

구조계획에 있어 들림형 보구조의 특성과 구성방식

Composition Method and Character for Beam String Structure in Structural Planning

이 주 나*
Lee, Ju-na

박 선 우**
Park, Sun-woo

요 약

들림형 보구조는 휨재와 뜯지주, 스트링으로 조합되는 구조로서, 스트링에 PS력을 도입하여 휨재의 응력과 변형을 조절함으로써 구조능력을 높이는 구조시스템이다. 기존의 연구결과와 실사례를 조사하여 들림형 보구조의 특성과 구조계획시 구성방식을 파악하였다. 그 결과, 연력도형의 보의 형상 및 높낮이 그리고 스트링의 sag설정, 평면배열, 뜯지주의 수와 구성이 설계인자로서 고려될 수 있음을 파악하였고, 실사례와 구조적 거동의 연구고찰을 통해 그 설계인자의 세부 구성방식을 나타내었다. 또한 들림형 보구조는 큰 부가하중이 작용할 때의 구조부담을 줄이기 위하여 부가하중에 대해 별도의 저항 메카니즘을 고안함으로써 구조효율을 높일 수 있는 방식이 고려될 수 있음을 보였다.

Abstract

Beam String Structure is a structure system that is composed with beam, strut and string, and the structural capacity of this structure system is enhanced by introducing prestress force in string and controlling the stress and deformation of beam. Researching on the established studies and examples, character and composition methods of Beam String Structure was investigated. At the result, It was examined that the design elements of the system are shape and rise of beam, sag of string, plan arrangement and the composition and number of strut, in addition, detailed composition methods of the design elements were represented. Also, it was showed that the method to form the individual mechanism against additional load can be employed in order to reduce stress of Beam String Structure under the heavy additional load.

키워드 : 인장구조시스템, 들림형 보구조, 뜯지주, 스트링, PS력, 자체정착식

Keywords : Tension Structural System, Beam String Structure, Strut, String, Prestress Force, Self-Anchorage

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

케이블과 같은 스트링체인 인장재를 활용하는 인장구조시스템은 구조능력이 뛰어난 것은 물론, 건축에 있어서도 여러 관점에서 높은 가치를 지닌 구조방식이다. 반면, 스트링재의 안정성 확보나 정착구조의 확보 또는 장력도입기술 등을 고려해야 한다는 점이 난점이기도 하다.

본 연구에서 언급하고자하는 들림형 보구조는 스

트링과 휨재를 조합하여 얻어지는 구조방식으로, 스트링재를 이용한 인장구조의 장점을 구조시스템에 도입하면서도 기본적으로는 휨재의 특성을 가지고 있어 안정성확보나 정착의 해결이 용이하여 건축물에 적용하기 유리한 인장구조시스템이라고 여겨진다.

일본에서는 張弦梁(초젠바리)구조라고 알려져 있는 구조방식으로 외국에서는 특별히 대공간 건축물의 예가 아니더라도 다수 사례를 찾아 볼 수 있다.

들림형 보구조는 기본원리를 바탕으로 다양하게 조합되어 나타나는데, 폭넓은 건축물에 활발히 활용되고 구조계획을 가능하게 하기 위해서는 이들 다양한 조합으로 인해 구조거동에 미치는 영향이 파악되어야 할 것이며, 그럼으로써 계획단계에서의 고려

* 정회원, 일본대학 객원연구원, 공학박사
Tel:+81-3-5978-3418, E-mail:juna24@hanmail.net

** 정회원, 한국예술종합학교 미술원 건축과 교수

해야하는 설계포인트, 즉 설계인자를 인식할 필요가 있다고 본다.

따라서 본 연구에서는 들림형 보구조의 구성에 영향을 미치는 설계인자를 분석하고, 인자들의 설계범위와 구조적 특성을 고찰함으로써 구조계획시 활용할 수 있는 구성방식을 파악하고자한다.

1.2 연구방법 및 범위

들림형 보구조는 대공간 건축에서부터 소규모에 이르기까지 이미 다수의 사례에서 나타나고 있으며, 그 실현을 위해 폭넓은 가능성과 설계변수를 고려한 기술적 연구가 계속되어지고 있다.

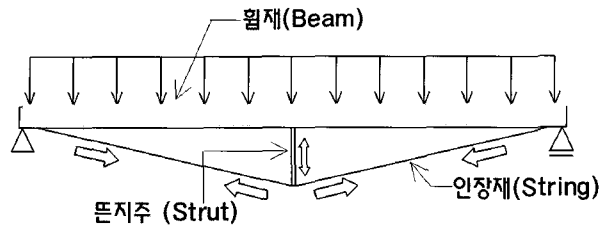
본 연구는 이러한 연구와 사례를 바탕으로 구조계획적인 측면에서 들림형 보구조의 전반적인 성질을 고찰하고, 그를 통해 계획단계에서 활용할 수 있는 설계기법을 파악하고자 하는 것이다.

그러므로 본 연구에서는 먼저 들림형 보구조의 기본 구조원리를 고찰하고, 기존의 연구문헌과 일본의 대공간 건축물에 사용된 들림형 보구조 사례를 대상으로 하여 구조계획시 고려되는 주요 설계인자와 구성방식 그리고 그에 따른 구조특성을 고찰하도록 한다.

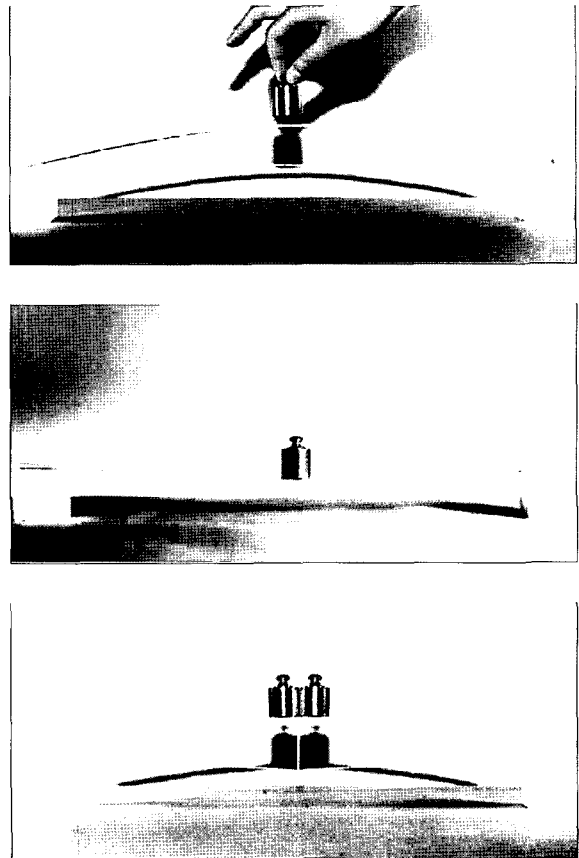
2. 들림형 보구조의 정의 및 발생

먼저 본 논문에서 다루지는 들림형 보구조와 기본용어에 대하여 정의하고자 한다. 본 논문에서 들림형 보구조는 <그림 1>과 같이 주부재인 휨재와 케이블과 같은 인장재사이에 뜬지주(strut)를 끼워넣어 구성한 일종의 조합식 구조시스템을 의미한다.

이 구조시스템의 가장 큰 구조적인 특성은 <그림 2>의 간단한 실험에서 확인할 수 있는 것처럼, 일반 휨재에서 아래로 처지며 정모멘트가 발생하는 부분을 뜬지주로 받치고, 하부의 인장재를 당겨올려 상향의 들림력을 인위적으로 가함으로써 높은 구조능력을 가지게 하는 것이다. 특히나 이 구조시스템에서는 주어지는 하중에 대하여 인장재의 사전가력(Prestress, 이하 PS)량을 결정하여 들어올리는 힘을 결정하는 것이 가장 중요한 설계포인트가 되므로,



<그림 1> 들림형 보구조의 구성



<그림 2> 들림형 보구조의 원리 시연

휨재가 들어올려진다는 특성을 강조하여, 들림형 보구조라고 하고자 한다.¹⁾

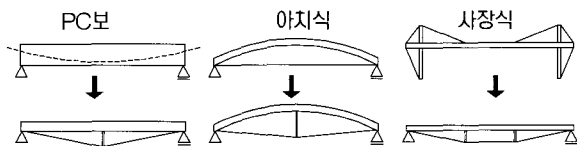
1) 2003년 건설기술기반 구축사업 지역특성화분야 연구지원으로 이루어진 『대공간 연성구조물의 설계 및 시공기법 개발』연구팀의 인장구조시스템에 대한 연구협의과정을 통하여, 뜬지주를 이용하여 스트링을 당겨 들어올려 막을 지지하는 방식을 들림형 하이브리드 막구조라 결정한 바 있다. 들림형 보구조는 막을 이용한 시스템은 아니지만 하부에서 뜬지주와 스트링을 이용하여 들어올리는 시스템이므로 이 유사한 구조원리의 이해를 돕기 위하여 일관된 용어를 사용하고자 한다. 이주나의 3인, “연성구조시스템의 분류체계와 용어”, 한국셀·공간구조학회 논문집, 제4권 제2호, 2004. 6.

또한 들림형 보구조를 이루는 각 부재도 명칭이 분명치 못하는데, 하부에서 보를 들어올리는 역할을 하는 부재는 수직압축재이기 때문에 지주라는 용어를 사용하였는데, 일반적으로 하부구조나 지면에 지지되어 있는 지주와 구분하기 위하여 본 논문에서는 뜬지주라고 하고자 한다.

뜬지주를 들어올리는 하부의 인장재는 PS력을 도입할 수 있는 선형의 부재로, 대표적인 케이블 외에도 로드, 체인이나 세장비가 큰 형강 등이 사용될 수 있다. 이러한 선형부재의 통칭을 스트링(String)이라고 할 수 있어 본 논문에서는 하부 인장재를 스트링이라는 용어로 칭하고자 한다.

들림형 보구조는 사실 근래의 새로운 구조시스템은 아니라고 할 수 있다. 이 구조방식의 기원은 핑크트러스나 왕대공트러스가 변형된 것으로 생각할 수 있으므로 매우 오래전부터 발달해 온 구조방식이다. 19세기이전부터 목재트러스 하부에 인장재를 철재로 보강한 보강방법의 하나로 사용되기 시작하여, 인장재를 이용하여 PS력을 가한 들림형 수법이 19세기 유럽의 대공간건축에 다수 사용되었다.2) 그러나 건축발달과정에서 한동안 나타나지 않고 있다가 최근에 들어 강구조를 활용한 개방적 대공간이 많아지면서 다시 활발하게 나타나고 있는 것으로 보인다.

또한 들림형 보구조의 구조원리는 이미 1970-80년대에 다수 나타났던 사장형방식의 역전된 구조시스템이라 이해될 수도 있고, 타이가 있는 아치가 발전된 형식이나, 교량의 보강방식으로도 널리 쓰이고 있는 아웃케이בל식의 프리스트레스 콘크리트보에서도 그 원리를 쉽게 얻을 수 있다. 요약하면 일반적인 휨부재에서의 인장응력부분을 PS력의 도입이 가



〈그림 3〉 들림형 보구조의 발상

2) W. Schueller, "The Design of Building Structures", Prentice-Hall, 1995, p.737.

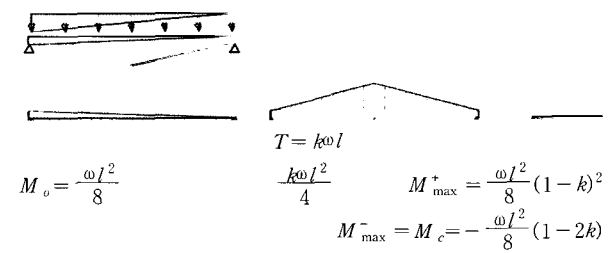
박선우, "지붕구조 시스템", 세진사, 1999, pp.13~16.

능한 인장재로 분리해냄으로써 큰 응력을 요구하는 부재에서 전체적인 체적 및 자중의 경감을 가져오고 구조능력을 높이는 방식이라고 설명할 수 있다.

3. 들림형 보구조의 원리와 특징

휨재를 스트링의 인장력으로 들어올려 구조능력을 높인다고 하는 들림형 보구조의 구조원리를 보다 구체적으로 언급하고자 한다. 들림형 보구조는 먼저 고정하중에 대한 휨재의 응력과 변위를 조절하는 것에 중점을 두고 스트링의 PS력을 결정하여 구조를 이루게 된다. 그리고 비상시적으로 구조에 부과되는 하중(바람이나 적설하중 등)에 대하여는 보와 스트링이 일체화된 부재로써 저항하는 시스템이다.

보부재의 균일화를 목적으로 하여3) PS를 도입한 들림형 보구조의 원리를 단순보와 비교하여 나타내면 다음과 같다.



$$M_{\max}^+ = M_{\max}^- = M_{\max}$$

$$\frac{\omega l^2}{8} (1-k)^2 = -\frac{\omega l^2}{8} (1-2k)$$

$$k = 2 - \sqrt{2} \approx 0.586$$

이 때의 들림형 보에 발생하는 최대모멘트는

$$M_{\max} = \frac{\omega l^2}{8} (1 - (2 - \sqrt{2})^2) \approx 0.172 M_o \text{ 이다.}$$

즉, 뜬지주에 분포하중 (ωl)의 0.586배의 들림력

3) 최적 PS량의 설정의 경우에 채용되는 목적함수으로써는 다음의 것이 있다. ①정부(+/-)의 휨모멘트M을 같게 한다.(부재의 균일화)/②보의 응력도를 최소화한다.(단면의 최소화)/③보의 변형에너지의 합을 최소화한다.(중량의 최소화) 보의 높이가 적고, 응력에 따라 단면을 변경할 수 없을 경우에는 ① 부재의 균일화를 택하는 경우가 일반적이다. 岡田章, '케이블구조의 계획', 建築技術, 1997.01, p.120.

이 가해지면 같은 값을 갖게 되는 보의 정모멘트와 부모멘트는 단순보 모멘트값의 0.172배에 해당하는 값으로 부재응력이 감소한다. 따라서 구조체는 전반적으로 경량화가 이루어지게 된다. 또한 들림형 보구조는 하부 스트링을 당김으로 발생하는 반력이 상부의 휨재로 정착되는 자체정착식이므로 하부에는 연직하중만을 전달하게 된다.

이에 따른 건축적인 효과로, 구조부재의 체적감소로 인해 투명하고 개방적인 공간확보가 가능해진다. 또한 자체정착식으로 수평추력이 없어지면서 외부 정착물이나 수평링 등 정착구조체가 필요없고, 입면 디자인 등에서 개방성이 증대되어 디자인이 구조로부터 자유로워진다. 그리고 휨재를 기본으로 하는 구조방식이기 때문에 지붕의 형태는 자유자재의 형태표현이 가능하게 된다.

이러한 건축적 특성으로 인해 그간의 사례에서 볼 때에도 들림형 보구조는 가장 일반적으로 적용 가능한 인장구조형식 중 하나이다.⁴⁾ 실제 건축에 적용된 패턴을 고찰해 본 결과, 아주 작은 스패의 건물에서 초대형 공간구조에 이르기까지 인장구조형식 중 사용공간의 규모폭이 가장 넓으며, 평면형과 입면형에 제약받지 않고, 소규모의 건축물에서 대형체육시설에 이르기까지 가장 다양한 용도의 건축물에서 사용되고 있는 것으로 나타났다.⁵⁾

4. 들림형 보구조의 구성방식

들림형 보구조는 언급한 바와 같이 구조능력의 확보나 건축적 효과 등 여러 의도에 따라 조합구성되는 구조이다. 본 절에서는 기존 연구와 실제 건축된 사례들을 통하여 들림형 보구조의 설계인자를 고찰하고 그 구성방식을 파악하고자 한다.

일반적으로 구조능력을 높이기 위한 방안으로는 부재의 고강도화, 휨저항보다 축력저항의 지향, 힘의 흐름 분산, 구조지지스패의 축소화 등이 있다고

4) 이주나의 1인, "인장구조의 건축구성요소와 유형체계", 대한건축학회논문집 계획계 21권, 1호, 2005. 01. pp.43-52.
 5) 이주나의 2인, "인장부재를 이용하는 건축구조의 구성형식과 특성", 대한건축학회논문집 계획계 19권 12호 2003. 12. pp.55-62.

볼 수 있다. 들림형 보구조 또한 이러한 측면에서 고안되는 것으로 아래와 같이 각각의 의도에 따른 구성방식을 가지고 있다고 볼 수 있다.

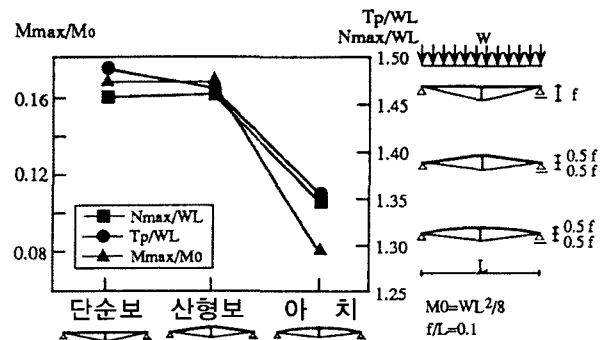
구조능력 강화방안	들림형 보의 구성방식	
부재의 고강도화	고강도 재료사용 케이블에 PS도입	→기본원리에 반영
축력부재 지향	인장재로 이산 보의 연력도형태구성	→입면형태구성
힘의 흐름 분산	입체구성 부가하중에 대한 별도 메카니즘 저항	→평면배열구성
		→부가하중에 대한 구성
스패 축소	뜯지주삽입	→뜯지주의 구성

따라서 들림형 보에서 구조특성에 영향을 미치는 직접적인 설계인자로서 다음의 4가지를 파악하여 세부적으로 고찰하고자 한다.

4.1 구조입면형태구성



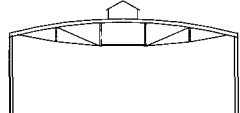


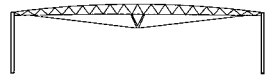

구조부재에 있어 입면형태와 부재의 깊이 등은 구조능력에 직접적인 영향을 미치는 중요한 인자이다. 들림형 보구조는 기본적으로 휨부재로 구성되는 것이기 때문에 휨부재의 형태와 높이(rise)를 변화시키는 것이 휨응력의 직접적인 변화요인이 된다.

휨부재의 형태를 변화시킴에 있어서 가장 효율을 얻을 수 있는 방법은 힘의 연력도 형을 따르는 것일 것이다. 직선형의 보와 산형보, 아치형의 들림형 보



〈그림 4〉 보의 형태와 부재응력의 관계
 M ; 보의 모멘트, N ; 보의 축력, Tp ; 스트링 장력

〈표 1〉 들림형 보구조의 사례

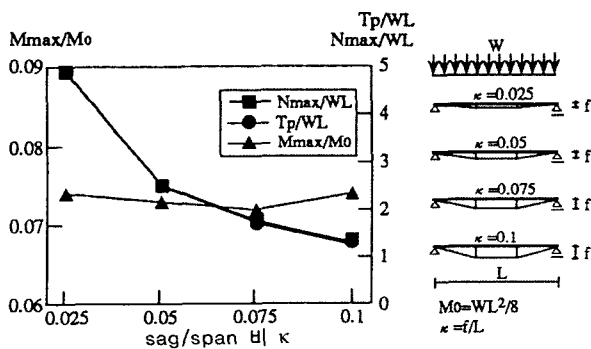
건물명	구조입면형상 (Non Scale)	스팬 (m)	휨 재	스트링	뜯지주 (본수)	rise비	Sag비
고요건설실험동		22	$\phi 318 \times 10.3$	$\phi 25$	3	0.134	0.063
야마나시학원 시드니기념 수영장		27	H-340×250×9×14	2- $\phi 35.5$	5	-0.04	0.06
군마사회복지대 체육관		29	H-340×250×9×14	$\phi 46$	2	0.09	0.03
이와테야마 중학교		36	H-594×302×14×23	2- $\phi 48$	4+D	0	0.069
호리노우치 초립체육관		38	W700 집성재단면	2- $\phi 32$	4+D	0.07	0.07
사카타시 국채기념관		41	H-588×300×12×20	2- $\phi 32$	3	0.075	0.025
기타큐슈 아노 돔		45	H-650×350×16×28 와 집성재의 합성보	2- $\phi 28$	3	0.045	0.066
아키타체육관		55	W2-220×1000 집성재단면	2- $\phi 53$	4+D	0.05	0.05
일본대 이공스포츠홀		58	상 $\phi 267.4 \times 9.3$ 하 $\phi 267.4 \times 5.8 (d=2.0)$	$\phi 58$	2	0.069	0.034
유메멧세 미야기		61	H-900×300×16×28	$\phi 58$	4	0.06	0.04
아오야마학원 스모관		65	상1- $\phi 267.4$ 하1- $\phi 267.4 (d=2.5)$	2- $\phi 75$	8	0.086	0.022
우라야시 수영장		66	상H-400×300시리즈 하H-250-250시리즈 d=2.1	2- $\phi 58$	1	0.08	0.04
시즈오카 에코파아리나		72	H-1000시리즈	$\phi 42$	5+D	0.055	0.03
서일본 충전시장		75	상2- $\phi 318.5$ 하1- $\phi 165.2 (d=2.5)$	$\phi 85$	2	0.03	0.06
그린돔 마에바시		122	상H-400×408×21×21 하H-400×408×21×21d=2.5	2- $\phi 42$	2	0.073	0.03
이즈모돔		140	2W-914×273 집성재	$\phi 36$	8	0.35	-

구조거동을 조사한 기존 연구에 의하면(<그림 4>6), 산형과 직선형의 경우보다 연력도형인 아치형의 보를 가진 경우 응력에서 이점이 있는 것을 보이고 있다. <표 1>에 보인 사례들에서도 다수의 대공간 사례에서 아치형의 보가 사용되고 있는 것을 알 수 있다.

부재의 휨응력의 변화는 당겨 들어 올리는 스트링의 설정깊이(sag)에 의해서도 변화하는데, 보에서 인장측 팔길이 효과와 같은 맥락으로 깊이가 깊을수록 적은 양의 장력으로 들림효과를 얻게 된다. 기존연구7)에 의한 <그림 5>의 그래프를 보면 sag/span비인 κ 에 따라 보의 축력과 케이블의 장력계수가 현저하게 줄어드는 것을 볼 수 있는데, κ 값이 0.05이상이 되면 부재력의 값이 급격히 증가하고 0.1이하가 되면 깊이증가에 대한 효율이 떨어지는 것을 알 수 있다. 따라서 κ 값은 0.05~0.1사이가 합리적이라는 것을 알 수 있는데, 표 1에 나타난 사례에서도 0.06~0.07의 범위가 다수 나타나고 있는 것을 볼 수 있다.

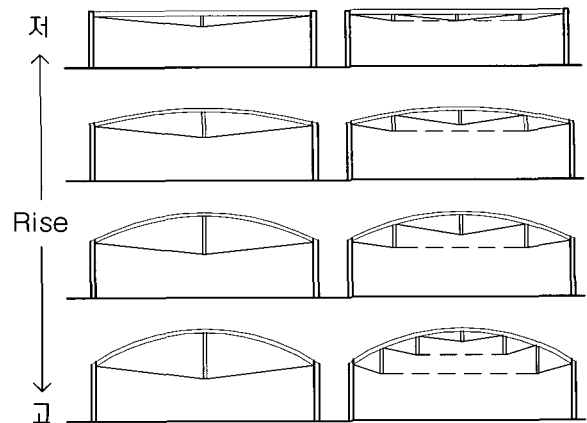
입면높이(rise)와 깊이(sag)의 영향은 내부공간의 체적과 공간감에 영향을 많이 미치기 때문에 구조적 요건외에도 여러 설계조건을 고려하여 결정되어야 할 요소라고 생각된다.

특히, 넓은 공간에 대한 대응으로써 아치의 높이를 증가시킬 경우 기존방식의 뜬지주를 사용할 경우 구조부분의 공간이 커지고 천정고가 낮아지는 등, 기능적 공간적 구조적 합리성이 부족하게 된다. 들림형 보의 스트링을 후프로 구성할 수 있는 경우



<그림 5> Sag/Span 비와 부재응력의 관계

6) 徐蕾, et. al., '張弦梁構造の軀體數量と軀體コストに関する研究', 日本建築學會講演概要集, 1996. 09, pp.861- 862.
7) 徐蕾, et. al., 앞 논문.



기본 들림형 보 다단식을 통한 천정고확보

<그림 6> 다단식 들림형 보의 전개

에는, <그림 6>과 같이 기본적인 들림형에서 출발하여 다단식 들림형 보로 고안될 수도 있다.8) 이 방식은 후프스트링을 이용하여 상부방향으로 들림형 보를 복수조합하는 방식으로 중앙부의 천정고를 줄여 사용가능한 내부공간의 체적을 증가시키는 것이 가능하다.

4.2 평면배열구성

들림형 보구조는 인장재에서 발생하는 인장추력이 상부에 있는 휨재에서 압축력으로 흡수되기 때문에, 상부구조자체가 독립적으로 구성되는 자체정착식 구조시스템이다. 따라서 인장구조의 정착으로 인해 하부에 특정구조의 구성이 요구되지 않으며, 평면구성에 제한이 없다는 이점이 있다.

그러므로 들림형 보구조는 건축의 용도와 기능에 따라 주어지는 평면형태에 자유롭게 적용될 수 있는데, 일반적인 평면배열은 1방향과 2방향, 방사형으로 방식으로 구성된다.

<표 2>에서 사례를 살펴보면 다양한 평면배열구성이 나타나고 있는데, 그중 1방향배열이 다수 사용되고 있는 것을 알 수 있다. 스패인 30m를 초과하는 대공간구조의 경우는 주 스패에 대한 부 스패의 간격이 1/10미만에 해당하는 1방향배열로 구성되고 있다. 이는 들림형 보구조의 조립, 장력도입 등에

8) 森田明, et. al., '低ライズ多段式張弦梁構造の力学特性に関する研究', 日本建築學會講演概要集, 1995. 08, pp.793-794.

〈표 2〉 들림형 보구조 사례의 평면형식

건물명	주스팬 (m)	부스팬 (m)	형식	평면형
고요건설 실험동	22	8.8	1방향	
야마나시 학원 수영장	27	6		
군마복지대 체육관	29	5.7		
이와데야마 중학교	36	3.5		
호리노우치 초립체육관	38	3		
아키타 체육관	55	6		
일본대 이공스포츠홀	58	5.3		
유메멧세 미야기	61	6		
시즈오카 에코파아리나	72	6.6		
서일본총 전시장	75	9		
사카타시 국채기념관	41	3	1방향	
기타큐슈 아노돔	45	9		
아오야마학원 스모관	65	-	1방향 (수평 곡률)	
우라야시 수영장	66	6	1방향 + 2방향	
그린돔 마에바시	120	9	1방향 + 방사형	
이즈모 돔	140	-	방사형	

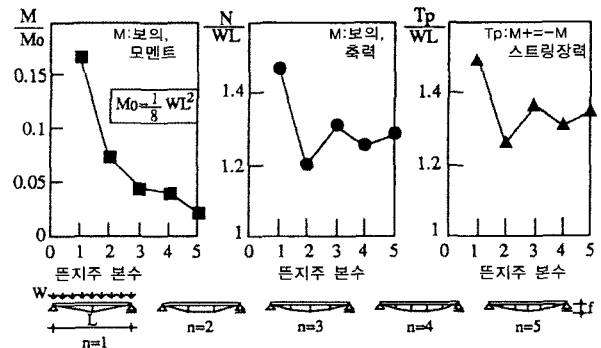
있어 1방향구성이 용이하기 때문으로 보이며, 대공간건축에서 요구되는 평면형이나 공간형과도 밀접한 관계가 있다고 본다.

원형의 평면형의 경우 사용되는 방사형 배열은 방사형의 특성상 뜬지지군이 원형의 링을 구성하므로 후프스트링을 구성하여 돔 거동을 보일 수 있다. 또한 <표 2>의 그림에서 보인 것처럼 1방향형식과 방사형의 배열은 하중분포가 변화하게 되는데, 이에 따른 들림형 보의 구조거동은 방사형의 경우가 1방향의 경우보다 동일한 최대모멘트 값을 갖게 하는 PS장력은 약 30% 감소하나 휩재의 모멘트 값은 약 20%증가하는 변화를 보인다.9) 그러므로 그린돔 마에바시처럼 복잡한 평면배열을 가진 경우에는 구조거동의 차이에 따른 구조전체의 발란스가 고려되어야 할 것이다.

4.3 뜬지주의 구성

들림형 보에서 뜬지주(Strut)는 휩재의 중간지지점의 역할을 하는 부재이다. 뜬지주의 본수에 따른 휩재응력의 변화는 동일한 조건에서 뜬지주 수를 변화시켜 구조의 거동을 살펴 본 <그림 7>에서 살펴볼 수 있다. 본수가 늘어날수록 휩모멘트는 감소하며 휩재의 축력은 처짐(f)를 가진 스트링부재의 수평반력치인 $1.25\omega l (= \omega l^2/8)$ 에 가까워져, 뜬지주의 수가 늘어날수록 서스펜아치구조와 같은 양상이 되어 휩부재가 아니라 축력구조의 거동을 보이게 됨을 알 수 있다.10)

이와 같이 다수의 뜬지주가 사용될 때는 휩재가 축력부재화되어 응력상 이점이 있지만, 뜬지주의 소요량과 하부스트링과의 접합개소가 증가하는 것



〈그림 7〉 뜬지주 본수와 들림형 보의 응력변화

9) 齋藤公男, '放射型張弦梁構造の構造計書に關する一考察', 日本建築學會講演概要集, 1988. 10, pp.1365-1366.
10) 徐蕾, et. al., 앞 논문.

이 전체적인 구조비용증가의 원인이 되기도 한다. 특히 뜬지주의 수가 하나에서 두 개로 늘어날 때 예와 스트링의 응력이 대폭 감소하므로, 2본 뜬지주 구성의 효율이 높은 것을 알 수 있다.

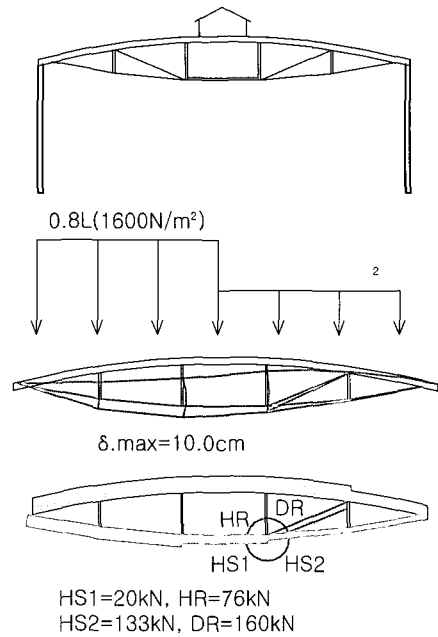
사례역시 유사한 스펜범위에서도 뜬지주의 수나 형식이 다양한 것을 알 수 있으며, 다수의 사례가 앞서 기존연구를 살펴본 바와 같이 구조적으로 합리적인 수준의 2-4개의 뜬지주를 사용하고 있는 것으로 보인다.

한편 현수형 보의 하부에 케이블을 부착하기 위해 5개의 뜬지주를 사용한 야마나시학원 수영장이나, 평면적으로도 곡률을 가진 보의 발란스를 위해 여러 개의 뜬지주를 설치한 아오야마학원 스모관의 경우 등 특수한 예도 볼 수 있다. 그 외, 본 연구에서 언급하지 않은 다수의 사례에서도 많은 수의 뜬지주를 사용한 예를 볼 수 있는데, 들림형 보구조의 뜬지주 본수의 설정은 구조능력의 증대만을 목적으로 하고 있지는 않는 것으로 생각되며, 대부분 뜬지주는 내부에 드러나는 경우가 많아, 넓은 공간의 내부공간 감에 미치는 영향도 고려되고 있는 것으로 보인다.

또한 뜬지주사이에 대각선 부재를 삽입하여 구조기능을 높이는 방식도 관찰된다. 대각선부재는 불균형 부가하중의 작용에 있어 부재력을 발휘하며(<그림 8>참조) 변형을 제어하는 효과를 가진다.¹¹⁾ 사례에서는 이와데야마중학교나, 호리노우치 초립체육관, 아키타체육관 등에서 사용된 것을 볼 수 있는데, 이들 사례는 모두 상당한 적설하중을 부가하중으로 고려해야하는 적설지역의 사례들이다. 아키타체육관을 예로 살펴보면 그림 8과 같이 불균형 적설하중의 작용시 대각선부재에 응력이 발생하며 케이블의 부담이 줄어드는 효과를 가진다. 이처럼 기본적인 들림형 보구조의 웹부분에 추가강성을 확보할 수 있는 부재구성이 고안될 수 있다.

4.4 부가하중에 대한 구성

들림형 보구조는 기본적으로 고정하중에 대한 구

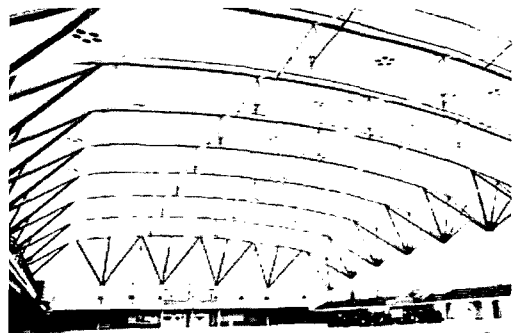


<그림 8> 아키타체육관의 적설하중에 대한 대각선 부재의 거동

조효율이 높은 구조방식이다. 추가되는 부가하중이 크게 영향을 미치는 경우, 예를 들면 큰 적설하중이



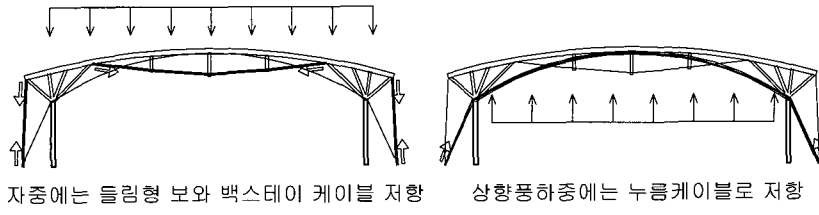
누름케이블에 의한 요철이 있는 외부형태구성



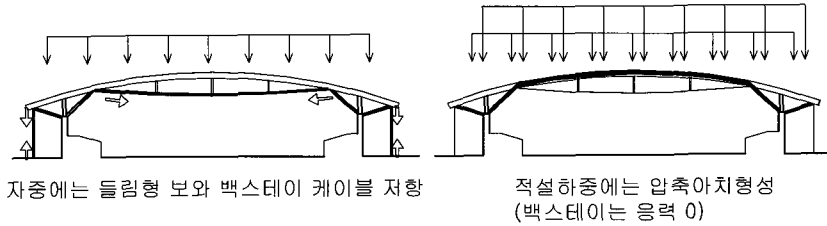
들림형보와 브라켓에 의한 내부공간

<사진 1> 기타큐슈 아노 돐의 외관과 내부

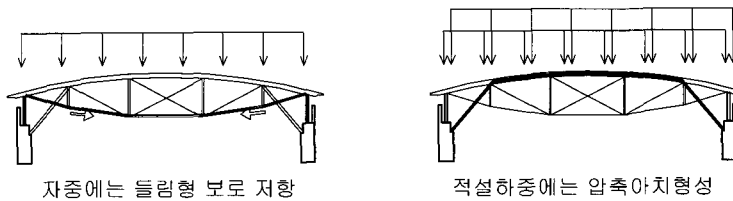
11) 城戸隆宏, et. al., '多雪地域における大断面集成材を用いた張弦梁構造の設計と施工', 日本建築学会講演概要集, 2004. 8, pp.929-930.



기타큐슈 아노 돔



사카타시 국채기념관



호리노우치 초림체육관

〈그림 9〉 부가하중에 대한 저항메카니즘

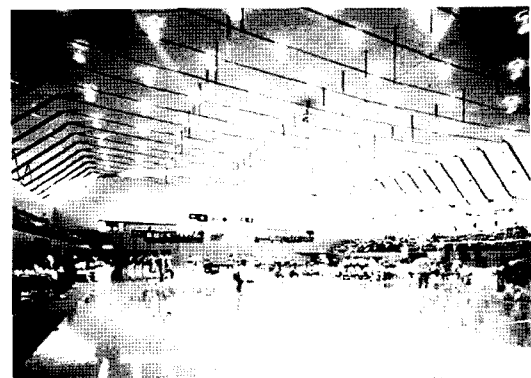
나 풍하중이 작용하는 경우, 부가하중은 들림형 보에서 상당한 부재응력으로 전적으로 감당하게 되는 것이 일반적이다. 따라서 부가하중이 매우 큰 대공간구조에서는 부재에 상당한 부담이 가해질 수 있는데, 부가하중에 대한 별도의 하중메카니즘을 형성하는 것이 구조효율을 높일 수 있다.

사례를 통해 살펴보면 기타큐슈 아노 돔의 경우는 풍하중에 대한 별도의 시스템을 구성한 예이다. 고정하중에 대해서는 브라켓위에 들림형 보가 있고 이를 외측의 백스테이 케이블이 잡아주는 구조방식이나, 바람의 상향 부가하중에 대하여는 막의 누름 케이블과 주두부분의 내풍용 백스테이가 형성하는 인장아치로 별도의 시스템으로 저항한다.(〈그림 9〉 참조) 이에 따라 아노 돔은 고정하중과 부가하중을 분산하여 구조효율을 높였으며, 동시에 구조부재가 독특한 외관과 내부공간을 형성하도록 고안되었다.

아노 돔과 유사한 구성을 가진 사카타시 국채기념관의 사례에서도 양 사이드의 브라켓과 백스테이 케이블이 들림형 보구조를 지지하고 있다. 고정하중

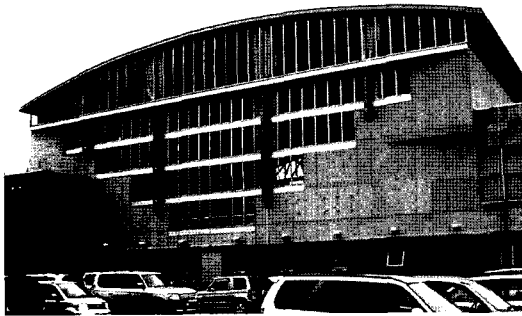


아치형 보와 백스테이 케이블로 구성된 외관

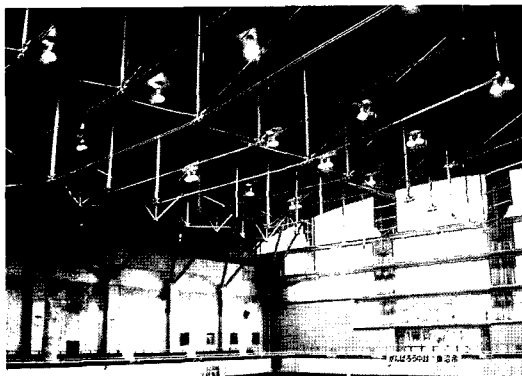


들림형보와 브라켓에 의한 내부공간

〈사진 2〉 사카타시 국채기념관의 외관과 내부



아치형 보와 백스테이 케이블로 구성된 외관



들림형보와 브라켓에 의한 내부공간

〈사진 3〉 호리노우치 초립체육관의 외관과 내부

시에는 백스테이 케이블에 큰 인장력이 발생하지만 적설하중시에는 지붕가구에서 추력이 발생하여 하부구조에 수평력이 작용하면서 보와 브라켓이 결합된 아치가 형성되어 새로운 하중메카니즘이 발생하고 백스테이의 인장은 감소한다.

호리노우치 초립체육관의 사례 또한 매우 적극적인 방법으로 부가하중에 대처한 경우라고 할 수 있다. 이 사례는 적설깊이가 3.5m이상으로 10kN/m² 이상의 적설하중을 고려하는 지역의 건축물이다. 고정하중에 대해서는 들림형 보가 저항하고 상당한 부가적설하중에 대해서는 측면에 있는 경사기둥부재와 대각선부재가 부담하는 것을 의도하고 있다. 양 측면의 경사기둥부재는 스패를 축소화하고 아치메카니즘을 이뤄 압축력으로 하중을 전달하는 역할을 하기 때문에(그림 9참조) 케이블의 인장부담이 1/4로 줄어들게 된다. 한편, 뜬지주 사이에 있는 대각선부재는 부등분포하중에 대한 강성보강을 목표로 하고 있다.¹²⁾

따라서 일련의 사례에서 볼 수 있는 것처럼 큰 부가하중에 의한 별도의 하중메카니즘을 고려함으로써 들림형 보구조의 효율을 높일 수 있으며, 또한 부가하중에 대한 휨재의 응력과 변형의 제어에 대한 구조계획은 의장과 시공법에도 영향을 미치는 인자가 됨을 알 수 있다.

5. 결 론

들림형 보구조는 휨재와 뜬지주, 스트링으로 조합되는 구조로서, 스트링에 PS력을 도입하여 휨재의 응력과 변형을 조절함으로써 구조능력을 높이는 구조방식이다.

기존의 연구와 실사례를 조사하여 들림형 보구조의 설계인자와 그 구조적 특성을 파악한 결과, 들림형 보구조의 계획에서는 고려되어야 할 주요 구성방식은 다음과 같이 요약된다.

1. 보의 형상 및 높낮이 그리고 스트링의 sag 설정은 들림형 보구조 설계의 중요한 설계요소이다. 보의 형상은 연력도형인 아치형이 유리하며, sag/span비가 커질수록 효율이 높은데, 0.05~0.1의 범위가 합리적이다. 휨재의 높이가 높아지면 내부공간의 확보를 용이하게 하는 단단식 들림형 보로 고안될 수 있다.
2. 들림형 보구조는 자체정착식 시스템이기 때문에 인장구조의 구성으로 인한 하부 평면형에 제한이 없어 자유로운 평면형을 구성할 수 있는 이점이 있다. 대공간의 사례에서는 주로 1방향 배열이 다수 나타나며 입체적인 힘의 분산을 가능하게 하는 방사형 배열이나 2방향 배열, 또한 구성될 수 있다.
3. 뜬지주 본수의 영향에 있어서, 구조적으로는 본수가 늘어날수록 이점이 있으며 뜬지주가 2개 설치될 때 효율이 높은 것으로 나타난다. 그러나 사례에서 나타나듯이 스트링과의 접합개소의 증가로 인한 시공적 문제와 내부공간의 기능, 형태 등을 포괄적으로 고려한 적절한 본수의 선정이 이루어진다. 또한 불균형하중에 대한 강성확보를 위해 대각선부재를 포함한 구성도 고안될 수 있다.
4. 고정하중에 대한 제어가 원활한 들림형 보구조

12) 伊藤博之, et. al., '多雪地域における木造複合張弦構造の

構造特性に関する研究', 日本建築学会講演概要集, 1996. 9, pp.851-852.

는 사례를 통하여 보인 것처럼 눈이나 바람 등 부가 하중에 대한 별도의 구조시스템을 구성함으로써 들림형 보구조의 부담을 적극적으로 감소시키는 구성 방식이 고려될 수 있다.

들림형 보구조는 스트링을 이용하여 PS력을 도입하여 구조능력의 향상이 용이한 구조이면서도 휨재를 이용한 자체정착시스템으로 건축물에 매우 높은 적용성을 가진 구조시스템이다. 적극적으로 활용하기 위해서 스트링 접합디테일이나 부재강성 설정방식 등 보다 세부적인 설계방안과, 적절한 PS도입을 위한 시공방안이 연구되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 사이토마사오저, 박찬수의 2인역, '건축 공간 구조 이야기', 기문당, 2005.
2. W. Schueller, "The Design of Building Structures", Prentice-Hall, 1995.
3. 박선우, '지붕구조 시스템', 세진사, 1999.
4. 皆川洋一 편집, '建築空間構造', オーム社, 2002.
5. 岡田章, '張弦梁構造の構造計画に関する研究', 日本大学博士学位論文, 1999.
6. 岡田章, '케이블구조의 계획', 建築技術, 1997. 01.
7. 徐蕾, et. al., '張弦梁構造の躯体数量と躯体コストに関する研究', 日本建築学会講演概要集, 1996. 09, pp.861-862.
8. 森田明, et. al., '低ライズ多段式張弦梁構造の力学特性に関する研究', 日本建築学会講演概要集, 1995. 08, pp.793-794.
9. 城戸隆宏, et. al., '多雪地域における大断面集成材を用いた張弦梁構造の設計と施工', 日本建築学会講演概要集, 2004. 8, pp.929-930.
10. 斎藤公男, '放射型張弦梁構造の構造計画に関する一考察', 日本建築学会講演概要集, 1988. 10, pp.1365-1366.
11. 伊藤博之, et. al., '多雪地域における木造複合張弦構造の構造特性に関する研究', 日本建築学会講演概要集, 1996. 9, pp.851-852.