

# 초고층건물의 풍진동 제어기술 동향

## Recent Trend in Wind Induced Vibration Control for Tall Buildings



조 지 성\*



김 홍 진\*\*



김 대 근\*\*\*



이 종 인\*\*\*\*



김 현 배\*\*\*\*

\*포스코건설 기술연구소 건축기술연구팀 과장  
 \*\*포항산업과학연구원 시스템 건축실  
 \*\*\*포스코건설 송도사업본부 설계팀 과장  
 \*\*\*\*포스코건설 기술연구소 건축기술연구팀 팀장  
 \*\*\*\*\*포스코건설 기술연구소 소장

### 1. 개 요

최근 경제발전과 산업고도화에 힘입어 좁은 지역에서 극도의 효율을 달성하기 위한 경향이 건설 산업에도 확산되어, 한동안 국내 최고의 건물로 유명했던 63빌딩(1985년, 60층, 249m)보다 높은 타워팰리스III(2004년, 73층, 264m), 목동 하이페리온(2003년, 69층, 256m)을 비롯하여 부산 센텀파크(2005년, 52층)등의 주거용건물이 완공되었고, 롯데 잠실타워(107층), 인천타워(151층), 상암동 DMC 랜드마크 빌딩(120~130층) 및 부산 월드비즈니스센터(110층)등의 상업용 건물 또한 계획 중에 있다. 이러한 초고층 건물의 증가는 일반 수요자들에게 첨단건축기술에 대해 다양한 관심을 불러일으키고 있으며, 특히 초고층건물이 기본적으로 지녀야 할 안정성과 더불어, 생활수준향상에 따른 거주성에 대한 관심도 크게 증가하고 있다.

한편 국내외에서 날로 확대 되어가고 있는 초고층건설 시장 진출을 위해 국내 학·협회를 비롯한 건설사는 요소 기술 확보를 위해 총력을 기울이고 있으며, 이의 가시적인 성과가 한때 세계 초고층이던 말레이시아 KLCC타워(88층, 452m)를 비롯하여, 장래에 세계 최고층의 자리를 차지할 아랍에미레이트(UAE)의 버즈두바이(160~170층)를

삼성건설이 수주함으로써 점차 나타나고 있으나, 아직 원천기술이라 할 수 있는 설계기술은 대부분 외국선진사에 의존하고 있는 것이 현실이다. 이러한 초고층 설계기술 중 풍진동저감(제어)기술은 바람에 대한 초고층건물의 안정성과 사용성을 향상시키기 위한 기술이며, 최근 들어 향상된 구조재료(경량 및 고강도)의 사용에 기인한 구조물량 감소 등 효율적인 설계는 이루어지고 있으나, 이에 의해 오히려 구조물의 낮은 강성 및 감쇠성능으로 풍진동에 대한 안정성 및 사용성문제에 노출될 위험이 점점 증가하고 있다(그림 1, 2 참조).

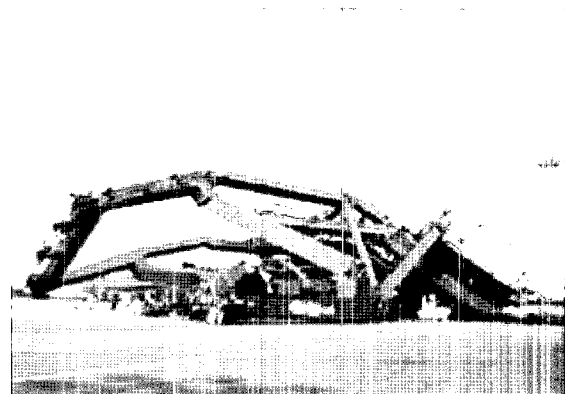


그림 1 부산 신감만 크레인 전복(태풍매미)

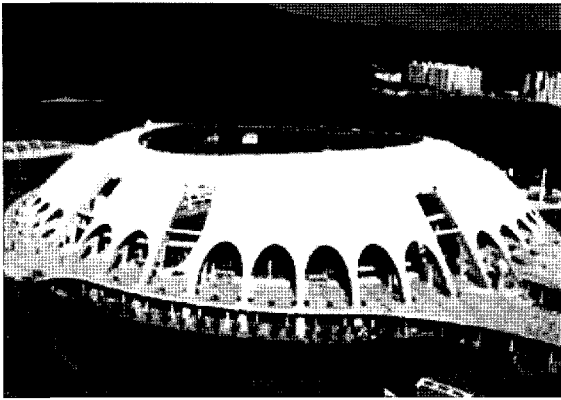


그림 2 부산 아시어드 주경기장 지붕막 파손(태풍 매미)

## 2. 풍진동을 감소시키기 위한 대책 (Wind-Induced Vibration Control)

초고층건물에서 풍진동을 감소시키는 대책으로 예전에는 효율적인 구조시스템을 이용하여 해결하는 방법을 주로 사용하였다. 이 방법은 초고층건물의 횡강성을 강성시키기 위해 구조시스템을 개선하고 때로는 구조부재의 크기를 키우거나 부재의 개수를 증가시키는 방법이다. 그 후 풍동실험기술이 발전함에 따라 구조물의 입체형상 및 단면을 변형하여 풍진동을 저감시키는 공기역학적인 방법을 이용하게 되었고, 근래에는 경제적인 진동제어기술의 개발에 힘입어 풍진동제어기를 사용하는 방법이 풍진동 저감대책으로 활발히 사용되고 있다.

| 풍진동 저감대책 | 세부 방법              | 장단점              |
|----------|--------------------|------------------|
| 공기역학적 방법 | 건물형태나 단지배치를 조정     | 계획단계에서 검토 가능     |
| 구조역학적 방법 | 구조물의 질량, 강성을 변화    | 구조 재설계, 구조물량 변화  |
| 기계적 방법   | 제진장치 활용 (TMD, TLD) | 제진장치만 설계, 일부구조보강 |

이러한 각 방법별 특징을 기술하면 다음과 같다.

### 2.1 구조역학적(Structural Mechanics)방법

풍진동(하중)에 대해 건물이 견딜 수 있도록 구조시스템 개선 및 강성증가, 일반화질량의 조절을 통한 고유진동수(강성, 질량)의 변화를 이용하여 풍하중 및 풍진동에 건물이 안전성 및 사용성을 만족하도록 하는 방법이다. 초고층건물의 초창기에는 풍동실험과 제진기술이 발전하지 못

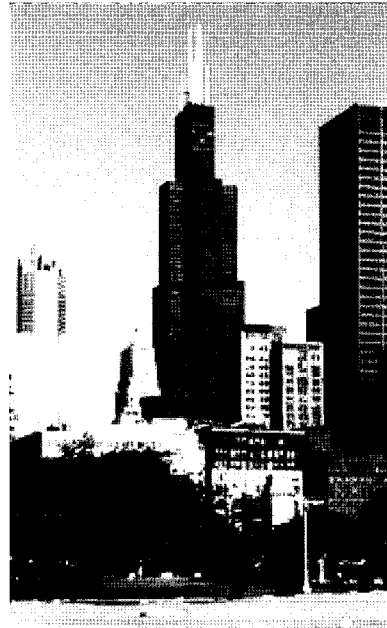


그림 3 Sears Tower(Bundled Tube)

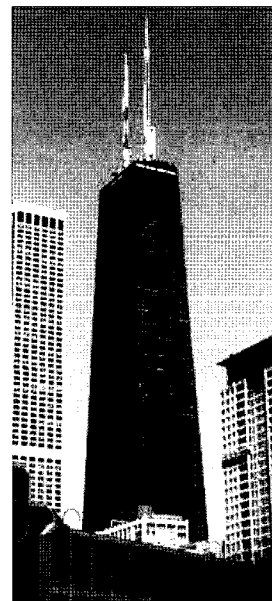


그림 4 John Hancock Center(Braced Tube)

하여 이 방법을 주로 사용하여 풍진동에 대처하였으며, 현재 추진되고 있는 대부분의 초고층건물은 당시 개발된 구조시스템을 그대로 도입하거나 이들을 조합하여 설계한다. 이 방법은 비경제적인 구조물량의 증가를 초래할 수 있으며, 여러 가지 제약에 의해 풍진동에 의한 사용성을 만족시킬 수 없는 경우도 있다.

### 2.2 공기역학적(Aero-Dynamics)방법

건물자체에 작용하는 풍하중(풍진동)의 영향을 최소화

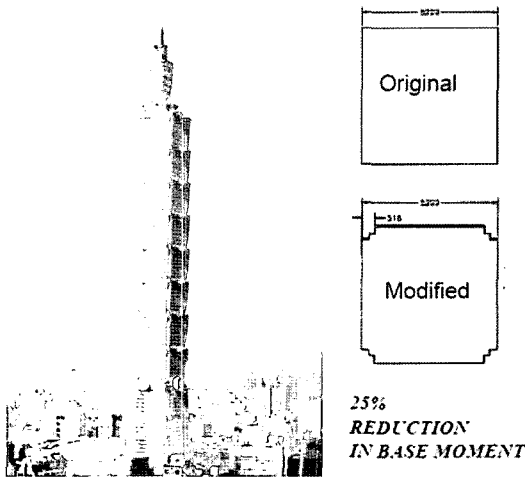


그림 5 대만 타이페이 101

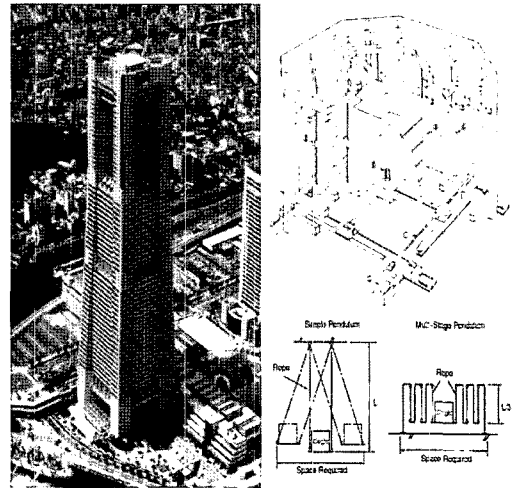


그림 7 요코하마 랜드마크 타워(TMD)

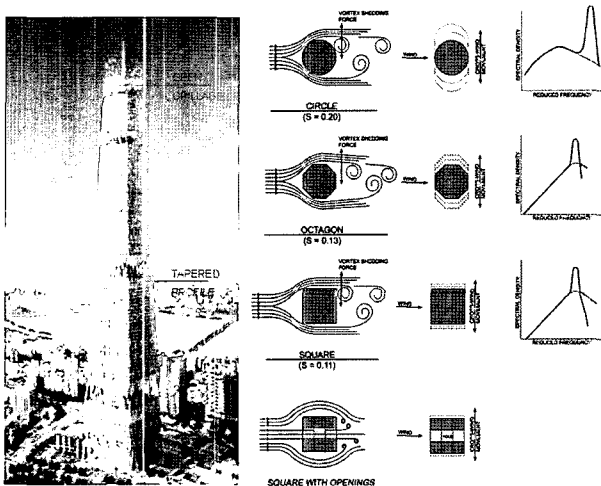


그림 6 잠실 롯데월드

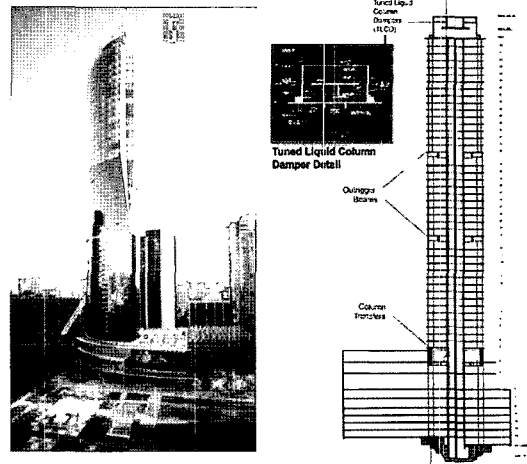


그림 8 밴쿠버 One Wall Center(TLCD)

하기위해 단지배치 및 건물의 형태를 풍진동에 유리하게 변형하는 방법으로 여러 가지 대안에 대한 풍동실험을 통해 풍하중 및 풍진동 저감효과를 확보할 수 있다(그림 5, 6). 이 방법은 풍진동 저감과 더불어 풍하중 저감에 의한 구조물량 감소효과를 추가로 기대할 수 있으나, 계획의 초기 단계에서 수차례의 풍동실험을 통한 대안분석 등 건축가, 구조공학자 및 풍공학자간의 상호 긴밀한 협력이 요구된다.

### 2.3 제진장치(Control Devices)를 이용한 방법

비교적 최근에 개발된 방법으로 풍진동 에너지를 제진장치가 흡수하도록 유도하여 풍진동을 감소시키는 특징과 더불어 건물의 내부공간 계획에 큰 영향을 주지 않고 대책수립이 가능하다는 장점이 있다.

이러한 기술은 초기 계획단계에서 상호유기적으로 검토하여야 하나 국내의 경우 초고층건물 설계경험 부족으로

기존의 중·저층건물의 설계과정을 답습하여 설계가 이루어진 후 풍동실험을 통한 풍진동발생 유무에 의해 위의 구조역학적 방법이나 제진장치를 이용하는 방법을 주로 활용하고 있다.

## 3. 초고층건물 풍진동저감 대책의 최신동향

### 3.1 공기역학적 풍진동 대책의 적용사례 증가

최근 발달된 컴퓨터기술을 이용한 설계가 증가추세에 있으며, 이 디지털화된 CAD데이터를 이용하여 골조나 커튼월을 자동으로 생산할 수 있는 생산기계가 출현함에 따라 2차원 도면으로는 표현하기 힘든 건물들이 출현하고 있다(그림 9).

기술의 발달은 건축가에게 자유로운 형태를 창조할 수 있는 기회를 주고, 이로 인해 초고층 건물은 기존의 설계

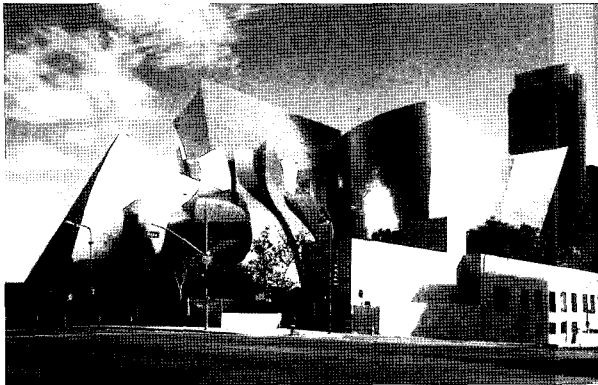


그림 9 Walt Disney Concert Hall

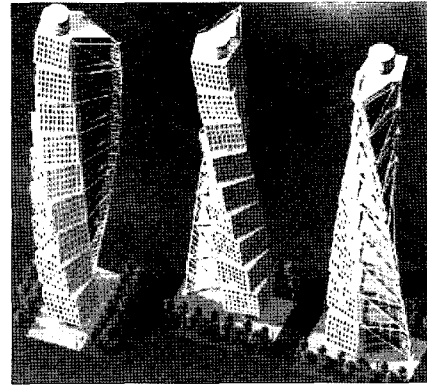
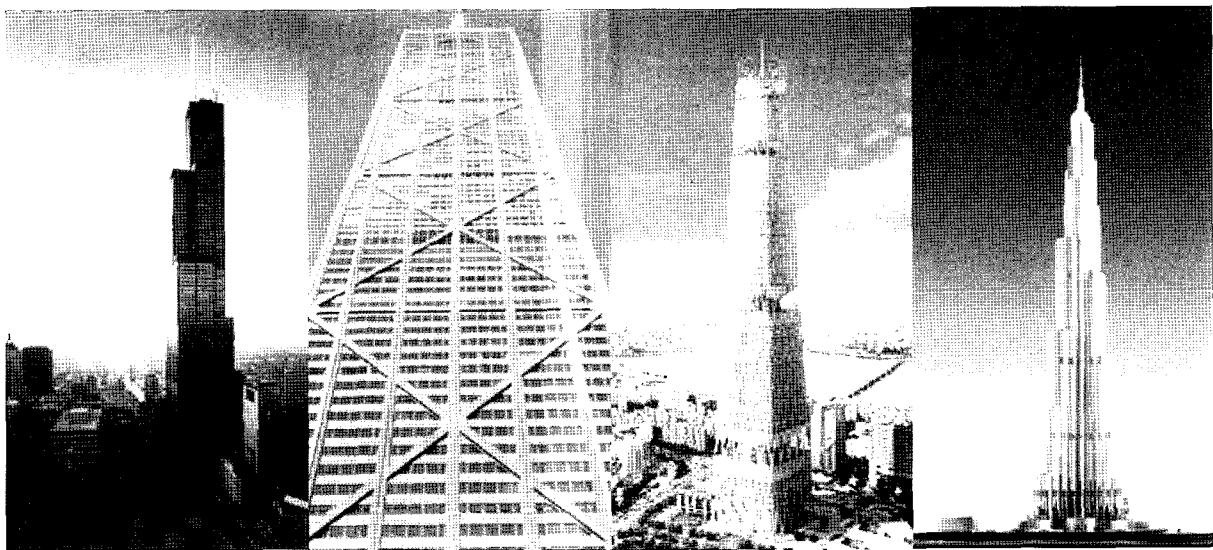


그림 10 Turning Torso



Sears Tower  
6.4

John Hancock Center  
6.6

Lotte  
7.1

Burj Dubai  
8.2

그림 11 초고층건물의 세장비

및 공법으로는 구현하기 힘든 독특한 형태적 상징성을 부여받고 있다(그림 10).

이러한 초고층건물은 형태를 기존의 원형, 박스형 등의 단면에서 탈피하여 자연스러운 외관으로 계획함으로써 풍진동(하중)에 보다 유리한 거동을 보이며, 이에 따라 기존의 건물에 비해 높은 높이와 세장비에도 불구하고 제진장치 등을 별도로 필요로 않는 특징이 있다(그림 11).

즉 건물의 계획단계에서 자연스러운 외관에 의해 공기역학적 장점을 최대한 살려 풍진동(하중)에 의한 영향을 감소시켜 구조물량을 절감하고 별도의 풍진동제어기도 필요로 하지 않는 경제적 초고층 구조시스템을 구현하고 있다.

### 3.2 경제성 있는 풍진동제어기의 활발한 채택

한때 신뢰성, 경제성, 시공성 및 유지관리 등의 문제로 적용이 활발하지 않던 풍진동제어기가 최근의 진동제어

기술의 발전에 의해 기존의 문제점을 해결하고, 구조역학적인 방법(구조보강, 질량조절)보다도 경제적으로 저렴해져 이의 활발한 적용이 세계적인 초고층건물의 집합지인 미국 뉴욕을 중심으로 전개되고 있다(그림 12, 13, TSD: Tuned Sloshing Damper, TLD: Tuned Liquid Damper).

실례로 미국의 Citicorp센터의 TMD는 설치 및 제작을 위해 약 1.5백만불의 비용이 소요되었으나, 횡강성 및 질량을 조절하는 방법을 이용시 약 28,000ton의 추가적인 철골물량이 발생하여 전체적인 공사비용이 약 400만불이 증가되는 것으로 조사되었다. 또한 뉴욕의 Random House(그림 15)는 TLCD를 사용함에 따라 부가 감쇠장치없이 골조에만 의존하여 횡력에 저항하는 구조시스템에 비해 약 7~8백만불(약 100억원, 총공사대비 약 5%)의 절감효과가 있는 것으로 조사되었다.

이러한 뉴욕에서의 풍진동제어기 적용이 국내와 다른점은 골조가 완성된 후 마감이 어느 정도 진행된 상태에서

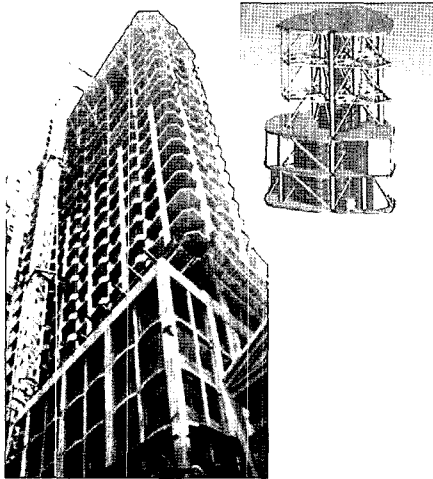


그림 12 미국 뉴욕 Barclay Tower(60층, TSD)

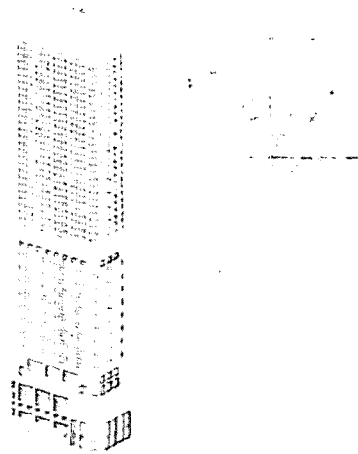
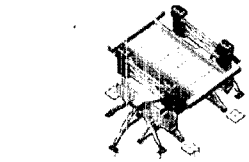


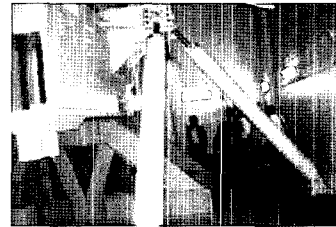
그림 13 미국 뉴욕 Washington st(60층, TLD)



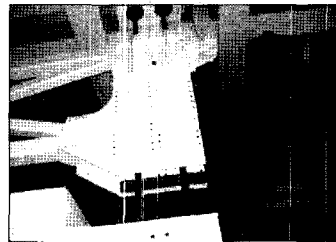
전경



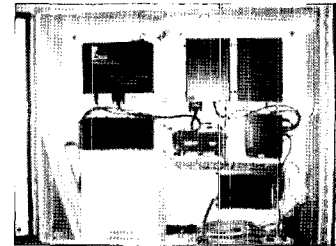
TMD



Oil Damper

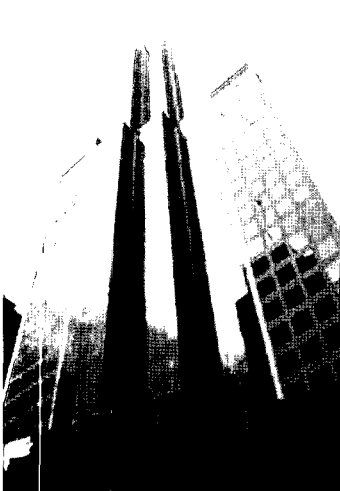


Pendulum 길이 조정부

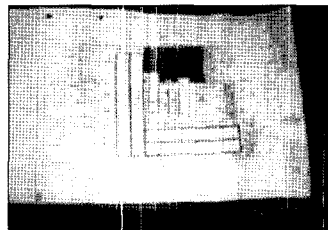


Monitoring System

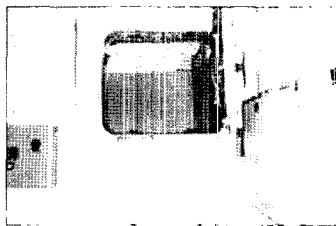
그림 14 Bloomberg Tower에 설치된 TMD



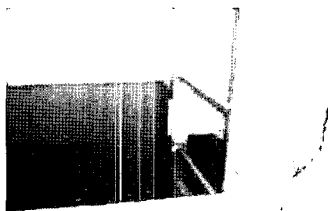
전경



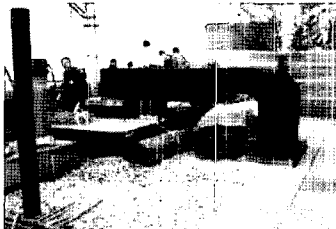
T\_LCD 설치평면



TLCD 입구



TLCD 내부



TLCD 상부 Cover

그림 15 Random House 설치된 TLCD

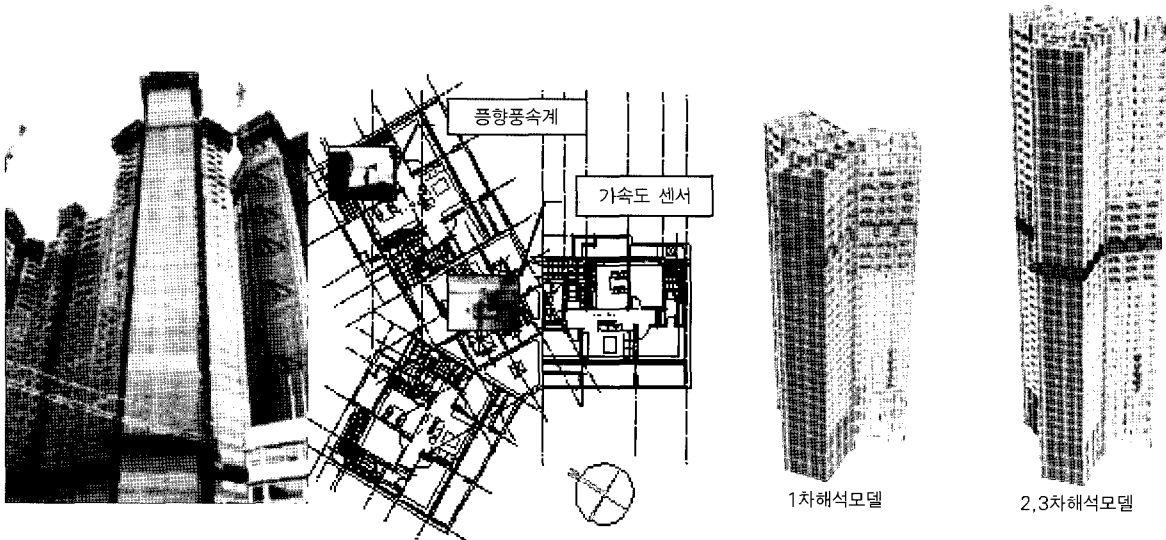


그림 16 부산 센텀파크 풍진동계측

계측에 의해 고유주기와 감쇠비를 구하고, 이를 통해 풍진동을 재 예측함으로써 최종적으로 풍진동제어기의 설치 여부를 결정한다는 것이다. 이는 설계단계에서 이미 풍진동 저감대책이 결정되어 계측에 의해 풍진동제어기가 필요하지 않다는 결론이 발생하더라도 원 계획대로 제어기가 설치되는 우리나라의 현실과는 큰 차이가 있다. 또한 선진외국사들은 측정에 의한 초고층건물의 주기나 감쇠특성이 해석치와 다를 수 있다는 사실을 충분히 인지하고 이를 제어기 설치시 반영하고 있다. 이러한 해석치와 실측치

표 1 초고층 건물의 고유진동수 해석값과 실측값 비교(1차 모드)

| 구분       | 부산 센텀파크 | 타워펠리스 III |
|----------|---------|-----------|
| 해석값 (Hz) | 0.515   | 0.139     |
| 실측값 (Hz) | 0.625   | 0.200     |
| 오차 (%)   | 21.4%   | 30.5%     |

의 차이는 국내에서 수행한 몇몇 초고층건물의 계측을 통해서도 확인할 수 있다(표 1, 그림 16).

참고로 자체적으로 조사한 수동형 풍진동제어기들의 장단점은 표 2와 같다.

표 2 풍진동제어기들의 장단점

| 구분    | TMD                    |                        | TLD                                       |                         |                                       |                           |                          |
|-------|------------------------|------------------------|---|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------|--------------------------|
|       | T.E. Solution          | Motioneering           | Motioneering                              |                         | SHIMIZU                               | MITSUBISHI                | MKA                      |
|       | L-TMD                  | P-TMD                  | TSD                                       | TLCD                    | SSD                                   | TLMD                      | TLD                      |
| 형태    |                        |                        |   |                         |                                       |                           |                          |
| 설치 사례 | <br>부산 센텀파크            | <br>대만 타이페이 101        | <br>상하이 국제금융 센터(건설중)                      | <br>밴쿠버 One Wall Centre | <br>요코하마 프린스 호텔                       | <br>PAL Corp. Head Office | <br>홍콩 Hang Lung Tower   |
| 특징    | - 1방향<br>- 동조 용이       | - 동조 용이<br>- 2방향 제어    | - 시공 용이<br>- 360° 제어                      | - 경제성 우수<br>- 2방향 제어    | - 경량(소형)<br>- 360% 제어                 | - 설치용이<br>- 댐핑조절 용이       | - 경제성 우수<br>- 2방향 제어     |
| 단점    | - 유지관리 주의<br>- 정밀제작/시공 | - 유지관리 주의<br>- 정밀제작/시공 | - 360° 구조특성 동일시<br>- 양중/운반문제<br>- 댐핑조절 곤란 | - 1방향 거동<br>- 구체중량 과다   | - 360° 구조특성 동일시<br>- 수량과다<br>- 댐핑조절곤란 | - 정밀제작필요                  | - 양방향 동조 곤란<br>- 구체중량 과다 |

## 4. 국내외 풍진동제어 기술 현황 및 대응 방안

### 4.1 풍진동저감 기술개발 현황

경제적인 풍진동 저감대책은 초기 계획단계에서 구조역학적, 공기역학적 및 제진장치를 이용한 방법이 상호유기적으로 검토하여야 하나, 초고층건물 설계경험 부족으로 기존의 중·저층건물의 설계과정을 답습하여 설계가 이루어진 후 풍동실험을 통한 풍진동발생 유무에 의해 위의 구조역학적 방법이나 제진장치를 이용한 방법을 활용하고 있다. 그 결과 상당수가 구조역학적으로 해결하기 어려워 제진장치를 활용하는 사례가 증가하고 있다(그림 17, 18, TMD: Tuned Mass Damper, TLD:Tuned Liquid Damper).

한편 포스코건설에서는 송도 the # 1st World에 동조액

체기둥감쇠장치(TLCD, Tuned Liquid Column Damper)를 설치할 예정이며, 이의 성능검증을 위해 축소모형을 제작하여 성능실험을 수행중이다(그림 19, 20).

또한 송도 the # 1st World에는 Tower Palace(삼성건설), 부산 하이페리온(현대건설)에서 실시한 상시거동측정과 비슷한 동적거동상시계측시스템을 구현하여 계측을 실시할 예정이다(그림 21).

### 4.2 향후 대응방안

풍진동 저감대책으로 사용하는 제진장치의 설계경험은 타 초고층 요소기술과 비교하여 더욱 미천하여 이의 설계 및 시공을 위해 상당한 비용을 외국선진사에 지불하고 있으며, 이 제진장치의 설계비용이 초고층 건물의 구조설계 비용을 초과하는 역설적인 현상도 나타나 이에 대한 기술

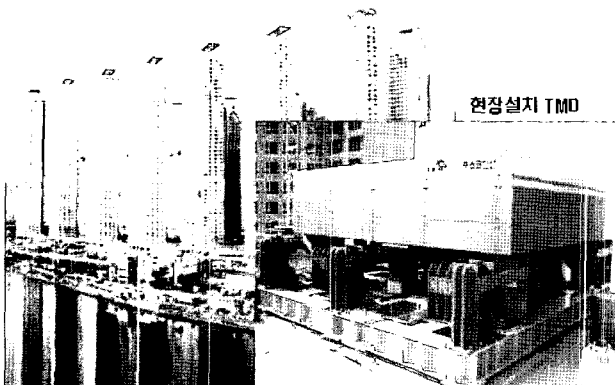


그림 17 부산 센텀파크에 설치된 TMD(포스코건설)

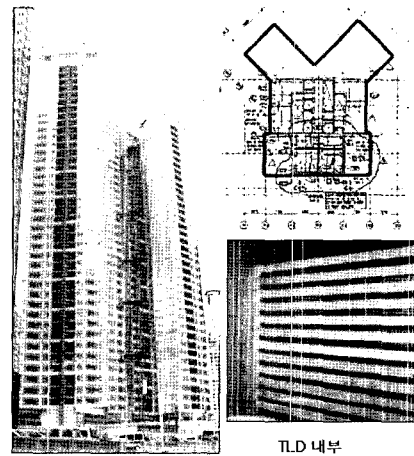
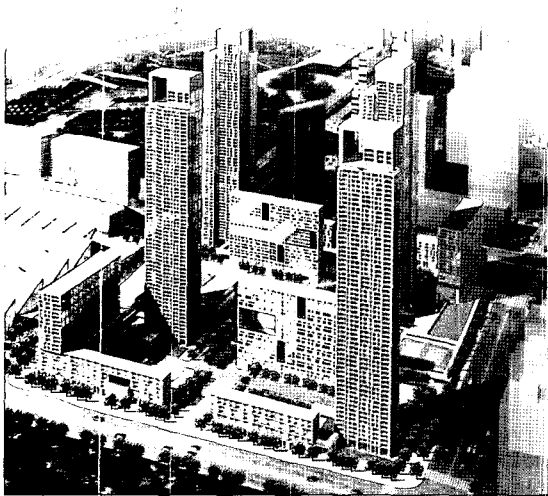
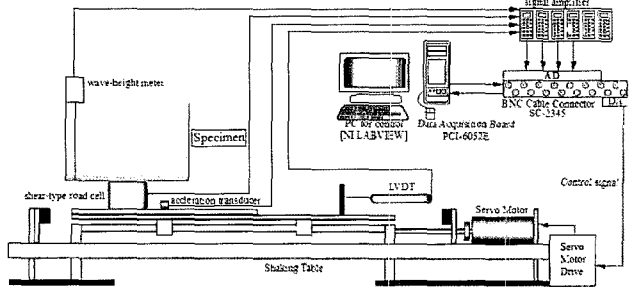


그림 18 부산 하이페리온에 설치된 TLD(현대건설)

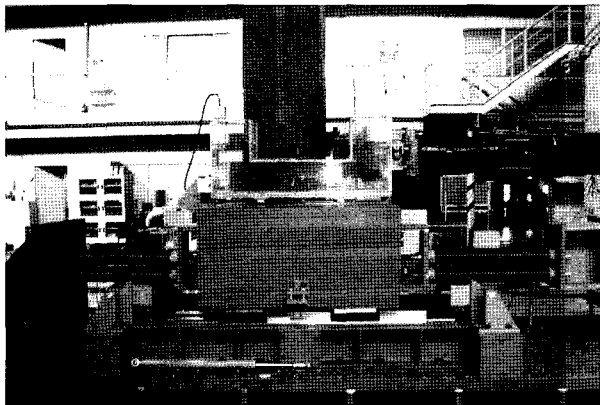


(a) 송도 the # 1st World(포스코건설)

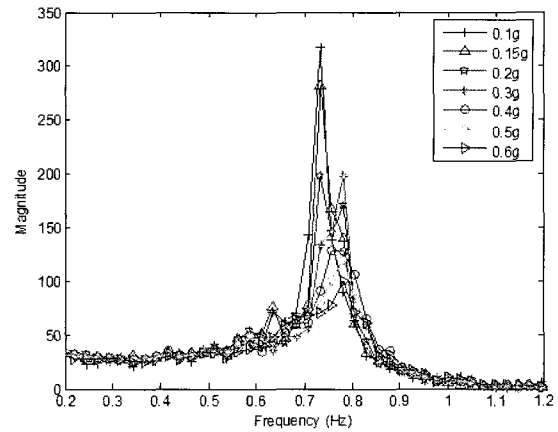


(b) TLD, TLCD 모형실험 개념도

그림 19 TLCD 성능실험



(a) 구조체-TLCD 실험모형



(b) 전단력의 전달함수

그림 20 TLCD 성능실험

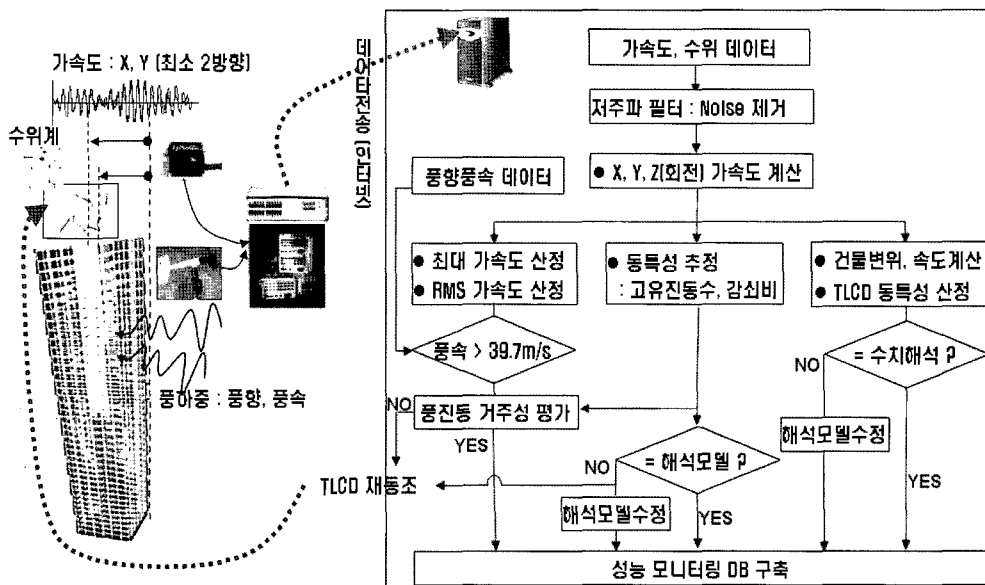


그림 21 송도 the # 1st World - Monitoring System 구축 계획도

독립이 절실히 요구되고 있다. 이론적인 연구와 달리 이러한 풍진동제어기의 실제설계는 초고층건물 구조설계와 견줄만큼 많은 경험과 해석/설계기술 그리고 설치 후 성능검증에 관한 많은 축적자료가 필요하다. 즉 질량형 풍진동제어기의 일종인 동조유체감쇠기의 구조는 풍진동에 의한 수압보다 지진에 의해 수압이 크게 발생하며, 실제 수조벽체의 설계는 지진 시 하중에 따라 결정된다. 또한 외국설계사의 무분별한 활용은 제어기의 이상에 의해 거주성요건을 만족시키지 못할 경우에 유지관리문제를 야기시킬 수 있다. 따라서 현재 까지 설치된 풍진동제어기의 선진기술을 습득과 지속적인 동적거동계측을 통해 원천설계기술을 확보하여 향후 늘어날 것으로 예상되는 초고층건물에 대응할 국내의 독자적인 풍진동 제어기모델의 개발이 필요하다.

### 참 고 문 헌

1. A. Kareem, T. Kijewski and Y. Tamura, Mitigation of Motions of Tall Buildings with Specific Examples of Recent Applications, Wind and Structures, Vol. 2, No. 3, 1999, 201~251.
2. J. P. Den Hartog, Mechanical Vibrations, 4th edn, McGraw-Hill, New York, 1956.
3. T. T. Soong, and G. F. Dargush, Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering, New York, John Wiley & Sons, 1997.
4. Sakai, F., Takaeda S., and Tamaki T., "Tuned Liquid Column Damper-New Type Device for Suppression of Building Vibrations", Proc. Int Conf. on High Rise



- Building, Nanjing, China, 1989, pp. 25~27.
5. C. C. Chang and C. T. Hsu, "Control performance of liquid column vibration absorbers", *Engineering Structures*, Vol. 20, No. 9, 1998, pp. 580~586.
  6. Wright, G., "Steadying Influence-Damper systems save millions in cost, while reducing lateral movement in tall buildings", *Building Design & Construction*, 2002. 11.
  7. Watkins, R. D., and Hitchcock, P. A., "Tests on various liquid column vibration absorbers", in Proc. Int Conf. Motion and Vibration Control Yokohama, 1992. pp. 1130~1134.
  8. H. Gao and K. C. S. Kwok, "Optimization of tuned liquid column dampers", *Engineering Structures*, Vol. 19, No. 6, 1997, 476~486.
  9. P. A. Hitchcock, K. C. S. Kwok and R. D. Watkins, "Characteristics of liquid Column vibration absorbers (LCVA)-I", *Engineering Structures*, Vol. 19, No. 2, 1997, pp. 126~134. 