

Hybrid 구조물의 개요와 적용



서 일 교*



최 옥 훈**

1. 서 론

대공간 구조물은 힘의 흐름을 자연스럽게 하고 휨모멘트의 영향을 가능한 저감시켜 면내력만으로 외부하중에 저항케 하는 역학개념을 기초로 구조시스템의 효율성을 극대화 시키는 형태저항형 구조이다.

대공간구조물을 형성하는 경우, 스팬의 길이가 어느정도 이상이면 자중을 지지할 수 없는 문제가 발생한다. 이러한 문제점의 해결책으로서 좌굴에 지배되는 압축부재를 최소화하고, 구조의 대부분을 인장재로 구성하여 인장재의 강도를 최대로 활용하는 것이다.

인장재로서 케이블은 강도가 크고 경량이며, 유연성이 풍부하여 자유로운 형상을 갖을 수 있고, 부재의 길이에 제한이 없어 운반이 용이하다. 따라서 이와 같은 잇점을 갖는 케이블 재료는 단독으로 또는 다른 구조요소와 조합되어 건축구조에 적용하면 대스판 구조와 자유로운 건축형태를 가능케하고, 인장응력의 큰부위에 케이블의 적용은

경제성이나, 조형상의 면에서도 건축구조의 가능성을 한층 넓힐 수 있으리라 사료된다. 케이블을 이용한 구조형식의 분류는 그림 1과 같다. 인장재인 케이블에 장력을 도입하여 강성을 부여하는 무주대공간 구조시스템으로는 케이블 넷구조, 막구조, Tensegrity(Tension-Intergrity 약칭) 개념을 도입한 Hybrid 구조 등이 있으며 앞의 두 구조시스템은 많은 연구가 이루어 졌다. 그러나 인장재 케이블과 다른 구조요소들을 조합하고 장력을 도입하여 강성을 부여한 Hybrid 구조시스템은, 최초 R. B. Fuller 에 의해, 압축부재의 수를 줄이고 인장부재를 케이블로 사용하여 구조시스템의 경량화와 합리화를 위하여 시도되었던 구조로서 Vilnay, F.Otto 등에 의해 지속적인 연구가 이루어졌고(그림1.2-7), 그 이후 압축재의 수를 줄일 수 있는 Hybrid 구조 시스템을 성공적으로 실제 구조물에 적용한 사례로서는 Geiger에 의해 설계 시공된 서울올림픽 체조경기장과 미국에 있는 조지아돔 등이 있다.

이 케이블 돔구조는 인장재에 케이블로, 압축재

* 정회원, 제주대학교 건축공학과 교수

** 정회원, 안동공업전문대학 건축과 교수

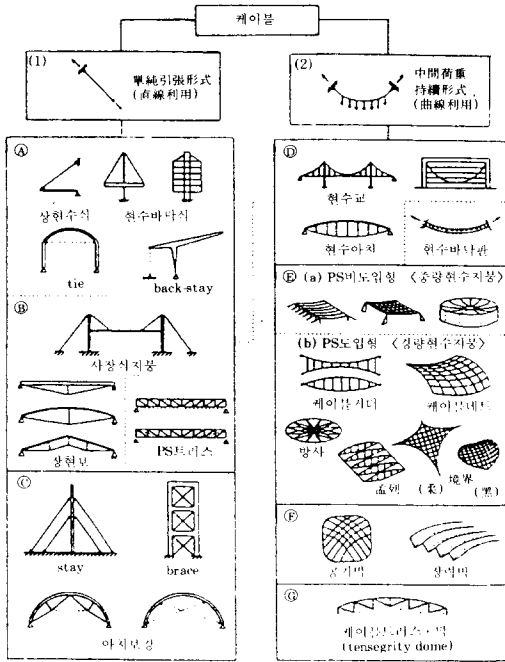


그림 1.1 케이블을 이용한 구조형식의 분류

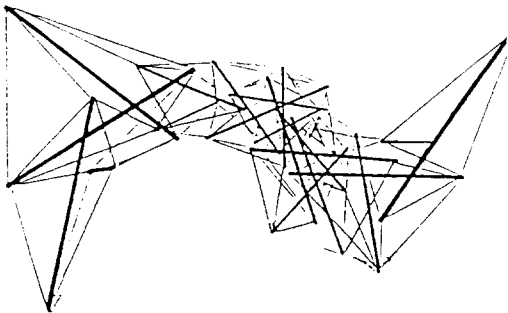


그림 1.2 Snelson의 조각

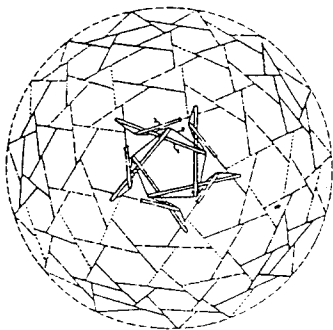


그림 1.3 Fuller's 돔

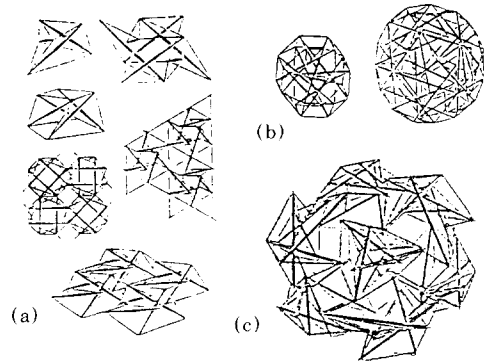


그림 1.4 Emmerch의 Tensegrity 구조

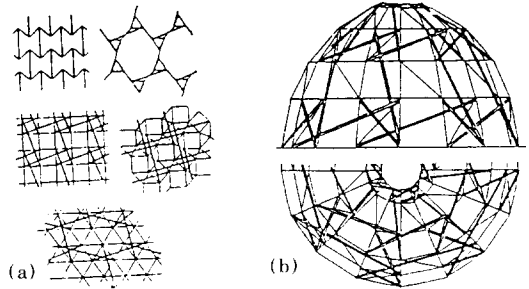


그림 1.5 Vilnay의 구조

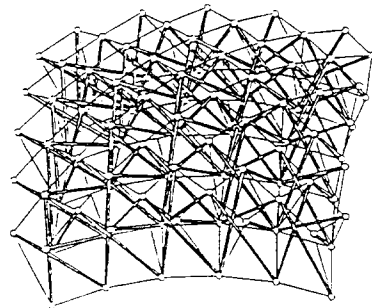


그림 1.6 Mortro의 복층 Tensegrity 격자구조

에는 포스트제와 경계의 압축링으로 대체하여 구성된 Hybrid 케이블구조이다.

본 장에서는 앞에서 서술한 Hybrid 케이블구조와 현재 연구중인 장력안정구조의 안정화에 대해 알아본다.

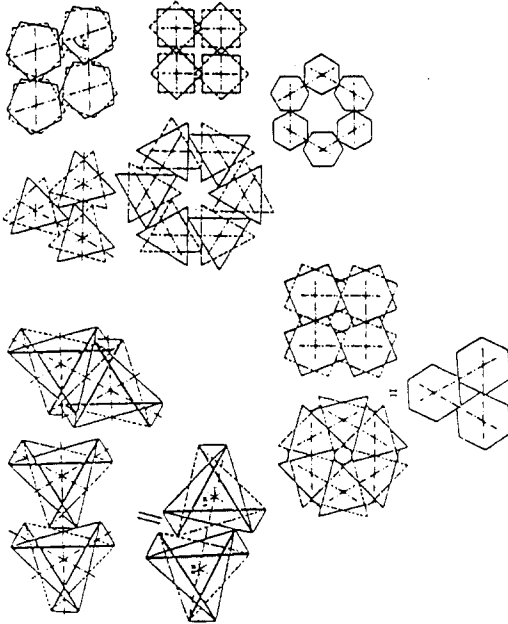


그림 1.7 Hanaord의DLGTs

2. Hybrid케이블 구조

2.1 개요

Hybrid 케이블 구조는 인장재 케이블과 압축재로 된 Hybrid 구조형식, 즉 불연속계인 압축시스템과 불연속계인 장력시스템과의 상호작용에 의해, 구조물 전체의 자기평형상태 (Self-Equilibrium Condition)를 만족하는 구조이다.

이 Hybrid 구조는 대공간 구조를 용이하게 건축할 수 있다는 점에 잇점이 있으며, 세계에서 최초로 설계시공된 실례는 서울 올림픽 체조경기장이다.

구성부재중 케이블재의 종류로서는 사용위치에 따라 리지(Ridge) 케이블, 경사(Diagonal) 케이블, 누름(Valley) 케이블, 링(Ring) 케이블이 있다. 여기서 하중은 지붕재료로 사용되는 막으로부터 경유하여 주변압축링으로 전달된다. 누름 케이블은 막에 장력을 가하여 강성을 확보함과 동시에 바람에 의한 부하중에 저항하는 역할도 한다. 또한 지붕높이는 포스트의 크기를 조절함에 따라 결정되고, 스패의 길이는 포스트와 포스트의 간격을

조절함으로써 결정된다. 구조계획시, 재료의 역할과 거동은 각각의 구조형식에 따라서 다르므로 주의가 요한다. 적용사례는 표 1과 같다.

표 1 적용사례

건물명	시공	설계사	스판	비고
서울 체조경기장	1986	Geiger, 공간	120 m	
펜싱경기장	1986	공간연구소	90 m	야구, 테니스,
플로리다 Suncoast 돐	1989	Geiger	직경 : 240m,	콘서트 야구,
미국 조지아 돐	1988	Geiger	장방형원주 : 700m	테니스, 콘서트
부산 돐	현 시공중	Geiger	200 m	

2.2 Hybrid구조물의 구조해석 및 설계

2.2.1 구조개요

■ 구조개요

- ① 지붕구조의 내부, 케이블과 막으로 구성된 접합구조를 결정한다.
-스팬, 높이, 높이와 스패의 비, 돐형상
- ② 구조시스템의 종류를 결정한다.

■ 부재구성 및 재료설정.

- ① 구성부재를 결정한다.(그림 2.1)
-텐션링, 리지케이블, 경사케이블, 누름케이블, 링케이블, 압축포스트, 막재(지붕 마감)
- ② 텐션재에 프리스트레스 도입용의 기구설치에 관한 계획을 고려한다.
-턴버클, 단부나사 등
- ③ 케이블재료는 규격에 맞는 와이어를 사용한다.⁽¹⁶⁾
--JIS G 3506(경강선재)
--JIS G 3502(피아노선)
- ④ 케이블의 간격은 지붕막재인 막재의 크기에 따른 제약에 의해 10~20m정도가 적합하다.

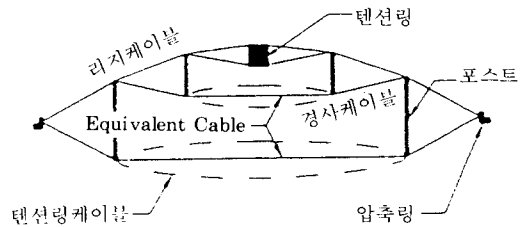


그림 2.1 Hybrid 케이블 구조의 부재구성

■ 안전율의 설정

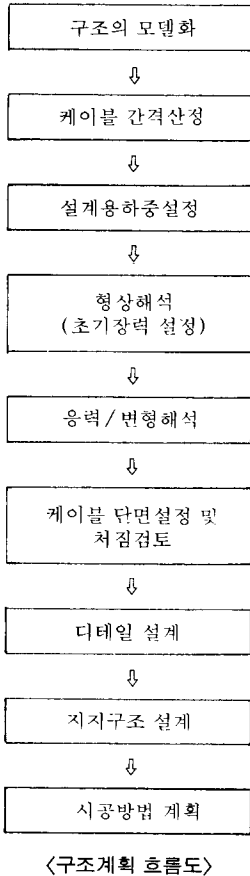
막재와의 합성구조라는 것, 또 시공이 특수하다는 것등을 고려하여 케이블의 안전율에 여유를 갖도록 고려한다.

- 장기허용인장력 = (1/3) × 파단하중
- 단기허용인장력 = 1.35 × 장기허용인장력

■ 풍하중시의 동적거동에 대한 고려

풍하중시에는 모든 주요부재의 응력이 초기상태에 비해 변동이 작고, 또한 과도한 변형도·변형이 없을 경우, 생략할 수 있으나, 그렇지 않을 경우에는 동적거동을 고려해야 한다.

2.2.2 구조계획



(1) 하중의 설정

■ 고정하중

막재, 상하현재의 인장재, 압축포스트, 정착 급

속기구 등을 포함한 하중을 설정한다.

■ 프리스트레스력

형상해석에 의해, 막재(중, 횡방향), 리지 케이블, 경사케이블, 누름 케이블에 대한 프리 스트레스력을 구한다.

프리스트레스 설정시 주의사항으로서는 다음과 같다.

- ① 본 구조의 특성으로서 케이블에 도입된 초기장력의 크기에 따라, 가구전체의 응력·변형기동과 시스템의 안정 성이 크게 좌우 된다.
- ② 설계시, 예비해석을 통하여 상력도입량의 영향을 조사하고 적절한 도입량을 설정한다.
- ③ 프리스트레스의 크기산정시, 구조기동이 하중의 크기와 제작·시공오차 등에 대해 민감하게 변화하는 것과 하중설정(적설분포, 풍 동시험에 따른 풍력계 등)에 불명확한 부분이 많음을 신중히 고려해야 한다.

■ 풍하중 : $W_w=Cq(\text{kg/m}^2)$

(C : 할증계수, q : 설계속도압(kg/m^2))

■ 적설하중(W_s)

$W_w=\alpha d\gamma$ (α : 할증계수, d: 적설량)

$\gamma=2.0\text{kg/cm/m}^2$ (단위중량)

■ 지진하중

지진력에 관해서는 막지붕부분의 중량이 경미하므로 해석상 검토는 생략할 수 있다.

■ 하중조합⁽¹⁶⁾

(2) 구조해석

구조해석은 경계조건을 포함한 구조모델을 적절히 설정후, 기하학적 비선형을 고려한 유한요소법을 이용하여 PS도입에 따른 평형형상을 구하기 위한 형상해석, 부가하중에 대한 응력변형해석을 한다.(설계장력은 장기허용인장력 이하이어야 함.)

■ 가정

① 케이블의 강성이 아주 높으므로 응력진부는 케이블의 부담하는 것으로 한다.

모든 하중은 점하중으로 치환할 수 있다고 한다.

③ 재료는 선형탄성으로 기동하고, 기하학적 비선형만을 고려하는 것으로 한다.

④ 장력에 의한 장력변곡강성은 단면 강성에 선형적으로 부가되는 것으로 한다.

■ 형상해석(초기장력 설정)

형상해석은 완성형상 또는 그에 최적근사한 형상인 초기평형형상을 구하는 해석(초기형상해석)으로서, 케이블 구조의 초기평형형상은 고정하중에 대해 각 케이블이 소정의 장력(초기장력)상태에서 평형상태되도록 설정한다. 구조 안정론적으로, 케이블 부재의 특징은 장력이 도입되어 구조요소로 작용한다. 따라서 어떤 크기의 장력이 주어질 때 그 장력을 잃을 때까지 압축력에 저항할 수 있게 된다. 이와 같이 장력상태에 있는 케이블 부재를 포함하는 케이블 구조의 설계에서 다른 구조형식의 설계와 가장 다른 과정은 설계형상(완성형상)의 설정에 있다.

즉 케이블 구조의 완성형상이라는 것은 그것을 구성하는 각 케이블에 주어지는 소정의 초기장력과 고정하중(사중)이 평형조건을 만족하는 형상이며, 이를 위해 장력도입이 가능한 케이블의 형상 및 구성을 선택하여 소정의 장력에 대한 평형형상을 구하고, 또한 부가하중(고정하중을 제외한 외력)과 경계구조의 변형에 기인한 지점이동 등에 대해서 안정하도록, 충분한 강성을 확보할 수 있는 형상과 부재구성으로 이루어져야 한다.

〈주의사항〉

케이블구조의 구조형식에 따라서, 설정된 완성형상을 구성하는 각 케이블의 초기장력은 평형계를 만족하는 값이고 반드시 그 구조에 필요한 강성을 확보하는 장력이 된다고는 할 수 없다. 따라서 케이블 구조의 형상설정시 기본구조 설계단계에서 채용하는 구조형식의 특성을 충분히 파악하고 부가하중 등에 대한 보강방법을 적절히 계획할 필요가 있다. 또 이와 같은 초기장력 때문에 경계구조에 큰 부하가 걸리므로 과도한 장력의 설정을 피하고, 경계구조나 지지구조와 반란스를 취한 장력을 설정할 필요가 있다. 또 Hybrid케이블 구조는 고정하중이 부가하중에 비해서 지배적이 되지 않는 경우도 있기 때문에 그것을 구성하는 각 케이블 부재의 초기장력의 설정은 설계상 매우 중요한 요소이다.

따라서 케이블 구조의 설계시 부가하중에 대한 구조형식의 특성을 충분히 파악하고 설계장력을 설정하지 않으면 안된다.

■ 응력변형해석 및 가설해석

이 해석은 완성형상에 추가 재하하중에 대한 해석이고, 구조형식, 구법, 시공법을 고려하여 실제 상황에 따라 해석방법을 설정한다.

유한변위이론을 이용하여 정적탄성해석을 하는 것을 원칙으로 하며, 필요시에는 소성 및 동적해석 등을 수행하고, 전산프로그램의 적합성도 충분히 배려한다.

유한변위이론을 이용하는 이유로서 케이블 구조물은 비교적 변형이 크고, 케이블에 높은 장력이 도입되기 때문이다. 동적으로 작용하는 강풍이나 지진인 경우에도, 설계용 하중으로서 등가정적하중으로 평가한다.

장력변곡강성(장력강성)에 의한 부가강성 매트릭스는 다음과 같다.

$$K = \left(\frac{EA}{L} \right) \begin{bmatrix} ll & lm & ln \\ lm & mm & mn \\ ln & mn & nn \end{bmatrix} + \left(\frac{P}{L} \right) \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} ll & lm & ln \\ lm & mm & mn \\ ln & mn & nn \end{bmatrix} \right\}$$

위식에서, 제1항은 부재강성매트릭스이고, 제2항은 장력변곡강성 매트릭스이다.

(4) 가설해석

가설해석은 부재조립하면서 초기형상에 이르는 과정을 제어하기 위한 해석이다.

조립시 이전 부재의 부하중과 무응력 상태에서 구조형상으로 조립시 케이블 장력을 도입하고 완성형상에 도달하는 과정의 모든 상태에서 하중과 응력은 평형상태에 있지 않으면 안된다. 케이블구조의 부재조립 순서 및 프리스트레스 도입순서에 따라, 그 전과정에서 구조의 안정과 응력수준의 안전을 확인하면서 가설오차의 흡수와 장력조정을 행하여 목표로 하는 완성형상으로 유도할 필요가 있다.

케이블 구조에는 〈초기형상해석〉에 따라서 완

성시에 목표로 하는 평형상태와 응력상태가 확정되는 경우가 많다. 따라서 <가설해석>에는 먼저 확정된 초기 평형형상과 응력상태를 최초의 기준상태로 해서, 시공단계의 전단계를 설정하는 해석을 수행할 수 있고 다음에 그 상태를 다음 단계의 기준상태로 해서 다음 시공단계의 전단계를 설정하는 해석을 수행할 수 있다. 그것을 하나 하나 반복하여 시공과정을 역진해가는 것이다.

이러한 가설해석에 따른 시공단계목표가 설정된다면 실제의 시공상황에서도 그 단계에 따른 목표형상과 응력상태가 정확히 현실화 되는 것을 현장계측에 따라 확인해야 한다. 해석값과 계측값이 크게 다르면 그 원인이 해석에 있는가, 시공에 있는가를 충분히 파악하여, 그 검토결과에 따른 대책을 세운다.

역진적 해석방식과 달리, 케이블 구조의 형식, 구법, 시공법에 따라서 다른 방식으로 가설해석을 수행할 수 있다.

(5) 케이블의 단면산정 및 처짐검토

응력변형해석의 결과에 의해 단면산정을 하고, 처짐검토는 규준에 정해진 바는 없으나, 구조물의 사용성 및 안정성이 확보될 수 범위로서, 실제 외력과 절점이동 등에 따른 케이블의 변형이 스팬이 100m이하시에는 1/160~1/150정도, 스팬이 약 200m시에는 1/100 정도 적용되고 있다.

(6) 디테일 설계

포스트의 상하에 높은 장력이 도입된 텐션 재가 여러개 집합되므로 포스트에 생기는 압축력과 텐션재의 인장력이 편심이 걸리지 않도록 디테일 설계를 하고, 지지구조와 장력이 도입된 케이블의 양카부 등의 디테일에도 응력의 편심이 생기지 않도록 상세한 배려를 해야한다.

(7) 지지구조

케이블 구조의 지지구조는 케이블의 장력을 원활히 하부구조에 전달될 수 있도록 하고 단면산정은 지붕구조의 해석결과에서 구한 케이블의 반력과 막재의 반력을 외력으로 작용시켜 구한 결과에 의한다. 지지구조는 경계구조의 구성과 메카니즘에 따라 외부경계지지형식과 내부경계 지지형식으로 크게 나눌 수 있다(그림 2.2). 외부경계지지

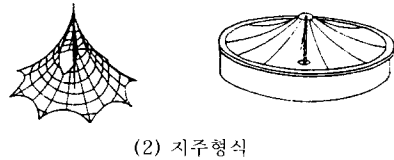
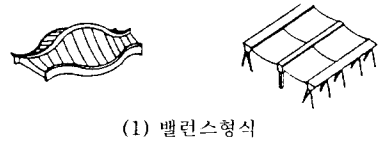
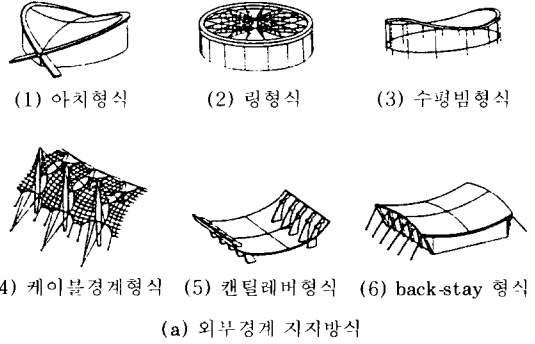


그림 2.2 지지구조의 형식

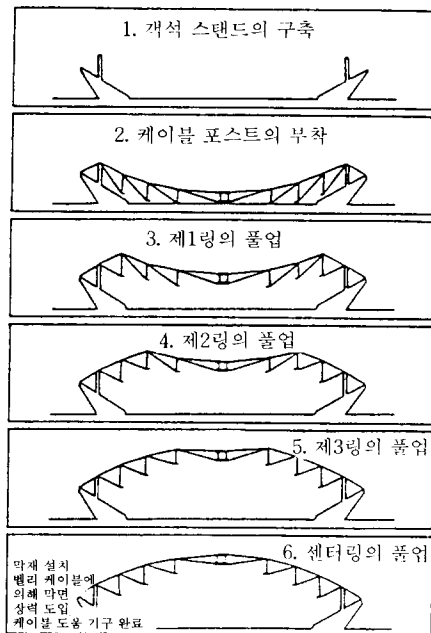


그림 2.3 리프트업(Lift-UP) 공법

형식은 케이블 인장력의 수평장력을 상호간에 소실되도록 처리하고 건물의 하부구조에는 수평장력의 영향을 받지 않도록 의도한 형식(아-치 형식, 링 형식, 수평빔 형식)과 케이블 장력을 지붕 또는 床面 이외의 하부구조에 전달되도록 처리한 형식(케이블 경계형식, 캔틸레버형식, 백스태이형식) 등이 있다. 건물내부에서 케이블 구조를 지지하는 내부경계지지형식에는 지지점의 좌우 케이블 장력의 수평성분이 상호 소실되도록 의도한 형식이 있다. 또한 케이블 구조에 관한 지지구조의 설계에서는 외주경계지지형식과 내부경계지지형식을 조합하여 구성할 수도 있다.

(6) 시공방법

시공계획시, 케이블 돔의 특징은 높은 장력에 의한 지붕면의 안정화를 기하는 점에 유의하여 시공안전성을 확보해야 한다. 주로 적절한 공법으로서 그림2.3과 같이 리프트업(Lift-Up)공법을 채용한다.

2.2.2 적용사례

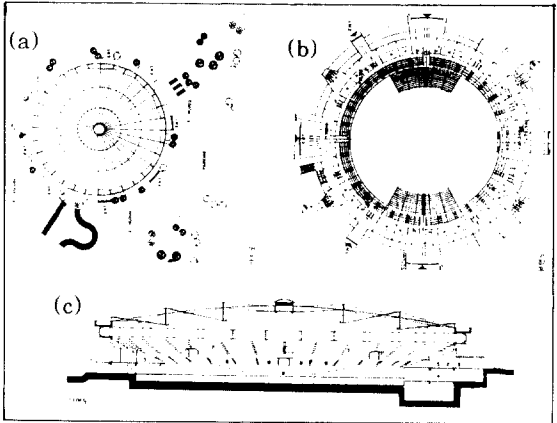
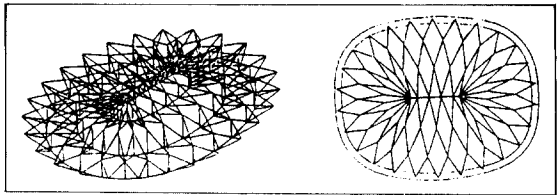
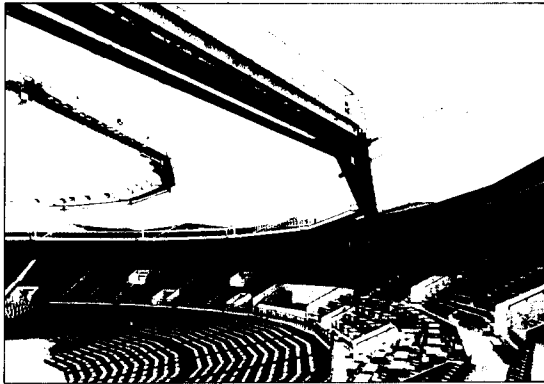


그림 2.5 서울 올림픽 펜싱경기장 : (a)배치도 (b)평면도 (c)단면도

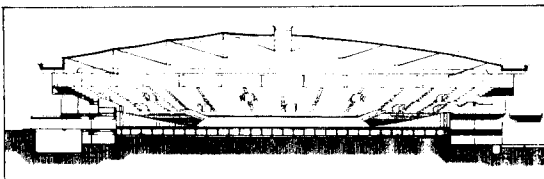


(a) 분해구성도 (b) 지붕평면도

그림 2.6 조지아 케이블돔



(a) 경기장 내부



(b) 단면도

그림 2.4 서울올림픽 체조경기장

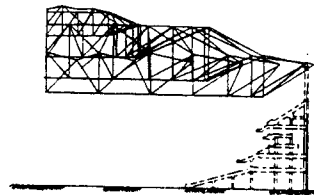
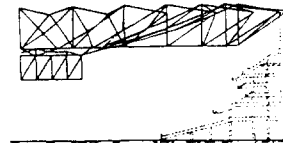
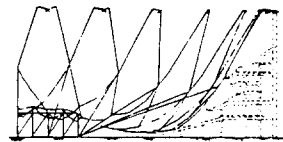
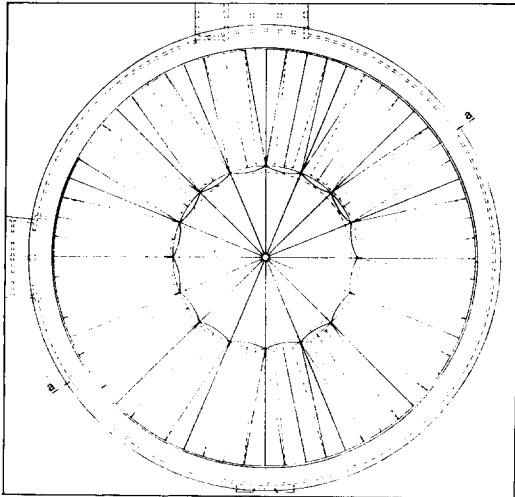


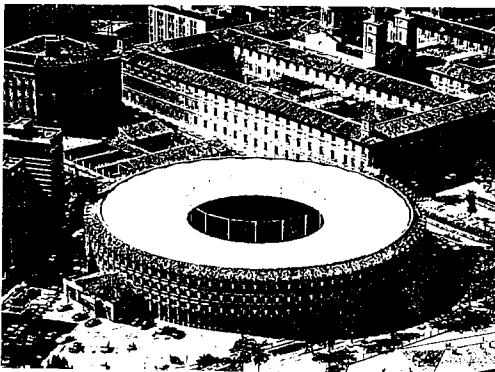
그림 2.7 조지아 돔 시공순서



(a) 단면도



(b) 자방평면도



(c) 구조물의 외관

그림 28 자라고자 돔

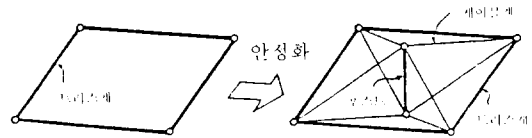
3. 장력안정트러스 구조

Geiger의 케이블 돔구조는 구조물 전체의 관점에서 하나의 자기평형상태를 만족하는 구조로서, 돔과 같은 닫힌형상(閉形狀)의 구조에는 유리한 구조시스템이 되지만, Vault와 같은 열린형상(開形狀)에는 적용상 문제가 있으므로, <안정화된 단위구조>를 고려한 장력안정트러스 개발이 현시

점에서 대공간 구조분체에 관한 해결방안중의 하나이다.

안정화된 장력안정 트러스구조를 구성하는 <단위구조>는, 그림 3.1(a)와 같이 4개의 트러스재로 접합된 불안정구조물에, 포스트와 케이블재를 조합하여 자기평형장력을 도입하여 안정화된 구조로서(그림 3.1(b)), 그림 3.2와 같이 적용할 수 있다. 자기평형 축력모드는, 그림 3.3과 같은 단위구조 해석모델의 각 절점에서, 식(3.1)과 같이 구할 수 있다. N_{ij} 는 양단부 절점이 i 와 j 인 부재의 자기평형 축력모드를 의미하고, 파라메타 α 는 포스트의 중간점이 절점5와 6의 위치에서 z 방향으로 임의의 거리만큼 떨어져 있는 위치를 나타낸다.

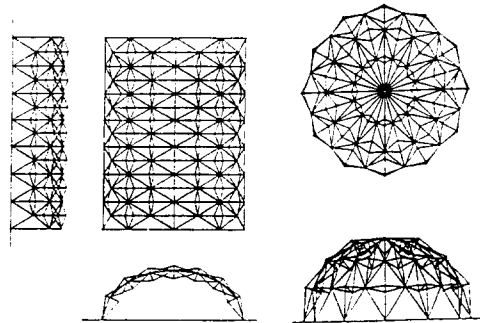
그림 3.4은 α 가 포스트의 상하위치에 따른 자기평형 축력모드의 값과치를 보여준다.



(a) 불안정 트러스

(b) 단위 구조

그림 3.1 단위구조



(a) 원뿔형 안정 트러스

(b) 돔형 안정 트러스

그림 3.2 단위구조를 적용한 장력안정 트러스구조 시스템

$$\begin{aligned}
 &N_{35}: N_{13}: N_{23}: N_{15}: N_{25}: N_{12} = \\
 &-(h_1+h_2)\sqrt{x^2+y^2+z^2}: 2h_2\sqrt{y^2+(z+h_1)^2}: \\
 &2h_1\sqrt{y^2+(h_2-z)^2}: 2(h_2-z)\sqrt{x^2+h_1^2}: \\
 &2(z+h_1)\sqrt{x^2+h_2^2}: -4[z(h_2-h_1)+2h_1h_2]
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

해석모델의 좌표는 그림 3.3에서, $x=150\text{ cm}$, $y=260\text{ cm}$, $z=27.5\text{ cm}$, $L=301.4\text{ cm}$, $\theta=6.037^\circ$, $\phi=59.68^\circ$ 이다. 여기에서, θ 는 y 축과 1-3부재에 의해 이루어지는 각이고, ϕ 는 4-5부재와 4-6부재 또는 3-5부재와 3-6부재에 의해 이루어지는 각이다.

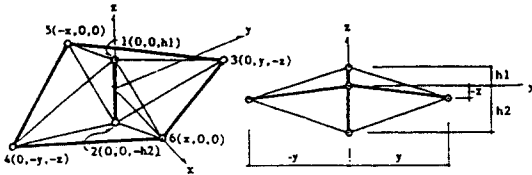


그림 3.3 기본단위 구조모델

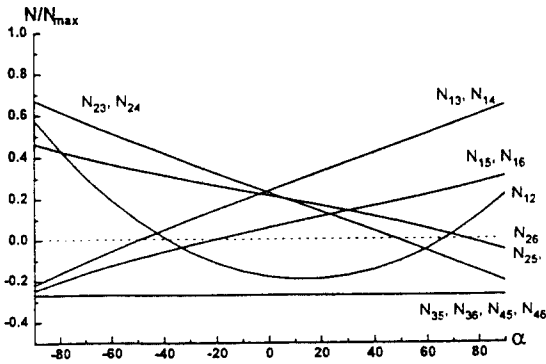


그림 3.4 α 에 따른 자기평형 축력모드

단위모델이 장력 안정구조로서 성립하기 위해서는, 장력재에는 인장력만 작용하고 압축재에는 압축력만 작용하도록 구성되어야 한다.

따라서 그림 3.4에 의해, 초기상태에서 장력재가 이완되지 않은 단위모델의 매개변수 α 의 안정화 범위는 1-5부재 및 1-6부재의 축력곡선과 점선 ($N=0$)의 교차점에서 2-3부재 및 2-4부재의 축력곡선과 점선($N=0$)의 교차점까지의 구간임을 알 수 있다.

단위형상결정시, α 의 결정방법으로서는 위 그림을 이용할 수 있다. 즉 초기상태에서 가장 적합한 축력배분상태를 선택하고, 그것에 대응하는 α 의 값을 채용하는 것이다. 예를들면 최적치로서 가장 지배적인 축력모드곡선(1-5부재 및 1-6부재와 2-3부재 및 2-4부재)의 교차점을 적용하는 것이다.

안정화 단위구조를 실제 구조물에 적용시, 위에서 알아본 매개변수에 따른 자기평형축력모드를 여러 가지 형태에 따라 분류하면 매우 유용하게 사용할 수 있으리라고 사료된다.

4. 결 론

현재, Tensegrity의 개념을 도입한 Hybrid구조 시스템이 전세계적으로 관심을 모아 세계 곳곳에서 다양한 용도와 형태, 규모로 연구, 계획, 건설 중이다. 국내에서도 88서울올림픽과 '93년 대전세계 Expo와 같은 대규모 이벤트를 통해 다양한 용도를 해결할 수 있는 초대형 공간에 많은 관심이 갖게 되었으며, 현재 스펠 300m인 부산 스타디움 지붕구조에 건설 중이며, 포철 분당돔, 롯데의 잠실돔 등의 건설 계획이 추진되고 있으나 대부분 외국의 기술에 의존하고 있는 상태이며, Hybrid구조 시스템에 관한 국내의 체계적인 기술축적(국내의 연구 및 계획, 시공, 구조기준 등)은 거의 전무한 상태이다.

산업발전, 경제력향상 및 21세기를 향한 국가간의 무한 기술경쟁시대에 접어들고 있는 현 시점에서, 향후 국내에서도 Hybrid구조 시스템에 대한 연구가 많이 이루어져야 하겠으며, 그 결과에 의해 국내의 독자적인 기술개발을 위한 가능성이 한 차원 높일 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. C. R. Calladine, "On the Calculation of the Equilibrium and Stiffness of Frame", Philosophical Magazine, 1864, Vol.27.
2. R.B. Fuller, "Tensile-Integrity Structure", U. S.Pat. 3, 3,063,521, 1962.
3. R.B.Fuller, R.Marks, "The Dymaxion World of Buckminster Fuller" Doubleday Anchor Press, 1973.
4. A. Pugh, "An Introduction to Tensegrity", University of California Press, 1976.
5. D. G. Emmerich, "Exercices de Géométrie Constructive Travaux d'étudiants", Ecole Nationale Supérieure des Beaux Arts, Paris,

- Archeature, 1970.
6. A. Motro, "Forms and Forces in Tensegrity Systems", Proc. of 3rd Internatioal Conference on Space Structures, 1984, pp.283-288
 7. A. Motro, "Tensegrity systems Latests Developments and Perspectives", proc. Madrid, 1989
 8. O. Vilnay, "Structures made of Infinite Regular Tensegric Nets", IASS Bulletin NO. 63, Vol.XVIII-1, Apr., 1977, pp.51-57
 9. Frei Otto, Tensile Structure, The MIT Press, 1979.
 10. D. H. Geiger, "Roof Structure", U. S. Pat. 4, 736, 553, 1986
 11. 日本鋼構造協會, 索 構造, コロナ社, 1975
 12. 日本鋼構造協會, 建築構造 ケーブル設計施工指針, 1983.
 13. 日本建築學會, 建築物荷重指針, 1993.
 14. 日本建築學會, ケーブル構造設計指針・同解説, 1994.
 15. 권택진, 한상을, 김충한, 최옥훈, "장력안정트러스 구조물 기법에 관한 연구", 한국전산 구조공학회 학술발표회 논문집, 제9권 제2 집, 1996.
 16. 서일교, 최옥훈, Hybrid 케이블 구조물의 해석 및 설계, 제15회 한국전산구조공학회강습회, 1997. 