

근대건축의 구조시스템과 건축적 특성에 관한 연구

A Study on The Structural Systems of Modern Architecture and Architectural Characteristics

조 성 현*

Cho, Sung-Hyun

Abstract

The purpose of this study is to examine the relationship between the structural system used in modern architecture and the form and spatial composition of the buildings. The principle in stabilization of structures is closely related to the architectural form. That is, in order to stabilize a building, a special type of structural system is required and consequently shows up with consistent characteristics in the architectural form.

Modern architecture can be classified into skeleton structure, trusses structure, and space structure according to the structural characteristics. Skeleton structure is then divided into a perpendicular form and tapered form. Trusses structure is categorized as dome-shaped structure and slab-shaped structure, and space structure can be divided into compressible space structure and tensile space structure.

When classifies the modern building with the aspect of architectural effect, there is a possibility of trying to divide with effect of production, and its expression. Effect of production mean structural system and effect of expression mean space and plan.

키워드 : 건축형태, 부재력, 구조시스템, 구조적 안정

Keywords : Architectural Form, Internal force, Structural system, Structural Stability

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

건축형태는 추상적 개념화 단계에서 구체화된 형태로 발전되고 주어진 하중에 대응하기 위하여 구조시스템이 필요하며 건축요소들의 조합 또는 상호관계에 의해 이루어진다. 건축요소들의 조합은 물리적 구성요소인 구조의 결합방식이 주를 이루고 있다. 또한 구조시스템과 결합방식은 전체 형태에서 뿐 만 아니라 디테일의 조작과정에서도 건축적 표현의 수단이 될 수 있다.

건축양식의 역사를 살펴보면 사회, 문화적 요소만큼 기술적 요소도 건축을 만드는 중요한 요소로 작용한다. 역사가들이 한 시대를 평가하고자 할 때 건축을 필수적으로 다루는 이유는 건축 재료와 건축형태가 그 시대의 기술 발달에 따라 다르게 나타나고 건축이 그 시대에 이루어진 것에 대한 지표가 되기 때문이다.

건축이론가 들은 건축의 기본요건에 대한 다양한 주장을 하였다. Vitruvius가 주장한 건축의 기본요소는 17세기 Henry Wotton에 의하여 견고성, 편리성, 아름다움으로 재해석되었고 건축에 대한 가치평가의 주된 요소로 자리 잡고 있다. 그 중 견고성은 건축물의 가장 기본적인

요소로서 형태와 평면배치에 직접영향을 주는 요소가 될 수 있다. 또한 건축물의 형태를 이해하는 기준과 방법은 구축방법에 근거한 구조시스템의 결합으로 나타나는 경우가 대부분이다.

건축을 평가하고 형태와 공간을 이해하기 위해서는 건축물을 구조체로 인식할 수 있어야하며 안정과 불안정, 정정과 부정정, 그리고 구조부와 비구조를 구분하는 역학적 지식이 필요하다. 구조시스템과 재료는 공간의 물리적 형태를 결정하는 역할과 공간을 조직하는 역할을 수행하고 인간이 느낄 수 있는 공간지각 과정을 보편적이고 단순하게 형상화한다. 또한 새로운 형태와 공간의 요구는 구조시스템과 재료의 기술적 가능성에서 시작됨으로서 합리적이고 객관적이라 할 수 있다.

새로운 구조방식과 재료의 개발은 기본적인 기하학 형상을 선택하거나 디테일 및 조합방식을 결정하는데 창조적인 가능성을 제공한다. 근대건축 역시 새로운 기술과 재료의 개발로 당시 건축가의 최선의 목표는 건축에 이러한 요소들을 조화시키는 것이었다.

본 연구는 근대건축물을 구조유형별로 분류하여 분석하고 이들의 건축적 특성을 물리적 측면과 심리적 측면으로 나누어 고찰하였다. 또한 구조적 요소가 건물형태에 어떻게 나타나는지 알아보고 형태디자인의 합리적인 원

* 정회원, 영남대학교 건축학부 겸임교수, 공학박사

리를 제시하고자 한다. 그리고 철, 유리, 콘크리트와 같은 재료를 사용하여 새로운 기술과 공간을 표현한 근대 건축물들을 통하여 공간의 구축방법을 고찰하고 공간이 구축되기 위한 객관성을 도출하는 것을 목적으로 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

건축구조의 기본 목적은 공간을 정의하고 하중을 감당하는 데에 있다. 그 결과로서 건축물의 형태는 구조가 취하는 공간정의의 방법과 하중 감당방법의 영향을 직접적으로 받게 된다. 그리고 구조가 건축물 형태의 골격이 되어 공간적 특성 및 감각적 특성에 영향을 주고 있다는 점에서, 구조는 건축적 가치를 충족시키기 위한 많은 요소들 중 근본이 되고 중요한 역할을 하는 요소들 중 하나라고 할 수 있다.

초기 근대건축은 건축기술의 발달로 새로운 재료를 적극적으로 건물에 도입하였고 기술적 요소가 형태에 직접 영향을 주게 된다. 골조구조방식의 건물은 20세기 초기의 주거건축물이 주요 사례가 되고 트러스구조와 스페이스 구조방식은 20세기 후반의 대 공간 건물들로 구성하였다.

본 연구는 건물의 정량적인 수치해석은 제외하고 구조체의 응력 다이어그램을 분석하여 구축성에 근거한 기술적 속성을 제시하는 것이다.

연구의 진행은 근대건축의 발전과정을 재료의 발전과정과 구조시스템을 통합하여 정리하였다. 또한 근대건축에 나타나는 구조시스템에 의하여 건물을 사례별로 분류하고 이들을 지지점과 반력을 가지는 자유물체도 (free-body diagram)¹⁾로 표시하였으며 Midas²⁾프로그램을 사용하여 응력을 다이어그램화 하였다. 이와 같은 다이어그램은 축력과 휨 력과 같은 응력으로 표시되고 휨력을 줄여주는 방법이나, 축력으로 바꾸어 주는 방법이 건축물의 중요한 안정방식이 된다고 할 수 있으며 건축물의 형태에 영향을 준다고 할 수 있다. 이와 같은 분석과정을 통하여 근대건축이 가지는 건축적 의미를 물리적 측면에서 정리해 볼 수 있다. 그리고 건축물은 인간의 시각을 통하여 과거의 경험과 이들의 조합에 의하여 인지된다는 점에서 심리적 측면의 요소를 건축물의 공간형성과 관련하여 고찰 하고자 한다.

2. 건축의 발전과정과 구조시스템의 관계

2.1 근대화 이전의 구조시스템과 재료의 발전과정

고대건축의 발전과정은 철이라는 재료의 발전과 밀접한 관계를 가진다. 그러나 고대건축에서는 매우 제한적으로 사용되며 구조재료로 사용된 것은 19세기 이후의 일이다. 그러므로 새로운 재료가 발전하여 충분한 내구성을

1) 구조물을 단순화시키고 작용하고 있는 하중이나 반력을 기입한 그림 즉, 구조물을 구조해석하기 위하여 간단한 모델로 표시한 그림으로 지지점을 갖고 있지 않다(지지점을 반력으로 치환하여 표시한다.)

2) 구조물의 축력과 휨 응력을 도식화 하여 부재를 설계하는 구조해석 프로그램

가지고 건축 재료로 활용하기 위하여 일정한 시간과 테크놀러지가 필요하다는 것을 알 수 있다.

그리스건축물에 사용된 구조방식은 기둥과 보의 결합으로 이루어진 가구식 구조이며 절석의 구법을 사용하였다. 단위부재는 연결철물을 사용하였다. 그러므로 이전의

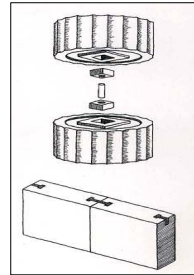


그림 1. 그리스 신전에 사용된 기둥과 보의 접합방법

조적식 건축과는 달리 부재의 크기나 축조방법이 복합적이라는 특성을 가진다. 또한 대형공간을 요구하는 건물의 지붕은 목조 트러스를 사용하였다. 이와 같이 사용건물의 용도와 목적에 따라 적절한 재료를 선택하고 결합방식을 고려하여 구축하는 것은 단순히 석재만을 사용한 고대건축과 차이점이라 할 수 있다.

로마건축물의 구조는 아치와 볼트 그리고 돔이 사용되었다. 건축 재료는 석재였지만 구조체와 부재는 압축력에

대응하고 있다. 아치구조는 수직방향의 압축력과 수평방향의 횡력을 지지하는 벽체식 구조이고 압축력에 강한 석재는 아치의 주된 재료로 사용된다. 볼트구조는 기둥이 없는 통로와 같은 공간을 만들 수 있다. 그리고 돔 구조는 판테온 신전과 같은 원형 평면의 지붕을 구축할 수 있다. 로마 건축물의 공간적 특성은 사용자 중심의 실용적인 공간을 추구하는 것이다. 즉, 그리스 건축이 신전 중심의 건축물이라면 로마 건축물은 사람이 주체가 되는 공간을 추구하였다고 볼 수 있다.

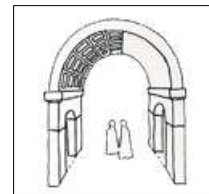


그림 2. 로마건축물의 배럴볼트

고딕건축물의 구조는 리브볼트와 첨두아치 그리고 플라잉버트레스를 사용하였다. 이러한 구조는 재료를 절약함과 동시에 경량성을 추구하고 넓은 내부공간을 구축할 수 있으며 구조체를 안정화시킬 수 있다. 리브볼트는 선형 부재이기 때문에 비교적 다양한

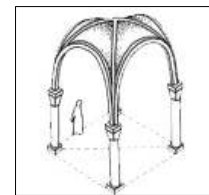


그림 3. 고딕 건축물의 리브 볼트

유형의 평면에 사용되고 리브 사이의 천장 부재는 경량의 부재로 구축할 수 있어 자중에 유리하다. 첨두아치는 측면에 작용하는 사선 방향의 압축력으로 하중을 전달하고 있다. 그리고 플라잉버트레스는 수직 구조부재에 수평력이 가해질 경우 이것을 보강하기 위한 기능과 높은 부재의 좌굴을 잡아준다. 구조체의 재료는 석재나 벽돌과 같은 조적재였고 절석의 방법을 사용하여 조적단위를 작고 가볍게 할 수 있었다. 지붕과 벽체 그리고 바닥 모두 조적 구조방식의 석재를 사용하면서 높고 밝은 공간을 만들 수 있었다. 고딕구조 방식은 그 시대가 요구하는 공간의 요구를 충족시키면서 재료의 한계를 극복한 합리적인 구조방식이었다.

근대화 이전의 건축 재료는 석재나 벽돌이었고 이러한 재료들은 압축력이 강한 재료였다. 또한 이러한 재료들은

절석의 방법을 사용하여 부재를 단위화하여 조적식 공법으로 공간을 구축한다. 구축된 공간은 석재를 사용하여 높고 넓은 공간을 만들기 위하여 다양한 구조시스템이 적용된다.

2.2 근대건축의 전개과정과 구조시스템

근대 유럽사회는 영국의 산업혁명(1764년)과 미국의 독립선언(1776년) 그리고 프랑스의 시민혁명(1789년)으로 사회적 전환기를 가지게 된다. 사회문화를 크게 바꾸어 놓은 것은 산업혁명이다. 산업혁명은 종교중심의 건축과 문화를 자본주의 경제성과 산업관련 건축물로 바꾸었다. 근대화된 사회에서, 공업화된 건축과 기술과의 관계를 중심으로 근대건축에 영향을 주었던 기술적 요소를 분석함으로써 근대건축이 가지는 건축적 가치개념을 파악할 수 있다.

Otto Wagner는 근대건축(Moderne Architektur, 1896)에서 합목적적 건축, 재료의 정직한 사용, 구조의 합리성, 그리고 위의 세 가지 요소가 만들어 내는 필연적인 형태가 근대건축의 원칙이라고 했다. 이와 같은 형태는 근대건축의 기능적 측면을 제시하게 된다. 근대건축의 발전과정과 구축방법에 관심을 가지는 것은 근대건축이 새로운 재료와 구조시스템을 추구하는 기능적인 측면과 공간의 합목적성과 심리적 요소를 추구하는 감각적 측면을 동시에 추구하였기 때문이다.

근대건축으로 전환되는 과도기적 단계인 19세기의 구조재료는 돌이나 벽돌이라는 재료가 철근 콘크리트와 판

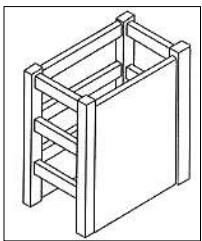


그림 4. 일체식 골조구조방식

유리라는 새로운 재료로 바뀌게 된다. 철을 사용한 철골구조는 건축에서 부분적으로 이용되었으며 건물의 구조체로서 철골이 활용된 것은 19세기 후반부터이다.³⁾ 강재를 사용한 사례로는 파리의 만국 박람회의 에펠탑(Tour Eiffel, 1887-89)과 기계관(Galerie des Machines, 1887-1930)을 들 수 있다. 에펠탑은 풍압에 대응하는 모멘트형상을 가진 래티스 구조로 되어있고 기계관은 횡 방향으로 트러스가 배치되었으며 유리벽체를 이루고 있다. 각각의 아치트러스는 두 개의 개체로 되어 있고 주각 부분이 지반과 편 접합되어 있다.⁴⁾

20세기 전반의 건축물은 철근콘크리트를 재료로 하여 일체식 골조구조방식을 사용하였다. 기둥과 보로 결합된 라멘구조와 내력벽과 골조구조가 혼용되어 사용되었다. 이러한 재료와 구조시스템은 모듈화 되어 반복적용이 가능하고 직각형태의 입면을 가지게 된다.

20세기 후반의 건축물은 철골을 사용한 트러스 구조를 사용하여 장 스패의 지붕을 구축할 수 있었다. 또한 대 공간 구조로서 전시공간, 체육시설, 그리고 공장건축과

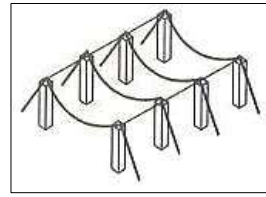


그림 5. 서스펜션 구조방식
으로 분류할 수 있다.⁵⁾

같은 비교적 넓고 균일한 대규모의 내부공간을 필요하는 건축물을 중심으로 압축형 돔 구조물과 인장형 현수케이블 구조물이 나타나게 된다. 20세기 후반 이러한 돔구조, 셸구조, 그리고 케이블구조는 대 공간 구조물로서 스페이스 구조방식

3. 근대건축에 나타나는 구조시스템의 유형과 형태

3.1 골조 구조 방식(Skeletal Structure)

근대건축의 물리적 특성은 구조시스템의 종류와 유형에 따라 골조 구조 방식, 트러스 구조 방식 그리고 형태로 대응⁶⁾하는 스페이스 구조 방식으로 나누어 볼 수 있다. 골조 구조방식은 기둥과 보로 이루어진 골조구조와 내력벽 구조 그리고 이들의 복합방식으로 구축되어진다. 형태적 특성으로 수직재와 수평재의 접합으로 이루어진 직각형태의 골조구조와 응력의 흐름에 대응하여 부재와 구조물에 테이퍼 형상⁷⁾을 가지는 경우로 나누어 볼 수 있다.

골조 구조방식에 사용되는 안정방식은 하중의 효율적 분배와 개선된 단면의 사용 그리고 부재의 결합부분의 형태 변형으로 정리 할 수 있다. 직각형태의 골조구조는 하중의 효율적 분배로 안정되는 구조방식을 사용하며, 개선된 단면을 가지는 부재를 사용함으로써 구조적 효율성을 높일 수 있다.

Le Corbusier의 도미노 구조는 4m×4m×10cm의 슬래브와 30cm×30cm크기의 6개의 기둥 그리고 돌출한 1m의 캔틸레버로 구성되어있다. 상하이동 수단인 계단은 2개의 주요방향에 대해 가새로 작용하고 슬래브는 로스트 타일(lost-tile)공법을 사용하는 플랫 슬래브(flat slab)이다. 구조적 측면에서 플랫 슬래브는 보 춤이 없기 때문에 적층할 경우 건물전체의 높이를 줄일 수 있고 실내 반자높이는 높일 수 있다. 또한 실내 칸막이벽의 자유로운 계획이 가능하다.

도미노 구조는 슬래브의 크기로 분석하면 장변과 단변

7) Space structures는 Curt Siegel이 그의 저서 'Structure and Form'에서 대 공간 구조물을 통칭하는 건축물을 말한다.

8) 형태저항(form-active)은 Heino Engel이 그의 저서 'Structure Systems'에서 휨 모멘트가 없는 플렉시블한 부재가 어느 일정한 모양을 이루어 양끝이 고정되면, 그 자체가 구조체로 되어 공간에 가구를 구축할 수 있는 구조시스템이라고 정의하고 있다. 즉, 단일 응력(축력)상태로 된 구조시스템으로 Form-resistant라고도 한다.

9) 테이퍼 형상의 어원은 이집트시대의 오벨리스크라는 태양신을 상징하는 탑의 형상에 사용된 형태로서 상부로 갈수록 좁아지는 형상을 뜻한다. 그러나 본 연구에서 테이퍼 형상이란 힘을 많이 받는 부분의 구조체를 두껍게 하거나 보강하는 것을 의미한다.

3) 김성곤, 서양건축사, 기문당, P.345, 2002

6) 함인선, 구조의 구조, 발언, P.157, 2000

조 성 현

의 길이가 같은 2방향 슬래브이다. 그러나 로스트 타일공법을 사용한 슬래브 단면은 응력의 흐름을 한 방향으로 유도하는 1방향 슬래브로 해석된다. 도미노 구조가 적용된 주거건축의 슬래브 크기는 5m×2.5m와 5m×5m로

구성되어 있다. 슬래브의 크기로 판단하면 1방향 슬래브와 2방향 슬래브가 혼용되고 있는 것이다.

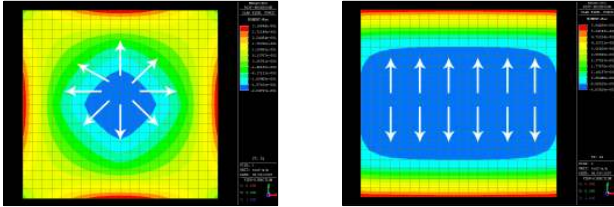


그림 6. 2방향 일반슬래브의 응력 흐름(左)과 도미노 슬래브의 응력 흐름(右)

그러나 크기로 슬래브를 해석하는 경우는 일반 슬래브의 경우이고 도미노 구조에서 사용한 플랫 슬래브는 응력의 흐름 측면에서 1방향 슬래브라고 해석할 수 있다.

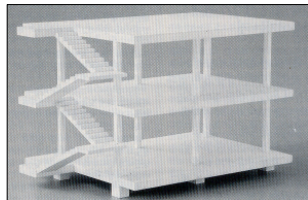


그림 7. 도미노 구조시스템

그러나 크기로 슬래브를 해석하는 경우는 일반 슬래브의 경우이고 도미노 구조에서 사용한 플랫 슬래브는 응력의 흐름 측면에서 1방향 슬래브라고 해석할 수 있다. 도미노 구조가 형태에 미치는 영향은 하중을 벽체가 받지 않고 기둥과 슬래브가 부담함으로써 자유로운 입면을 추구할 수 있다. Mies건물의 구조는 내력벽 방식의 골조구조로부터 내력벽과 기둥과 보가 혼용된 직각형태의 라멘구조로 발전한다. 또한 부재의 접합과정을 시각적으로 노출하는 반접합(disjoint)을 사용하여 건물을 이루고 있는 개체의 중요성을 강조하고 재료와 결합방법을 표현한다. 부재의 접합방법은 대부분 핀접합(pin-joint)으로 이루어져있다. 핀접합은 부재 단부의 휨응력을 줄여주는 구조적 역할을 하고 부재들을 시각적으로 분리한다. 또한 부재의 독립성을 강조하는 것은 Mies의 건축이 근대적 재료로 구축되었고 새로운 공간적 요구와 구축방법을 강조한다는 점에서 근대이전의 건축과 차별성을 가진다. 기둥과 보로 이루어진 골조 방식의 구조체계를 사용하면서 부재의 단면을 개선하여 사용한 것도 Mies건축물의 공통된 특징이라 할 수 있다.

개선된 단면이란 구조적 효율성을 추구하는 부재를 사용한다는 것이다. Barcelona Pavilion(Barcelona, Spain, 1928-29)과

Tugendhat House(Brno, Czech Republic, 1930)는 십자형 단면의 기둥과 I형 단면 형강이 기둥으로 사용된다. 구조적 측면에서 이러한 부재는 응력이 작은 부분의 단면을 제거하여 구조적 효율성을 높인 개선된 단면을 가지는 부재들이다. 즉, 장방형 단면보다 단면적이 적고 경량으

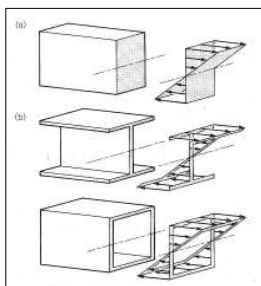


그림 8. 개선된 단면의 휨 응력

로 부재를 만들지만 부재의 강도는 거의 같으므로 구조적 효율성을 높인 것이다.

테이퍼 형상의 골조 구조방식은 기둥의 주두 부분과 필로티기둥의 형상, 그리고 경기장과 같은 대규모 지붕형상에 주로 사용된다.

P. L. Nervi가 설계한 Stadium in Florence(Florence, Italy, 1930-32)는 장변의 길이가 220m이고 22m의 캔틸레버 차양이 관람석 좌석 슬래브와 결합되어 있다. 캔틸레버 차양의 곡선은 휨 응력 다이어그램 형상을 따르고 있고 관람석을 지지하는 하부구조는 핀 접합되어 휨 응력을 줄이고 있으며 관람석슬래브는 경사방향의 가새 역할을 하고 있다. Nervi는 자중과 적재하중을 고려하여 최소의 재료를 사용하여 힘을 기초까지 유도하는 방법을 형태로서 표현하고 있다.



그림 9. Stadium in Florence의 지붕구조형태(左)와 휨 응력 다이어그램(右)

기둥 주두 부분의 보강사례는 그리스 신전건축물의 기둥에서도 Abacus를 사용하여 주두를 보강하였다. Johnson & Wax Building(F. L. Wright, Wisconsin, USA, 1936-39)의 실내 기둥은 주두 부분이 넓은 접시모양을 취하고 있다. 이러한 형태는 슬래브에서 기둥으로 하중이 전달될 경우 휨 응력이 동심원 형태(8)로 기둥 주변에 형성되기 때문이다. Johnson&Wax Building은 14층의 연구 타워 동과 저층 사무동으로 배치되어 있다. 14층 규모의 연구동은 중심계단과 엘리베이터 코어가 전단벽의 역할하고 있으며 슬래브는 전단벽에 캔틸레버 형태로 지지되어 있다. 이러한 방식은 라이트의 타워형 건물의 대표적 구조체계가 된다.

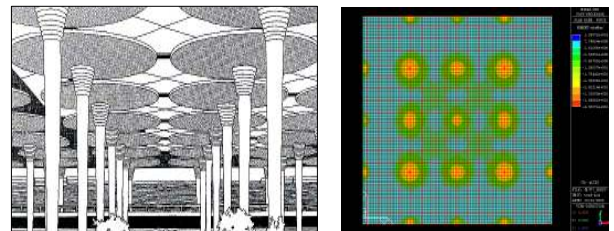


그림 10. Johnson&Wax Building의 실내 주두형상(左) 과 슬래브의 등력선 다이어그램(右)

Le Corbusier의 유니테 다비타시옹은 필로티에 테이퍼형상의 기둥을 사용하고 있다. 1952년 Marseilles 주거단지의 1층은 같은 형태의 테이퍼형상의 기둥이 반복되지만 1958년 Berlin 주거단지의 경우 건물 내부로 기울어지

10) 슬래브에 기둥이 접합되면 하중이 흐르는 경로가 형성되고 기둥의 위치에 따라 등력선(isostatic)이 생긴다. 등력선의 형태는 워플 슬래브나 리브볼트의 형태로 나타난다.

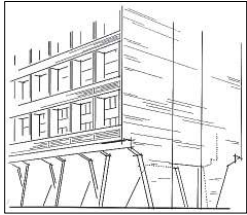


그림 11. Berlin주거단지

는 테이퍼 기둥(Tapered legs)과 건물외부로 기울어지는 기둥이 반복하여 교차되며 구성된다. 이러한 형상은 캔틸레버 평면의 경우 상부 하중이 1층 필로티 부분에서 건물 내부 및 외부방향으로 휨 응력을 가지게 되기 때문이다. 건물 외부 방향으로의 휨 모멘트는 필로티 상부에 내부 수평력을 발생시킨다. 그러므로 필로티기둥은 외부로 기울어진 형상을 가진다. 또한 건물 내부방향으로의 휨모멘트는 필로티의 상부에 외부 수평력을 발생시키고 내부로 기울어진 기둥 형상을 가지게 한다. 즉, 테이퍼 기둥의 형상을 교차하면서 배열하여 구조적 효율성을 추구하고 있다. 또한 동일한 구조체의 교차되는 기둥형상은 풍하중이 작용하였을 때 한쪽 기둥열에서 인장력과 압축력을 동시에 가짐으로써 응력에 효율적으로 대응할 수 있다.

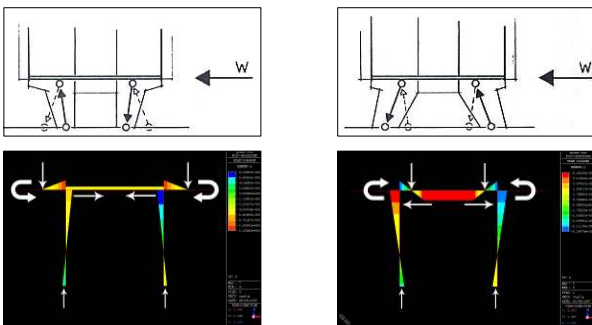


그림 12. 베를린 주거단지의 외부방향 휨 응력도(左)와 내부방향 휨 응력도(右)

3.2 트러스 구조 방식(Trussed Structure)

트러스 구조에 사용되는 안정방식은 구조부재에 발생하는 휨 응력을 압축력과 인장력과 같은 축 방향 응력으로 바꾸어 주는 방식으로 안정된다.

Mies의 Crown Hall(Chicago, USA, 1950-56)은 트러스를 사용한 압축구조 방식의 건축물이며, 구조는 4개의 래티스 트러스 구조로 된 지붕과 지상에서 1.8m 높여 배치된 67m×36m 크기의 슬래브, 그리고 내부에 기둥이 없는 균일한 공간으로 구성되어있다. 기둥의 스패ンは 7.3m이고 3m간격의 멀리온이 유리벽체에 배치되어있다. 투명한 유리벽체를 통하여 실내의 건축적 요소를 실외에서 파악할

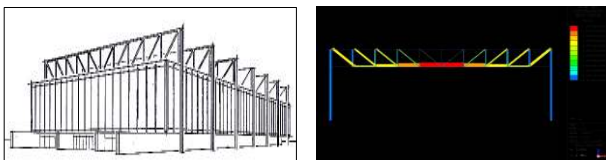


그림 13. Crown Hall의 지붕트러스와 응력 다이어그램

수 있다. 공간은 철골의 장 스패 구조와 철근 콘크리트 구조의 혼합으로 이루어져 있다.

비렌딜⁹⁾ 트러스(Vierendeel truss) 구조를 사용하는 사

례로 Louis I Kahn의 Salk Institute (California, USA, 1959-66)가 있다.

Salk Institute는 2개의 건물이 중정을 사이에 두고 마주 하여 배치되어있고 도서관과 사무실 그리고 무주공간의 실험실(22m×72m)로 구성되어있다. 실험실은 포스트



텐션 구조인 비렌딜 트러스로 지지되고 개별연구실은 콘크리트 내력벽 구조로 구축되어있다. 연구소의 공간적 특징은 실험실의 무주공간이다. 일반적인 슬래브와 보를 사용한다면 실험실의 평면에 기둥을 배치해야만 건물이 안정화된다. 그러나 무주공간의 실험실을 구축하기 위하여 포스트 텐션 구조와 비렌딜 트러스를 사용하여 실험실을 지지하고 있다. 일반적인 라멘구조 보다 비렌딜 트러스 구조의 경우 트러스의 개수가 증가함에 따라 휨 모멘트가 줄어들기 때문에 구조적으로 효율적이고 장 스패의 공간을 구축할 수 있다. 포스트텐션 보의 내부는 설비배관이 지나가고 구조시스템과 설비시스템 그리고 공간이 상호 통합된다. 구조시스템을 통한 서비스 시설의 통합은 Kahn의 대부분 건물에서 공통적으로 나타나는 특징이 된다.¹⁰⁾

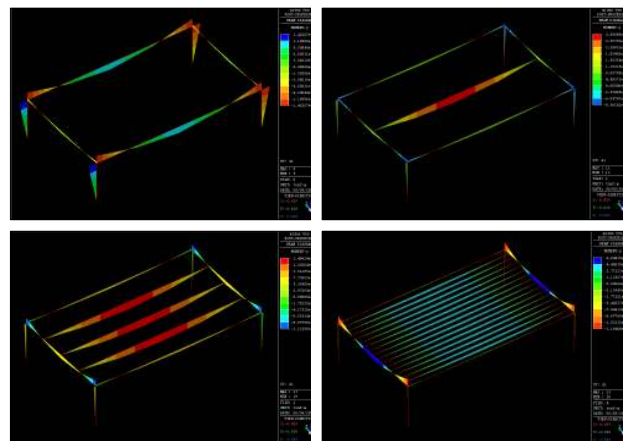


그림 15. 비렌딜 트러스(Salk Institute)의 증가에 따른 응력 다이어그램

3.3 스페이스 구조 방식(Space Structure)

스페이스 구조방식은 주로 대 경간 구조시스템에 사용되며, 요구되는 응력에 형태로 대응하는 방식과 응력의 집결 부분에 구조적 보강을 하는 안정방식이 사용된다고 할 수 있다.

스페이스 구조방식의 건물은 돔이나 셸 같이 압축력이 중요한 응력이 되는 것과 인장력이 주된 응력이 되는 서스펜션 구조의 건물로 나누어 볼 수 있다.

11) 비렌딜은 사다리를 의미는 격자보이고 강접합으로 결합된다.
12) 김낙중, 루이스 칸 건축의 구조적 특성에 관한 연구, 서울대 박사학위 논문, P.118, 1999

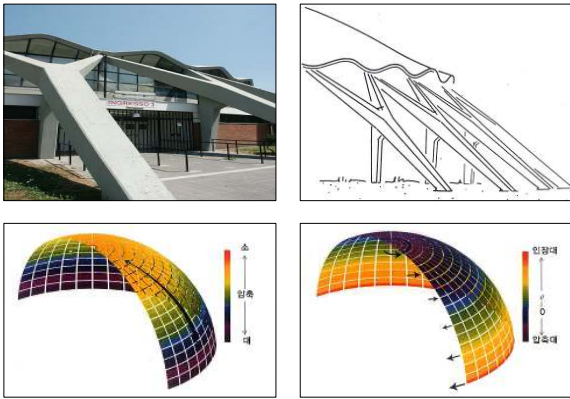


그림 16. Little Sports Palace의 종 방향 응력다이아그램(左)과 횡 방향 응력다이아그램(右)

압축력이 주된 응력으로 작용하는 사례는 Nervi의 Little Sports Palace(Rome, Italy, 1957)가 있다.

구조적 요소로서 돐의 내부에 설치된 리브는 좌굴을 방지하는 역할을 하고 돐 외부의 압축력은 Y자 형태의 버트레스형 기둥이 대응하고 있다. 이러한 돐 구조물의 응력을 분석하면 돐의 종 방향으로 내려올수록 압축력이 증가하고 횡 방향으로 인장력이 증가한다. 종 방향의 압축력은 Y자형태의 버트레스형 기둥이 대응하고 횡방향의 인장력은 곡형단면의 형태로서 대응하고 있다. 이러한 축력에 대응하는 방법은 돐 구조물의 안정화 및 형태 구성 방법에 밀접한 영향을 주고 있다.

인장력이 주된 응력으로 작용하는 사례로 Kimbell Art Museum(Texas, USA, 1967-72)이 있다. 단위공간구조는



그림 17. Kimbell Art Museum의 전경

30.5m×7.3m의 16개의 볼트형 구조가 길이방향으로 배치되어 있고 각각의 단위구조 지붕은 포스트 텐션 공법에 의하여 장 스패의 처짐을 방지하고 경량의 보 역할을 하고 있다. 이 지붕의 중앙부분에는 슬릿 모양의 개폐 가능한 개구부가 나있고, 이곳

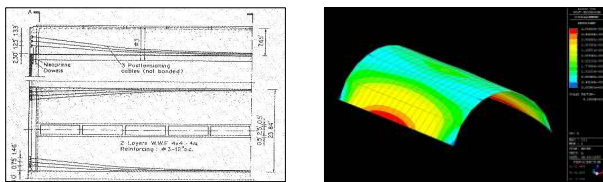


그림 18. Kimbell Art Museum의 배근도(左)와 응력 다이어그램(右)

지붕 상부에 일직선으로 틈을 두었고 벽체 상부와 지붕의 접합부에도 틈을 두어 볼트지붕의 압축력을 벽체가 지지하고 있지 않다는 것을 시각적으로 나타내고 있다. 바닥 슬래브는 위플슬래브를 사용하였다. 또한 외벽상에서 보이는 시공이음과 볼트지붕 단부의 포스트텐션 캡의 표현은 구축의 과정을 시각적으로 표현하고 있다.



그림 19. Burgo Paper Mill의 전경

평면은 볼트단위구조 지붕이 하나의 전시 공간을 형성하고 있다. 볼트형 구조는 미술관의 형태와 평면 구성 방식의 기본이 된다.

인장 케이블을 사용한 사례로 Nervi의 Burgo Paper Mill(Mantua, Italy, 1961-63)이 있다. 구조는 현수케이블이 공장의 지붕슬래브를 들어올려 공간을 형성한다. 두 개의 교각 사이에 매달린 평지붕은 중앙부의 스패인 163m이고 전후로 42m씩 캔틸레버 형태로 돌출되어 있다. 교각의 높이는 50m이고 교두부에는 4개의 인장 케이블을 설치하여 철골의 평평한 트러스 지붕을 매달고 있다.

평면은 현수케이블이 매달고 있는 지붕으로 인하여 넓고 균일한 대규모 무주공간을 제공하여 제지공장의 기계 설치와 생산동선을 원활하게 하고 있다. 위의 사례와 같이 물리적 구성요소로서 스페이스 구조방식은 힘의 흐름을 압축형과 인장형으로 분류 할 수 있다. 즉, 구조체에 힘이 축력으로 전달되는 것이다. 이와 같은 형태저항구조는 구조적 요소가 건물의 외피에 그대로 표출되어 입면 구성의 중요한 형태적 특성을 가진다.

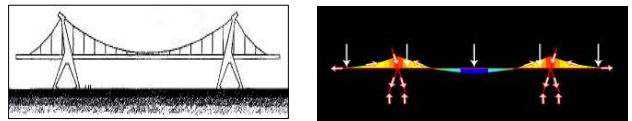


그림 20. Burgo Paper Mill의 지붕구조(左)와 응력다이아그램(右)

4. 근대건축의 구조시스템과 건축적 특성

4.1 구조시스템의 물리적 측면에서의 특성

근대건축물을 건축적 특성으로 고찰하면 건축은 재료의 특성과 기술적 속성을 추구하는 물리적 특성과 공간에 대한 인식을 경험적 측면에서 고려한 심리적 특성으로 나누어 볼 수 있다. 물리적 특성성은 구조시스템을 의미하고 심리적 특성은 공간과 형태를 의미한다.

구조시스템을 응력의 제어 방법에 따라 분류하면 하중의 효율적 분산, 개선된 단면의 사용 그리고 구조체의 형태로 대응하는 경우로 나누어 볼 수 있다.

하중의 효율적 분산 측면에 적절한 물리적 유형은 직각형태의 골구조방식 그리고 압축형 스페이스 구조방식이 포함된다.

직각형태의 골구조로서 도미노시스템의 하중전달 방법은 내력벽을 효율적으로 배치하고 하중을 집중하여 기초로 분산 시킨다. 또한 내력벽을 주거건물의 측벽에 주로 배치함으로써 조망을 확보하고 평면구성과 공간배치에 효율성을 제공하고 있다.

압축형 스페이스 구조는 압축력에 대응하는 버트레스 기둥과 아치형 보를 사용하여 하중을 기초로 전달한다.

표 1. 근대건축의 구조시스템과 건축적 특성

구조시스템		형태와 공간	물리적 측면에서의 특성	심리적 측면에서의 특성
Skeleton Structure	직각형태의 골조구조	공간 구성형	· 플랫 슬래브 · 내력벽의 효율적 배치 · 개선된 단면 사용	· 층고확보, 심리적 안정감 추구, 곡면벽의 자유로운 배치 · 골조구조와 혼용, 공간계획의 다양성 추구 · 부재를 시각적으로 분리함으로써 독립성강조
	테이퍼형상의 골조구조	형태 구축형	· 부재의 두께와 형상조정	· 역학적 원리에 근거한 형태적 안정감 추구
Trussed Structure	트러스 지붕	형태 구축형	· 래티스 트러스 구조, 스페이스 프레임 사용 · geodesic dome 구조	· 시각적으로 통일감 있는 지붕형태연출 · 대규모 공간계획
	트러스 보	공간 구성형	· vierendeel truss + 포스트텐션 공법	· 보를 시각적으로 노출, 장 스패의 공간 구축 · 주요 구조부와 비구조부로 공간의 분리
Space Structure	인장형 스페이스 구조	형태 구축형	· 인장 케이블 + 포스트 텐션 · 응력에 대응하는 형태	· 현수곡선의 시각적 비례와 형태미 표현 · 대 공간 평면구성과 밝은 실내공간 연출 · 역학적 지식을 바탕으로 객관적인 형상추구
	압축형 스페이스 구조	형태 구축형	· 버트레스 기둥 · 아치형 보	· 압축력에 대응하는 기둥의 형태와 기울기를 조정함으로써 시각적 안정감 추구 · 돔 하부의 압축력을 분산시키고 인장력에 대응하는 부재를 형태적 특성을 가지고 배치

개선된 단면을 사용하는 경우는 같은 단면적의 부재를 사용하여 효율적으로 하중을 감당하고 부재를 경량화 할 수 있다. 또한 휨 응력을 줄일 수 있는 접합방식을 사용한다. 대표적 사례로서 트러스 구조방식이 있고 사용장소에 따라 트러스 지붕과 트러스 보를 사용한 경우로 나누어 볼 수 있다. 트러스 지붕은 래티스 트러스 구조와 스페이스 프레임¹³⁾ 그리고 지오데식 돔 구조물이 있다.

지붕구조에 트러스를 사용하면 휨 응력을 줄이고 축력으로 응력에 대응할 수 있다. 휨 응력이 줄어들면 부재의 두께가 줄어들고 지붕구조를 경량화 할 수 있다. 트러스 구조의 부재 결합방법은 반접합(disjoint)을 사용하여 디테일을 기술적 형태로 나타내고 구축과정을 강조한다.

트러스 보로서 비렌달 트러스 구조는 라멘골조 구조방식과 혼용하여 강접합으로 결합되고 부재내부의 휨응력을 분산하기 때문에 구조적으로 효율적이다.

구조체의 형태로 대응하는 경우는 테이퍼 형상의 골조구조와 인장형 스페이스 구조방식이 있다.

테이퍼 형상의 골조구조 방식은 부재의 두께와 형상을 조정함으로써 휨 응력이 집중되는 부재중앙과 강절점 부분에 철근을 배근하고 재료의 두께를 조정하여 응력에 대응하고 있다. 또한 강접합으로 결합할 경우 최대 휨응력을 줄일 수 있어 부재의 두께가 과도하게 두꺼워 지는 것을 방지 할 수 있다.¹²⁾

인장형 스페이스 구조는 프리스트레스 인장케이블이나 현수케이블을 구조요소로 사용하며 형태로서 대응하고 있다. 스페이스 구조방식은 압축력과 인장력을 적절한 경로와 구조부재를 통하여 기초로 전달하고 있다. 구조부재가 대응하는 응력에 따라 인장형과 압축형으로 나누어 볼 수 있지만 두 가지 유형이 혼용되어 구축되는 경우가

대부분이다.

건축물에 사용되는 구조시스템은 역학적으로 안정되기 위하여 필요하며 건축물의 물리적 특성을 구성하는 기본 요소가 된다고 할 수 있다.

4.2 건축물의 심리적 측면에서의 특성

건축물의 심리적 특성은 공간과 형태로 나타나며 평면 계획에 영향을 주고 있다. 이와 같은 심리적 특성은 공간 구성형과 형태 구축형으로 설명 될 수 있다. 공간 구성형은 소규모 단위공간인 주거 건축에 나타나고 강접합의 결합방법을 사용한다. 형태 구축형은 구조시스템이 건물 형태와 골조에 직접영향을 주는 경우로서 주로 대규모의 균일한 공간을 요구하는 집회시설, 체육관, 그리고 공장 과 같은 용도에 사용된다.

공간 구성형은 직각형태의 골조구조방식과 트러스 보를 사용한 경우로 정리할 수 있다. 직각형태의 골조방식으로서 도미노 구조는 칸막이벽의 가변적 배치와 곡면벽의 자유로운 배치로 공간계획에 효율적이다. 또한 도미노 슬래브를 주 공간과 부 공간에 삽입하여 공간의 내적 조화를 이루고 평면 그리드를 형성한다. 이러한 도미노 구조는 초기 근대건축의 기하학적 형태에 영향을 주며 부재의 결합은 외부로 노출되지 않는 강접합을 사용한다.

Mies가 사용한 골조구조는 다양한 다목적 공간과 유동하는 공간을 추구한다. 초기 주거건물은 내력벽체가 사용되기 때문에 외부와 개방되지 못하고 폐쇄적인 특성을 가지고 있지만 기둥과 벽체가 혼용되면서 닫혀지지 않고 유동적인 공간을 구축하게 된다. 이러한 유동적 공간은 판유리라는 근대재료를 사용하여 상호관입하는 공간을 표현 할 수 있다.

공간 구성형으로서 트러스 보를 사용한 Kahn의 건물은 실내공간에 기둥이 없는 무지주 공간을 구축할 수 있다. 비렌달 이라는 격자보를 사용하여 실험실에 기둥이

13) 트러스로 만들어진 슬래브
14) Angus J. Macdonald, Structure and Architecture, Butterworth Heinemann, P.128, 1994

조성현

없는 넓고 균일한 공간을 구축하고 주 공간과 부 공간을 물리적으로 분리한다. 즉, 구조시스템으로 공간을 설정하고 형태를 통합시키고 있다. 그러므로 구조는 주 공간과 부 공간의 매개체 역할을 하고 있다.

형태 구축형은 테이퍼 형상의 골조 구조방식과 트러스 지붕 그리고 스페이스 구조로 정리할 수 있다.

테이퍼 형상구조는 주로 기둥과 보의 집합 부분에 집중적으로 나타나고 형태로써 저항하는 구조이기 때문에 시각적으로 건물형태 계획에 직접적인 영향을 주고 있다. 또한 역학적 원리에 근거하여 형태적 안정감을 추구하고 있다.

트러스화 된 지붕은 시각적으로 통일감 있는 지붕형태를 나타내고 지오데식 돔 구조는 시각적 비례미와 기하학적 형태를 추구하고 있다.

인장형 스페이스 구조는 현수곡선의 시각적 비례와 형태미를 가지고 대 공간의 평면과 밝은 실내공간을 구축할 수 있다. 그리고 압축형 스페이스 구조의 경우는 기둥의 형태와 기울기를 조정함으로써 시각적 안정감을 추구하고 구조물 하부에 생기는 압축력을 분산시킨다. 스페이스 구조는 구조시스템 자체가 형태가 되고 이러한 건축성향은 현대 과학과 테크놀러지를 바탕으로 공간 구성과 형태 표현의 새로운 가능성을 탐구하는 하이테크 건축이념의 바탕이 된다.

5. 결론

건축양식의 전개 과정은 그 시대의 재료와 구축법의 발전으로 이루어진다. 재료와 구축법은 물리적측면의 특성이 되고 그러한 공간을 요구하는 사회적, 문화적 요구는 심리적 측면의 특성으로 나타난다.

근대건축의 물리적 특성은 구조시스템에 의하여 골조구조, 트러스 구조 그리고 스페이스 구조로 정리할 수 있다. 또한 응력의 제어 방식에 따라 하중의 효율적 분산, 개선된 단면으로 경량화 추구, 그리고 형태로 대응하는 방식으로 분류할 수 있다.

골조구조 방식은 직각형태의 골조구조와 테이퍼형상의 골조구조로 나누어 볼 수 있다.

트러스 구조방식은 휨 응력을 줄이고 축력으로 하중을 감당하는 것이다. 이러한 구조는 지붕과 같이 노출되어 형태에 직접 영향을 미치기도 하고 보와 같이 실내공간 구성 원리로서 사용되기도 한다.

스페이스 구조방식의 압축형 구조는 주로 돔이나 셸과 같은 구조물을 의미하고 인장형 구조는 케이블이나 포스트텐션 공법을 사용한 건물이다. 건축물의 형태와 공간을 구성함에 있어서 구조적 요소가 밀접한 관련성을 가지는 것은 그 시대의 사회, 문화가 다양한 공간을 요구하기 때문이라 할 수 있다. 대 공간 구조물은 체육관이나 전시실 그리고 공장과 같은 목적으로 사용되고 구조적 요소가 시각적으로 형태에 직접 영향을 주고 있다고 할 수 있다.

심리적 특성으로 건물을 분류하면 공간 구성형과 형태 구축형으로 정리할 수 있다. 공간 구성형은 주로 주거

건축과 같은 소규모 건축물이고 구조는 골조구조와 내력벽이 혼용된 경우가 대부분이다. 또한 시기적으로 20세기 초반 주거건축물들로 구성된다. 형태 구축형은 응력에 대응하는 구조적 방법과 안정화 요소들이 시각적으로 직접 형태에 나타나는 경우로서 테이퍼 형상의 골조 구조방식, 트러스 구조방식, 그리고 스페이스 구조방식의 건물로 구성된다. 특히 스페이스 구조방식의 건물은 20세기 후반에 구축된 대 공간 구조물이기 때문에 재료의 발전 뿐 만 아니라 기술적 요소가 발전되어 구체화되기까지는 일정한 시간이 필요하다는 사실을 알 수 있다. 이와 같이 구조시스템은 건물형태에 영향을 주고 있고 또한 공간구성에도 객관적이고 합리적인 원리를 제공하고 있다.

건물의 형태는 심리적 개념화 과정을 통하여 계획되고 물리적 구조시스템을 통하여 구체화된다. 이러한 과정이 객관적인 구조적 원리에 의하여 구축됨으로써 구조시스템은 건물형태 및 공간계획에 합리적이고 효율적인 원리를 제공한다고 할 수 있다.

참고 문헌

1. Peter Rice 저, 이수권 역, 엔지니어 이미지, 청람, 1997
2. 김성호, 현대건축사교론, 시공문화사, 1999
3. 임석재, 형태주의 건축 운동, 시공사, 1999
4. 함인선, 구조의 구조, 발언, 2000
5. 김성곤, 서양건축사, 기문당, 2002
6. 이상현, 철과 근대건축이론의 발전, 발언, 2002
7. 임석재, 땅과 인간, 북하우스, 2003
8. 함인선, Tectonic Studio, 발언, 2003
9. 김종성, 구조의 원리, 기문당, 2004
10. 김종성, 건축구조 원리이해, 기문당, 2006
11. 김곤, 은희창, 함희정, 박우열 공저, 건축 속의 공학, 기문당, 2006
12. 김종성, 김철환, 이은택 공저, 건축, 구조디자인과 모형, 구미서관, 2007
13. Torroja, Eduardo, Philosophy of Structure, Univ. of California Press, 1958
14. Curt Siegel, Structure and Form, Reinhold Pub. Corp., 1962
15. Angus J. Macdonald, Structure and Architecture, Butterworth-Heinemann, 1994
16. Ford, Edward R., The Details of Modern Architecture vol 1,2 MIT Press, 1996
17. Moore, Fuller, Understanding Structure, McGraw-Hill, 1999
18. John Haldane, Form, Meaning and Value; a history of the philosophy of architecture, The Journal of Architecture, 1999

논문접수일 (2010. 3. 10)

심사완료일 (1차 : 2010. 3. 25, 2차 : 2010. 4. 7)

게재확정일 (2010. 4. 11)