

철근콘크리트 고층 건축물의 해석 및 설계

## 철근콘크리트 고층건물의 하중과 구조시스템

### Design Load and Structural Systems of High-rise Reinforced Concrete Buildings



신 영 수\*



이 세 웅\*\*

#### 〈편집자 주〉

콘크리트 재료의 고강도화, 고유동화 기술의 발전과 컴퓨터의 발달로 인한 해석 기술의 발달로 복잡한 고층 건축 구조물을 보다 합리적이고 경제적으로 설계 및 건설할 수 있게 되었다. 특히, 고강도 콘크리트 및 구조용 경량콘크리트가 기둥 및 슬래브에 사용되면서 세계적으로 철근콘크리트 고층구조물의 발전을 가져왔으며 컴퓨터 소프트웨어의 발달은 복잡하고 거대한 고층 건축구조물의 거동을 보다 실제에 가깝게 예측하여 안전성의 확보를 가능하게 하였다. 우리나라에서도 토지 이용의 효율화를 위해서 초고층 건물에 대한 필요성이 대두되고 있으며 현재 설계중인 건물도 있는 것으로 알려지고 있다. 따라서, 이번 특집에서 철근콘크리트 고층 건물의 시스템, 풍하중, 지진하중, 접합부 등의 설계적인 분야를 주제로 제반 사항에 대해 다루는 것은 우리나라의 철근콘크리트 고층건물의 보급을 위해서도 의미가 있다고 할 수 있다.

본 특집에서는 고층건물의 설계 기술 및 해석 기술에 대한 고찰과 적용방법을 소개하면서 고층건물에 대한 이해를 돕고자 하였으며 끝으로 여러 가지 어려운 여건에서도 훌륭한 원고를 집필해 주신 필자 여러분께 감사의 말씀을 드린다.

(특집주관: 이화여자대학교 건축학과 신영수 교수)

#### 1. 서 언

건축의 구조를 구성하는 요소는 기본 부재인 기둥, 보 등의 선형부재와 슬래브, 벽체 등의 표면부재, 쉘, 튜브와 같은 공간부재 등의 조합으로 이루어지며 건물의 용도, 하중, 높이, 스펠 등에 따라 다양하게 부재를 선택하여 사용한다. 이러한 구조체의 종류에 따라 적절한 구조부재를 선택하는 과정을 구조설계라고 하며 여러 부재들을 적절히 조합·배치하여, 구조물에 미치는 외력, 즉 고정하중, 풍하중, 지진하중 등을 효과적으로 지지하면서 경제성, 안정성, 사용성을 최대한 확보할 수 있는 구조체계를 구조시스템이라고 한다. 구조시스템의 선택은 필연적으로 안전성을 확보해야 하며 적절한 경제성을 추구하는 것이 필수적이다. 구조물의 안전성이 확보된 경우, 구조물의 경제성은 건물의 높이, 폭, 구조재료, 시공방법, 공사기간 등의 여러가지 요소에 의해 영향을 받는다.

건물이 고층화되어 높이가 증가함에 따라 전체적

\* 정회원, 이화여대 건축학과 교수

\*\* 상용건설 기술연구소 부장

인 건축물의 경제성에 미치는 영향은 연직하중 (gravity load)에 의한 영향보다는 건물에 가해지는 바람, 지진과 같은 수평하중에 의한 영향이 커진다. 즉, 다층화 됨에 따라 축력이 증가하여 기둥, 벽체 등의 수직부재의 크기가 커지나 이러한 축력에 따른 부재의 변화보다는 횡력에 따른 변형 및 응력이 급속히 증가하게 되어 횡력을 지지하기 위한 구조체가 급격히 증가하게 된다.

따라서, 본 고에서는 먼저 고층 건물에 작용하는 하중 중 횡력 즉, 풍하중과 지진하중에 대하여 기술하고 실제 철근콘크리트 구조물에서 사용한 구조시스템을 중심으로 기술한다.

## 2. 고층건물의 횡하중

### 2.1 풍하중

일반적으로 1Hz 이하의 고유 주파수를 나타내는 고층건물의 경우에는 고주파 영역에서 많은 에너지를 포함하고 있는 지진의 경우보다는 저주파 영역에서 많은 에너지를 포함하고 있는 풍하중에 대한 응답 또는 하중효과가 상대적으로 더 커질 우려가 있다.

국내에서 고층 아파트, 호텔, 콘도 등의 건설 증가에서 알 수 있듯이 고층건물의 용도가 주거용으로 확산됨에 따라, 일상 생활 속에서 흔히 경험하게 되는 진동의 문제와 구조설계시 사용성 및 거주성 (serviceability)의 확보를 위하여 풍하중에 대한 문제가 더 중요하게 대두되고 있다. 이러한 문제점의 해결을 위해서 본 고에서는 대략적으로 고층건물에 대한 바람의 평가에 관련하여 다음에 대하여 고찰해 보고자 한다.

- (1) 정적 풍하중 - 풍하중 산정의 기본 원리  
현재 각국의 풍하중 산정법
- (2) 동적 풍하중 - 풍동실험  
수치해석법
- (3) 풍하중에 의한 사용성 평가법

#### 2.1.1 정적 풍하중

##### (1) 풍하중의 산정방법

실제로 풍속에서 풍하중을 계산하는 식은 단순하

게 정의되는데 기본적으로 풍속으로부터 풍압력을 구한뒤 다시 구조물의 형상과 수압면적을 고려하여 풍하중을 구하게 되며, 공기역학이론에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = 1/16 \times V^2 \times C \times A \quad (\text{공기의 밀도} = 1/8)$$

여기서 P는 풍하중, V는 풍속, A는 수압면적으로 바람이 닫는 면적, C는 풍력계수로 건축물의 형태에 따른 바람맞이 정도를 나타내는 값이다.

국내의 경우 풍하중은 구조설계시에 적용되는 건설부령 "건축물의 구조기준등에 관한 규칙"에 의한 풍하중 산정식은 다음과 같다.

$$\text{풍하중} = \text{풍력계수} \cdot \text{가스트계수} \cdot \text{속도압계수} \cdot \text{기본속도압} \cdot \text{유효면적}$$

국내에서는 개방된 평지의 10m 높이에서 측정된 100년 재현주기의 년 최대풍속을 기본 풍속으로 하며, 이 기본 풍속을 이용하여 기본속도압을 정한다.

속도압 계수는 대기상계층내의 연직분포를 지수 분포로 가정된 식을 적용하는데 이 식에 사용되는  $\alpha$  값은 지표면의 조도에 의해 영향을 받는 것으로 되어 있으나, 이에 대한 정량적인 평가는 아직 이루어지지 않은 실정으로 설계자의 판단으로 이루어진다.

가스트계수는 풍하중의 동적인 효과를 고려하기 위하여 도입한 것으로 노풍도를 3개 지역으로 구분하여 1.25, 1.5, 2값 중 하나로 정하도록 하고 있으며 기본속도압에 속도압계수와 가스트계수를 곱한 값을 설계속도압으로 정의하고 있다.

이 설계속도압에 건물의 형상을 고려한 풍력계수의 값과 유효 풍압면적을 곱하여 풍하중을 계산하게 된다. 법규에서 주어지는 풍력계수의 경우 저층 구조물을 대상으로 정리된 자료이며, 고층의 경우 그 자료가 없으므로 법규칙 13조 3항에서 풍동실험에 의한 풍력계수를 정할 수 있도록 되어 있다.

##### (2) 외국의 산정방법 비교

이러한 기본적인 풍하중 산정시 고려사항에 대하여 이해를 가지고서 외국의 경우 산정법에 대하여 살펴보면 표 1과 같다.

표에서 알 수 있듯이 기본적으로 풍하중을 산정하는 방식은 거의 유사하나 건축물의 사회적 중요성을 고려한 중요도 계수와 변동 풍하중을 받는 구조물의 동적 영향을 고려하는 동적할증계수를 고려함에 있어 국내와 차이가 있음을 볼 수 있다.

국내에서는 건축물의 중요도 계수를 전혀 고려하고 있지 않으며, 동적특성을 단순히 노풍도에 따라 일정한 값을 고려하고 있는 반면, 외국에서는 동적효과를 다양한 변수를 사용하여 고려한다. 사용되어지는 변수로는 조도 계수, 돌풍에너지 계수, 구조물 치수 계수, 형상미 계수, 고유진동수 계수, 감쇠비 계수, 미시기후 효과 계수 등이 있다. 또한 캐나다와 일본의 경우에는 진동 및 사용성에 관련한 규준도 있다.

### 2.1.2 동적 풍하중

건축물에 작용하는 바람이란 지표의 마찰, 요철,

장애물 등의 영향으로 공기의 흐름이 시간적, 공간적으로 불규칙하게 변동하는 특성을 지닌 난류이므로 앞에서 살펴본 바와 같이 동적인 영향을 고려한 정적인 하중만으로 고층건물의 영향을 평가하는 것은 진동의 문제, 건축물의 형태, 형상 및 주변조건 등의 영향 등과 같은 특성을 파악하기에는 한계가 있다.

#### (1) 풍동실험

내풍설계를 위해 풍동실험을 할 경우 사용되는 풍동은 건축물에 작용하는 바람은 대기경계층을 대상으로 하므로 환경중 풍동이여야 하며, 특히 고층 또는 초고층 건축물을 실험할 경우 적어도 1.5m×1.5m 이상의 풍로이어야 한다. 또한 풍동의 높이는 2m 이상이 바람직하다.

풍동의 종류로는 크게 구분하여 회류식, 분출식, 흡입식이 있는데 어떤 방식의 풍동이던 건축물을 대상으로 하는 풍동의 경우에는 실험대상이 놓여지

표 1 각국의 규준 비교

	미국 ANSI A58.1 1988	캐나다 NBCC 1985	일본 1994	한국 1992	영국 BS 1984
풍 하 중 산 정 식	$P = K_z G q C_d A$ 노풍도 · 돌풍계수 · 속도압 · 풍력계수 · 유효면적	$P = q C_e C_p A$ 속도압 · 노풍도계수 · 돌풍영향계수 · 풍력계수 · 유효면적	$P = q C_e G_s A$ 속도압 · 노풍도 · 돌풍영향계수 · 유효면적	$P = C G K_z G q_s A$ 풍력계수 · 가스트계수 · 속도압계수 · 기본속도압 · 유효면적	$P = 0.613 (V S_z S_e)^2 C_d A$ 기본풍속 · 지형계수 · 조도계수 · 중요계수 · 풍력계수 · 유효면적
기본풍속	50년 재현주기 최대마일 풍속	30년 재현주기 1시간 평균풍속	10분 평균풍속	100년 재현주기 년최대풍속	50년 재현주기 3초 돌풍속도
측정위치	노풍도C지역 10m 높이	10m 높이	개방된 평지 10m 높이	개방된 평지 10m 높이	개방된 평지 10m 높이
중요도계수	속도압 산정시 계산	돌풍영향계수 산정시 계산	재현기간으로 고려		설계풍속산정시 고려
노풍도	4개지역	3개지역	5개지역	3개지역	4개지역
동적할증계수	돌풍계수 (돌풍에너지, 돌풍상관계수, 치수계수, 감쇄계수)	돌풍영향계수 (지역적, 폭, 높이, 주기, 감쇄율)	돌풍영향계수 (고유진동수, 비공진계수, 난류강도, 공진계수, 치수계수 등)	가스트계수	기본풍속으로 3초 가스트속도를 고려하고 다시 미시기후 효과를 고려해서 설계 기본풍속을 산정
비 고	강성도에 따라 돌풍계수 산정이 다름(주기, 형상미)	NRCC No.23178에 상세보증, 진동에 관한 규준	사용성에 관한 규준		기상환경을 고려하여 상세히 규정

는 풍로 단면내에서 재현하고자 하는 기류가 충분히 재현되는 것이 중요하다. 이러한 재현을 위하여 연직분표, 조도를 만들기 위해서는 충분한 길이의 풍로가 필요하다. 풍동실험에 사용되는 계측장비로는 풍속계, 풍압계, 공기력 분석계, 진동계 등이 있다.

풍동실험은 건축물 등 주변의 지형, 지물을 모델화하고 인공적으로 풍동기류를 만들어 건축물에 작용하는 풍력, 풍압, 건물의 응답, 기류상태를 조사하는 것으로 이는 실제 현상의 예측과 확인을 위한 것이므로 실제 현상을 재현하지 못하거나 맞지 않으면 의미가 없는 실험이 되고 만다. 이를 위하여 실험에서는 실제 현상과의 상사성을 만족해야 하는데, 상사성의 조건은 크게 나누어 아래의 3가지가 된다.

- 상사성 ① : 실제 구조물과의 상사성(모양을 닮게 한다)
- 상사성 ② : 풍동기류의 상사성(흐름의 상황을 비슷하게 한다)
- 상사성 ③ : 상호작용에 관한 상사성(힘의 균형을 서로 비슷하게 한다)

이들 상사조건에서 무차원의 파라메타를 유도하여 실물과 일치시켜 풍동실험을 한다.

상사성 ①은 모형의 형상과 실물을 일치시키는 것이고 상사성 ②는 높이 방향의 평균풍속 수직분포나 흐트러짐 강도 분포 등의 자연풍의 형상을 축적에 대응해서 풍동내에서 서로 비슷하게 하는 것이다. 상사성 ③은 유체힘의 균형을 서로 비슷하게 하는 것이다. 한 예로 유체의 관성력과 점성력의 비인 레이놀즈수를 모형규모에 맞추어야 하는데 현실적으로 매우 어렵기 때문에 일반적으로 각이 있는 건축물의 경우에는 레이놀즈수의 영향이 적어서 대니수의 경우 레이놀즈수의 일치는 무시하고 있다. 하지만 원주와 같은 각이 없는 표면을 가진 경우에는 레이놀즈수의 영향이 크기 때문에 실험에서는 모형표면을 거칠게 하는 등의 특별한 강리가 필요하다.

건축분야에서 행해지는 풍동실험은 풍압실험, 풍력실험, 풍진동실험 등을 들 수 있다.

풍압실험은 건축물 외부 각벽에 작용하는 풍압계수를 측정하여, 건축물 외장재의 하중평가를 목적으로 행해지는 경우가 많다. 풍압의 측정은 건물모형 벽면에 안지름 1mm 정도의 풍압 측정 구멍을 뚫고 거기에서 거의 같은 정도 지름의 비닐튜브를 끼워 이를 통해서 압력측정장치로 연결하여 측정한다. 풍압계수는 측정점의 압력과 풍동내 흐름의 기준 정압과의 차이를 기준속도압에서 빼서 구한다.

풍력실험은 건축물 전체 또는 그 일부에 작용하는 하중을 평가하는 것을 목적으로 한다. 평균적인 풍력 뿐만 아니라 변동하는 풍력을 풍력계수 실험용 분석계를 사용하여 평가한다. 풍력의 측정은 가능한 한 경량이며 강한 모형을 천칭에 올려서 하는데 일반적으로 건축물에서는 수평 2방향의 풍력, 전도모멘트, 수직방향의 2성분이 대상이 된다. 이렇게 측정된 풍력은 기준속도압, 대표면적, 대표길이 등을 사용하여 풍력계수의 형태로 부차원화할 수 있다. 풍진동실험은 직접적으로 건축물의 응답을 측정함으로써 건축물의 안전성을 직접 확인할 수 있는 실험으로 강성이 크고 경량인 모형을 2방향으로 병진할 수 있는 자유도를 갖는 지지장치(짐받이)에 설치하여 실시한다. 실제 건축물의 바람에 의한 동적진동특성을 재현하기 위해서는 풍동기류, 건물의 형상 이외에 질량비, 진동수, 감쇠성능 등의 구조동력학적인 특성을 실제 대상으로 하는 건물에 맞게 하여 실험한다.

## (2) 풍하중의 해석

풍하중에 의한 해석적인 방법도 크게 계산유체역학을 이용한 기류의 수치해석 방법과 확률론적 응답해석법에 의한 구조물의 진동 해석법으로 대별된다.

컴퓨터에 의한 기류해석은 최근 슈퍼컴퓨터의 발달과 함께 주로 항공분야를 중심으로 유체를 지배하는 기초방정식을 수치적으로 풀어 유체현상을 예측하는 형태로 발전되고 있다. 건축구조물과 관련해서도 풍동실험에 비해 시간적, 경제적으로 유리한 방법으로써, 풍동실험에서 구현하기 어려운 유동장의 현상을 파악하기 위한 방법으로써 계산유체역학이 연구되고 있다. 이러한 계산유체역학은 아직까지 건축물과 관련하여 밀접한 관계를 가지고 있지는 않으나 풍동실험의 결과와 비교를 통한 신

뢰성 확보 등에 관한 많은 연구가 이루어 지고 있다. 즉, 아직까지는 실제 건축물의 내풍설계에 있어서 유체계산의 결과가 직접적으로 적용된 예는 없어 보이며, 유체계산에 의해 얻어진 값을 그대로 이용하여 실제 구조물의 풍하중을 설정할 정도로 유체계산의 신뢰성은 확보되어 있지 않다고 말할 수 있다. 따라서 현 상황에서는 기본설계단계에서, 예를 들면 고층 건축물의 단면형상의 검토 등에 기술자료를 제공한다든가 하는 정성적인 정보를 활용하는 것이 유체계산의 응용면에서 중요하다고 생각되어 진다.

풍하중에 의한 진동해석 방법은 주로 주파수 영역해석법으로 1961년 Davenport에 의해 제안된 확률론적 응답해석에 기초를 두고 있다. 이 방법은 시간영역에 의한 해석법보다 신뢰도가 높은 경우가 많다. 왜냐하면 주파수영역해석은 수많은 시간영역 해석 결과의 평균치에 해당하기 때문이다. 확률론적 응답계산은 외력인 바람의 일반화된 풍력 스펙트럼을 이용하여 구한 일반화된 변위의 표준편차에 정상 확률과정에서 구한 피크계수를 곱하여 최대 응답치를 구하는 방법이다. 이와 같이 응답의 평균값, 분산, 표준편차 또는 최대값의 확률값을 입력된 변동풍속이나 변동풍력의 평균값이나 분산 등의 확률값에서 구한다.

현재 국내에서도 변동풍속, 변동풍력스펙트럼을 이용한 정상, 비정상, 풍사 동적응답해석에 관한 연구가 많이 이루어지고 있으나 아직까지는 국내용 풍하중 스펙트럼이 개발된 사례가 없이 외국의 연구자에 의해 제안된 풍하중 스펙트럼을 이용하고 있다.

### 2.1.3 사용성 기준 (수평진동 허용치)

인간에게 있어서 진동의 지각은 매우 주관적이며 주위의 환경 등에 영향을 받으므로 건물의 거주자가 바람으로 인한 진동에 대하여 느끼는 진동의 지각영역과 허용범위는 사람에 따라 다르다. 그리고 이에 대한 기준의 연구는 많으나 대부분 실험에 의한 것이기 때문에 이 결과를 고층건물의 사용성 판단 자료로 보정 없이 사용하는 것은 매우 위험하다. 따라서 거주자의 불쾌감을 검토할 신뢰성 있는 제안식이나 규준으로서 국제적으로 공인을 받고 있는

것은 거의 없는 실정이며 제안된 식들 역시 각기 표현방법과 결과에 있어서도 많은 차이를 보이고 있다. 본 장에서는 사용성 규준으로 재현주기별 강풍에 대한 허용 응답가속도를 제시하고 있는 일본의 거주성능 평가 지침서와 캐나다 기준을 검토하였으며 개인연구자에 의해 지금까지 제시된 사용성에 관련한 제안 중에서 강풍으로 인한 건물의 진동에 대하여 건물 사용자가 불쾌감을 느끼는 비율을 재현주기별 강풍에 대한 건물 최상부의 응답가속도로 표현한 Hansen, Irwin, Davenport 의 제안에 대해서 아래의 표 2에 정리하였다.

표 2 사용성에 관한 제안

기 준 및 제 안 자	기 준 값	특 징
일 본	진동수에 따라 최대가속도 값 제안	4가지 등급으로 구분
캐 나 다	10년 재현주기 풍속에 따른 최대가속도 값 제안	풍방향과 풍격각 방향의 가속도 근사식 제안
Hansen	불쾌감을 느끼는 비율과 강풍의 재현 주기에 따른 RMS 가속도 값 제안	두 건물대상 설문조사한 자료와 강풍의 발생 빈도에 대한 확률 분포이용
Irwin	1년 혹은 5년 재현주기에 따른 RMS 가속도 값 제안	병원을 대상으로 기준 설정, 주거용의 경우 계수를 곱하여 완화
Davenport	재현 주기별 가속도 값 제안(일반적인 경우 10년 재현주기에 20gal 이하)	x, y, z 방향의 가속도를 합성하여 가속도 설정

## 2.2 지진하중

우리나라의 지진하중에 관한 규정은 ATC기준을 근간으로 만들어진 것으로 중간 정도의 지진으로 규정하고 있다. 건물이 고층화됨에 따라 풍하중에 비하여 하중의 산정에 고려하는 에너지 소산 능력 등의 규정에 의하여 전체적인 크기는 적어지나 횡변위 문제, 부재 조인트의 피해 등으로 인하여 반드시 검토해야 할 사항이다. 본고에서는 우리나라 기준을 중심으로 먼저 지진하중 산정방법을 기술하고

지진해석 방법에 대해 기술한다.

우리나라의 지진하중 기준은 동가정적해석법으로 규정하고 있으며, 밀면전단력을 계산하는데는 지역 계수, 중요도 계수, 동적계수, 지반 계수, 반응수정 계수 등을 포함하고 있다. 이중 동적계수에 의해 설계스펙트럼을 만들 수 있으며 이를 동적해석에 적용하고 있다. 지진하중을 구하는 식은 다음과 같다.

$$V = (AICS/R)W$$

A : 지역계수, I : 중요도 계수, C : 동적계수,  
S : 지반 계수, R : 반응수정 계수

$$C = 1/1.2 \sqrt{T} \leq 1.5$$
$$CS \leq 1.75$$

여기서 주기 T는 구조 재료에 따라 계산 방법을 달리하도록 규정하고 있으며 수정반응 계수 R은 구조형식에 따라 분류되어 있다. 지반계수 S는 기초를 지지하는 지반의 성질을 반영하도록 되어 있다.

지진하중에 대해서는 동가정적하중에 의한 정적 해석 방법과 설계 반응 스펙트럼이나 지진시각력을 이용한 해석 방법 등이 있다. 그러나, 설계 단계에서는 먼저 개념적인 부재의 크기를 정하고 정확한 해석을 통하여 안전성을 확보하도록 하는 것이 보편적이다. 즉, 먼저 탄성적으로 접근하여 구조부재를 정하고 시각력해석 등 기타의 방법으로 검토하는 방식으로 진행된다.

## 2.3 고층 건물의 설계방법

고층건물의 설계과정은 대개 2단계 즉, 개념적 설계 단계, 개념적 설계의 확인 단계를 거친다. 개념적 설계 단계에서는 풍하중과 지진하중을 동시에 만족하는 구조체를 설계해야 하므로 동가정적하중을 비교하여 두 횡력 중 큰 것으로 설계하는 과정으로 탄성설계를 통한 해석 및 구조부재의 설계를 통하여 전체적인 구조물을 결정한 후 개념적 설계의 확인 단계를 거치게 된다. 다음은 두 과정에 대하여 기술한다.

### 2.3.1 개념적 설계 과정

개념적 설계의 과정은 다음과 같다.

- (1) 풍하중 및 지진하중에 대해 설계 기준으로 하중을 계산한다.
- (2) 반응 스펙트럼에 근거하여 지진하중을 평가한다.
- (3) 횡력에 대한 횡력저항 구조시스템의 크기를 결정한다.
- (4) 가정한 부재의 신뢰성을 확인하기 위하여 동적 특성을 검토한다.
- (5) 횡력저항 구조시스템을 설계한다. 이 경우 횡변위(story drift)에 관하여 검토해야 한다.
- (6) 횡력저항 구조시스템과 골조 및 골조 부재간의 조인트 상세에 대해 검토한다.

이상에서 설계된 구조체에 대하여 안전성을 확인하는 과정을 거쳐야 한다.

### 2.3.2 개념적 설계의 확인과정

개념적 설계의 확인과정은 주로 다음의 방법으로 해석하고 개념적 설계단계에서 결정된 부재의 안전성을 확인한다.

- (1) 반응 스펙트럼 해석(Response Spectra Analysis)

반응스펙트럼에 의한 해석은 전체적인 구조체의 거동과 횡력지지시스템과의 집합부에서 발생하는 응력을 파악하는데 사용할 수 있다. 반응스펙트럼에 의한 해석 결과로 집합부의 안전성에 대해 검토할 필요가 있다.

- (2) 연속 항복 해석(Sequential Yield Analysis)

연속항복 해석 방법은 부재의 항복이 발생하는 부재의 조인트를 찾아 안전하게 설계함으로써 구조 부재의 안전성을 확보하는 해석방법이다. 철골구조의 경우 가새가 있는 부분에서 조인트의 문제가 발생하나 철근 콘크리트의 경우 일반적으로 전단벽과 보의 조인트 부분에서 항복이 발생하여 순차적으로 항복이 진행되므로 조인트의 상세에 유의할 필요가 있으며 발생하는 모멘트에 충분히 지지할 수 있도록 설계되어야 한다.

- (3) 비탄성 시각력 해석(Inelastic Time History Analysis)

해석은 정확하나 해석시간이 많이 소요되고, 질

단콘크리트 구조물에서는 적용하기가 어려운 면이 있다. 또한, 정확한 지진 가속도의 시각력에 대해 해석할 수 없으므로 지진가속도 시각력의 선택에 유의할 필요가 있다.

### 3. 철근 콘크리트 고층구조물의 계획

#### 3.1 건축계획

고층건물은 초기 단계에서 건축계획에 의해 기본적인 형태, 면적, 개략적인 층수는 설계되어지나 안전성, 경제성, 사용성 등을 확보하기 위한 구조계획이 함께 이루어져야 한다. 즉, 구조부재의 배치를 위한 평면계획, 기둥의 배치, 코어의 배치 등이 초기단계에서 고려되어야 한다. 이 단계가 고층건축물의 경제성을 좌우하는 가장 중요한 단계이다. 따라서, 건축설계의 초기단계에서 구조설계자와 긴밀한 협조가 필요하며, 구조적 측면에서 고려된 평면의 형태, 입면의 형태가 설계에 반영되어야 안전하고 경제성이 있는 건축물을 설계할 수 있다.

#### 3.2 구조계획

고층건물은 계획의 초기단계에서 계획, 시공, 보수 유지관리 등에 영향을 미치는 여러가지 요소를 고려하여 구조적 안정성 및 안전성, 경제성 등을 면밀히 검토해야 한다. 구조계획 단계에서 구조적으로 고려되어야 할 사항을 정리하면 다음과 같다.

##### (1) 지반조건

기초 시스템의 선택은 고층건물의 안전성, 경제성 등이 큰 영향을 미치는 요소로 고층건물의 설계시 주변의 지반조건을 고려해야 한다. 일반적으로 고층건물은 축력이 크고 횡력에 의해 발생하는 하중이 크므로 암반층에 지지시키고 있다. 설계 초기 단계에 이러한 지질조건들이 만족되는지 검토되어야 한다.

##### (2) 건물 폭에 대한 높이의 비 (Aspect Ratio)

건물 폭에 대한 높이의 비는 보통 5~7 정도가 적절한 것으로 보고되고 있으나 도심의 고층건물의 경우나, 초고층화 될 경우 10이상을 적용하기도 한다. 이 경우 횡변위, 진동 등에 취약하게 되므로 이

를 지지할 수 있는 구조시스템의 확보가 중요하다. 진동, 변위 등을 조절하는 시스템도 이용하고 있다.

##### (3) 시공적 측면의 검토

고층구조물은 시공성, 시공 방법 및 조립 등에 대해서 검토해야 한다. 철근 콘크리트 고층건물의 경우 고강도콘크리트의 사용으로 인한 시공적 문제점, 콘크리트의 타설, 양중계획, 공법 등에 대해서도 검토한다.

##### (4) 설비층의 구조적 검토

건물이 고층화되면 중간층 부분에 설비층이 필요하게 되므로 구조시스템의 적절한 위치에 설비층을 둬으로써, 건물의 전체적인 설비 시스템이 원활하도록 한다.

##### (5) 경제성의 검토

여러가지 구조형식에 따른 개략적인 구조체의 비율, 구조체의 물량, 공사비, 공사기간 등을 산정하여 구조형식 선택의 기준으로 이용한다.

##### (6) 방화시설에 대한 검토

- 구조체의 불연성 재료의 사용으로 구조적 안정성 확보
- 방화구획에 따른 구조계획
- 비상 출입구에 대한 고려, 전단벽과의 문제점 파악
- 효과적인 연기 및 화재 감지시설
- 스프링클러, 배연, 배열 시스템 확보

##### (7) 지역적 고려사항

지역적 특수상황을 고려하여 설계 당시부터 고려한다.

##### (8) 건축재료의 유용성

구조 및 마감재료를 획득하기 쉬운 재료로 계획한다.

### 3.3 시공계획

고층건물의 시공은 고층화에 따른 높이의 증가로 저층 구조물의 시공과 달리 작업내용이 복잡·다양하게 되어 작업능률이 저하되고 공사기간이 늘어난다. 공사기간 동안 작업의 안전성 확보 대책, 내진, 내풍 등의 구조성능 확보, 방재시설 등의 요구로 공사비가 증가하여 종래의 저층 규모의 구조물과 시공방법, 공기산정 등에 대해 달리하는 점이 많이 발

생한다.

특히 철근 콘크리트조일 경우 콘크리트가 현장 타설될 때에는 공기에 직접적으로 영향을 미치므로 세밀한 계획이 필요하다. 높이와 파이프 라인의 길이, 펌프의 능력 등을 계획 초기단계에서 설정할 필요가 있으며 공법, 시공계획 등에 따른 구조검토가 필요한 부분은 이 단계에서 검토해야 한다. 필요할 경우 2차 인양 방법에 대해서도 고려하여 2차 인양에 의한 구조적, 재료적 결함을 최소화할 수 있도록 계획해야 한다. 이러한 양중계획 외에도 고층건물의 공기에 커다란 영향을 미치는 요소는 시공관리 기술과 거푸집의 개선이라고 할 수 있다. 공업화된 거푸집 방법의 선택, 과학적인 시공관리 등이 필수적 요소이다. 즉 Slip Form 공법, Up-Down(Top-Down) 공법, 시공의 기계화는 고층건물의 시공에서 필수적으로 고려해야하는 사항이며 기구, 인원 사용계획, 공사의 병행시공방법, 구조적 처짐, 침하에 대한 시공적 처리방법 등에 대해서도 고려해야 한다. 철근 콘크리트 코아의 경우에는 코아 콘크리트의 거푸집 계획, 타설 방법 및 시공계획, 선행공정의 선택 등이 고려되어야 할 중요한 요소이다.

## 4. 고층건물의 구조형식

### 4.1 구조형식의 선택

고층건물의 최적설계는 건축적, 기술적인 요구사항과 설계기준을 만족하면서 가장 경제적인 구조물을 선택하는 것이다. 고층건물의 구조는 경제성의 확보와 함께 사용성의 확보가 중요한 요소로서 1차적으로 횡변위, 층간 변위를 조절해야 하는데, 횡변위 조절을 위해서는 구조재료의 강도(strength)보다는 구조체의 강성(stiffness)에 대한 고려가 중요하다. 구조체의 강성은 건물의 형태와 공간구성에 맞게 횡력 지지구조체를 적절히 배치함으로써 증가되는 것으로 구조설계 초기부터 구조체의 강성확보를 위한 고려가 있어야 한다.

따라서, 고층건물 설계에서 경제성과 사용성 확보를 위해서는 높이에 대한 구조체 물량의 최소화 및 적절한 횡변위 조절이 가능한 구조형식을 선택하여 수평력의 효과를 최소화하는 것이라고 할 수

있다. 고층건물의 설계는 주어진 공간에서 최소의 구조체량으로 최대의 강성을 갖게 하는 것이다. 또한, 적절한 바닥구조시스템의 선택은 고층건물의 설계에서 횡력에 대한 강성 확보와 가용면적의 확보라는 측면에서 중요한 요소이다. 바닥 시스템은 층고를 최소화하여 동일한 건물 높이에서 최대의 층수가 확보되며, 횡력에 대해서는 충분히 나이아프램 역할을 수행하여 횡력지지 구조부재에 적절히 분배, 전달될 수 있도록 해야 한다.

현재 우리나라에 건설되고 있는 대부분의 고층건물은 주거용, 사무실용으로 주거용의 경우 1차형 철근 콘크리트 내력벽식 구조체가 대중을 이루고 있고 사무실 건축의 경우 골조-전단벽 시스템으로 된 합성구조가 많이 사용되고 있다. 건물을 더욱 고층화하기 위해서는 현재 지어지고 있는 구조시스템에 대한 경제성, 구조적 합리성 등에 대한 전반적인 검토가 필요하다. 또한, 고층건물의 설계가 보편화되기 위해서는 구조재료, 구조형식, 구조부재의 다양성을 추구할 필요가 있다.

1960년대 중반 Fazlur Kahn은 당시 고층건물의 구조형식으로 주류를 이루었던 2차원 강성 골조 시스템을 개선하여 구조물을 전체적으로 해석, 설계하는 3차원적 구조시스템을 고안하여 적용하였다. 또한, Kahn은 일반적인 형태와 모양을 가진 사무소 건축에 적용할 수 있는 구조시스템을 그림 1에서와 같이 제안하였다.

실제 적용할 구조시스템의 선택에는 건축적, 구조적인 조건을 만족하면서 경제성있는 구조시스템을 선택하기 위해서는 같은 평면에 대해 2~3개 구조시스템에 대해 횡변위, 구조체의 량 등을 검토하고 이 결과에 근거하여 선택할 필요가 있다. 적절한 고층건물의 구조시스템을 선택하는 방법을 정리하면 다음과 같다.

(1) 정확한 결정을 위한 모든 자료를 구한다. 즉, 지반 조사자료, 설계기준, 건축법, 하중에 관한 규정, 사용 구조재료 및 기술, 재료단가, 노임수준 등을 구해서 분석하고 초기단계에서 건축, 구조설계, 기계설비, 전기설비, 토질 등의 전문가에게 필요한 자료를 수집한다.

(2) 평면이 개략적으로 결정되면 구조시스템을 선정하여 구조의 경제성에 대해 개략적으로 검토한



다. 이 단계에서는 적절한 시스템을 위한 것으로 상대적인 경제성만 분석하면 된다.

(3) 상대적으로 경제적인 시스템에 대하여 각 분야별 전문가들과 협의하여 최종적인 구조시스템을 결정한다. 정확한 협의를 위해서는 개략적인 구조부재의 크기가 필요하다.

(4) 선택된 구조시스템이 기능적으로 문제가 없는지, 다른 분야와 문제는 없는지, 기타 문제의 가능성이 있는 부분을 면밀히 검토하고 문제가 많아 구조시스템을 다시 결정할 필요가 있으면 (2)에서부터 다시 시작한다. 이 단계에서 구조부재의 크기, 위치 등이 상당부분 확정되어야 한다.

(5) 확정된 구조시스템을 평면, 입면 등의 구조도로 나타내고 정밀한 해석으로 각 부재를 설계하여 구조시스템의 경제성을 분석한다.

(6) 최종적으로 선택된 구조부재의 안전성을 검토 확인하고 전체적인 건물의 안전성 및 경제성 검토를 한다.

요즈음 고층구조물에 나타나는 경향은 구조체를 하나의 구조재료를 사용하지 않고, 구조재료의 복합적 사용, 합성화, 하이브리드화로 나가는 추세이다. 이는 컴퓨터의 발달과 구조재료 등에 대한 연구가 상당한 정도까지 진행되어 해석에 의해 구조물의 거동을 비교적 정확히 예측할 수 있는데 기인한다고 볼 수 있다. 구조해석 및 설계방법이 크게 발전되어 부재단위의 경제성 및 안전성은 쉽게 확보할 수 있다.

현재까지 널리 사용되고 있는 철근콘크리트 고층

건물 구조시스템은 다음과 같다.

- (1) 내력벽 구조
- (2) 골조 구조
- (3) 코어 구조
- (4) 골조-전단벽 구조
- (5) 튜브 구조
- (6) 합성 혼합 구조

## 4.2 내력벽 구조

우리나라 주거용 건물에 가장 많이 사용되는 구조형식으로 벽체의 위치, 방향에 따라 대면벽 구조, 상벽구조, 2방향 구조, 방사형 구조 등으로 분류되며, 내력벽의 간격을 3.6m에서 5.4m 정도로 축력과 횡력을 동시에 지지하는 방식이다. 내력벽 구조의 거동은 구조재료, 벽체 사이의 상호작용, 벽체의 위치 등에 따라 다르다. 횡력을 받는 벽체의 거동은 구조체 전체의 강성에 좌우되는데 슬래브를 다이아프램(rigid diaphragm)으로 가정하여 분배할 경우 벽체와 벽체사이의 보나 슬래브가 충분한 강성을 갖도록 하여 횡력을 전달할 수 있어야 한다. 다이아프램이 충분한 강성을 갖지 못할 경우 중앙부의 연결보(혹은 슬래브)가 파괴되어 벽체의 상호 거동이 달라지게 되어 건물 자체가 위험할 수 있으므로 주의해야 한다.

또한, 고층 내력벽 구조에서는 횡력에 의해 변위 힘 보다는 면내 힘에 의하여 구조적 문제가 될 수 있으므로 면내 힘에 대해 반드시 안전성을 확보해야 한다.

우리나라에서는 이 구조방식이 30층까지 적용되었으나 그 이상의 건물에 적용하기 위해서는 현재의 내력벽 방식보다는 벽체의 위치, 구조물의 강성, 슬래브 등을 충분히 고려해야 안전성 및 경제성을 확보할 수 있으므로 건축적, 구조적 연구가 필요하다.

## 4.3 골조 구조

이 구조 방식은 초기 고층건물에서 널리 사용된 방식으로 요즈음도 시공의 편의성으로 인해 재래적 시공방법을 이용하여 널리 시공되고 있다. 이 구조

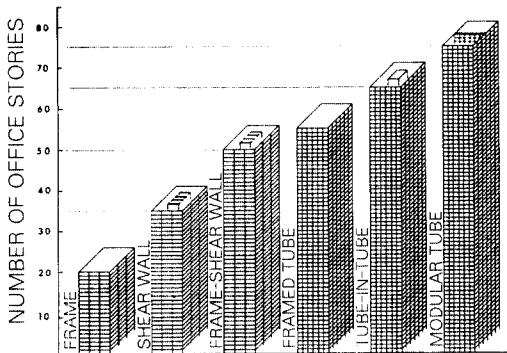


그림 1 층수에 따른 구조시스템

방식은 부재 접합부의 형식에 따라 응력을 부담하는 요소를 달리할 수 있는 특징이 있다.

강성골조방식은 전단에 의한 변형이 전체변형의 80% 정도이며 20% 정도가 휨에 의한 변형을 발생시킨다.

현장타설 철근 콘크리트조의 경우, 보와 기둥을 강접합으로 연결하는 방식으로 보와 기둥이 연직력과 횡력을 동시에 지지하도록 한다. 이때 횡력에 대한 효율은 스패인이 작고 보의 춤이 클수록 횡력에 대한 효율은 증가한다. 강성골조 방식은 횡력에 대하여 강성이 적으므로 해석시 횡변위 검토에 유의하여야 한다. 또한, 슬래브는 횡력을 분배하는 역할을 하므로 개구부의 위치와 크기에 유의하여야 하며 슬래브의 두께는 횡변위 강성에 영향을 없다. 이 방식은 20층 내외 규모에서 사용되고 있다.

#### 4.4 코아 구조

사무실 건축 등에서 수직 동선과 에너지 분배를 담당하는 부분(엘리베이터, 계단, 화장실, 설비 샤프트 등)을 모아 코아로 사용하고 코아를 구조체로 이용한다.

반면에 콘크리트 코아의 경우 수직, 수평하중을 부담할 수 있을 뿐만 아니라 공간을 분할해 주며 내화에 대해 고려할 필요가 없다.

횡력에 대한 코아의 구조적 반응은 평면 형태, 강성의 정도, 횡력의 방향 등에 따라 달라지는데 코아의 형태가 열린 형태이거나 비대칭일 경우 비틀리게 된다. 이러한 비틀림에 의한 효과는 전단력과 함께 작용하므로 비틀림 효과를 고려할 수 있는 구조해석방법을 선택해야 한다.

코아의 위치, 형태, 숫자 등에 의해 분류하면 다음과 같다.

- (1) 코아 형태에 의한 분류 - 열린(open)코아, 닫힌(closed)코아
- (2) 코아 숫자에 의한 분류 - 단일코아, 다중코아 (multiple core)
- (3) 코아 위치에 의한 분류 - 내부코아, 외부코아, 주변코아
- (4) 코아 배치에 의한 분류 - 대칭코아, 비대칭코아

#### 4.5 엇갈린 벽보 구조 (Staggered Wall Beam Structures)

엇갈린 벽보구조는 그림 2에서와 같이 층고 전체를 벽보로 사용하여 한층에서 엇갈려 위치하게 하고 외벽에 기둥을 넣은 방식이다. 즉, 엇갈린 벽보가 횡력에 대해서는 바닥구조의 다이아프램 역할로 연속된 벽체형태의 거동을 하게 되고 연직력은 벽보가 받아 기둥에 전달하게 된다. 즉, 외곽부의 면적이 중앙부의 면적에 비해 많이 되므로 기본 설계 단계에서 이 점을 고려해서 평면 계획을 해야 한다. 이 구조형식은 우리나라에서는 거의 사용되지 않는 구조 시스템으로 중북도형의 기숙사, 콘도, 아파트 등에 적합한 구조형식이다. 시공적으로는 어려운 점이 있으나 구조적으로 벽체의 량에서 경제성이 있으므로 적용할 필요가 있다. 엇갈린 벽보구조의 지진력에 대한 계수는 전단벽 구조에 따르면 된다.

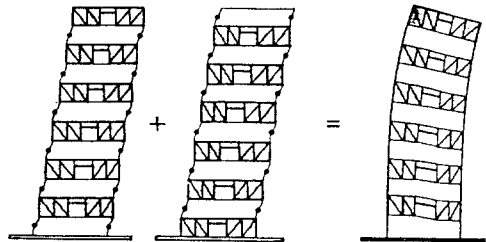


그림 2 엇갈린 벽보구조

#### 4.6 골조-전단벽구조

횡력을 전단벽과 골조가 동시에 저항하는 방식으로 골조의 변형 형태인 전단모드와 전단벽의 변형 형태인 휨모드가 적절히 조합된 구조방식으로 우리나라의 사무실 건물에서 주로 사용되는 구조형식이다. 전단벽이 구조체의 강성을 크게하여 풍하중이나 지진하중에 효율적으로 지지하지만, 전단벽의 강성이 클수록 연성이 감소되므로 적절한 강성의 확보가 중요하다. 철근 콘크리트 벽체의 연성거동

을 확보하기 위해서는 응력 흐름을 Diagonal Strut로 상호작용하도록 유도해야 한다. 즉, 벽체의 중앙부를 보로 연결시킨 병렬 전단벽을 사용함으로써 에너지 소산능력을 증가시킬 수 있다.

1990년에 건설된 75층 시카고의 311 South Wacker Drive Tower는 이 방식으로 된 철근 콘크리트 구조물로 고강도 콘크리트를 이용하여 저층부에서 고층부 기둥의 콘크리트강도를 달리하였다.

강성 골조-전단벽 구조의 횡력에 대한 반응은 전단벽에 대한 골조의 상대강성에 따라 달라지는데 일반적으로 대부분의 횡력을 전단벽이 부담하며, 높이가 높아질 수록 상부에서 골조가 횡력을 부담하게 된다. 따라서, 이 구조형식에서는 횡력의 분담율은 층 별로, 강성 별로 달라지므로 정확한 분담율은 무의미하다고 할 수 있다. 30층 정도의 규모에서는 전단벽이 횡력이 대부분을 부담하게 되므로 기본 설계단계에서 횡력을 전단벽이 부담하는 것으로 하여도 문제는 없다.

골조와 전단벽의 상호작용은 실제로 매우 복잡하여 건물의 상부에서 발생하는 응력은 골조와 전단벽 사이의 적합성만으로 예측하기 어렵다. 즉, 골조와 전단벽의 변형이 선형적으로 나타나지 않으며 S 형태를 띠게 된다. 이는 벽체가 상부에서는 골조에 의해 당겨지고 하부에서는 서로 비틀림 형태의 응력상태를 보여준다. 이 구조방식을 사용하여 횡변위를 조절하기 위해서는 기둥과 벽체의 크기를 조정하여 상호작용을 하는데 최대의 효율을 얻을 수 있는 적절한 강성을 갖는 부재의 선택이 중요하다.

플랫 슬래브 구조는 횡력에 대해서는 강성이 약하므로 횡력에 대해서는 전단벽이 지지하는 것으로 설계하고 있다. 이 구조방식은 40층에서 50층 정도 까지 경제성이 있는 것으로 판단되고 있으며 경제성 여부에 따라 70~80층 정도까지도 이용되고 있다.

#### 4.7 튜브구조

튜브구조는 최근 Fazlur Khan에 의해 제안된 것으로 기본 개념은 건물의 외부 벽체에 뚫어 놓은 정도의 개구부를 뚫으로써, 횡하중에 대하여 튜브

와 같은 거동을 하도록 하여 휨강성을 최대화하여 건물의 높이를 최대화 할 수 있도록 하는 방식이다. 즉, 횡력에 대하여 건물 전체가 캔틸레버 보와 같은 거동을 하도록 하는 것으로 처음에는 철골구조에 주로 사용되었으나 철근콘크리트 건물에도 같은 개념을 적용하여 초고층화 되고 있다.

철근콘크리트 초고층 구조물에 사용되는 튜브구조의 형식은 다음과 같이 분류할 수 있다.

- (1) 속빈 튜브 : 골조 튜브, 트러스 튜브(가새튜브)
- (2) 내부 가새된 튜브 : 전단벽을 가진 튜브, 이중 튜브, 묶음 튜브(나중튜브).

튜브구조는 경제성, 안전성 측면 뿐만 아니라 구조적인 면에서도 다음과 같은 장점을 가지고 있다.

- (1) 횡력저항 구조체가 건물의 주변에 있으므로 건물의 전체 폭이 모멘트에 저항하므로 휨강성이 크다.
- (2) 횡력저항 구조체가 건물의 주변에 있으므로 내부구조체는 연직하중만 지지하면 되므로 설계가 단순해진다. 결과적으로 기둥이나 보의 배치가 자유롭다.
- (3) 튜브구조는 전층의 바닥 구조를 동일하게 할 수 있다.
- (4) 튜브구조는 튜브를 이루는 구조체의 크기가 전층 동일하게 함으로써 시공성이 뛰어나다.

##### 4.7.1 골조 튜브 (Framed Tube)

골조 튜브 형식은 튜브형식 중 가장 먼저 사용된 구조방식으로 외부에 기둥을 1.2m~3.0m로 촘촘히 배치하고 기둥과 기둥 사이를 60cm~150cm의 큰 보를 강접합으로 연결하는 형태로 외부 기둥이 구조물의 횡하중과 연직하중을 동시에 지지하도록 한다.

건물의 평면에 대한 단면 2차 모멘트를 최대화할 수 있도록 계획하는 것이 전체적인 건물의 휨강성을 증가시키는 데 중요하다. 골조튜브 구조는 횡력 방향에 평행한 기둥이 웨브 역할을 하고 수직인 방향의 기둥이 플랜지 역할을 하여 횡력에 반응한다. 대개 벽면적의 30%이하의 개구부를 가지고 있을 경우 캔틸레버 거동을 하는 것으로 밝혀지고 있으나 일반적으로 개구부의 면적이 30~50%이다. 따라서, 이 구조 방식의 횡력에 대한 반응은 완전한

캔틸레버 거동과 골조거동의 중간 정도의 거동을 하게 된다. 즉, 횡력과 평행한 면에 있는 기둥은 스펀드럴 보의 강성에 따라 강성골조와 비슷한 거동을 하게 된다. 이러한 보 강성의 효과는 Shear lag 현상을 야기하게 된다.

Shear lag 현상은 기둥에 비선형적으로 응력을 분포시켜 코너 기둥이 큰 응력을 부담하는 결과로 나타나며 구조체의 변형을 휨 변형모드에서 전단 변형모드가 더 심각하게 되어 횡변위 급격히 증가하게 된다. 이 현상은 튜브구조시스템의 거동과 경제성에 큰 영향을 미치므로 이 현상을 방지하거나 감소시키는 방향으로 구조형식이 연구되고 있다. 그러나 이 구조방식은 외부 기둥의 형상이 시공적으로 단순하고 처리가 용이하다는 점과 건축상 공간 배치의 자유로움을 추구할 수 있고 실면적을 효율적으로 사용할 수 있다는 장점이 있다. 외부 기둥이 촘촘히 서게 되므로 하부에서 출입이나 공간활용에 문제가 발생하기 쉬우므로 몇개의 기둥을 하나의 기둥으로 하중을 전달 시키거나 전달보(transfer girder)를 사용하여 윗 기둥을 없앨 수 있다. 이 경우 전달보가 직접 상부 횡력에 의한 응력을 받게하면 경제성이 상실되므로 하부에 횡력을 받을수 있는 코아를 배치하여 수평구조체의 다이아프램 효과에 의해 코아에 전달되도록 하는 것이 바람직하다. 또 전달보가 부담하는 하중이 클 경우 1~2층 높이를 전달보의 층으로 사용하기도 한다. 전달보 층을 최소화하기 위해서 프리스트레스트 방법을 사용하거나 고강도 강재를 사용하기도 한다. 골조튜브는 철근 콘크리트의 경우 60층 정도가 경제적이다.

이상에서 골조튜브 구조를 효율적이고 경제적인 구조시스템으로 발전시키기 위해서는 다음 사항에 주의해야 한다.

- (1) 튜브는 건물 주변 기둥의 강성과 스펀드럴 보의 강성에 매우 민감하므로 구조부재의 크기 선택에 유의하고 처짐, 진동 등의 제한을 만족해야 한다.
- (2) 튜브의 코너 구조에 주의해야 한다.
- (3) 튜브의 외관은 반드시 마감되어 있어야 하며 마감에 없을 경우 온도에 의한 응력을 반드시 고려해야 한다.

(4) 바닥 슬래브는 다이아프램 역할을 할 만큼 충분한 두께와 강성을 가지고 있어야 하며 개구부의 위치선정에 주의해야 한다.

(5) 고정하중에 의한 축방향 변형을 고려하여 부등변위를 시공중에 이를 보완해야 한다.

다음에 나타나는 튜브구조는 골조튜브의 성능을 개선한 것이다.

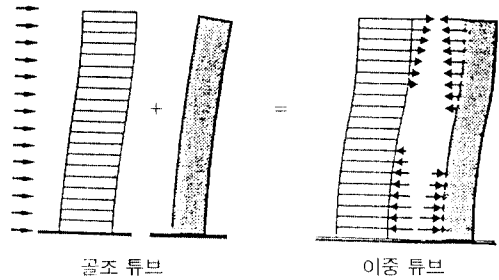
#### 4.7.2 가새 튜브 (Braced Tube)

골조튜브가 스펀드럴 보의 강성에 의해 Shear lag 현상과 같은 문제가 야기되므로 이를 방지하고 강성을 증진시키기 위하여 외부에 가새를 넣어 횡력을 부담하도록 하는 방식이다. 이 가새 부재로 인하여 구조체가 휨거동을 하게 된다. 가새튜브 방식은 골조 튜브방식에 비하여 기둥간격을 넓게 배치할 수 있고 캔틸레버 거동에 가깝게 되어 횡력에도 효율적이다. 이 구조방식의 거동은 골조튜브와 가새부재의 상호작용으로 인하여 매우 복잡하다. 즉, 가새부재와 기둥으로된 웹부분은 전단력을 효율적으로 지지하는 반면 전체적으로는 가새튜브가 회전 즉 전도에 저항하게 된다. 코너의 기둥은 캔틸레버 트러스의 상, 하현제 역할을 하므로 매우 큰 하중을 부담하게 된다. 연직하중하에서 가새부재는 하중과 부등변위를 재분배하는 역할도 하여 벽체응력을 균등화한다. 가새가 기울어진 기둥역할을 하므로 일반적으로 인장력은 발생하지 않으며 사재의 방향은 45도 정도가 바람직하다. 전체 골조가 사선방향(diagonal)의 가새형식으로 되는 것이 횡력에는 효율적이지만 수직력으로 인하여 경제성이 감소되는 것이 특징이다.

철근 콘크리트 가새튜브 구조는 1985년에 완공된 뉴욕의 50층 780 Third Avenue Office Building에서 처음 적용하였다. 이 건물은 높이/폭의 비가 8 정도인 세장한 건물로 높이는 173.7m(570ft)이다. 가새방식은 사선방향으로 창문을 콘크리트로 배우는 방식으로 하여 철근을 배근하였다. 세장한 구조물에 콘크리트 가새를 넣어 횡방향 강성을 증가시키고 콘크리트의 사중을 이용하여 안정성을 유지하게 한 구조형식이다. 또한, 프리스트레스트를 적절히 이용하여 균열의 발생을 억제하였다.

#### 4.7.3 이중튜브

골조튜브의 강성을 증가시키기 위해서 내부 코어를 가새된 철골구조나 콘크리트 전단벽을 배치하는 방법으로 외부 골조튜브의 전단변형을 감소시키고 외부 튜브와 상호작용으로 회전 저항능력을 향상시킨다. 즉 횡력에 대해 외부튜브는 상층부에서 지지하고 내부튜브는 건물의 저층부에서 지지하게 되어 보다 효율적으로 거동하도록 한 방식으로 골조-전단벽 구조형식과 비슷하다. 초기 설계단계에서는 외곽 골조는 횡력이 가해지는 방향의 골조만 유효한 것으로 하여 2차원으로 해석하여도 무방하다. 이때 슬래브는 횡력을 전달하는 강체로 간주하고 양단이 힌지 접합된 것으로 한다.

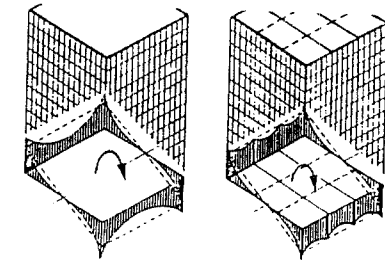


골조 튜브

이중 튜브

#### 4.7.4 묶음 튜브(Bundled Tube, Modular Tube)

건물의 높이가 높아질 수록 골조튜브 방식은 Shear lag 현상이 심각하게 되는데, 이를 최소화 하기 위해 평면 중간 부분에 횡력과 평행한 방향으로 튜브 구조체를 넣어 횡력을 지지하도록 하는 방식을 사용한다. 이 경우 중간에 삽입된 튜브도 웹 골조(web frame) 역할을 하게 하여 하나의 건물에 몇개의 튜브가 있는 형태를 보이는 구조방식을 묶음 튜브 혹은 다중 튜브라고 한다. 건물이 횡하중 하에서 힘을 받을 때 바닥 슬래브의 강한 면내 강성으로 인하여 내부 웹골조와 외부 웹골조의 변형이 동일하게 발생하게 되므로 각각의 횡변형 강성에 따라 전단력이 분배되므로 필요한 웹골조의 강성을 증가시켜 효율성을 증가시킬 수 있다. 내부 웹 골조의 외부 거동은 외부 웹골조에 의해 직접적으로 영향을 받게 되므로 단독 튜브일 경우보다 더욱 심각하게 응력을 받게 된다.



단일 골조 튜브 방식

묶음 골조 방식

그림 3 이중골조방식과 묶음 골조방식

결과적으로, 그림 3에서와 같이 내부 웹 골조는 Shear Lag현상에 의한 거동 응력의 불균형을 감소시켜 골조 튜브 방식보다 튜브거동(tube action)에 가깝다. 평면의 비대칭에 의한 비틀림은 폐쇄단면 형태로 인하여 크게 문제가 되지 않는다.

묶음튜브 구조를 사용할 경우 각각의 튜브가 다른 위치에서 끝나게 되어 축하중의 차이에 따른 부등 수직변위가 문제가 된다. 예를들어 100층의 건물에서 일부분이 50층으로 되어 있다면 서로 변하

는 부분에서 50층 만큼의 축하중이 더 발생하므로 여기서 발생하는 축변형량을 정밀하게 검토하여야 한다. 묶음튜브는 구조적으로 뿐만 아니라 건축적으로 비정형적인 평면형태나 높이 제한을 받는 건축물의 경우에도 효율적이다.

#### 4.8 합성 및 혼합구조

구조재료의 측면에서 점차 두개 이상의 재료를 합성, 혼합하여 사용하므로 경제성을 확보하고 바람직한 구조적 거동을 하도록 하고 있다. 합성 및 혼합구조에서 주로 사용되는 철근 콘크리트와 철골 부재를 상호작용하도록 함으로써 최선의 구조거동을 얻도록 하는 방법이다. 여러 종류의 구조부재 즉 슬래브, 보, 기둥의 합성 거동에 대하여 연구되어 왔다. 일반적인 합성구조형태는 다음과 같다.

- (1) 합성골조튜브
- (2) 합성철골조
- (3) 합성 내부코어 가새시스템
- (4) 합성 프레임

(5) 하이브리드 합성구조

철골과 철근 콘크리트 합성 보는 1950년대 부터 쉬어코넥터를 사용하여 완전합성거동을 할 수 있도록 하였다. 합성보는 철골과 철근 콘크리트의 장점을 동시에 가지고 있고 강도, 경량성, 공기의 단축, 내부장관의 유연성 증가, 구조재료 비용의 감소, 강성, 감쇄효과, 내화성능 향상 등을 기대할 수 있다.

5. 결론

고층건물의 설계시 고려하게 되는 횡하중, 구조 계획, 구조 시스템 등에 대해 살펴보았다. 다소 개괄적인 내용만을 다룬 면이 없지 않으나, 고층건물의 설계에 관한 전체적인 개념을 정리하려고 노력하였다. 아직도 국내에서는 풍공학 및 지진에 대한 연구가 진행되고 있는 상태이고 국내의 철근콘크리트 초고층 빌딩은 건설되지 않고 있는 상태이다. 따라서, 우리나라의 현실에 적합한 연구를 통하여 동남아에서 널리 사용되고 있는 초고층 철근콘크리트 빌딩의 출현을 기대하면서 다음 사항에 대한 심도 있는 연구를 기대한다.

- (1) 국내의 지진하중 및 풍하중에 대한 동적 하중의 정립
- (2) 해석용 프로그램의 개발
- (3) 고강도 콘크리트의 실용화

(4) 공업화 거푸집 연구

- (5) 초고층 철근콘크리트를 구조를 위한 시공기법 연구
- (6) 철근콘크리트 초고층 건물의 경제성 분석
- (7) 적절한 구조시스템 연구

참 고 문 헌

1. W.Schueller, "The Vertical Building Structure", VNR, 1990
2. "Analysis and Design of High-rise Concrete Buildings", ACI, SP-97, 1985
3. B.S.Smith & A.Coull, "Tall Building Structures Analysis and Design", John Wiley & Sons, 1991
5. "고층 건물의 구조 형식", 신영수, 전산구조공학회지 제7권 제1호, 1994. 3
6. Davenport, A. G., The Design of Tall Buildings for Wind Forces International, 1974
7. Peter Sachs, Wind Forces in Engineering, Pergamon Press, 1972
8. Henry Liu, Wind Engineering Prentice Hall, 1990
9. 일본건축학회, 건축물의 진동에 관한 거주성능평가 지침 동해설, 1991. 4