

超高層 건물의 횡변위 제어를 위한 아웃리저 시스템의 最適 위치에 관한 연구  
(Study on Optimal Location of Outrigger System for the Lateral Displacement Control of a High-rise Building)



교수 : 이윤우  
주정식, 고현석

연구 배경 및 목적

**연구 배경**

- 2001년 9월 11일 미국의 뉴욕에서 초고층 건물의 새 시대를 열었던 세계무역센터가 테러에 의해 붕괴된 이후 초고층 건물의 미래에 대해 다양한 의견이 교환되었다.
- 국내에서는 1990년대 초반 시작된 초고층 건물 건설안이 IMF라는 국가적 위기를 맞아 취소된 이후 고급주거시설을 위주로 한 초고층건물이 활발히 건설되고 있다.
- 다수의 초고층 건물이 단기간에 폭발적으로 건설되고 있지만 핵심기술들은 국내 기술로 해결하기 어려운 정도 있어서 국내의 현황을 잘 반영한 기술을 연구하고자 한다.

**연구 목적**

- 아웃리저 시스템은 해외에서 효율성이 입증되었으나 국내는 도입 초기로 국내 여건을 반영한 아웃리저의 최적 위치를 찾는 것이 연구의 목적이다.

연구 내용 및 방법

**연구 내용**

- 사례조사를 통해 설정사항을 현실과 일치시켜서 모델링 후 아웃리저의 위치와 개수를 변화시켜 최적 위치를 탐구하는 것이다.

**연구 방법**

- 초고층 건물 및 횡지향 시스템에 관한 이해
- 국내외 초고층 건물의 사례조사
- 층높이, 층고, 경면, 단면 형태, 재료, 부재 단면 결정
- 형상비에 따른 모델링 작업
- 아웃리저를 변화시켜 가면서 최적 위치 고찰

풍 - 지진하중

| 풍하중의 데이터  |         | 지진하중의 데이터 |      |
|-----------|---------|-----------|------|
| 설계속도 V    | 30m/sec | 지역계수 A    | 0.11 |
| 노동도계수 E   | B       | 지반계수 S2   | 1.2  |
| 중요도계수 I   | 1.0     | 중요도계수 I   | 1.2  |
| 가스트림향계수 G | 2.2     | 방풍수계수 R   | 4.0  |
|           |         | 고유모드수     | 30   |

초고층 건물의 정의 및 사례조사

**초고층 건물의 정의**

- 형상비(Aspect ratio)가 50이상의 건물
- 약 50층 이상의 건물
- 횡하중에 저항하기 위해 특별한 구조형식을 도입할 필요가 있는 건물
- 미국 고층건물 위원회 - 높이가 설계 시공 및 사용에 있어서 특정한 지역과 시기의 보통 건물에 존재하는 것과는 다른 조건들을 제시하는 건물

**사례조사 선정배경**

- 층 수 60~80층을 중심으로 선정
- 아웃리저 시스템 적용 유무
- 가능한 헬릭스콘크리트
- 평면형상은 평면사례조사 결과 중앙코어, 방형평면 형상
- Jin meo Tower, Plaza Rakyat Tower, One Liberty Place 외 11개

| 평면형상                                                               | 형태구성                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 초고층부에서의 횡력에 대한 저항력, 엘리베이터 조닝과 코어비, 용도구성, 그리고 형태적 상징성 등에 영향을 받고 있다. | 수직화가 표현의 수단이 되지 않더라도 엔지니어들의 기술적 체계의 표현뿐만 아니라 도시적 맥락을 반영하는 형태가 중요하게 요구된다. |
| 많은 사례에서 중앙코어, 방형 평상을 보이고 있다.                                       | 횡력에 저항할 수 있는 안정적 구조시스템의 요구가 형태 구성에 중요한 요인으로 대두되고 있다.                     |

**사례조사**

| 건물명         | 층수 | 면적      | 구조 | 비고                    | 비율   | 비율  |
|-------------|----|---------|----|-----------------------|------|-----|
| 110-11      | 51 | 117,150 | RC | 방풍벽을 이용한 중앙 코어, 방형 평면 | 0.11 | 1.2 |
| Plaza Tower | 55 | 100,000 | RC | 방풍벽을 이용한 중앙 코어, 방형 평면 | 0.11 | 1.2 |
| 118-118     | 55 | 100,000 | RC | 방풍벽을 이용한 중앙 코어, 방형 평면 | 0.11 | 1.2 |
| 119-119     | 55 | 100,000 | RC | 방풍벽을 이용한 중앙 코어, 방형 평면 | 0.11 | 1.2 |
| 120-120     | 55 | 100,000 | RC | 방풍벽을 이용한 중앙 코어, 방형 평면 | 0.11 | 1.2 |
| 121-121     | 55 | 100,000 | RC | 방풍벽을 이용한 중앙 코어, 방형 평면 | 0.11 | 1.2 |
| 122-122     | 55 | 100,000 | RC | 방풍벽을 이용한 중앙 코어, 방형 평면 | 0.11 | 1.2 |
| 123-123     | 55 | 100,000 | RC | 방풍벽을 이용한 중앙 코어, 방형 평면 | 0.11 | 1.2 |
| 124-124     | 55 | 100,000 | RC | 방풍벽을 이용한 중앙 코어, 방형 평면 | 0.11 | 1.2 |
| 125-125     | 55 | 100,000 | RC | 방풍벽을 이용한 중앙 코어, 방형 평면 | 0.11 | 1.2 |
| 126-126     | 55 | 100,000 | RC | 방풍벽을 이용한 중앙 코어, 방형 평면 | 0.11 | 1.2 |
| 127-127     | 55 | 100,000 | RC | 방풍벽을 이용한 중앙 코어, 방형 평면 | 0.11 | 1.2 |
| 128-128     | 55 | 100,000 | RC | 방풍벽을 이용한 중앙 코어, 방형 평면 | 0.11 | 1.2 |
| 129-129     | 55 | 100,000 | RC | 방풍벽을 이용한 중앙 코어, 방형 평면 | 0.11 | 1.2 |
| 130-130     | 55 | 100,000 | RC | 방풍벽을 이용한 중앙 코어, 방형 평면 | 0.11 | 1.2 |

**Jin Mio Tower**

- 세계에서 4번째 높이(지하 3층, 지상 88층, 420m)
- 세장비 8
- 아웃리저: 8각형코어와 매개 컬럼을 2개층 높이로 연결(24-26, 51-53, 85-87층에서 연결)
- 두께 8m의 매트기초 적용
- 기둥하부 750톤/본 내력을 가진 강관파일 사용

**Plaza Rakyat Tower**

- 헬릭스콘크리트 세계 최고 (지하 6층, 지상 79층, 382m)
- 횡변위: H/700
- Belt Wall: 28-29, 51-52층 설치
- 아웃리저: 건물의 상층부(73-74층)

**One Liberty Place**

- 지하 1층, 지상 61층, 288m
- 기준층 골조는 합성 W21 ASTM A-527 등급 50으로 코어부터 외부 면까지 13.4m의 보로 구성
- 최종적으로 설계는 20.37 및 51층에 위치한 대형 대각선재의 외측 단부에 마무리
- 코어 면에 설치된 여섯 개 층 높이 대각선 아웃리저 시스템(21.3 x 21.3m의 개 층 코어가 복합)

아웃리저 시스템의 이론적 고찰

**아웃리저 시스템의 개념**

- 코어: 중앙 돛대
- 보, 외부기둥: 돛대, 버팀물
- Outrigger: 횡하중으로 인한 코어부분의 모멘트를 아웃리저를 통해 기둥의 수직력(인장, 압축)으로 분배시켜 전도모멘트를 약화시키고 최종변위, 층간변위를 감소시킴

**아웃리저 시스템의 종류**

- 깊은 헬릭스콘크리트 보요소, 헬릭스콘크리트 벽요소, 헬릭스 트러스요소
- 연단벽-골조 & 아웃리저
- 벨트 트러스 & 아웃리저

**근사이론 기본 가정**

- 건물은 탄성체
- 코어는 기초에 완전고정
- 건물은 연립레버보로 가정
- 아웃리저의 강성은 무한대
- 외부기둥의 강성과 휨 및 축변위만 고려

**최대 횡차짐**

가) 연립레버 보의 최대 변위  $\theta_w, \theta_o$ 와 외력  $M, P$

$$\theta_w = \frac{M_w}{EI} (L - x) \quad \theta_o = \frac{M_o}{EI} (L - x)$$

나) 외력 조건

$$\theta_w = \theta_o = \theta_L$$

$$\theta_w = \theta_o = \theta_L$$

다) 코어의 횡차짐이 일정한 높이에 여러 단면으로 변하는 아웃리저 건물 근사이론을 활용하여 최대 변위  $\theta_w, \theta_o$ 와 외력  $M, P$ 를 구할 수 있다. 이를 이용하여  $\theta_w = \theta_o = \theta_L$ 를 적용하면

$$\theta_w = \theta_o = \theta_L = \frac{M_w}{EI} (L - x) = \frac{M_o}{EI} (L - x) \quad i=1, 2, \dots, n$$

이 된다.

최대 변위를 구하기 위해서는  $\frac{d\theta}{dx} = 0$ 을 만족하는  $x$ 를 구해야 한다.

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{d}{dx} \left( \frac{M_w}{EI} (L - x) \right) = \frac{d}{dx} \left( \frac{M_o}{EI} (L - x) \right) = 0 \quad \therefore x = \frac{L}{n+1} \dots x = \frac{L}{n+1}$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{d\theta}{dx} (L - x) = 0 \quad \therefore \sum_{i=1}^n \frac{d\theta}{dx} (L - x) = 0$$

**아웃리저 최적 위치**

- 아웃리저 1개 및 2개 설치했을 경우의 근사해
- 1. 1개의 최적 위치:  $n=1$   
 $X1=L/2$
- 2. 2개의 최적 위치:  $n=2$   
 $X1=L/3, X2=2L/3$
- 타라나스(taranath)가 주장한 아웃리저 한 개의 최적 위치: 0.455H
- 맥남(McNabb)이 주장한 아웃리저 두 개의 최적 위치: 0.312H, 0.685H
- 근사이론과 각각 9.8%, 2.7~6.7%의 오차로 신뢰도가 높다.

### 해석 초고층 건물 개요

**개요**

- 규모: 시계조사 결과 Fazlur Khan의 변형 설계
- 60층 내외 기본구조물

- 구조재료: 황근콘크리트 구조(경재성 확보측면)
- 층고: 1~5층 4.5m, 6~60층 3.5m
- 건물높이(H): 215m
- 평면형상: 시계조사 결과 평면형상에 장방형 코어를 선택
- 모듈: 8m스팬을 기본 모듈로하여 평면치수는 32m x 32m
- 크레바: 보폭 20% 내외인 모듈 감한 크레바수는 16m x 16m로서 25%
- 형상비(Aspect ratio): 7.3

| 층수    | 기둥(m)   | 전단벽 Thk. (mm) | 아웃리거 Thk. (mm) | 압축 강도 (Mpa) | 층수    | 기둥(m)   | 전단벽 Thk. (mm) | 아웃리거 Thk. (mm) | 압축 강도 (Mpa) | 층수    | 기둥(m)   | 전단벽 Thk. (mm) | 아웃리거 Thk. (mm) | 압축 강도 (Mpa) |
|-------|---------|---------------|----------------|-------------|-------|---------|---------------|----------------|-------------|-------|---------|---------------|----------------|-------------|
|       |         |               |                |             |       |         |               |                |             |       |         |               |                |             |
| 1~20  | 1.7x1.7 | 800           | 800            | 40          | 1~10  | 1.9x1.9 | 700           | 600            | 45          | 1~20  | 1.9x1.9 | 700           | 600            | 45          |
| 21~30 | 1.5x1.5 | 500           | 800            | 40          | 11~30 | 1.7x1.7 | 600           | 800            | 40          | 21~40 | 1.7x1.7 | 600           | 600            | 40          |
| 31~50 | 1.5x1.5 | 500           | 600            | 35          | 31~40 | 1.5x1.5 | 500           | 600            | 40          | 41~50 | 1.5x1.5 | 500           | 600            | 40          |
| 51~60 | 1.2x1.2 | 400           | 600            | 35          | 41~60 | 1.5x1.5 | 500           | 600            | 35          | 51~70 | 1.5x1.5 | 500           | 600            | 35          |
|       |         |               |                |             | 61~70 | 1.2x1.2 | 400           | 600            | 35          | 71~80 | 1.2x1.2 | 400           | 600            | 35          |

### 변수 및 모델링 정의

**변수**

- 아웃리거의 설치 층수의 변화: 1개층 & 2개층
- 형상비의 변화: 60층, 70층, 80층
- 구조해석(10개 층이 한 개의 모듈)
- 아웃리거를 1개층에 설치 (60층 건물 7회 + 70층 건물 8회 + 80층 건물 9회=24회)
- 아웃리거를 2개층에 설치 (60층 건물 15회 + 70층 건물 21회 + 80층 건물 26회=64회)
- 총 88회의 구조해석 실행 컴퓨터에 의한 구조해석 MIDAS GENw 5.3.0 이용
- 변, 기둥은 선(line)요소, 슬래브는 박재는 막(membrane)요소

• 60층 기본구조물의 압연도, 크레바 전단벽-아웃리거 설치 모습

• 60층 기본구조물의 평면도, 아웃리거가 설치된 투시도

### 지진하중 응답 비교분석

| 층수  | 아웃리거 1개(Rx) | 아웃리거 1개(Ry) | 아웃리거 2개(Rx) | 아웃리거 2개(Ry) |
|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 50층 |             |             |             |             |
| 70층 |             |             |             |             |
| 80층 |             |             |             |             |

• 횡변위(H/500)=0.4500m, (H/400)=0.5375m를 제한치로 할 경우

- 기본구조물 1개의 최적 위치라 판단되는 33F위치에서의 변위는 0.1462m(H/1473)
- 2개의 최적위치라 판단되는 20F~40F(10F~40F)위치에서의 변위는 0.132m(H/1829)
- 이는 아웃리거의 층과라가 보다서는 서울시 외곽주변의 지반이 안정되어 있는 지역 특성이다.
- 또한 70층, 80층 건물 일과도 모두 제한치 안에서 변위가 일어나 제한치를 만족하고 있다.
- 70층의 횡변위 제한치 - 횡변위(H/500)=0.5000m, 횡변위(H/400)=0.6250m
- 80층의 횡변위 제한치 - 횡변위(H/500)=0.5700m, 횡변위(H/400)=0.7125m

• 지진하중의 경우 약속된 Ray의 변위 편차가 Rax 보다 편차가 큰 것은 약속 방향에서 전단벽의 길이, 단면적이 작기 때문이다.

### 풍하중 응답 비교분석

| 층수  | 아웃리거 1개(Wx) | 아웃리거 1개(Wy) | 아웃리거 2개(Wx) | 아웃리거 2개(Wy) |
|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 50층 |             |             |             |             |
| 70층 |             |             |             |             |
| 80층 |             |             |             |             |

- 아웃리거를 1개 위치에 설치했을 경우 최적의 위치는 30F 부근으로서 타리나스가 주장한 0.455H(33F) 보다 오히려 근사 이론치에 가까운 결과를 나타냈다.
- 아웃리거를 2개 위치에 설치했을 경우 최적의 위치는 20F~40F 부근으로서 근사이론치와 거의 동일한 결과를 나타내고 있다. 이는 근사이론치의 신뢰도를 반영하는 결과로도 받아들일 수 있다.
- 아웃리거 2개를 가장 불리한 위치에 설치하는 것은 아웃리거 1개를 최적위치에 설치하는 것보다 못하다.

• 서울시 외곽 주변에서는 지진하중에 대한 변위 제어보다는 풍하중에 대한 변위제어가 더 중요함을 나타내고 있다.

### 형상비에 따른 비교분석

• 횡변위 감소율은 형상비가 커짐에 따라 감소되는 추세를 보이기 때문에 이에 대한 추가 보강 시스템의 도입이 필요하다.

### 연구 결론 및 제안사항

| 결론1                                                                                                                                                                                                                                     | 결론2                                                                                                                                                                                                                                           | 결론3                                                                                                                                                                                                                               | 결론4                                                                                                                                                            | 제안                                                                                                                                                                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• 아웃리거를 최적의 위치에 설치하면 형상비에 관계없이 아웃리거를 설치하지 않았을 경우와 비교해 불타 20~30% 가량의 횡변위 제어효과가 있다.</li> <li>• Roof 층을 기준으로 1개 위치일 경우 0.412H~0.491H, 2개 위치일 경우 0.329H~0.420H와 0.651H~0.737H 범위가 최적위치이다.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 효과적으로 횡변위를 제어할 수 있는 아웃리거 위치를 예상할 때 도시이론은 매우 신뢰도가 높으며 근사적인 계산으로도 실재구조물에 대한은 오차 없이 최적위치를 찾아 낼 수 있다.</li> <li>• 아웃리거 1,2개 층을 최적위치에 설치할 경우 형상비에 관계없이 최악의 경우와 비교해 불타 14%~18% 내외의 횡변위 제어효과가 있다.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 60,70층까지는 아웃리거 2개 위치로 서울시의 풍, 지진하중에 대해 횡변위 제어에 기여했으나, 80층에서 2개로는 제어가 어렵다.</li> <li>• 아웃리거를 설치하지 않았을 경우에도 나타나듯이 횡변위 감소율과도 형상비가 커짐에 따라 감소되는 추세를 보이므로 이에 대한 추가 보강 시스템의 도입이 필요하다.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 지진하중의 경우 약속된 Ray의 변위 편차가 Rax 보다 편차가 큰 것은 약속 방향에서 전단벽의 길이, 단면적이 작기 때문이다. 결과적으로 밀면전단벽이 커짐으로써 발생하는 현상이라 사용된다.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 최상층, 최하층에 아웃리거를 설치할 시 최상층 부분의 외부기둥의 파괴 길이가 짧아져 횡변위 제어에 유리하다.</li> <li>• 아웃리거 2개 설치 시 최상층, 최하층이거나 최상층에 2개 설치하는 것은 아웃리거 1개를 최적위치에 설치하는 것 보다 못한 결과를 나타낸다.</li> </ul> |

### 형상비가 큰 건물(8이상)에서 횡변위 제어를 위한 대책 및 향후 연구 과제

- 건축적 방법(Passive method)으로 건축 계획상 가능한 범위 내에서 아웃리거 층수를 늘리는 방법, 한 층 내의 아웃리거 벽체 개수를 늘리는 방법.
- 능동적 방법(Active method)로서 건물 상부 층에 제진 장치를 설치, 적용하는 방법.
- 하이브리드 시스템(Hybrid System)으로서 다른 구조시스템과의 벽체 및 조항을 고려하는 방법.

• 본 연구에서는 구조시스템의 전체 거동에 대한이론 다루어오며, 풍하중에 대한 건물의 성능 평가로서 층간 변위비, 횡변위 개수에 대한 분석이 요구된다.

- 모듈링과정에서 층수 모듈을 10개 층으로 하는 층도도 하의 동적 최적 위치와 산정이 필요하다.
- 지체(서울 외 부산...) 및 구조재료(RC조, SPC조, S조)에 따른 검토가 필요하다.