

대공간 구조형식 분류체계에 관한 연구

A Research on the Classified Structural System in Long-Span Structures

양재혁*
Yang, Jae-Hyuk

Abstract

The objective of this paper is to help to make decision of the appropriate structural types in long span structured building due to range of span. For the intention, based on 7 forces of structural element, it is analyzed the relationships among 6 configurations of structural element(d/1), 25 structural types, 4 materials, and span-length known with 186 sample from 1850 to 1996.

- 1) bending forces: club(1/100~1/10), plate(1/100~1/10), rahmen(steel, 10~24m) simple beam(PC,10~35m)
- 2) shearing forces: shell(1/100~1/1000) hyperbolic paraboloids(RC,25~97m)
- 3) shearing+bending forces: plate, folded plate(RC,21~59m)
- 4) compression axial forces: club, arch(RC, 32~65m)
- 5) compression+tension forces: shell, braced dome shell(RC, 40~201m), vault shell(RC, 16~103m)
- 6) compression+tension axial forces: rod(1/1000~1/100), cable(below 1/1000)+rod, cable+rod+membrane(below 1/1000), planar truss(steel, 31~134m), arch truss(31~135m), horizontal spaceframe(29~10 8m), portal frame (39~55m), domical space truss(44~222m), framed membrane(45~110m), hybrid membrane (42~256m)
- 7) tension forces: cable, membrane, suspension(60~150m), cable beam(40~130m), tensile membrane(42~136m), cable -stayed(25~90m), suspension membrane(24~97m), single layer pneumatic structure(45~231m), double layer pneumatic structures(30~44m)

keywords : long-span structures, force, element, material

1. 서 론

1.1 연구의 배경과 목적

대공간 건축은 용도상 내부공간이 분할될 수 없는 단일공간을 수용하는 장스팬 건축이다. 대공간 건축은 고대 및 중세에는 대형분묘 및 신전과 성당 등 종교건축, 그리고 근대 이후에는 철도 역사와 박람회장, 비행선과 비행기 등의 격납고, 그리고 현대에는 체육관, 컨벤션홀, 공항 등 초대공간을 비롯하여 전시시설, 종교시설 등 많은 사람들이 이용하고 있는 공공시설물로서 도시를 구성하는 매우 중요한 기능적, 상징적, 시각적 인자로 작용하고 있다. 최근에는 국내에도 경제발전에 따른 여가활동과 여가시간의 증대로 인해 외부환경요인들에 관계없이 풍요

롭고 쾌적한 스포츠, 레포츠, 전시시설 등을 충족하는 대형 공간 건축에 대한 수요가 증가하고 있으며, 그 용도와 규모가 복합 다기능화, 다양화, 거대화되고 있다. 대공간 건축은 고대부터 현대까지 각 시대 별로 생산된 구조재료와 구조형식 그리고 조립, 시공기술 등에 의한 건축공학기술의 총체적인 결과물이다. 또한 주요 구조재료와 부재의 조인트 등의 직접적인 표현과 더불어 구조의 응력 흐름 형태가 디자인 형태에 표현되는 등 구조와 디자인이 상호 결합된 전형적인 건축물로 발전되어 왔다. 이처럼 대공간 건축은 구조의 비중이 크며, 또한 특수 구조물로서 전문성이 매우 강하기 때문에 대공간을 디자인 할 때 초기 디자인 단계에서 구조형식별로 적용되는 스패 규모, 경제성, 시공·조립성, 유지·관리성 등 구조계획을 지원하는 체계적인 자료가 필요하다.

본 연구는 이상의 항목 중에서 근대 이후의 대공

* 정회원 · 동의대학교 건축학과 조교수

간 구조형식들을 분류 및 체계화하며 이를 토대로 구조형식별 각 사례들을 수집하여 발전과정을 고찰하고 스캔 규모를 분석함으로써 초기 디자인 단계에서 구조형식을 결정하는 지원 자료를 제시하고자 한다.

1.2 연구의 방법 및 범위

기존의 구조형식 체계는 일반적으로 부재의 응력 및 구조체의 형상 등의 측면에서 구조형식을 분류하고 있다.¹⁾ 하지만 이러한 응력과 구조체의 형상에 의한 분류는 대공간 건축의 초기 디자인 단계에서 구조재료와 구조형식 간에 상호 관련적인 정보를 제시하고 있지 못하고 있으며, 또한 부재 재료와 부재 형상은 특정한 응력들을 부담으로 고유의 구조형식을 창출하는 주요 인자가 될 수 있는 점을 간과하게 된다. 따라서 본 연구에서는 구조체를 구성하는 부재를 중심으로 부재의 주응력 외에, 부재를 구성하는 구조재료, 그리고 부재형상들을 조합하여 구조형식들을 분류하였다.

분류된 구조형식별로 스캔 규모를 분석하기 위해 1850~1995년까지 추출된 186개의 사례들 중에서 1955년 이후인 경우에는 Architectural Record (1955~1995), Progressive Architecture(1960~1995), Engineering News Record(1957~1995) 등의 건축 전문 잡지에서 추출하였고 1955년 이전의 사례들과 1950년 이후 누락된 자료들은 단행본 서적인 Architecture in the twentieth century(P.Grossel, 1994), Supersheds (C.Wilkinson, 1991), 20th Century Architecture (D.Sharp, 1991), Membrane Structures in Japan (K.Ishii, 1995), Encyclopedia of Architecture Technology (P.Guedes, 1979), Horizontal-span building structures (W.Schueller, 1983) 등에서 추출하였다.

2. 대형 공간 구조형식의 분류 체계

건축물의 구조는 각 구조형식별로 하중 및 외력

1) Heinrich Engel(Structure System, 1981)는 구조체 내의 응력을 휨응력, 압축과 인장의 축력의 조합, 압축 축력, 인장 축력, 면응력 등으로 구조시스템을 분류하였다.

Angus J. Macdonald(Structure and Architecture, 1994)는 구조의 형상과 효율성을 검토하여 Non-form-active, Semi-form-active, Form-active 등으로 구조시스템을 분류하였다.

의 작용에 대응하여 지지체의 반력을 유발시키는 부재 내의 응력이 서로 상이하다. 그러므로 각 구조들은 부재 내의 응력들, 즉 휨력, 압축력, 인장력, 전단력 등에 의해 분류가 가능하다. 한편 부재에 사용되는 재료별로 응력별 강도가 한정되어 있고 부재형상 가능범위도 한정되어 있으며 또한 부재는 형상별로 부담 가능한 응력의 범위가 한정되어 있다. 이처럼 구조형식은 부재 내의 주응력과 부재에 사용된 구조재료와 부재형상 등이 서로 맞물려 자립하고 있다. 따라서 본 연구에서는 이들 3자간의 상관관계를 토대로 구조형식을 분류하고자 한다.

2.1 부재형상과 주응력간의 상관관계

부재의 응력을 세분화하면 인장력과 압축력의 축력, 휨력, 전단력 등의 응력들이 독립적으로 혹은 2가지 이상이 조합되어 인장축력, 압축축력, 인장축력+압축축력, 휨력, 전단력, 압축축력+휨력, 휨력+전단력, 전단력+인장축력, 전단력+압축축력, 인장축력+휨력+전단력, 압축축력+휨력+전단력 등을 포함하여 이론상으로 15종류의 응력들이 조합될 수 있다.

부재의 형상은 크게 선재와 면재로 구분되는데, 이를 재료의 춤(d)에 대한 길이(l)의 비율에 따라 세분화 할 수 있다. 선재의 경우 d/l의 비율이 1/1000 이하를 索이라 하고 1/1000~1/100 정도를 骨이라 하며, 1/100~1/10의 비율은 棒이라 일컫는다. 면재의 경우도 마찬가지로 1/1000 이하를 膜이라 하고 1/1000~1/100을 殼이라 하며, 板은 1/100~1/10 정도를 일컫는다.

선재는 독립적으로 혹은 그 조합에 의해 索, 骨, 棒, 索+骨, 索+棒, 骨+棒, 索+骨+棒 등 7가지로 구분된다. 면재도 마찬가지로 膜, 殼, 板, 膜+殼, 膜+板, 殼+板, 膜+殼+板 등 7가지로 구분된다.²⁾ 그리고 이들을 포함하여 선재와 면재가 조합될 때 이론상으로 63종류의 조합이 가능하다.

한편, 각 부재형상과 주응력간의 관계를 살펴보면, 索과 膜은 인장력, 骨과 殼은 압축력과 인장력, 약간

2) 물론 索+骨+膜 경우처럼 선재와 면재가 결합된 복합구조(Hybrid Structure) 시스템이 있지만, 주요 응력을 전달하는 재료에 우선 순위를 두어 선재계와 면재계 2가지로 분류하였다.

의 휨력, 樑과 板은 휨력, 그리고 殼과 板은 전단력 등을 주응력으로 한다. 한편, 선재가 춤/스팬의 비가 0.5 이상이 되면 전단력이 탁월해지지만 춤/스팬비 0.5 이상의 부재는 면재가 되므로 전단력은 선재에서는 존재하지 않고 殼, 板 등의 면재에서만 존재한다.

2.2 구조재료의 종류별 적용가능 부재형상과 주응력의 범주

2.2.1 집성목재

인공목재 중에서 대공간 건축에 주로 사용되는 구조재료는 구조용 큰 단면 집성재이다. 집성재는 자연목재가 갖고 있는 미려한 외관과 더불어 임의 치수와 형상을 만들 수가 있으므로 설계의 자유도가 크다. 그리고 자원 활용도가 높고 부재의 규격화, 공업화가 가능하므로 가공성 및 작업성이 높다. 대단면으로 하면 내화성을 가지며³⁾ 제재판에 방부처리를 함으로써 내구성이 높아지는 장점을 갖고 있다.

집성재는 압축강도 615kg/cm², 인장강도 670kg/cm² 등의 균질한 강도를 갖고 있다. 집성재는 높은 인장강도를 요구하는 索과 膜 부재에는 부적합한 반면, 인장축력과 압축축력을 교대로 사용하는 骨, 인장력과 압축력을 조합하여 면응력으로 사용하는 殼, 압축력과 휨력을 사용하는 樑, 전단력을 사용하는 板의 부재에 적합하다.

2.2.2 철근 콘크리트

철근 콘크리트는 강도에 비해 자중이 무거워 효율적인 구조재료는 아니지만 내화성, 내구성, 내진성이 뛰어나며, 조소성이 뛰어난 구조물을 취할 수 있다. 또한, 시공 시에 특별한 숙련을 요하지 않으며, 비교적 값이 싸고 유지비가 거의 들지 않는 등 경제적이므로 20세기 중후반까지 PC공법으로 대공간 구조물에 널리 사용되었다. 그러나 큰 자중, 건축 수축에 의한 균열, 긴 시공기간, 불확실한 품질관리 등의 요인으로 최근에는 대공간 구조물에서 거의 사용되고 있지 않다.

일반 철근 콘크리트의 압축강도는 240kg/cm²이며,

인장강도는 압축강도의 8~14%에 불과하므로 인장축력을 주응력으로 하는 索과 膜, 압축축력 외에 인장축력도 사용하는 骨에는 부적합하며, 압축력과 휨력이 적용되는 선재계의 樑, 면내력이 적용되는 면재계의 殼, 板 등의 재료형상을 가진다. 한편, 강재와 콘크리트의 부착력이 뛰어난 프리스트레스트 콘크리트는 인장강도가 강화되어 선재계의 骨에 적용이 가능하다.

2.2.3 강재

철은 18세기와 19세기 초반에 주철이, 19세기 후반과 20세기 초반에 강철 등이 대공간 구조재료로 널리 사용되었다. 그 후 철근 콘크리트의 조소성에 관심을 많이 가진 구조 디자이너의 외면으로 사용되지 않다가 2차대전 이후 신속한 전후 복구와 대량 건설에 적합한 부재의 규격화, 표준화, 공업화, 짧은 공사기간 등의 장점이 새롭게 주목받아 다시 대공간 건축물에 널리 사용되고 있다.

강재 중에서 주철은 주조물로서 조소성이 뛰어나지만, 대단면일 경우 부재 내부의 냉각율의 차이로 인해 강도가 불균질하며, 탄소 함유량이 많아 인장강도(1400kg/cm²)는 압축강도(6600kg/cm²)보다 상당히 낮고 연성이 낮으므로 주철은 압축력을 받는 樑의 형상에 적용되었다.

강철은 1854년 Bessemer제강법 등의 개발로 대량 생산 되었으며, 주철의 단점인 인장력을 개선하고 탄성력을 확보하며, 강도의 불균질성을 없앴다. 또한 강철은 높은 연성을 가지므로 재결정 과정을 거치지 않는 냉압연을 통해 고강도의 와이어를 만들 수 있다.

강재는 압축강도와 인장강도가 약 5000kg/cm² 내외, 강재 케이블은 인장강도가 20,000kg/cm²의 매우 높은 강도를 가지므로 선재계의 索, 骨 樑 등에 적용되고 있는 반면, 면재계의 경우 膜, 殼, 板 등이 가능하지만 국부좌굴의 염려와 더불어 경제적인 대체 재료가 많아 아주 예외적인 경우를 제외하고 거의 적용되고 있지 않다.⁴⁾

3) 탄화속도가 0.6mm/분이므로 내화피복을 하지 않고 내화구조로 사용 가능하다.

4) Physical Education Complex (span:90.9m, 1979년)은 공기막 구조로서 막재 대신 스테인레스 강판 슈트를 사용하였다.

2.2.4 막재

막재는 경도가 약해 물리적 파손에 취약하고, 조소성과 의장성이 다소 결핍되지만, 공장에서 가공재단이 되어 현장에서 조립 설치되므로 막재 주문 후 조립 설치까지 약 3개월가량의 짧은 공기의 장점과 함께 임시 가설물과 약 120m이상의 장스팬을 갖는 장기 구조물의 경우 타 재료에 비해 경제적이다. 막재는 역학적 특성을 담당하는 섬유재와 내구성, 내후성을 담당하는 피복재로 구성되어 있다. 섬유재는 유리섬유포, 피복재는 염화비닐 코팅, 실리콘 코팅, 4불화 에틸렌 코팅 등이 주로 사용되고 있다.

염화비닐 코팅 유리 섬유포는 절곡성이 좋고 가격이 저렴한 반면(공정포함 90,000~120,000원/m², 96년)에 내후성, 투광성, 내구성(4~6년)이 떨어져 임시 가설물에 사용되고 있다. 4불화 에틸렌 코팅 유리 섬유포는 피막이 단단하여 절곡성과 흡음성이 떨어지므로 곡률이 큰 돔에 제한적인 사용과 음향처리 문제, 상대적으로 비싼 가격(공정포함 450,000~500,000원/m², 96년) 등의 단점을 갖고 있지만 투광성, 내구성(25년), 防汚性 등이 탁월하므로 장기 구조물에 널리 사용되고 있다.

막재는 인장강도 35,000kg/cm²(fiber glass01) 인장비강도가 7,700~19,230으로서 자중에 비해 인장강도가 타 재료보다 훨씬 높아 구조 효율성이 매우 좋은 재료이다. 한편, 인장력만을 받으므로 선재계의 索, 면재계의 膜에 적용되며, 이 중에서 膜이 주요 구조재료로 사용되고 있다.

이상의 각 재료들의 최대 인장강도, 최대 압축강도, 적용 부재형상 등을 <표 1>에서 비교하였다. <표 1>에서 알 수 있듯이 목재는 인장강도와 압축강도가 우수하나, 인장강도가 그리 높지 않아서 인장력 단독으로 사용되는 索, 膜의 형상에는 적용되고 있지 않으며, 인장력과 압축력을 주응력으로 하는 骨, 殼 등과 휨력을 주응력으로 하는 棒, 板 등의 부재형상에 적용되고 있다. RC는 압축력을 받는 콘크리트와 인장력을 받는 철근의 부착력이 약하므로 인장력을 주응력으로 하는 索과 膜의 형상과 압축력과 인장축력을 사용하는 骨의 형상에도 부적합하고 압축

력과 휨력을 받는 棒 형상에 적용되고 있으며, 또한 면내력이 적용되는 殼, 板 등에 적용되고 있다. 강재는 면재에도 적용 가능하나 타 재료에 비해 경제성이 떨어지므로 주로 선재인 형강으로 대량 생산되고 있다. 강재 중에서 주철은 연성이 떨어지고 인장강도가 약하므로 인장력을 주응력으로 하는 索의 형상에는 적용되고 있지 않으며, 주로 압축력과 휨력을 받는 棒의 형상에 적용되고 있다. 강재는 연성이 우수하고 인장강도, 압축강도 등이 매우 높아 索, 骨, 棒 등의 형상에 모두 적용되고 있다. 강재 케이블은 압축강도가 거의 없으며 인장강도가 매우 높아 인장력을 주응력으로 하는 索 형상에 적용되고 있다. 막재는 압축강도가 거의 없는데 반해 인장강도가 매우 높으며, 형상 재단성이 매우 좋으므로 인장력을 주응력으로 사용하는 膜의 형상에 주로 적용되고 있다. 막재는 경도가 약해 물리적으로 파손 가능성이 크므로 소규모 임시 가설물 외에는 索 형상에 적용되고 있지 않다.

<표 1> 구조재료별 비중, 강도 및 부재형상 비교

재료	성질	비중	최대강도 (kg/cm ²)		비강도 (강도/비중)		부재형상
			압축	인장	압축	인장	
목재	집성목재	0.5	615	670.5	1230	1341	骨, 棒 殼, 板
콘크리트	일반	2.3	240	30	104	13	棒 殼, 板
	고강도		360				棒 殼, 板
	프리스트레스트		350 이상				骨, 棒 殼, 板
강재	주철	7.5	6600	1400	880	187	棒
	강철	7.8	5000	5000	640	640	索, 骨, 棒 (膜, 殼, 板)
	고강도강	7.8	7000	7000	900	900	索, 骨, 棒 (膜, 殼, 板)
	Cable Wire	7.8		20000		2500	索
막재	fiber glass05	2.6		10000		3846	索 膜
	fiber glass01	2.6		35000		13460	(索) 膜

5) Taiyo Kogyo Co. Permanent Membrane Structures, 1993

최근의 대공간 건축의 경우, 구조재료는 부재의 체적이 작고, 강도에 비해 자중이 가벼워 비강도가 높으며, 공장 생산되어 조립 시공성이 뛰어난 강재, 강재 케이블, 막재 등이 적용되고 있다. 또한 집성재는 강도가 위 재료들에 비해 다소 낮지만, 이상의 장점들 외에, 의장성이 좋고 자연친화적인 성격을 갖고 있어 최근에 일본, 유럽을 중심으로 대량 건설되고 있다.

2.3 부재의 주응력별 대공간 구조형식 분류

15개의 주응력별, 63개의 재료 형상별 조합에 대공간의 구조형식을 분류하면, <표 2>, 및 <그림 1>과 같이 분류되었다. <표 2>에서 알 수 있듯이 대공간에서 사용되고 있는 주응력의 종류는 인장축력, 압축축력, 휨력, 인장+압축 축력, 인장+압축 면응력, 전단력, 휨력+전단력 등 7개이다. 이는 구조효율성 관점에서 휨력과 전단력은 효율성이 낮아 휨+전단력 외에는 다른 응력과 조합되어 나타나지 않고 있

기 때문이다. 재료형상의 종류는 索, 骨, 棒, 索+骨, 索+棒, 骨+棒, 膜, 殼, 板, 索+骨+膜 등 10개로 압축되고 있다. 이는 면재의 경우 타 면재와의 결합부에서 문제가 발생하므로 면재간의 결합이 용이하지 않기 때문이며, 재료의 자중과 구조효율성으로 인해 붕괴 각, 판 등을 조합하는 재료형상은 사용하지 않기 때문이다. <표 2>에 기술되었던 구조형식들을 응력별로 자세히 살펴보면 다음과 같다.

2.3.1 주응력 - 인장축력

索과 膜은 인장력만을 부담하고 좌굴이 없기 때문에 단면을 최대한 사용할 수 있으므로 재료형상 중 최고의 효율성을 갖고 있다. 대공간 구조에서 索과 膜의 형상에 적용 가능한 재료는 각각 강재 케이블, 막재 등이다.

1) 索(S1계) - 강재 케이블 : 사장구조, 현수구조, 케이블보, 인장박막구조

索으로 구성된 구조형식들은 인장력만을 받는 케

<표 2> 선재계와 면재계의 주응력과 부재형상별 구조형식의 분류

재료형상	索	骨	棒	索+骨	骨+棒	索+棒	索+骨+棒	索+骨+膜	膜	殼	板	膜+殼	殼+板	膜+板	膜+殼+板
기호	S1	S2	S3	S1+S2	S2+S3	S1+S3	S1+S2+S3	S1+S2+M1	M1	M2	M3	M1+M2	M2+M3	M1+M3	M1+M2+M3
출/길이비	1/1000	1/100	1/10	1/1000~1/100	1/100~1/10	1/1000~1/10	1/1000~1/10	1/1000~1/100	1/1000	1/100	1/10	1/1000~1/100	1/100~1/10	1/1000~1/10	1/1000~1/10
주응력	인장	케이블넷, 사장, 현수	-	-	-	-	-	-	현수막	-	-	-	-	-	-
	압축	×	-	이 치 절보	×	-	×	×	×	-	-	×	-	×	×
	인장+압축	×	트러스 스페이스 프레임	-	Tensegrity 장현 트러스 보우빔	타이드 아치	-	하이브릿막	×	구형셀 볼트셀	-	-	-	-	-
휨	×	×	라멘	×	×	×	×	×	×	×	평판	×	-	-	-
전단	×	×	×	×	×	×	×	×	×	쌍곡포물선 셀	벽보	-	-	-	-
축력, 휨	×	×	경사기둥 라멘	×	트러스+보	×	×	×	×	×	곡판	×	-	-	-
휨, 전단	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	절판 구조	×	-	-	-
전단, 축력	×	×	×	×	×	×	×	×	×	-	벽보	-	-	-	-
축력, 휨, 전단	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	벽라멘	×	-	-	-

<출처> 양재혁, 대형공간 건축 구조 발전에 관한 연구, 연세대학교 박사논문, 1996, P36~37

- : 존재할 가능성은 있지만 구조효율성이 낮아 실현되지 않았거나 아직 발견되지 않은 구조형식.

× : 존재하지 않음 → 선재계에서는 전단력이 존재하지 않음.

인 장					압 축	
	사장구조	현수구조	케이블넷(케이블보)	케이블넷(인장막막구조)		
인장축력 + 압축축력					휨+전단	
	단일층공기막	현수막	이중층공기막구조	튜브구조		
인장축력 + 압축축력						
	보트러스 스페이스프레임	포털프레임	아치트러스	지오데식 돔		
인장+압축						
	볼트 셸	라멜라돔 셸	교차 셸	자유형 셸		
휨					전단	
	라멘구조	단순 보구조				

〈그림 1〉 대공간 구조형식 도해

이블을 보, 캔틸레버 등에 직선의 형태로 사장시키는 사장구조(Cable-Stayed), 현수된 케이블로 각 부재에 걸리는 하중을 감쇠하는 현수구조(Suspension), 케이블 넷트를 보처럼 작용케 하는 단일층/이중층 평행, 단일층/이중층 방사형 등의 케이블 보(Cable Beam), 그리고 지붕 외에 벽면도 케이블 넷트로 형성하는 케이블인장막구조(Prestressed Tensile Membrane) 등이 있다.

2) 膜(M1계) - 막제

: 현수막, 단일층 공기막, 이중층공기막

膜이 1차부재, 索이 2차부재로 구성된 막 구조형식들로서 주응력을 담당하는 1차부재인 膜계로 분류하였다. 막 구조형식은 현수막 구조, 골조막 구조, 하이브리트막 구조 등의 비공기막 구조(Non-Phneumatic Structure)와 단일층 공기막 구조, 이중층 공기막 구조 등의 공기막 구조(Phneumatic Structure)로 크게 구분된다.

현수막 구조는 텐트처럼 막면내에 초기 장력을 주어서 형태를 안정시키는 구조이며, 단일층 공기

6) 골조막 구조는 입체 트러스 등의 골조에 막을 2차 부재 혹은 마감재로 사용하는 구조이며, 하이브리트막 구조는 膜, 骨, 索 등 다양한 부재들이 결합되어 하중을 분담

막구조(Air Supported Structure)는 실내공간에 20~80mmAq(0.2~0.8기압)의 저압을 가압하여 막에 인장력을 부과하는 구조이며, 이중층 공기막 구조(Air Inflated Structure)는 이중막 사이에 160~650mm Aq(16~65기압)의 고압을 가압하여 막에 인장력을 부과하는 구조이다.

2.3.2 주응력 - 압축 축력

압축축력을 이용하는 구조형식들은 하중을 부재의 형상면을 따라 압축축력에 의하여 기초로 전달하는 구조이다. 하중이 커질수록, 규모가 커질수록 좌굴의 위험성이 증가되므로 압축축력만을 받는 대공간 구조형식에 적용되는 부재형상은 棒과 板이며, 압축축력을 받는 板의 경우 주로 지붕보다는 벽면에 적용되고 있다.

1) 棒(S3계) - 철근 콘크리트, 강재, 집성재

: 아치, 절보, 이형보

棒으로 형성된 구조형식들은 수직하중을 압축축력에 의해 부재축선을 따라 전달하는 아치, 절보, 이형보 등이 있다. 근대 이전의 돔구조와 볼트구조는

하는 구조이다. 그러므로 엄밀한 의미에서 비공기막 구조 중 현수막 구조만이 막계의 구조형식으로 분류된다.

아치구조를 3차원적으로 확장한 것이다. 근대초기에 주철 및 철근콘크리트 아치가 대공간에 널리 적용되었다.

2.3.3 주응력 - 인장축력+압축축력

인장축력과 압축축력을 사용하는 구조형식의 부재들은 압축력과 인장력의 축력만을 분담하여 하중을 전달한다. 인장 및 압축력 등의 부재응력별로 索, 骨, 膜 등 각 형상들이 조합된 하이브리드 구조가 구조효율적인 면과 의장적인 면에서 주목받고 있다.

1) 骨(S2계) - P.S.콘크리트, 강재, 집성재
: 먼트러스, 포탈 프레임, 아치트러스, 입체트러스, 목조격자 셸

하중을 인장력과 압축력으로 분담하므로 단면적이 작은 骨도 가능하다. 강재로 형성된 구조형식들은 먼트러스, 아치트러스, 그리고 단층 혹은 이중층으로 구성되어 하중을 3차원적으로 전달하는 것으로서 Schwedler, Rib, Lattice, Grid, Geodesic, Lamella 등의 돔 트러스와 스페이스 프레임으로 대표되는 입체트러스가 있다. 집성재는 먼트러스, 격자 셸, 입체트러스 등에, 그리고 프리스트레스트 콘크리트는 먼트러스 등에 적용되고 있다.

2) 索+骨(S1+S2계) - 케이블, 강재, 집성재, P.S. 콘크리트 : Tensegrity, 장현 트러스, 보우 빔
索과 骨을 조합하여 인장력을 받는 부재를 索, 압축력을 받는 부재를 骨 등으로 형성한 구조로서 Fuller가 창안한 tensegrity 구조, 인장력을 받는 하현재를 索으로 바꾼 먼트러스, 아치트러스 등의 장현 트러스계, 케이블로 대공을 지지하는 보우빔 등이 있다.

3) 索+棒(S1+S3계) - 케이블, 철근콘크리트
: 타이드 아치

아치에 인장재를 보강한 것으로서 2지지단에 索의 타이드를 설치하면 2단이 구속되는 효과를 낳는 타이드 아치가 대표적인 구조형식이다.

4) 索+骨+膜(S1+S2+M1) - 케이블, 강재, 집성재, 막재 : 하이브리드 막구조

索, 骨, 膜 등의 형상을 갖는 케이블, 강재 및 집성재, 막재 등이 각각 인장력, 압축력, 인장력 등을 분

담하는 구조로서 하이브리드 막구조가 대표적인 구조형식이다.

2.3.4 주응력 - 면내 인장력+압축력

인장력과 압축력의 조합에 의한 면응력을 이용하는 것으로 면재계에만 존재한다.

1) 殼(M2계) - 철근 콘크리트
: 돔 및 볼트 셸, 교차 셸

면응력을 부담하는 殼으로 형성된 구조로서 가우스 곡률이 正을 갖는 돔형, 볼트형, 그리고 볼트형의 조합인 교차형 셸이 대표적인 구조형식이다.⁷⁾ 한편 초대형 스펀일 경우 Lamella, Rib 등이 보강되어 적용되고 있다.⁸⁾

2.3.5 주응력 - 휨력

棒과 板이 휨력을 부담하지만 휨력계는 구조효율성이 낮아 대공간 구조에 적용하기 위해서는 자중을 줄여 구조효율성을 높이는 재료의 선별과 부재 형상의 변형이 필요하다.

1) 棒(S3계) - 철근 콘크리트, 강재, 집성재
: 단순 보, 강성라멘

휨력을 부담하는 棒으로 형성된 구조로서 단순보와 라멘구조 등이 대표적인 구조형식이다. 인장력이 강화되고 자중이 작은 프리스트레스트 콘크리트와 웨브가 격자로 구성된 강재 open-web joist는 30m 이상의 대공간 구조에 적용되고 있다.

2) 板(M3계) - 철근 콘크리트 : 리브 격자판

板으로 형성된 구조는 리브 격자판 구조로서 평판의 자중을 줄이고 휨력을 보강하기 위해 板 부재를 변형하였다.

2.3.6 주응력 - 전단력

춤/스팬 비가 0.5이상이 되면 전단력이 탁월해진다. 동시에 이 부재는 면재가 되므로 선재계에서는 전단력이 주응력으로 작용하지 않으며 면재계에서

7) 가우스 곡률 正(+)은 2방향으로 휘어져 있으며 동일 방향으로 블록한 곡면을 가진다.

8) 초대형 Rib Dome Shell의 대표적인 사례는 King County Stadium(201m, 1975)이다.

도 殼, 板 등에만 존재한다.

1) 殼(M2계) - 철근 콘크리트, 집성재

: 쌍곡포물선형 셸

(-) 가우스 곡률의 말안장형면을 갖는 쌍곡포물선형 셸(HP Shell)은 압축과 인장의 직선 모선군이 교차하여 그 합성효과가 전단력이 되기 때문에 주응력이 전단응력이 되는 셸이 된다.⁹⁾

2.3.7 주응력 - 전단력+휨력

선재계에서는 전단력이 없으므로 면재계에서만 존재하며 면재계 중에서도 휨력을 받는 板 형상의 부재에만 존재한다.

1) 板(M3계) - 철근 콘크리트, 집성재, 강재

: 절판구조

板으로 구성된 절판구조는 단변방향의 면내의 전단력과 장변방향의 휨력의 합력에 의해 하중을 지지점에 전달한다.

그외 전단력+축력의 조합, 축력+휨+전단력의 조합으로서 각각 板부재의 벽아치, 벽라멘 등의 구조들이 존재하나 구조효율성이 떨어져 대공간 구조에는 적용되고 있지 않다.

3. 대공간 구조형식의 발달과 적용 스패의 변화

3.1 재료별 대공간 구조형식의 발달

자연 목재 구조는 BC 1세기에 로마인들이 개발한 트러스, 중세 대성당 볼트 상부의 지붕 트러스, 1570년 Andrea Palladio가 설계한 3각 구면의 근대적인 트러스 등으로 발달하였다. 트러스의 부재가 강재로 대체된 후 목재는 대공간 구조에 사용되지 않았다. 그 후 집성재가 생산된 후 아치 트러스 구조(Iwase Sports Dome, 51m, 1991), 격자 셸 구조(Garden Pavilion, 50m, 1975 : 최초) 등과 케이블, 막재와 결합된 하이브리드 막 구조(Izumo Dome Stadium, 141m, 1992) 등에 활발히 적용되고 있다.

철근 콘크리트 대공간 구조는 20세기 초반에 대

9) (-) 가우스 곡률은 2방향으로 휘어져 있으며 오목한 곡면을 갖는다.

량 실현되었다. 철근 콘크리트 구조는 초기에는 압축축력을 사용하는 아치 골조(Breslau Centennial Hall, 65m, 1913)가 나타났으며 그 후 인장력이 결합된 면응력을 사용하는 얇은 돔형 셸 구조(Zeiss Planetarium, 16m, 1922)가 출현하였다. 리브가 보강된 셸(Leipzig Market Hall, 76m, 1927 : 최초 / King County Stadium, 201m, 1975 : 최대)의 출현으로 스패 범위가 확대되었으며, 프리캐스트 콘크리트(Italian Airforce Hangar, 41m, 1941 : 최초)를 사용함으로써 조립·시공방법이 향상되었다. 한편, 전단력을 사용하는 쌍곡포물선형 셸(Alfa Romeo Factory, 1934 : 최초)은 전단력과 휨력을 사용하는 절판구조(Unesco Conference Hall, 40m, 1958)와 더불어 의장성을 고려한 50m내의 스패의 건물에 많이 적용되었다. 철근 콘크리트 대공간 구조는 1920년대부터 1950년대까지 대량 건설되고 1970년대까지 지속적으로 건설되었지만, 구조와 설비의 집중성, 짧은 공사기간, 공장생산, 조립시공체제, 경제성 등의 측면에서 강구조와 막구조에 비해 상대적인 열악함과 더불어 클리프나 클라크에 의한 변형이나 노후화의 문제가 많이 발생하여 1970년대 이후부터는 철근 콘크리트의 대공간 구조에 대한 건설 수가 급감 하였다.

강재 구조는 압축축력을 이용한 주철 아치골조(Halle au Blè, 39m, 1811 : 최초)를 시작으로, 인장력이 강화된 연철 아치 트러스(Euston Station, 1835 : 최초)가 19세기 중반의 대부분 철도역사에 적용되었으며, 강철 아치 트러스(Galerie des Machines, 114m, 1898 : 최초)는 19세기 후반부터 1920년대까지 철도역사, 대박람회장, 격납고 등에 각각 적용되었다. 한편 면트러스는 Howe 트러스(1840), Pratt 트러스(1844), Warren 트러스(1848) 등으로 발전하였다. 입체 돔 트러스는 19세기 후반에 처음 적용되었다가(Schwedler Dome, 63m, 1874 : 최초), 구조해석의 어려움으로 인해 컴퓨터가 보급된 1950년대 이후 본격적으로 발전되어 구조해석과 시공이 간편한 Geodesic 돔(USA Pavilion Expo 67, 76m, 1967) 초대형 공간에 적용되는 Lamella 돔(Louisiana Superdome, 206m, 1976 : 최대) 등이 등장하였다. 1940년에 Mero System이 개발한 스페이스 프레임(A.G.Bell 최초 실험, 1907), 그리고 1949년 A.G. Pugsley가 단일 케이

블 초기형태를 해석한 이후 현수구조(Paper Mill, 149m, 1963), 장현 트러스 구조(Wesleyan Hockey Rink, 46m, 1969), 케이블보(Dulles International Airport, 65m, 1962), 케이블 인장박막 구조(Yale's Ingalls Hockey Rink, 56m, 1958), 사장구조¹⁰⁾(Renault Distribution Centre, 24m, 1980) 등이 본격적으로 발전하였다.

그러나 현수구조와 케이블 보 구조 그리고 케이블 인장박막 구조는 케이블과 지붕재의 결합부분, 경계부의 구조, 시공, 설계 등이 복잡하고 어려우며 또한 이들과 유사한 구조적 거동을 하는 현수막 구조의 출현으로 인해 1970년대 후반 이후 건설되고 있지 않다. 이에 반해 사장구조와 장현 트러스 구조는 의장성과 구조적 효율성 등으로 최근에도 널리 사용되고 있다.¹¹⁾

막 구조는 1970년대에 섬유재인 유리섬유포와 피복재인 4불화 에틸렌 수지 등 높은 강도와 내구성을 가진 재료의 개발과 구조해석의 전산화 등에 힘입어 본격적으로 건설되었다.

현수막 구조의 원형인 텐트는 기원전 8000년경의 유목민 주거, 로마시대의 원형극장 대형차일, 19세기 중반의 서커스 흥행장(Barnum, 50m, 1897), 20세기 초 비행선 격납고(Zeppelin Shed, 22m, 1909) 등을 거쳐 20세기 중반에 케이블과 막이 결합된 현수막 구조(German Pavilion, 38m, 1967 : 최초)가 나타났다.

골조막 구조는 입체 트러스 등의 골조에 막이 마감재 혹은 2차 구조재로 혼합된 구조(Ocean Dome, 110m, 1993)로서 막면의 장력에 구애받지 않고 다양한 형상을 시도할 수 있지만 과대한 구조체, 막면과 구조체의 복잡하고 많은 결합철물 등으로 시공제작의 경제성이 떨어진다.

하이브리드막 구조는 상향하중은 막면과 ridge 케이블 등이, 하향하중은 diagonal 케이블, hoop 케이블 등으로 구성된 장현 입체 트러스 혹은 격자 셸 등이 분담하는 등 각 재료의 특성에 맞게 응력별로

하중을 효율적으로 분담하는 복합구조로서 최근의 막구조 중에서 가장 주목 받고 있다. (Pusan Stadium, 256m, 2002)

공기막 구조는 18세기의 열기구, 20세기초의 비행선 등으로 그 가능성이 주목되다가, 1917년에 공기막 구조의 특허(F.W. Landchester), 1946년의 최초의 건설(Radar Dome, 46m)로 본격화 되었다. 단일층 공기막 구조는 150 m이상의 초대형 장기 건축물(Pontiac Silver Stadium, 228m, 1975)에 대부분 적용되었다. 한편 이중층 공기막 구조는 일반적으로 유리섬유포와 염화비닐수지가 결합된 막면을 사용하여 40m 내외의 임시 가설물(Technocosmos, 33m, 1985)에 적용되고 있다.

이상에서 대공간구조형식의 발전은 휨응력(BC 1350년이전)→압축응력(아치)(BC 1350년, Treasury of Atreus)→압축응력+인장응력(트러스)(1835년 Euston Station), 셸(1924년, Zeiss Company Planetarium), 스페이스 프레임(1940년, Mero System 개발)→인장응력(케이블 구조(1949년 A.G. Pugsley 케이블의 초기형태해석), 공기막구조(1946년 Radar Dome))의 순으로 구조의 효율성이 높은 응력을 주응력으로 사용하는 방향으로 이루어지고 있다

3.2 대공간 구조형식의 발달과 스패규모 변화

1850년부터 1996년 현재까지 186개의 구조들을 수집하여 이들을 3기분으로 나누어 재료별, 형상별, 주응력별, 구조형식별로 분류한 결과 <표 3> 와 같다.

<표 3>에서 나타난 것처럼 구조체의 주응력이 휨력<전단력+휨력<압축력<압축력+인장력<인장응력의 순으로 스패의 규모가 크며, 따라서 구조효율성이 이와 같은 순으로 크다는 것을 알 수 있다.

1850~1950년의 경우 철근 콘크리트 구조 중 아치구조는 65m 이내, 볼트형 셸은 16~103m, 돔형 셸은 40~75m 등의 분포를 보인다. 강제 구조의 경우 아치트러스가 대부분이며 31~114m의 분포를 보인다. 그 외 케이블 사장구조와 막재 중에서 현수막구조, 단일층 공기막 구조가 실험적으로 적용되어 각각 21~60m, 50m, 50m 내외의 분포를 가진다. 이 시기의 대부분의 구조들은 100m 내의 최대 스패를 갖는다.

10) 사장구조는 1837년 Arsenal shop에서 최초로 발견되고 있으며 1927년, Fuller의 Dymaxion House에서도 나타나고 있다.

11) 각각의 대표적인 사례는 Inmos Research Center (36m, 1982), Waterloo International Terminal(55m, 1988) 등이 있다.

〈표 3〉 집성재, 철근콘크리트, 강재, 막재 구조형식별 사례 적용 스펜범위(1850~1996년)

구조 재료	재료 형상	주용력	구조형식	11-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70	71-80	81-90	91-100	101-110	111-120	121-130	131-140	141-150	151-160	161-170	171-180	181-190	191-200	200-260	축스팬 비		
집성 목재	骨	압축 + 인장 (축력)	아치 트러스				●	●								●								-		
			격자셀 트러스			●	●																			-
철근 콘크리트	樑	휨	라멘 (P.S.Conc)	●●		●																		1/20~1/30		
			압축 아치			○	○		○																1/10 이상	
	板	휨, 전단	철판구조		○	○○		○			○													1/8~1/15		
			쌍곡포물 선형 셀	○	○		○○				○	○	○												1/3~1/16	
	殼	인장, 압축	인장, 압축	볼트 셀	○		○	○○		○	○			○											1/10 이상	
				교차셀			○○						●	○○												●
강재	樑	휨	구형라멘			○○	○○	○		○						●	●			●				●		
			보트러스			○●	●●	○						○				●								
	骨	인장, 압축 + 압축, 축력	포탈 프레임			○○	●	●●	●				○												-	
			아치 트러스			○○	○	○			○	○	○	○	○	○	○	○								1/5 이상
			돔 트러스				○○	○	○	○○	○				●	○○		○	●					●●	●●	-
			평판 스페이스 프레임		○○	○		○					●	○	○											1/12~1/25
	索	인장, 압축	현수 구조						○									○							-	
			장현량 구조			●	○	●																		-
			사장구조		○●	○●	○○	○○					○	○												-
			케이블보			○	○○			○	○	○	○	○○		○○	○									1/10 이상
막재	膜	인장	인장박막				○	○	○○	○	○	○○		○○		○									-	
			현수막		●	○	○○	●●		○	○		●○													-
			골조막				●							●●												-
			하이브리트막				●●						●			●										●●
			단일층 공기막				○○			○○	○	○○	●				●●									○●●
이중층 공기막				○●																			●●			

○ 1850~1950 ◎ 1950~1975 ● 1975~1996

<출처> 양재혁, 대공간 건축 구조 발전에 관한 연구, 연세대학교 박사논문, 1996, P.179~181 편집

1950~1975년의 경우 최대 스펜이 150~200m의 구조형식은 철근 콘크리트의 교차 셀, 돔 셀 등과 강재의 입체돔 트러스, 그리고 막재의 단일층 공기막 구조 등이다. 100~150m의 경우 현수구조, 케이블보, 인장박막 구조 등이며, 50~100m의 경우 보 트러스, 포탈 프레임, 평판 스페이스 프레임, 케이블 사장구조, 현수막 구조 등이며, 50m 내의 경우 아치, 절판, 볼트 셀, 자유형 셀, 이중층 공기막 구조 등이 분포되어 있다.

1975년부터 1995년까지 철근 콘크리트 대공간 구조형식은 그 사례가 출현하고 있지 않다. 또한 강재 대공간 구조 중에서 케이블보 구조, 인장박막 구조 등이 사라지고 이들과 유사한 구조시스템인 현수막 구조가 출현하여 대체되었다. 200m 이상의 스펜범위를 갖는 구조형식은 돔 트러스, 하이브리트막 구조, 단일층 공기막 구조 등이며, 100m 내외에서 적용되고 있는 구조형식은 아치트러스 등이며, 50m 내에 적용되는 구조형식은 포탈프레임, 사장구조, 현수막

구조 등이다.

4. 결 론

본 연구에서 부재의 7종류의 주응력, 12종류의 부재 형상, 4종류의 구조재료 등의 상호관계를 분석한 결과를 토대로 대공간 구조형식을 25종류로 분류하였으며, 이들을 중심으로 1850년부터 1996년까지 186개의 사례를 추출하여 구조형식들의 적용 스패ن 규모를 분석한 결과는 다음과 같다.¹²⁾

- (1) 부재의 주응력이 휨력일 때 부재형상은 樑과 板($d/l=1/100\sim 1/10$)이며 적용되는 구조재료는 철근 콘크리트, 강재, 집성재 등이다. 대표적인 구조형식과 그 스패는 라멘 구조일 경우 강재(10~24m), 단순 보일 경우 프리스트레스트 콘크리트(10~35m) 등이다.
- (2) 부재의 주응력이 전단력일 경우 부재형상은 殼($d/l=1/100\sim 1/1000$)과 板($d/l=1/100\sim 1/10$)이며 적용된 구조재료는 철근 콘크리트이다. 쌍곡포물선형 셸(25~97m, 1934)이 대표적인 구조형식이다.
- (3) 부재의 주응력이 전단력+휨력일 경우 부재형상은 板($d/l=1/100\sim 1/10$)이며 적용된 구조재료는 철근 콘크리트이다. 절판구조(21~59m)가 대표적인 구조형식이다.
- (4) 부재의 주응력이 압축축력일 경우 부재형상은 樑($d/l=1/100\sim 1/10$)이며 적용된 구조재료는 주철과 철근 콘크리트이다. 철근 콘크리트 아치구조(32~65m, 1913)가 대표적인 구조형식이다.
- (5) 부재의 주응력이 압축력+인장력(면응력)일 경우 부재형상은 殼($d/l=1/1000\sim 1/100$)이며 적용된 구조재료는 철근 콘크리트이다. 대표적인 구조형식과 그 스패는 돔 셸(40~201m,

1924), 볼트 셸(16~103m, 1922) 등이다.

- (6) 부재의 주응력이 압축축력+인장축력일 경우 부재형상은 骨($d/l=1/1000\sim 1/100$)과 索+骨, 索+骨+膜이며 일반적으로 적용된 구조재료는 집성재, 강재, 프리스트레스트 콘크리트이다. 부재가 骨 형상인 대표적인 구조형식과 그 스패는 강재의 경우 보 트러스(31~134m, 1848), 아치 트러스(31~135m, 1835), 평판 스페이스 프레임(29~108m, 1940), 포탈프레임(39~55m), 입체돔 트러스(44~222m, 1874), 골조막구조(45~110m) 등이다. 索+骨 형상일 경우 장현량 구조(30~55m), 索+骨+膜 형상일 경우 하이브리트 막구조(42~256m) 등이다.
- (7) 부재의 주응력이 인장응력일 경우 부재형상은 索과 膜($d/l=1/1000$ 이하)이며 구조재료는 각각 강재 케이블과 막재 등이다. 대표적인 구조형식과 그 스패는 케이블인 경우 현수구조(60~150m, 1921), 케이블 보(40~130m), 케이블 인장박막 구조(42~136m), 사장구조(25~90m) 등이다. 막재일 경우 이중층 공기막 구조(30~44m, 1959), 현수막구조(24~97m, 1967), 단일층 공기막 구조(45~231m, 1946) 등이다.

이상에서 최근의 대공간 건축에는 형태의 의장성, 부재의 공업화, 구조의 효율성, 조립·시공의 편리성 등이 강조되어 강재, 케이블, 막재, 집성재 등의 구조재와 인장력과 인장+압축력을 주응력으로 하는 구조형식이 사용되고 있다. 30m 이상 50m 내외에 적용되고 있는 구조는 보 트러스, 포탈 프레임, 사장구조, 장현 트러스, 현수막 구조, 100m 내외에 적용되고 있는 구조는 아치 트러스, 골조막 구조, 150m 이상의 초장스팬에 적용되고 있는 구조는 입체돔 트러스, 단일층 공기막 구조 등이 있으며, 하이브리트막 구조는 42~256m의 폭넓은 범위의 스패에 적용되고 있다.

향후 비슷한 스패 범위에 있는 이들 구조형식들을 중심으로 각 구조형식들의 형태·공간의 표현성, 조립·시공성, 유지·관리성, 경제성 등을 비교 분석하여 초기 디자인 계획시 적절한 의사결정을 지원

12) () 내의 연도는 구조형식별 최초의 건설시기를 나타낸다.

할 수 있는 후속 작업이 필요하다.

참고문헌

- 1) 양재혁, 대형공간 건축 구조 발전에 관한 연구, 연세대학교 박사논문, 1996
- 2) Alan Holgate, The art in structural design, Oxford University Press, 1986
- 3) Angus J. Macdonald, Structure & Architecture, Butterworth-Heinemann Ltd., 1994
- 4) Building Arts Forum, Bridging the Gap, Van Nostrand Reinhold, 1991
- 5) C. Wilkinson, The Architecture of long-span large volume Building, Butterworth Architecture, p.30, p.94, 1991
- 6) Eekhout, Mick, Architecture in space structure, Uitgeverij 010 Publishers, p.12, 1989
- 7) Lin Tueng Yen, Structural concepts and systems for architects and engineering, Van Nostrand Reinhold, p.394, 1988
- 8) R.J. Mainstone, Development in Structural Form, Penguin Books, 1975
- 9) Wolfgang Schueller, Horizontal-Span Building Structures, John Wiley&Sons, p.369, 1983
- 10) 건설기술정보 No.64, p.69, 1994.2.