇 피봇(pivot) 연결을 하지 말아야 한다. Zeigler는 중간 절점에서 고정 피봇과 슬라이딩

피봇, 끝 절점에서는 유연한 스프링유형의 연결부를 사용하였다.

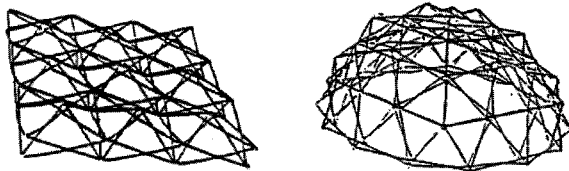
더 많은 연구는 Clarke<sup>[3]</sup>에 의해 진행되었다. Clarke는 Zeigler의 구조물의 기본 단위모델인 3쌍의 가위모양 부재를 수학적으로 정식화하였다. 3쌍의 가위부재는 6개의 스트럿(strut)으로 연결, 조합되어 움직이게 된다.<그림 5>는 완전히 전개된 3쌍의 가위부재의 윗부분의 모습을 보여준다.

Clarke는 스트럿의 길이간의 관계를 유도하였고, 전개된 후 스트럿에 힘이 생기는 불완전한 Zeigler의 돔의 기하학적 원인을 설명하였다. Zeigler의 특정한 형상은 상당히 좋은 연구 성과였음에도 불구하고 엄격한 구속조건으로 인해 제한된 기하학적 형상을 적용하여야 하는 한계가 있었다. 게다가 구조물이 완전히 전개된 형상에서는 사용하중의 좌굴 영향을 받은 휘고, 구부러진 부재들이 존재하였다. 이러한 현상은 하중저항성능을 크게 감소시키는 결과를 초래하였다.

1984년 제3회 공간 구조 국제회의에서는 더 많은 전개가능 구조물의 개념이 발표되었다. 하지만 모든 개념들은 피상적인 안정화 방법만을 연구한 것이었다. 따라서 Pinero의 구조물이 갖고 있는 근본적 문제들을 피할 수는 없었다. 하지만 세우는 방법이 다른 각도에서 고려되고, 천을 덮는 등의 흥미로운 사항들이 제시되었다. 그러한 여러 논문들 중에서 가장 주목할만한 것이 바로 스페인 세빌(Seville, Spain)의 건축학 교수인 Felix Escrig<sup>[4]</sup>의 논문이었다. Escrig는 기본적인 이론으로 <그림 1>의 팬토프를 다시 거론하였다. Escrig는 처음으로 전개가능



<그림 6> 가위모양의 부재



<그림 7> 평면형과 곡면형의 전개가능 구조물

구조의 해석을 다루었으나, 전개된 형상에서 구조물이 안정하기 위해서는 여전히 추가적인 부재가 필요했음에 한계가 있었다.

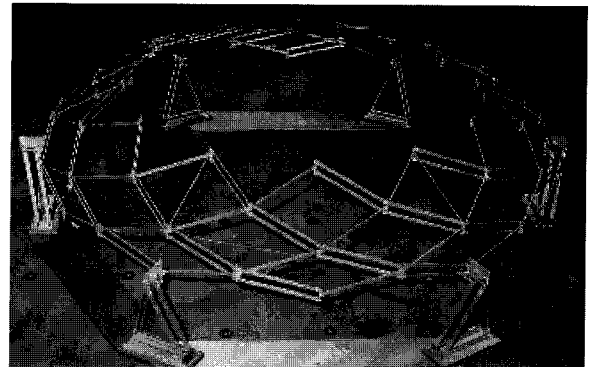
1990년을 전후로 MIT 건축과에서는 Zalewski 교수의 지도아래 수년간에 걸쳐 전개가능 구조에 대한 많은 연구가 진행되었다. 그의 제자 중 Sivam Krishnapillai<sup>[5]</sup>는 Zeigler의 연구를 개선시킨 디자인 개념을 소개하였다. 그는 접혀지고 전개된 형상에서 응력이 발생하지 않는 안정한 구조물의 기하학적 형상을 발견하였고, 간단한 기하학적 구속조건을 정식화하여 구조거동을 예상하였다. 하지만 이러한 연구는 구조적 접근이라기보다는 건축적 접근에 가까웠다는 한계가 있다.

그 중 Krishnapillai는 <그림 6>과 같은 가위모양의 부재(scissor like elements)를 조합하여 일반적인 다각형의 단위모형을 만들었다. 이러한 일반적인 다각형의 단위모형이 조합되어 <그림 7>에서 보여지는 평면과 곡면의 기하학적 형상의 구조물들이 만들어질 수 있는 것이다.

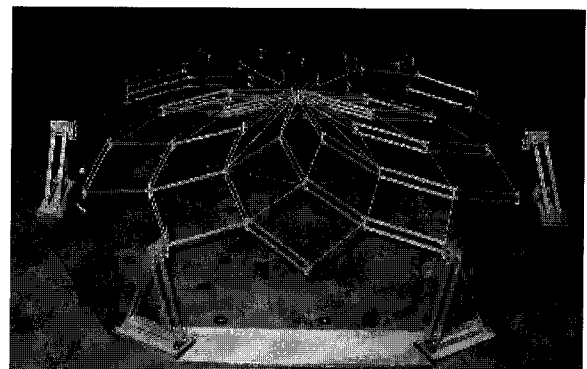
앞선 연구자들이 모두 건축 디자이너였다면 Charalambos Gantes<sup>[6]</sup>는 MIT 토목공학과와 구조 엔지니어였다. 그는 좀더 체계적인 구조적 디자인 방법을 정식화하였고, 해석과 실험을 통해서 실제적인 구조 시스템의 가능성도 입증하였다. 전개과정에서 안쪽 부재들에서 발생하는 휨응력은 점차 증가하다가 전개된 형상에서는 응력이 제로로 떨어지게 되는 스냅스루(snap through)유형의 구조물을 해석적으로

로 설명하였다.

<그림 8>과 <그림 9>는 현재 연구가 활발히 진행 중인 영국의 캠브리지대(Univ. of Cambridge, UK) 교수 Pellegrino와 일본의 동경대(Univ. of Tokyo, JP) 교수 Kawaguchi가 수행한 전개가능 구조물의 프로젝트 예를 보여준다.



(a) 전개전

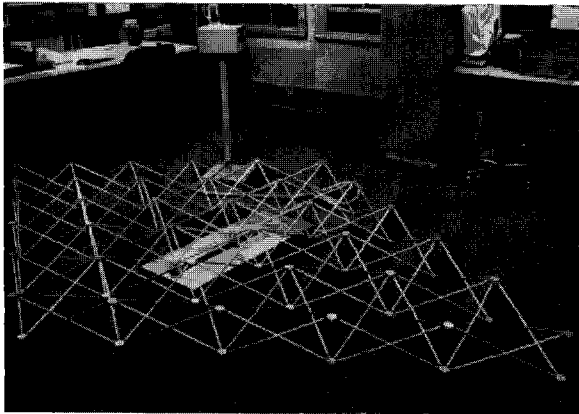


(b) 전개후

<그림 8> Pellegrino의 전개가능 구조물



(a) 전개전



(b) 전개후

〈그림 9〉 Kawaguchi의 전개가능 구조물

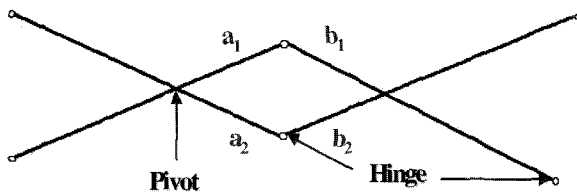
### 3. 전개가능 구조물의 형상결정

기하학적 디자인은 전개가능 구조의 전체 설계 과정에 있어서 무엇보다도 중요한 부분이다. 단지 얻고자 하는 전개된 형태의 형상을 결정하는 간단한 문제가 아니라 구조체로 조합이 될 것을 고려하여 단위모형을 구성하는 부재의 길이와 각도의 계산까지 포함하여야 하기 때문이다. 또한 접히고 펼쳐진 두 형상에서 구조물이 안정하고 무응력 상태가 되게 하기 위해서는 기하학적 구속조건들을 보다 신중하게 고려하여야 한다.

전개가능 구조물의 기본 요소는 <그림 10>과 같은 가위모양의 부재이다. 구조물을 접고 전개하기 위한 디자인의 기본조건은 다음식과 같다.

$$a_1 + a_2 = b_1 + b_2 \quad (1)$$

가위부재는 가운데 절점에 피봇으로 접합된 두개의 직선 부재로 구성되며, 피봇 절점은 두 부재로 구성되는 면에 수직한 축에 대해서만 회전이 가능하다. 두 부재의 단부 절점은 또 다른 가위부재의 절점과 힌지로 연결된다. 이러한 가위부재들이 서로 연



〈그림 10〉 가위부재의 기본조건

결되어 평면, 곡면형의 단위모형을 구성하고, 이 단위모형들이 유기적으로 조합되어 전개 가능한 구조물을 형성한다.

#### 3.1 평면 다각형 구조물의 기하학적 디자인

위에서 살펴본 가위부재를 조합하여 <그림 11>과 같은 세 가지 유형의 정다각형 단위모형을 구성할 수 있다. 다른 정다각형 단위모형을 전개가능 구조물로 구성할 경우에는 여러 단위모형들이 조합하여 이루는 접점의 사이각의 합이  $360^\circ$ 가 되지 않는다. 따라서 세 가지 유형의 단위모형을 제외한 다른 유형의 단위모형로는 전개가능 구조물을 형성할 수 없는 것이다.

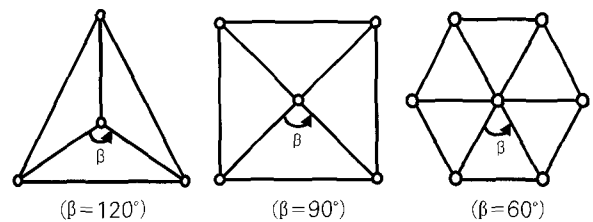
<그림 11>과 같은 정다각형의 단위모형들을 조합하여 <그림 12>와 같은 평면형의 전개가능 구조물을 만들 수 있다.

전개에 이르는데 필요한 기하학적 구속조건을 유도하기 위해서 <그림 13>과 같은 전개된 형상의 평면 정사각형 단위모형을 고려한다.

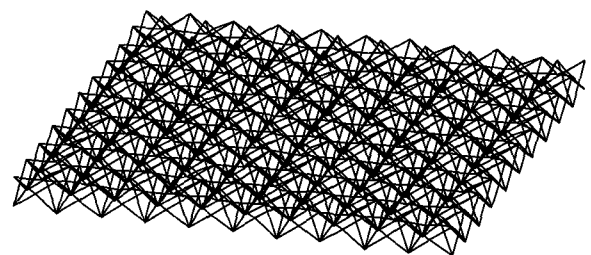
정다각형의 두 대각선 부재의 사이각  $\beta$ 로 인해 설계하고자하는 다각형의 유형을 결정할 수 있다.

$$\beta = \frac{360^\circ}{n} \quad (2)$$

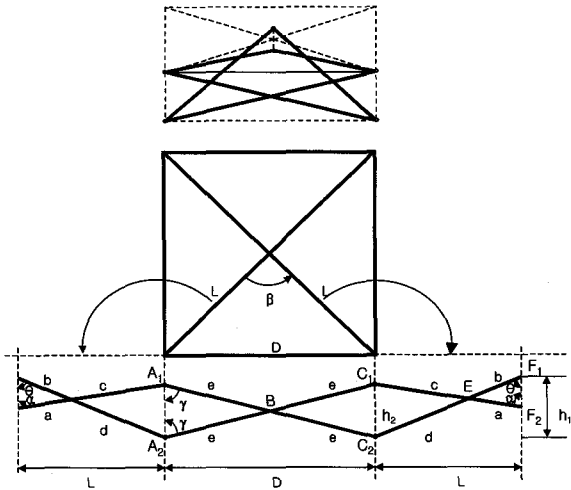
여기서  $n$ 은 다각형을 이루는 변의 수이다.



〈그림 11〉 평면형의 정다각형 단위모형



〈그림 12〉 평면 구조물의 전개된 형상(정사각형)



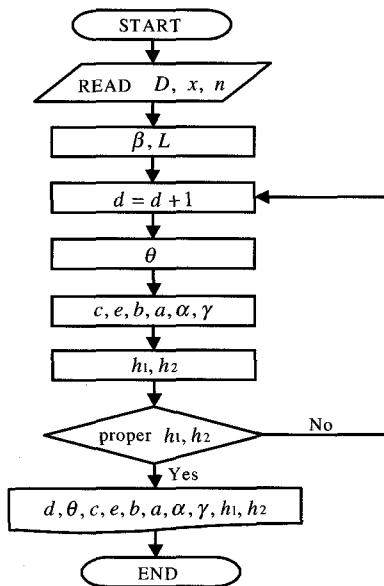
<그림 13> 평면 정사각형 단위모델의 기하학적 변수

<그림 13>에서 보는 바와 같이 접혀진 상태에서 응력이 영(zero)이 되는 구조물이 되게 하기 위한 가위부재의 기본조건은 다음식과 같다.

$$c + d = e + e = 2e \quad (3)$$

여기서  $\beta, L, D$ 는 설계변수이고  $x$ 는 기하학적 매개변수로 설계의 요구에 의해 정할 수 있는 부재 길이의 비이다.  $x$ 의 값은 다음과 같다.

$$x = \frac{a}{b} = \frac{c}{d} \quad (4)$$



<그림 14> 평면 구조물의 형상 알고리즘

$D, x, n$ 의 선택 후에는 다음과 같은 과정에 의해 평면형 전개가능 구조물의 기하학적 형상 치수를 구할 수 있다.

기하학적 구속조건을 고려한 기하학적 형상 치수를 정리하면 다음과 같다.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{D}{2h_1 \sin \frac{\beta}{2}} \quad (5)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{D}{h_2} \quad (6)$$

$$e = \frac{D}{2 \sin \gamma} \quad (7)$$

$$d = \frac{4e^2 - h_2^2}{2(2e - h_2 \cos \theta)} \quad (8)$$

$$c = 2e - d \quad (9)$$

$$b = \frac{h_1}{\cos \theta} - d \quad (10)$$

$$a = \frac{bc}{d} \quad (11)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{d \sin \theta}{c} \quad (12)$$

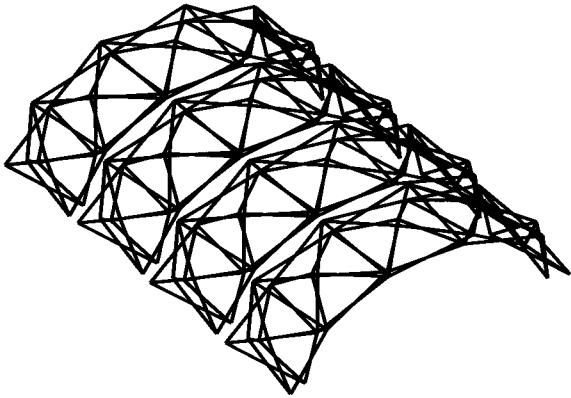
$$h_1 = (b + d) \cos \theta \quad (13)$$

$$h_2 = c \cos \alpha + d \cos \theta \quad (14)$$

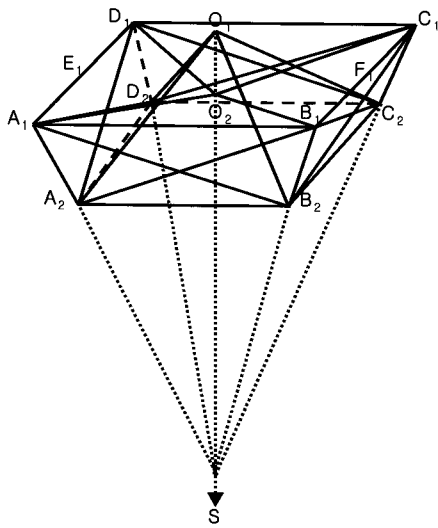
### 3.2 곡면 다각형 구조물의 기하학적 디자인

이번 절에서는 <그림 15>와 같은 곡면형 구조물을 살펴보도록 한다.

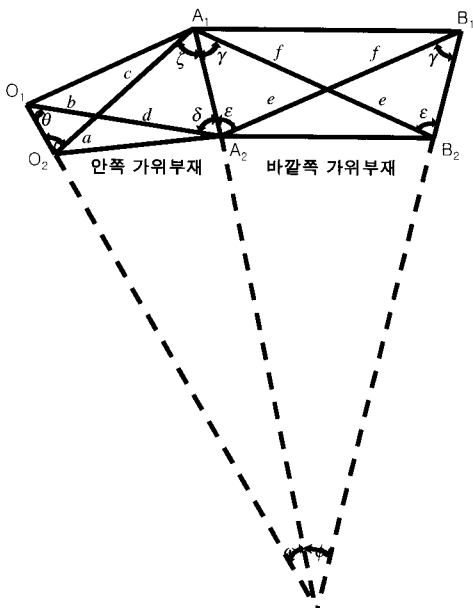
곡면형 전개가능 구조물의 단위모델은 <그림 16>과 같으며, 동일 곡률을 가진 아치(arch)와 돔(dome)에 적용할 수 있다. <그림 17>은 곡면 구조물의 기하학적 변수를 보여주기 위해 바깥쪽과 안쪽의 가위부재를 전개한 그림이다.



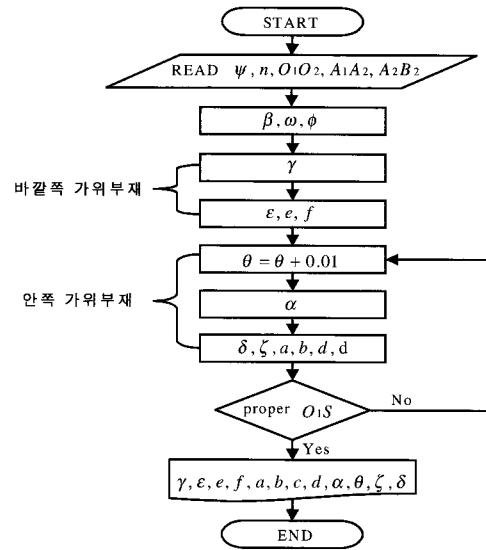
〈그림 15〉 곡면 구조물의 전개된 형상(정사각형)



〈그림 16〉 곡면 구조물의 단위모델



〈그림 17〉 바깥쪽과 안쪽의 가위부재



〈그림 18〉 곡면 구조물의 형상 알고리즘

아치나 돔의 곡면 단위모델의 크기는 설계의 요구에 의해 정할 수 있는 값으로  $\psi = \angle E_1SF_1$ ,  $\phi = \angle A_1SB_1$ ,  $\omega = \angle A_1SO_1$ 가 되고, 설계변수이자 곡면 전개가능 구조물의 기하학적 매개변수는  $O_1O_2$ ,  $A_1A_2$ ,  $A_2B_2$ 이다.

$n, \psi, \phi, \omega, O_1O_2, A_1A_2, A_2B_2$ 의 선택 후에는 다음과 같은 과정에 의해 곡면형 전개가능 구조물의 기하학적 형상 치수를 구할 수 있다.

기하학적 구속조건을 고려한 기하학적 형상 치수를 정리하면 다음과 같다.

$$\gamma = \tan^{-1} \left[ \frac{\cos \frac{\theta}{2}}{\sin \frac{\theta}{2} + \frac{A_1A_2}{A_2B_2}} \right] \quad (15)$$

$$\epsilon = \gamma + \theta \quad (16)$$

$$e = \frac{A_2B_2}{2 \sin(\gamma + \frac{\theta}{2})} \quad (17)$$

$$f = \frac{(A_2B_2) \sin(\gamma + \theta)}{2 \sin \gamma \sin(\gamma + \frac{\theta}{2})} \quad (18)$$

$$\left[ \frac{(A_2B_2)}{2 \sin \theta \sin \frac{\beta}{2}} - \frac{e+f}{1 + \frac{\sin \theta + \tan \omega \cos \theta}{\sin \alpha - \tan \omega \cos \alpha}} \right] \frac{\sin(\theta + \alpha)}{\sin \alpha} = (O_1O_2) \quad (19)$$

$$a = 2 \tan^{-1} \left[ \frac{\cos \frac{\theta}{2} \frac{(e+f)}{(A_1 A_2)} - \cos \left( \frac{\theta}{2} + \omega \right)}{\sin \frac{\theta}{2} \frac{(e+f)}{(A_1 A_2)} + \sin \left( \frac{\theta}{2} + \omega \right)} \right] \quad (20)$$

$$\zeta = a - \omega \quad (21)$$

$$\delta = \theta + \omega \quad (22)$$

$$a = \left[ \frac{(A_2 B_2)}{2 \sin \theta \sin \frac{\beta}{2}} - \frac{(e+f)}{1 + \frac{\sin \delta}{\sin \zeta}} \right] \frac{\sin \theta}{\sin a} \quad (23)$$

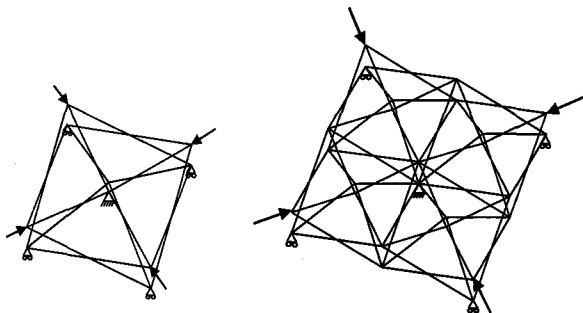
$$b = a \frac{\sin a}{\sin \theta} \quad (24)$$

$$c = \frac{e+f}{1 + \frac{\sin \zeta}{\sin \delta}} \quad (25)$$

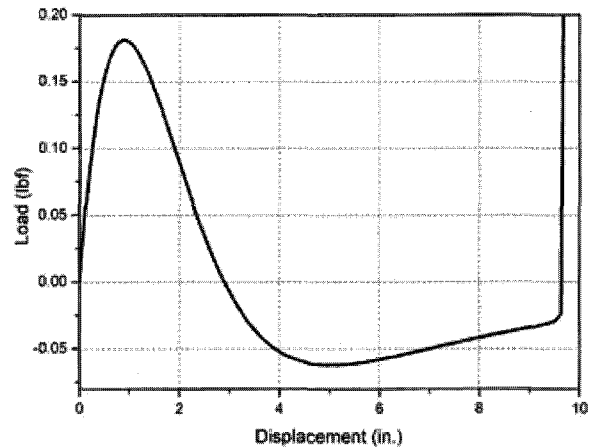
$$d = c \frac{\sin \zeta}{\sin \delta} \quad (26)$$

### 4. 전개과정의 비선형 해석

전개가능 구조물의 전개과정에 대한 해석은 기계, 항공, 자동차등의 해석에 주로 사용되는 다물체계 동적해석(multibody dynamic analysis)을 사용하였다. 여기서 다물체계 동적해석이란 여러 개의 강체로 연결된 시스템의 동적 특성을 다루는 해석으로서, 대변위-소변형 문제(large displacement and small strain problem)에 적합한 해석방법이다. 전개과정 해석 시 구조물의 초기형상은 모든 절점이 이론적으로 한 직선에 모이게 되어 형상결정에 어려움이 생기므로 전개과정의 해석을 최종형상에서 접는 과정의 해석으로 대치한다.



〈그림 19〉 전개가능 구조물의 해석조건



〈그림 20〉 단위모델의 해석결과

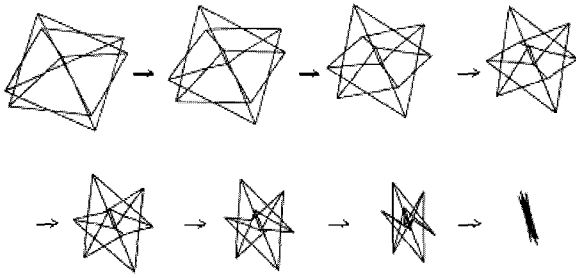
〈표 1〉 평면형 구조물의 부재 제원

A(in. <sup>2</sup> )	E(psi)	v	x	D(in.)	h <sub>1</sub> (in.)	h <sub>2</sub> (in.)	
0.35 × 0.35	110,000	0.40	0.90	30.00	10.64	9.10	
안쪽 부재(in., degree)				바깥쪽 부재(in., degree)			
a	b	c	d	α	θ	e	γ
6.50	7.23	14.85	16.50	83.34	63.37	15.68	73.10

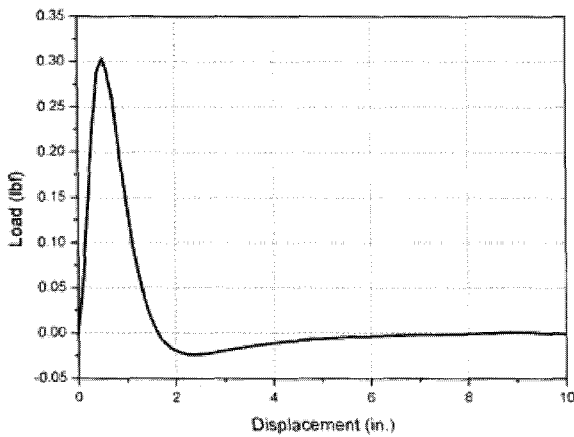
〈그림 19〉에서 보여 지는 바와 같이 전개가능 구조물의 해석은 구조물 전체의 가운데 절점을 고정한 후 구조물의 단부 위쪽 절점 4방향에 힘을, 그리고 아래쪽 4개의 절점은 절점들이 이루는 면에 대하여 수평방향 이동만을 가능하게 한다. 〈그림 20〉은 〈표 1〉의 부재 제원을 사용한 평면 사각형 단위모델의 전개과정에 대한 해석 결과를 보여준다. 정밀한 해석을 위해 부재들은 모두 티모센코 빔으로 사용하였으며, 각각의 부재들은 피벗 역할의 레볼루트 조인트(revolute joint)와 힌지 역할의 쉬페리컬 조인트(spherical joint)로 연결하였다. 여기서 레볼루트 조인트란 두 부재가 이루는 면의 수직방향 축에 대한 회전은 가능하되 그 외의 모든 자유도를 구속하는 조인트이며, 쉬페리컬 조인트란 위치는 구속하되 회전을 자유롭게 하는 조인트이다. 수치해석은 뉴턴-랩슨법(Newton-Raphson method)을 사용하여 변위를 100스텝으로 나누어 진행하였다.

〈그림 21〉은 해석모델을 10초의 시간간격으로 포착한 접는 과정에서의 변형된 형상이다.

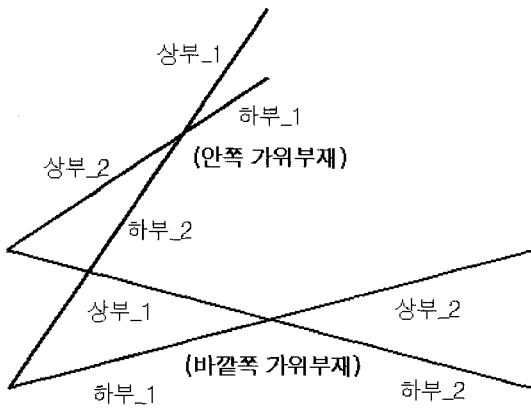




<그림 21> 단위모델의 접는 과정

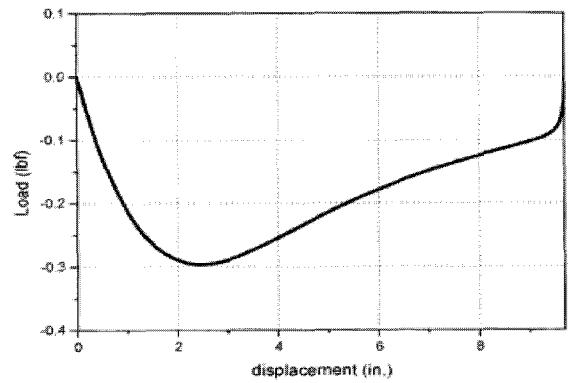


<그림 22> 2x2의 해석결과

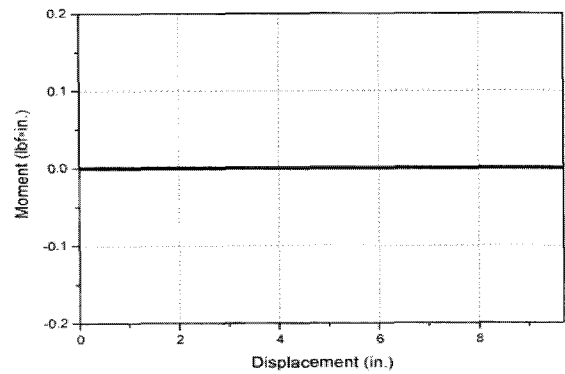


<그림 19>의 해석결과를 통해 전개과정의 구조적 거동이 스냅스루(snap through) 형태임을 확인할 수 있고, 단위모델 조합인 2x2 모델에 대한 해석은 단위모델 하중의 2배가 필요함을 알 수 있다<그림 22>.

또한, 앞의 단위모델을 대상으로 전개과정 시 발생하는 부재의 응력을 살펴보았다.

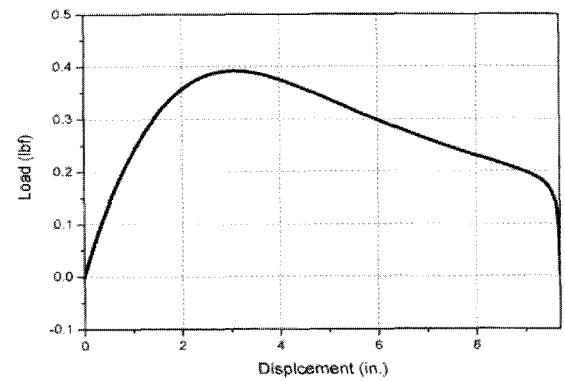


(a) 축방향력

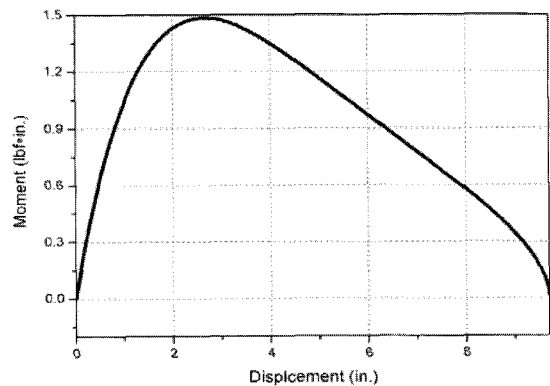


(b) 모멘트

<그림 23> 바깥쪽 가위부재



(a) 축방향력



(b) 모멘트

<그림 24> 안쪽 가위부재

<그림 23>과 <그림 24>는 윗 그림의 상부\_2에 해당하는 바깥쪽과 안쪽 가위부재의 응력곡선을 보여 준다. 바깥쪽 가위부재(outer scissor like elements)에는 압축력만이 작용하였고 안쪽 가위부재(inner scissor like elements)에는 큰 모멘트가 발생하였다. 따라서 부재내의 응력해석을 통해 안쪽 가위부재는 보의 사용이, 바깥쪽 가위부재는 트러스의 사용이 적합함을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구를 통해 다물체계 동적해석기법이 전개과정에 대한 해석의 적용으로 타당함을 입증하였고, 전개과정의 구조적 거동이 스냅스루 유형임을 확인할 수 있었다. 또한, Gantes가 정식화한 전개가능 구조물의 평면, 곡면의 형상 알고리즘을 정밀한 수치해석이 가능하도록 하였으며, 단위모델의 응력해석을 통해 바깥쪽 가위부재와 안쪽의 가위부재에 생기는 응력이 동일하지 않음을 알 수 있었다.

전개가능 구조물은 현재까지 건축의 적용보다 태양열 집열판, 안테나 등의 항공분야의 적용에 보다 많은 연구가 진행되어 왔다. 부재의 정교한 설계, 전개를 가능하게 하는 절점과 연결부 등의 복잡한 설계는 전개가능 구조물의 연구에 많은 불리한 사항을 주었으나, 임시적이고 일시적인 구조물, 항공우주 산업, 군사적 용도 및 그 밖의 일반 고정된 건축물로는 불가능한 여러 용도의 시설 등에 널리 사용될 수 있기 때문에 오래전부터 불리한 면을 개선하기 위한 연구가 진행되어 왔다. 하지만 이러한 건축적 용도의 필요성에도 불구하고 아직까지 우리나라에서는 전개가능 구조물의 개념조차 소개된 바가 없는 실정이다.

앞으로 전개가능 구조물의 절점과 연결부의 더욱 세밀한 설계와 마찰력을 고려한 해석, 최적조건의 부재 설계, 및 전개와 접는 과정의 기법 등이 더욱

연구되어야 할 부분으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. Pinero, E. P., A Reticular Movable Theatre, The Architects' Journal for August 30, 1961, p.299.
2. Zeigler, T.R., Collapsible self-supporting structures, US Patent No.4,437,275, 1984(filed August 7, 1981)
3. Clarke, R. C., The Kinematics of a Novel Deployable Space Structure System, third International Conference on Space Structures, H. Nooshin, Ed., University of Surrey, U.K., Elsevier Applied Science Publishers, London, pp. 820~822.
4. Escrig, F., Expandable Space Structures, Space Structures Journal, vol.1, No.2, 1985, pp.79~91.
5. Krishnapillai, S., and Zalewski, W. P., The Design of Deployable Structures, Unpublished Research Report, Department of Architecture, MIT, Cambridge, Massachusetts, Oct. 1985.
6. Gantes, C. J., Deployable Structures, National Technical University of Athens, Greece, Wit Press, U.K., 2001.
7. Bathe, K-J., Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1982.
8. Jalon, J. G., and Bayo, E., Kinematic and Dynamic Simulation of Multibody Systems, The Real-Time Challenge, Springer-Verlag, New York, 1994.
9. Haug, E. J., Computer-Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems, Volume I: Basic Methods, Allyn and Bacon, 1989.