

건축 인장구조시스템의 분류와 구성유형

The Type of Composition and Classification of Tension Structure Systems in Architecture

이 주 나*

Lee, Ju-Na

박 선 우**

Park, Sun-Woo

박 찬 수***

Park, Chan-Soo

Abstract

Tension members is a type of effective structural member, which is often used in large span structures. The structure systems composed with tension members are combined in various way and specific formations. So, there are need to research into the formations of tension structure and the type of adaptation in tension structure architectures.

The structure systems with tension members were considered as tension main system, vector system and tension supported bending system, comprehensively. And tension structures were classified into the formation of tension structure with uniaxial or multiaxial line tension member, with surface member, with hybrid member of line and surface, concerning the flow of tension force.

In each the formation of tension structure, the typical adaptations to architecture were also investigated through architecture examples. The type of the formation can be used to plan an architecture with respect to the flow of tension force and structural feature.

keywords : Structure System, Tension Members, Tension Structure Formation

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

건축에 대한 구조의 기여를 생각할 때, 구조는 수동적인 기술적 해결외에도 주도적으로 건축의 형태와 공간을 변화시키는 역할을 하게 된다. 특히 대공간 건축물의 경우 구조의 주도적인 역할은 더욱 커지게 된다.

이러한 주도적인 역할은 건축계획 초기부터 이루어져야 하고 세부적인 부재능력의 검토 이전에 건축가와 구조전문가 모두가 전반적인 관점에서 구조를 구성하는 방식을 체계적으로 파악하고 구조와 형태 및 공간구성의 상관관계를 고려할 때 가능해질 것이

다. 그러나 기존의 구조에 대한 인식은 엔지니어링 측면의 세부적인 구조기술에 관한 것이 집중적이며, 계획적인 차원에서 구조형식을 판단할 수 있게 하는 접근은 부족하였다고 생각된다.

이같은 맥락에서 본 연구는 건축구조를 힘을 전달하는 구성체인 구조시스템으로 단순화하여 보고, 그중 인장부재의 특성을 주목하여 인장구조시스템을 구성하는 방식을 고찰하고자 한다.

인장부재는 응력의 효율성에 따른 구조적 능력은 물론 철골재의 원활한 사용과 기술의 발달로 인해 대공간 건축에서 주로 고려되는 부재방식중 하나이다. 그러나 인장부재는 정착과 안정성 등에 대한 구법이 다른 구조시스템과 달리 특수성이 있고, 보편적으로 활용되고 있지 않기 때문에 그 세부적이고 다양한 구법이 체계적으로 밝혀지고 건축에 사용되는 구성방식이 연구되어야 할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 인장부재를 이용하여 구조

* 정회원 · 충북대 대학원 건축공학과 박사수료

** 정회원 · 한국예술종합학교 미술원 건축과 교수

*** 정회원 · 충북대 건축공학과 교수, 공학박사

를 구성하는 다양한 인장구조시스템을 구조적 원리에 의하여 분류하고 인장구조형식을 결정하여 체계적으로 인식하도록 하고자 한다. 또한 인장구조형식이 사용되어 온 실제 건축사례들을 살펴 일반적으로 건축에서 활용되고 있는 인장구조의 구성유형을 파악하고자 한다.

이것은 건축계획시 다양한 인장구조시스템을 원활하게 적용하고자 하는 것이며, 동시에 계획과정에서 인장구조의 구조원리와 그에 따른 구조적 특성을 체계적으로 고려하게 할 것이다.

1.2 연구방법 및 범위

구조체의 구조방식을 논의하기 위하여 본 연구는 우선적으로 건축 구조체를 힘의 흐름의 체계로 단순화하여 구조시스템이라고 보았다. 그리고 구조시스템의 힘의 흐름을 고려하여, 인장응력이 발휘되는 인장부재를 가지는 구조시스템을 인장구조시스템이라 하고 연구하고자 한다.

인장구조시스템은 인장응력의 분배방식에 따라 구성이 달라질것으므로 세부적인 전달방식을 고려하여 인장구조형식을 결정하고자 한다.

또한 인장구조형식이 사용된 기존의 사례들을 각 인장구조형식의 발전과정을 참고하여 조사하고자 한다. 사례는 영구적으로 사용되는 건축물로서 인장구조에 대한 기존연구 및 문헌^{1)~9)}에서 발췌하였고, 현대작가들 작품사례 및 현대건축자료를 비롯한 건축물 잡지 등을 폭넓게 조사하고 답사조사를 병행하였다. 제한적인 조사이지만, 실제 건축물에 나타난 사례들의 적용방식을 조사함으로써 인장구조형식으로 분류된 인장구조의 구성원리가 건축에 일반적으로 적용되는 방식을 파악할 수 있으리라 생각한다.

본 연구에서 구조시스템은 단일공간을 설정하며 힘을 양지점으로 전달하는 시스템을 연구에서 고려하는 기본적인 구조시스템의 단위로 하였다. 그리고 인장력만이 발휘되는 비강성부재, 케이블과 막과 같은 부재가 조합되어 나타나는 구조형식의 특성을 주로 고려하기 위하여 인장응력이 단독으로 발휘되는 부재를 포함하는 구조시스템만을 고려하였고, 돔과 셸 구조 등, 연속된 부재내에서 인장외의 여러 응력이 복합적으로 나타나는 것은 연구범위에서 제외하였다.

2. 인장구조시스템의 성격과 정의

2.1 인장응력의 특성

인장응력은 부재의 단면전체가 동일한 응력상태를 보이며 당겨지는 응력상태이다. 이것은 중립축을 중심으로 상하부가 압축과 인장으로 나뉘는 휨응력 상태나, 세장한 부재에서 좌굴이 발생하는 압축응력과 비교하였을 때 부재의 효율이 높다 할 수 있다. 즉, 인장응력은 길이와 부재의 단면에 관계없이 부재능력을 전적으로 끌어 낼 수 있는 힘의 종류이다. 또한 인장응력은 다른 응력상태와 달리 케이블이나 막재와 같은 비강성부재의 사용이 가능한 유일한 응력상태이다.

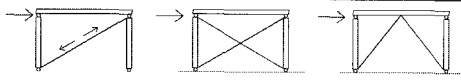

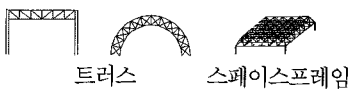

이 같은 인장응력의 특성은 결국 구조시스템에 있어, 경량구조를 가능하게 하고 자유로운 형태 요소를 제공하므로 대형건축물의 구조계획시 주 고려 대상이 되는 특징을 가지고 있다고 하겠다.

2.2 인장구조시스템

구조를 힘을 전달하는 구성체계인 구조시스템으로 단순화하여 보고 압축, 인장, 그리고 휨모멘트인 기본응력의 조합에 따라 분류하였을 때 인장응력이 발휘되는 구조시스템은 <표 1>과 같이 나타낼 수 있다.¹⁰⁾

인장구조시스템은 우선 수직하중 저항시스템과 수평하중 저항시스템으로 나눌 수 있는 데, 수평하중 저항시스템은 인장력을 이용하여 안정성을 확보

<표 1> 인장응력을 이용하는 구조시스템의 종류

| | | |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 수평하중 저항 시스템 |  <p>추가부재의 인장응력에 의한 저항</p> | |
| 수직하중 저항 시스템 | 인장 저항구조 |  <p>현수구조 텐트/케이블넛 공기막</p> |
| | 인장/압축 축력 조합구조 |  <p>트러스 스페이스프레임</p> |
| | 인장복합 휨 저항구조 |  <p>케이블 보강 구조</p> |

하는 경우이다. 수직하중 저항시스템에는 인장부재만으로 공간을 구성하는 인장 저항구조시스템과 트러스와 같은 인장/압축 축력조합시스템 그리고 인장부재를 이용하여 휨부재를 돕는 인장복합 휨저항 구조시스템이 있다고 보았다.

본 연구에서는 이러한 인장력 활용 구조시스템을 인장구조시스템이라 하고, 보다 세부적인 구성형식과 대표적 건축유형을 알아보려고 한다.

3. 인장구조시스템의 분류 및 인장구조형식 결정

<표 1>에서 나타낸 기본 인장구조시스템은 매우 다양한 방식으로 변화구성되어진다. 계획단계에서부터 다양한 인장구조시스템의 구조적 특성을 반영하고 적합한 구조방식을 결정하기 위해서는 역학적인 의의와 그 구성에 차이를 보이는 인장구조시스템들의 세부분류작업 및 형식화가 필요하다.

구조시스템의 구성은 힘의 전달방식에 따라 달라지므로 인장구조시스템의 경우는 인장응력의 흐름 변화가 시스템구성을 달라지게 할 것이다. 그러므로 인장구조시스템의 분류기준으로 인장응력의 흐름의 변화를 고려하고자 한다. 인장응력의 흐름은 전달부재의 성질과 구성에 따라 달라지게 될 것이므로, 먼저 선재와 면재인 인장부재 차이를 생각해 볼 수 있다. 선재와 면재는 축력과 전단력의 응력상태는 물론 다양한 역학적인 입장에서 세부적인 차이를 가지지만, 구조계획적인 측면에서 형태와 구성에 영향을 미치는 차이는 힘의 전달방향과 강성의 차이가 주목된다고 생각된다.

즉, 면재인 경우는 여러방향으로 응력을 전달하는 구성을 가지지만 선재의 경우는 선부재를 엮음에 따라 힘의 전달방향이 달라지고 그에 따라 힘을 전달하는 부재의 구성이 달라질 것을 생각할 수 있다. 따라서 선재의 건축부재가 힘을 전달하는 방식은 일방향의 경우와 다방향의 선재로 분류하여 보았다. 또한 선재와 면재가 조합되어 사용될 수도 있겠다.

따라서 일축방향과 다축방향으로 전달하는 선재, 면재, 그리고 선재와 면재가 복합적으로 사용된 경우를 인장구조시스템 분류기준으로 정하고, 앞서 <표 1>에서 나타낸 인장구조시스템들을 분류하여 <표 2>에서 나타내었다.

분류된 구조형식의 인지를 높이기 위하여 부호를 적용하였다. 부호는 인장저항구조(Tension system), 인장/압축 축력조합구조(Vector system), 인장복합 휨저항구조(supported Bending system), 인장 안정 저항구조(tension Stable system)의 주요 영문자를 첫 번째 기호로 하고, 각 시스템의 세부 분류기준인 일축선재(Uni-axial), 다축선재(Multi-axial), 면재(Surface) 그리고 선재와 면재의 복합(Hybrid)의 각 영문 첫자를 두 번째 기호로 하여 부호를 결정하였다.

본 연구에서는 <표 2>와 같이 인장응력의 전달방식을 달리하는 인장구조시스템의 구성법을 인장구조형식으로 결정하고자 한다.

4. 인장구조형식의 구성

분류를 통하여 얻어진 각 인장구조형식의 특성을 구체적으로 파악하고 인장구조형식에 내포된 인장구조의 구조적 의미를 보다 세부적으로 고찰하기 위

<표 2> 인장구조시스템의 분류 및 인장구조형식

| | | 수직하중 저항 시스템 | | | 수평하중 저항시스템 |
|-------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|
| | | 인장 저항구조 (Tension System) | 인장/압축 축력조합구조 (Vector System) | 인장복합 휨저항구조 (Supported Bending System) | 인장 안정저항구조 (Tension Stable System) |
| 선재 | 일축방향 (Uni-axial) | TU 일방향 현수구조 | VU 일방향트러스 | BU 일방향 사장구조 | SU 브레이스 |
| | 다축방향 (Multi-axial) | TM 케이블네트 및 디쉬구조 | VM 입체트러스 | BM 입체 사장구조 | SM 입체 브레이스 |
| 면재 (Surface) | TS 공기막, 텐트 | VS | BS | SS 전단벽구조 | |
| 선재+면재 (Hybrid) | TH 막과 케이블 복합구조 | VH 면재와 선재의 복합구조 | BH | | |

하여 각 구조형식의 구조원리와 구성방식을 살펴보고자 한다.

앞서 분류된 인장구조형식 중, 수평하중에 대한 시스템은 주 구조체에 부차적으로 고려되는 성격이 강하므로 본 논문에서는 수직하중에 대한 인장구조형식의 구성방식에 한하여 논의하고자 한다. 수평하중 시스템과 결합되는 인장구조시스템의 구성과 특성 또한 추후 체계적으로 연구되어야 할 것으로 생각된다.

4.1 인장저항구조

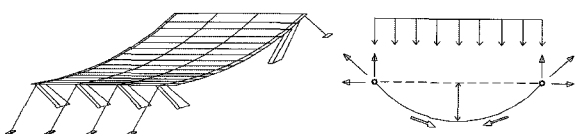
인장저항구조는 케이블이나 막과 같은 비강성부재를 이용하여 수평부재에서 인장응력만으로 저항하여 큰 구조성능을 내는 구조방식이다. 케이블이나 막과 같은 비강성부재가 사용되므로 안정성 확보가 주된 고려대상이 된다.

부재의 조합에 따라 <표 2>와 같이 일축방향 TU, 다축방향 TM, 면재 TS, 면재와 선재의 복합 TH, 4가지의 유형으로 나누어 볼 수 있으며, 각 세부구조형식의 구조구성을 살펴보고자 한다.

4.1.1 일방향 현수구조(TU)

선형의 유연부재 케이블을 <그림 1 a)>와 같이 일축방향으로 걸어서 양지점사이의 하중을 인장응력으로 전달하는 구조방식이다. 주 스패를 따라 케이블을 배치하면 등분포하중이 작용하고 부재는 현수곡선을 이룬다.

단일 케이블의 현수구조는 <그림 1 b)>와 같이 사전가력(Pre-stressed force)의 크기와 부과되는 하중에 따라 곡선의 처짐(Sag)깊이가 조절되고, 이에 따라 구조의 형태도 변화할 뿐만 아니라 케이블에 작용하는 응력도 변화하는 구조이다. 케이블의 이용으로 저항할 수 있는 인장응력이 크고 현수곡선이 형태적 요소가 된다.



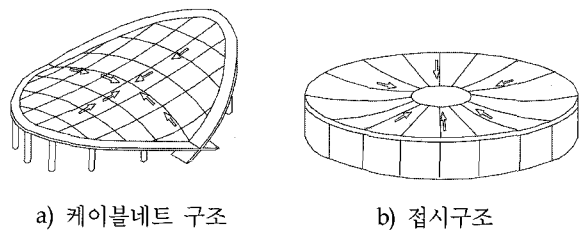
<그림 1> 일방향 현수구조의 힘의 흐름

4.1.2 다방향 현수구조(TM)

유연한 케이블을 사용하여 인장응력을 여러방향으로 분산 전달하는 시스템이다. 대표적으로는 케이블을 직교시켜 하중을 전달하는 케이블 넷(Cable Net)시스템과 방사방향으로 분산시키는 접시(Dish)구조가 있다.

복곡률(Anticlastic)로 이루어지는 케이블 넷 구조는 <그림 2 a)>와 같이 하나의 곡률을 따라 주 케이블이 설정되면 다른 방향의 이차케이블이 반대곡률로 덧붙여짐으로서 넓은 공간을 가능하게 하고 사전가력을 통해 케이블의 안정성을 확보할 수 있게 된다. 접시구조는 <그림 2 b)>와 같이 원형의 평면형에서 방사형으로 케이블을 배치하여 인장응력을 전달하는 방식이므로 삼각형의 등분포하중을 받아 3차포물곡선을 이루며 처짐곡선을 가지는 구조형식이다.

이들 구조는 하중의 전이가 다방향으로 되어지면서 넓은 평면형을 가지게 하고 단부에서 다방향에 따른 외부정착구조와 형태가 구성되는 특성을 가지고 있다고 할 수 있다.



<그림 2> 다방향 현수구조의 힘의 흐름

4.1.3 인장막 구조(TS)

면의 인장응력으로 하중을 저항하는 구조시스템은 텐트같은 막구조가 해당된다. 그러나 실제건축물에서 인장막을 이용하더라도 단부에서는 선재인 케이블을 사용하는 것이 효율적이기 때문에 면재만을 이용하여 저항하는 영구적인 막구조 건축물의 예는 찾아보기 어렵다.

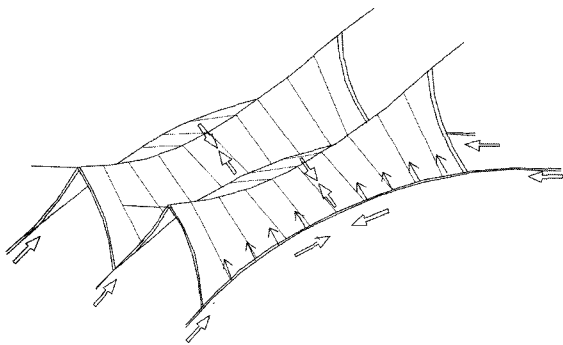
그러나 개념적으로 봤을 때 막의 내부나 막 사이에 공기를 가압하여 막에 생기는 장력으로 구조를 유지시키고 형성하는 공기막 구조를 대표적인 인장막 구조시스템이라 할 수 있다.

공기막구조의 방식은 크게 공기지지방식과 공기 팽창방식이 있어서, 가압과 감압을 이용하여 막의 장력을 이끌어 건축구조를 형성하게 된다.

4.1.4 인장막과 케이블의 복합구조(TH)

인장응력을 발휘하는 인장막과 선재인 케이블을 복합적으로 사용하여 힘을 전달하는 구조방식이다. 막재에 발생하는 인장면응력은 선재로 전이되어 구조를 이루기 때문에 부재형태와 힘의 방향의 변화가 이루어지고 힘의 전달방식의 구성이 복잡하고 다양해진다.

기본적으로는 인장막과 케이블의 연력도 형태가 이들 구조의 형태요소이지만, 선재를 복합하여 사용함으로써 다양한 막구조의 형태구성이 가능하고 선재 역시 경우에 따라서 직선형의 당김형과 곡선형으로 변화되는 구조형식이다. 막과 선재의 복합사용으로 정형화하기가 어렵고, 사전가력이나 형태결정 등 기술적으로 난점이 있는 방식이라 할 수 있다.



<그림 3> 인장막과 케이블의 복합구조의 힘의 흐름

4.2 인장/압축 축력조합구조

압축응력이 발휘되는 부재와 인장응력이 발휘되는 부재의 조합으로 지점사이의 힘을 전이시키는 구조방식이다. 이 시스템 역시 힘의 전달방식에 따라 일축방향 VU, 다축방향 VM 그리고 면과 선재의 복합시스템 VH로 구조형식을 분류하였다. 면재로만 구성된 인장/압축 축력조합 구조시스템 VS는 일반적인 구법으로 생각하기 어렵기 때문에 인장구조형식에서 제외하였다.

4.2.1 일축방향 축력조합구조(VU)와 다축방향 축력조합구조(VM)

VU구조에는 일방향 트러스구조가 여기에 분류된다고 할 수 있는데 소규모의 간이식 건물에서 초대형 구조에 이르기까지 매우 폭넓게 사용되는 구조형식이다.

또한 VM구조는 입체 트러스구조라고 할 수 있는데, 트러스의 개념이 다방향으로 확대됨에 따라 방향성없이 다양한 공간을 덮는 구조로 사용할 수 있다. 스페이스 프레임이 여기에 속하는 대표적인 구조형식이며 특히 1940년대 Mero시스템이 개발된 이후로는 불특정이고 형태에 제약이 없으며 그 시공성과 기술성에 있어서도 뛰어난 적용성을 가지기 때문에 대형건축물에서 매우 흔히 볼 수 있는 구조방식이 되었다.

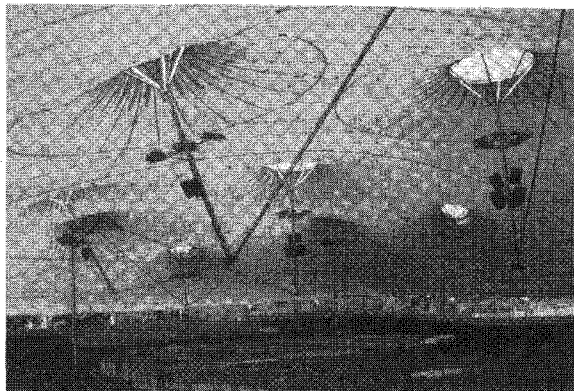
선형트러스의 경우는 주축방향으로 또한 입체트러스 경우는 양 방향으로 상당한 강성을 확보하며 안정성 확보에도 효과적인 구조방식이라 할 수 있다. 구성 또한 다양하지만 매우 익숙하게 사용되는 구조형식이므로 본 연구의 세부적인 고찰에서 제외하였다.

또한 VM구조 형식이 전형적인 입체 트러스에서 비강성재인 인장재와 사전가력을 통해 변형하여, 텐서그리티(Tensegrity)구조로 발전한다고 볼 수 있다.

4.2.2 면재와 선재의 복합구조(VH)

면재와 선재의 복합구조는 축력조합시스템 중 면재와 선재를 복합적으로 사용하는 경우다. 즉, 하부의 인장재 및 압축재와 더불어 막재나 판재의 응력이 하나의 구조시스템을 이루는 방식으로 매우 경량의 효과적인 구조이며 기술적 난이도를 가진 구조형식이라 할 수 있다.

이 구조방식은 Self- Stressing Spatial Network와 떠있는 듯한 압축재(Strut)로 이루어져 있다고 설명될 수 있는데,^[3] 이 같은 개념을 잘 보여주는 예로, 일반건축물은 아니지만 <그림 4>의 Wolf gang-Meyer-Sportangle 경륜경기장을 들 수 있다. 아래에 짧은 압축지주를 세우고 하부에서 인장재를 당겨서 인장막을 들어올림으로서, 넓은 경륜경기장의 지붕을 면



<그림 4> 면재와 선재의 복합구조의 힘의 흐름(Wolf-gang-Meyer-Sportangle 경륜경기장)

재와 선재의 복합구조방식으로 이루고 있다. 비강성 부재를 다수 포함하는 이 구조방식은 안정성확보를 위한 부재배치와 사전가력의 조절에 따라 구조형태와 구성이 변화되는 구조형식이다.

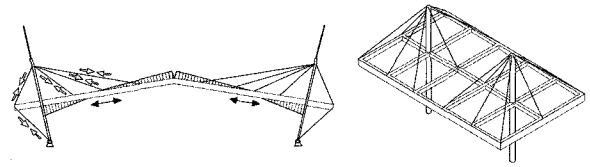
4.3 인장복합 휨저항구조

사장형 구조로 알려진 이 방식은 휨부재에 인장재를 추가로 사용하여 구조능력을 증대하는 방식이다. 앞서 <표 2>에서 나타난 바와 같이 보강으로 사용되는 인장재가 면형이나 면과 선재의 복합사용되는 경우는 없는 것으로 판단하고, 선형의 케이블이 단일축방향으로 당겨지는 경우인 BU구조와 여러 방향으로 당겨 보강하는 경우인 BM구조만으로 분류하였다.

구조개념상 휨으로 거동하는 하나의 휨부재를 가질 수도 있고 휨부재를 트러스로 구성할 수도 있다. 이 경우 트러스의 경우라도 전체적인 시각에서 봤을 때 하나의 휨재로 인식하는 것이 구조계획적인 인식을 가져오는데 합리적이라고 생각하여 트러스를 인장재를 보강한 경우도 인장복합 휨저항구조에 포함되는 것으로 보았다.

4.3.1 일방향 사장형 구조(BU)

<그림 5 a)>와 같이 사장형구조는 인장재를 이용하여 보강함에 따라 스패인이 줄어드는 효과와 같이 모멘트가 줄어들고 인장재와 휨재내부에 발생하는 축력으로 하중을 전이하는 방식이고 다른 구성방식보다 강성이 큰 휨부재가 안정성에 기여가 높은 구



a) BU구조

b) BM구조

<그림 5> 인장복합 휨저항구조의 힘의 흐름

조방식이다.

사장교에서 얻어진 이 구조방식은 당김케이블의 사전가력과 강성부재인 휨재를 이용하여 안정성을 확보하며 대공간 건축물에서 일찍부터 다수 사용되어져 왔다.

4.3.2 입체 사장형 구조(BM)

일방향 사장형구조와 원리가 같으나 여러방향에 인장재를 배치하여 휨재를 당기는 방식이다.

이들 구조는 <그림 5 b)>에서 나타난 것처럼 여러방향으로 휨재의 스패인을 줄이는 효과를 가져오기 때문에 큰 공간을 가능하게 하고 형태적으로 다양한 구성을 가져온다. 또한 여러방향의 인장재는 수직하중에 대한 보강외에 수평하중이나 불균형 하중에 대한 안정성확보를 의도하는 특성을 가지고 있다고 할 수 있다.

5. 인장구조형식의 건축구성유형

인장구조시스템 건축사례들은 모두 세부구성이 다른 독창체라고 할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 건축계획의 기본 공간설정과 입면형태에 영향을 미치는 구조의 특성에 주안점을 두고 해당사례들을 전반적인 구성유형으로 나타내었다.

사례들을 인장구조형식을 적용하여 분류함으로써, 사례건축에 내포되어 있는 인장구조의 원리가 분명히 파악되고, 또한 건축의 공간과 형태를 결정하는 인장구조의 전형적인 구성방식을 파악할 수 있게 하고자 한다.

5.1 인장저항구조

5.1.1 일방향 현수구조(표 3 : TU)

일방향 현수구조는 내부공간에 영향을 미치는 처

점으로 인한 구조체의 높이조절과 케이블의 안정성 확보방식의 차이로 인해 구성유형을 <표 3>과 같이 나누어 볼 수 있다.

먼저 1960년대에 주로 보이는 사례들은 달라스 공항과 유사하게 케이블설치 후 현장작업이나 판넬의 콘크리트로 구조체에 강성을 확보하여 오목한 셸과 같은 지붕형태를 취하였다. 요하네스버그 스타디

움 형은 주 현수케이블외에 추가로 안정을 확보할 수 있는 케이블을 설치하는 이중케이블 보 방식으로 유사한 시기에 경량으로 안정성을 확보하는 다른 유형이라고 할 수 있다. 또한 부르고 공장 형은 현수교와 유사한 상징적인 요소를 가진 현수구조로 처짐깊이를 크게 하고, 지붕마감위로 구조부재를 노출시키며, 매달린 지붕구조의 중량을 증대시키는 방식으로 안정을 취하므로 구분되는 구성유형이라 할 수 있다.

<표 3> 일방향 현수구조, TU구조의 구성유형

| | 달라스공항 형 | 부르고공장 형 | 요하네스버그 스타디움 형 |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 유형 특성 | 콘크리트를 사용한 강성확보, 단일레이어 케이블 | 아래로 지붕을 매단 현수구조 (현수교와 유사) | 이중 케이블보 방식 |
| 1960 | | | Reparature Halle |
| 1965 | ◎Dulles Airport Bremen City Center Maxico Swim. Pool John Deere Building | ◎Burgo Paper Mill | ◎Johannesov Stadium |
| 1970 | Frankfurt Airport Hanger |  | Maxico Stadium |
| 1975 | | Karlsruhe Stadium | Schiphof Transit Store Billingham Icerink |
| 1980 |  | Memmingen Ice Rink | |
| 1985 | | |  |
| 1990 | | | |
| 1995 | | | |
| 2000 | | Salt Lake City Stadium | |

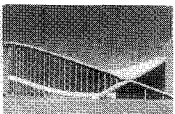
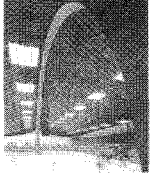



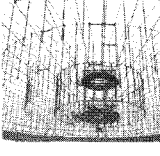
5.1.2 다방향 현수구조(표 4 : TM)

TM구조는 <표 4>와 같이 케이블 넷구조와 접시구조로 우선적으로 구분하여 볼 수 있다.

케이블 넷구조는 형태상 물리박람회장이나 오사카 수영장 형같은 단순한 처짐형식과 예일대 하키 경기장이나 뮌헨 아이스링크장형과 같이 중앙에 아치트러스(Kiel Truss)를 보내어 부재의 처짐곡선으로부터 실내공간의 높이를 확보한 형식으로 크게 구분될 수 있다.

일반형과 아치를 가진 두가지 케이블 넷의 구조유형 모두 초기의 사례들에서는 교차되는 케이블을 사전가력한 후 콘크리트로 강성을 확보하여 HP shell이라고 할 수 있는 유형이 다수 나타나며, 이후 Soft shell, 혹은 Light weight shell이라 불리는 막을

<표 4> 다방향 현수구조, TM구조의 구성유형

| 유형 | 케이블 넷 구조 | | | | 접시 구조 | |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | 물리박람회장 형 | 오사카수영장 형 | 예일대하키링크 형 | 뮌헨아이스링크 형 | 메디슨스퀘어가든 형 | 우티카 시립홀 형 |
| 특성 | 콘크리트를 사용한 강성셸 | 막을 이용한 개방적 경량 셸 | 아치트러스를 가진 콘크리트 강성셸 | 아치트러스를 가진 막재의 경량셸 | 단일 레이어 방식 | 이중 레이어 방식 |
| 1955 | ◎Raleigh Fair Arena | | | | | |
| 1960 |  | | ◎YaleUni. HockeyRink |  | Montevideo Stadium | ◎Utica CivicAuditorium Stadthalle der Freundschaft Jubilee Sports Hall Salt Palace Hamton Road Coliseum |
| 1965 | Kagawa Stadium Arizona Coliseum El Paso Event Hall | 67Expo German Pavilion | |  | Villita Assembly Hall Oakland Coliseum ◎Madison SquareGarden Inglewood Stadium | |
| 1970 | Millan Sport Hall |  | | | | |
| 1975 | | | Krylatskoe Velodrome | ◎Munich Ice Rink Lindsay Park Cener |  |  |
| 1980 | Calgary Stadium | | | Hakyu Ryou Dome | | |
| 1985 | | ◎Osaka Pool | | Myao Li Arena | | |
| 1990 | | | | | | |
| 1995 | | | | | | |
| 2000 | | | | | | |

력을 이용한 경량의 개방적인 유형이 다수 나타나는 것을 볼 수 있다. 이에 따라 케이블 넷구조는 4가지 구조유형으로 나누었다. 다수의 대규모 체육시설에서 현재에까지 일반적으로 사용되는 인장구조형식 중 하나이다.

집시구조의 경우는 1960년대와 1970년대 집중적인 사례를 보이는데, 구성유형은 케이블의 안정성 확보에 대한 방식으로 단일레이어 방식과 이중레이어 방식으로 크게 구분될 수 있다.

5.1.3 인장막 구조(표 5 : TS)

인장막구조의 대표적인 형식으로 공기막구조를 들었는데, 공기막구조의 구성유형은 공기압 방식에 따라 다양한 방식이 있게 된다.

그러나 임시가설건축물이 아닌 영구적인 건축물에서 일반적으로 적용되는 공기막구조의 유형은 <표 5>에서 보인 바와 같이 1970년대와 1980년대를 중심으로 다수 나타난 가압식의 단일공기막구조와 독립된 지붕을 형성하는 이중공기막구조라 할 수 있다.

5.1.4 인장막과 케이블의 복합구조(표 5 : TH)


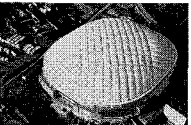

막의 장력을 이용하는 구조방식이 실질적으로 이 형식에 속한다고 할 수 있는데 막구조의 개방적인 특성상 막전체의 장력을 직접 정착시켜 공간을 형성하기 보다는 단부에서는 케이블로 전이시켜 막과 복합적으로 사용되는 것이 대부분이기 때문이다.

막과 선재의 복합사용으로 정형화하기는 어렵지만 구조유형은 건축형태와 공간구성에 미치는 구조의 역할을 고려하여 크게 <표 5>에서 나타낸 바와 같이 막의 지지점이 하부에 위치한 라 베른대 학생회관형과 상부에서 당겨 형태를 이루는 쉘럼버그 연구소형의 경우로 형태구성을 구분하여 볼 수 있다. 세부적으로는 지지점의 위치와 개수가 다양하게 변화하며 형태와 구조구성의 변화를 가져오게 된다.

5.2 인장/압축 축력조합구조(표 5 : VH)

축력조합구조형식에서 일방향 트러스 구조와 입체 트러스 구조는 이미 익숙한 구조형식으로 불특정 다수의 사례를 가지고 있기 때문에 본 연구의 사례를 통한 유형고찰에서 제외하였다. 다만, 면재와 선

<표 5> TS구조, TH구조와 VH구조의 구성유형

| 유형 | 공기막구조, TS구조 | | 인장막과 케이블의 복합구조, TH구조 | | 면재와 선재의 복합구조, VH구조 | |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| | 벤쿠버 돔 형 | 구마모토 돔 형 | 라 베른대 학생회관 형 | 쉘럼버그 연구소 형 | 서울체조경기장 형 | 샌디에고 컨벤션 센터 형 |
| 특성 | 단일공기막구조 | 이중공기막구조 | 막의 지점을 하부에 설치 | 막의 지점을 상부에 설치 | 방사형배열의 텐서그리드 돔 | 일방향 배열의 구조 |
| 1970 | Osaka'70 Expo U.S. Pavilion SantaClaraUni. Leavey Center Milligan Uni. Field House | | Japan Automobile Industry Pavilion La Verne Student Hall | | | |
| 1975 | Silver Dome Uni-Dome | | 74Expo U.S. Pavilion |  |  | |
| 1978 | South Dakota Dome Carrier Dome | | Bullock Department | | | |
| 1980 | Stephan C.O.Cornell Center Metro Dome Vancouver Stadium | | | Jeddah Airport | | |
| 1985 | The Hoosier Stadium Kajima Stadium | | Diplomatic Club Canada Harbour Place | Schlumberger Research Lab. | | |
| 1988 | Tokyo Dome | The Arena in Nijmes |  | | 서울올림픽체조경기장 팬싱경기장 Redbird Arena Suncoast Dome | Schlumberge Paris Hq. Staffordshire House San-diego Convention center |
| 1990 |  |  | M&G ricerche Lab. Denver Airport | Amenity Bdg. (Nottingham) | Amagi Dome Georgia Dome Taoyuan Arena | |
| 1997 | | Kumamoto Dome | Ja-Yi Gymnasium | | | |

재의 복합구조인 VH구조의 경우는 비강성 인장부재를 주로 사용하여 기술적으로 건축에 반영되는 구성방식이 고찰될 필요가 있는 것으로 생각되어 <표 5>에서 유형을 분류하여 나타내었다.

이 구조형식은 서울올림픽 체조경기장과 같이 방사형 배열의 텐서그리드돔구조와 샌디에고 컨벤션센터와 같이 사각형 등의 개방적인 평면에서 일방향 혹은 이방향배열로 사용되는 유형으로 나누어 볼 수 있다. 면과 선을 이용하는 구조원리는 같으나 평면형의 폐합성 때문에 압축링 및 방사형의 부재와 원형의 루프를 사용하는 텐서그리드돔과 달리 개방형 구조에서는 외부정착구조를 필요로 하는 구조구성을 보이게 된다.

5.3 인장복합 힘저항구조(표 6 : BU, BM)

휨재를 보강하는 방식은 <표 6>에서와 같이 BU

구조와 BM구조 모두 상부당김형과 하부당김형으로 크게 분류할 수 있다. 상부당김형은 사장교에서 원리를 얻어 일찍부터 나타난 구조개념으로 1950년대 이후에는 다수의 건축물에서 적극 사용되어 왔다. 상부당김방식은 기둥의 위치와 개수에 따라 정착구조와 형태 및 구조구성에 구별되는 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 대표적으로 단일기둥을 사용하여 양 캔틸레버 보를 당기는 형식의 유형으로는 BU구조의 경우 INMOS 공장 형, 그리고 BM구조의 경우는 IGUS 공장을 들 수 있다. 가장 일반적인 유형은 양측에 기둥을 가지고 중앙의 스패를 가로지르는 보를 돕는 방식으로 양측 기둥형이라 할 수 있으며, 대표적 예로 BU구조에서 세인스버리수퍼와 BM구조에서 르노센터를 들 수 있다.

또한 하부당김형 역시 하부에서 압축지주를 이용하여 케이블로 보강한 경우로 Sub-tension3), 또는 Under-tension4)으로 불리는 구조방식으로 일종의

<표 6> 인장복합 힘저항구조의 구성유형

| 구성 유형 | BU 구조 | | | BM 구조 | | |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| | INMOS공장 형 | 세인스버리수퍼 형 | 웨슬레안대학 아이스링크 형 | IGUS공장 형 | 르노센터 형 | 만하임박물관 형 |
| 특성 | 단일기둥 상부인장 형 | 양측기둥 상부인장 형 | 하부인장형 | 단일기둥 상부입체인장형 | 양측기둥 상부입체인장 형 | 하부입체인장형 |
| 1955 | TWA Hanger | Transcon Line 터미널 | | | | |
| | Pan Am Hanger | Nicholson Gymnasium | | | | |
| 1960 | Fiumicino Airport Hanger | J.F.K.PanAm Terminal | | Tosho Printing Works | | |
| 1965 |  | Squaw Valley Stadium | ①Wesleyan Uni. Ice Rink | | Tilburg Station | |
| 1970 | | |  | | | Kochelsee Pool |
| 1975 | | Braunlage 아이스링크 | | | Baxter Travenol Co. West Japan Exhibition Center | Robin Hood Theater |
| | | Craigavon 쇼핑센터 | | | FleetGuard Factory | |
| 1977 | | Arosa 아이스링크 | | ①IGUS Factory | | Passau Uni. Court |
| | | Pompidu Center | |  | | |
| 1980 | ①Inmos 공장 | NEC Hall7 | | | ①Renault Center | Konstanz Church |
| | | Pescia 꽃시장 | | | | |
| 1985 | Pats Center | Oxford Ice Rink | Memmingen City Hall | | | |
| | | ①Sainbury Super | | | | |
| 1988 | Nieuwegeyn 공장 | Nantes Shopping Center | | | Darling Harbour Place | |
| | Brentford Warehouse | SNECMA 공장 | | | | |
| 1990 | | McCormick Place 전시관 | Green Dome Maebashi | Bunnik의 사무소 | Wakita-Hi Tecs 본부 | ①Manheim Technic Museum |
| | | Sainbury Super | | | Almere 슈퍼 | Izumo Dome |
| 1992 | | Munich Airport Hanger | | | | GEA Headquater |
| | | East Croydon Station | | |  | Bremen BIBA Int. |
| 1995 | |  | Kitakyushu Anoh Dome | | | |
| | | | Urayasu Sport Hall | | | |
| 1997 | Makuhari Messe North Hall | | 일본대 앞 전철역 | | | |
| | | | 고꾸라경마트랙 | | | |
| 2000 | | | 오가사야마스포츠홀 | | |  |

트러스에 사전당김력을 가한 개선책으로 볼 수 있다. 이러한 형식은 다수의 건축물에서 일반적으로 사용되고 있는데, 압축지주의 위치와 개수 구성에 따라 세부적으로 변화되어진다.

6. 결 론

구조체를 힘의 전달체계인 구조시스템으로 단순화하여 보고, 인장부재를 이용하는 인장구조시스템의 구성방식을 고찰한 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 인장부재를 이용하는 인장구조시스템에는 인장 저항구조, 인장/압축 축력조합구조, 인장복합 휨 저항구조가 있으며, 이들 구조시스템은 단면효율이 높고 비강성부재가 이용 가능한 인장부재의 특성을 반영할 수 있는 구조시스템이라 할 수 있다.
- 2) 인장구조시스템은 인장응력의 분배방식에 따라 일축방향선재(U)와 다축방향선재(M), 면재(S), 그리고 선재와 면재의 복합구성(H)으로 분류할 수 있으며 이를 인장구조형식으로 결정하였다. 인장구조형식을 분류함으로써 인장구조의 구성방식을 인장응력의 흐름에 따라 체계적으로 다루었다.
- 3) 인장구조형식으로 건축된 실제 건축사례들을 조사하여 건축에서 반영되고 있는 인장구조형식의 구성유형을 파악하였다. 조사된 사례들을 이용하여 건축의 공간과 형태를 변화시키는 인장구조의 전형적인 구성방식을 유형화하여 나타내었다.

사례의 구성유형은 힘의 흐름을 고려하여 얻어진 각 인장구조형식에 따라 분류되었으므로, 건축계획시 인장구조의 구조적 원리와 특성을 반영하는 체계적이고 다양한 계획에 기여할 수 있다.

인장구조의 형식적 특성은 보다 구체적인 건축설계요소와 연관되어 있고 건축계획 초기에 인지되어

어야 하므로, 건축계획에 영향을 미치는 인장구조의 설계요소에 대한 보다 세부적인 연구가 이루어져야 한다고 생각하며 본 연구는 그러한 측면에서의 선행 연구이다.

역학적 원리를 고려하여 전반적으로 구조를 파악하고 그 구조방식에 대하여 보다 체계적인 연구가 이루어질 때, 초기 건축계획에 구조의 기여를 높여 합리적인 건축안을 모색할 수 있을 것으로 생각한다.

참 고 문 헌

- 1) IASS Journal, "Recent Spatial Structures in Japan", Vol.42, n.1-2, 2001.
- 2) Kevin Pui-k Li, "Masted Structures in Architecture", Butterworth Architecture, 1996.
- 3) Wolfgang Schueller, "The Design of Building Structures", Prentice-Hall, 1995.
- 4) 박선우, "지붕구조 시스템", 세진사, 1999.
- 5) C. Wilkinson, "Super Sheds", Butterworth Architecture, 1991.
- 6) R. Scheuermann et. al., "Tensile Architecture in the Urban Context", Butterworth Architecture, 1996.
- 7) ASCE, "Cable-Suspended Roof Construction State-of-the-Art", Journal of Structural Division, Vol.97, No.ST6, June, 1971.
- 8) Colin Davies, "High Tech Architecture", Rizzoli International Publication, 1988.
- 9) Kazuo, Ishii, "Membrane Design and Structures in the World", 신건축사, 1999.
- 10) 이주나, 박찬수, "건축구조시스템의 형식과 구성요소 분석", 대한건축학회연합회논문집, 2002. 11, pp.103~110.
- 11) F. Otto, "Tensile Structures", Prentice-Hall, 1980.