

풍동실험에 의한 건축물 풍응답 평가 및 제진장치 소개

Evaluation of Building's Response using Wind Tunnel Test & Introduction of Damper



황 규 석*



길 용 식**



김 형 래***

* 현대건설 연구개발본부 책임연구원
** 현대건설 연구개발본부 선임연구원
*** 현대건설 연구개발본부 수석연구원

1. 서론

우리나라는 지정학적으로 강한 태풍의 영향을 받는 위치에 놓여 있다. 기상청의 통계에 따르면 매년 평균적으로 3개 정도의 태풍이 우리나라를 내습하는 것으로 알려져 있다. 특히 최근에는 2002년 태풍 루사, 2003년 태풍 매미가 우리나라 기상관측 이래 최대의 풍속을 연이어 갱신하면서 제주도, 영남, 호남 일원을 강타하여 막대한 인적·물적 피해를 발생시켰다.

초고층건물, 공항관제탑, 관광타워 등과 같은 건축물은 바람에 민감해서, 종래와 같이 풍방향 풍하중에 대해서만 그 내력적인 검증만으로 내풍설계를 끝내면, 100년 재현주기인 설계풍속과 비교해 볼 때 1년에 한번 또는 수년에 한번 불어오는 상당히 낮은 풍속인 경우에 있어서도 사용자가 인지하는 진동을 발생시키는 경우가 있다. 바람에 의한 진동은 지진의 경우와 달리 한번 생기면 장시간 계속되기 때문에 거주자나 이용자에게 불쾌감을 주거나, 업무나 행동에 지장을 주기도 한다. 그래서 고층건축물이 되면 강도상 안전성의 문제뿐만 아니라 거주성, 사용성의 문제에 있어서도 풍하중에 대한 배려가 중요하게 되었다.

그렇지만 이러한 내풍설계는 내진설계에 비해서 용이하

지 않다. 예를 들면, 내풍설계에서는 내진설계와는 달리 표준풍이 되는 디지털 데이터를 작성해도 그다지 유효한 수단이 되지 않는다. 왜냐하면 건축물이 받는 풍력이 건축물의 형상에 강하게 의존하기 때문이다. 우리나라 건축구조기준(국토해양부 고시)에 명시되어 있는 풍동실험 대상 건축물은 다음과 같다.

- (1) 풍진동의 영향을 고려해야 할 건축물
- (2) 특수한 지붕골조 및 외장재
- (3) 골바람효과가 발생하는 건설지점



그림 1 풍피해 사례

- (4) 인접효과가 우려되는 건축물
- (5) 특수한 형상의 건축물

최근 풍동실험을 대체하는 기술로 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 적용하고 있으나 건축물의 형상이나 그 주변상황이 복잡하기 때문에 현시점에서는 실무적 수법으로 이용될 수 있는 수법으로 CFD가 확립되지 않았다. 결국 풍동실험에 의해 풍하중을 파악하고 풍응답을 평가해서 골조를 설계하는 수법이 가장 실용적인 내풍설계수법이라고 말할 수 있다.

고층건물은 풍진동에 취약하여 태풍과 같은 강풍에 의한 진동으로 거주자의 업무수행이나 안락함에 문제가 발생하기 쉽다. 이러한 풍진동은 풍하중의 변동성분에 의해 발생되는데, 건축물의 고유진동수가 낮을수록 풍진동의 크기는 증가한다. 구조시스템을 통한 고유진동수 증가량은 한계가 있으며, 경제적으로 풍진동을 감소시킬 수 있는 방안이 요구되고 있어 감쇠증진을 위한 부가질량형 제진장치가 적극적으로 도입되기에 이르렀다.

풍응답을 평가하기 위한 풍동실험과 풍진동을 감소시키기 위한 부가질량형 감쇠장치에 대해서 간략하게 알아보기로 한다.

2. 본론

2.1 풍동실험의 역할

건축물에 작용하는 바람에 의해서 초래하는 각종 현상은 공기의 흐름 그 자체를 해석적으로 추정할 수 없기 때문에 실험적 수법에 의해 이것을 예측할 수 있다. 많은 기준에 있어서 풍하중 산정을 위한 풍력계수는 원칙적으로 풍동실험에 의해 결정하는 것으로 되어 있다. 바람과 관련된 대다수 설계상의 문제에 대해서 풍동실험의 결과를 이용하는 것이 가능하다.

예를 들면 초고층 건축물, 관광타워, 굴뚝, 장대교량, 송전철탑, 장스팬 지붕, 냉각탑, 장대 크레인 등이 풍동실험의 대상이다. 이러한 풍동실험은 구조물에 작용하는 풍하중과 그 응답을 예측하기 위해서 실시되는 경우가 많다. 복잡한 지형 위에 세워진 경우나 근접해서 큰 건축물이 위치하는 경우도 설계속도압이나 풍하중의 추정을 위해 풍동실험이 실시된다. 그러나 구조물의 내력적인 안정성만이 아니라 사용성, 거주성의 확보, 혹은 보행자나 주변 이용자를 위한 풍환경을 파악하기 위한 실험도 자주 실시된다.

풍동실험을 하는 방법은 여러 가지 종류로 실험대상과



그림 2 현대건설 대형경계층풍동 전경

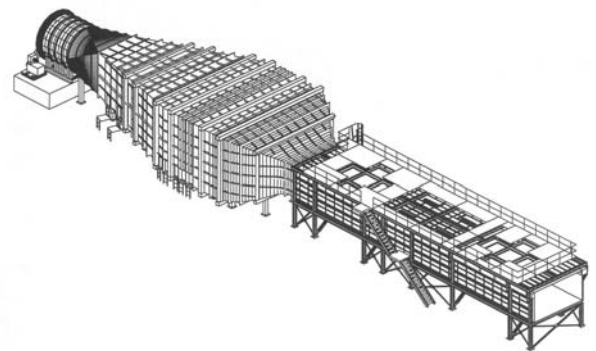


그림 3 현대건설 대형경계층풍동 투시도

목적에 따라 각각 다르게 적용하고 있다. 그중에서 고층건축물의 풍응답을 평가하는 목적으로 가장 널리 수행하고 있는 풍력측정실험에 대해서 기술하기로 한다.

2.2 풍력측정실험

풍력측정실험은 건축물 전체 혹은 그 일부에 작용하는 풍하중의 평가를 위해서 실시된다.

풍력측정실험에서는 대상이 되는 건축물의 모형을 분력기(Load Cell) 위에 고정하고, 모형전체에 작용하는 풍력(전단력, 전도모멘트)을 측정한다. 측정된 풍력에 의해 구조설계용 풍하중의 설정과 건축물의 풍응답해석이 가능하다. 단, 이 실험에서는 바람에 의해 건축물이 진동하고, 이로 인해서 발생하는 부가적인 공기력에 대해서 예측하는 것은 할 수 없다. 부가적 공기력의 효과를 파악하기 위해서는 공력진동실험 등으로 측정하지 않으면 안된다. 부가적 공기력의 효과를 무시할 수 있는 경우에는 풍력측정실험 결과만을 이용해서 내풍설계를 하는 경우가 많다. 또 실험대상 건축물의 구조특성이 명확하지 않은 시점에서 건축물의 형상이 정해지면, 응답추정시 건축물의 구조특성을 파라메



그림 4 풍력측정실험 예

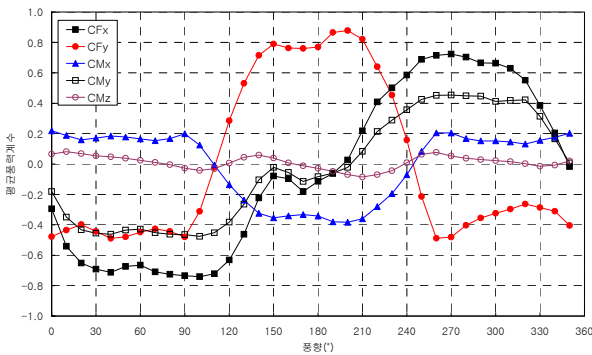


그림 5 풍력계수 예

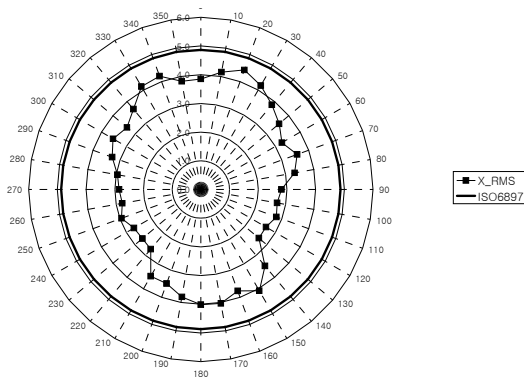


그림 6 가속도응답 예

터로서 변경할 수 있는 등의 이점도 있다.

강풍에 의하여 유발되는 건축물의 변위를 평가할 때는 설계풍속을 사용한다. 강풍으로 인하여 건축물에 발생하는 수평변위에 대한 제한은 NBCC에서 건물높이의 1/500로 규정하고 있다. 그러나 캐나다를 제외한 다른 나라에서는 수평변위 제한을 두지 않고 건물주나 보험회사가 자신들의 필요에 따라 규정할 수 있도록 하고 있다.

우리나라의 KBCC에서는 “바람으로 발생하는 건축물의 수평변위에 의하여 건축물 골조 및 외장재가 손상을 입지

않도록 해야 한다.”고 규정하여 강풍으로 인하여 건축물이 손상되지 않도록 하는 최소한의 제한을 두고 있으나 수평변위에 대한 구체적인 평가방법은 규정하고 있지 않다.

바람으로 발생하는 건물의 수평진동은 건물 사용자에게 멀미 등과 같은 불편감을 유발시켜 거주성을 저하시키는 문제를 야기한다. 따라서 건물 사용자의 거주성을 확보하기 위해서는 일정레벨의 강풍(1년, 5년, 10년 재현주기의 풍속)이 불었을 때 건물 최상층에서의 진동가속도가 일정레벨 이하가 되도록 해야 한다. 건물의 거주성에 대한 우리나라 및 외국의 규정을 소개하면 다음과 같다.

(1) KBC

“바람으로 발생하는 건축물의 진동에 의하여 거주자가 불안과 불편감을 느끼지 않도록 또한 건축물이 피해를 입지 않도록 적절하게 설계해야 한다.”라고 규정하고 있다. 거주성은 건축물의 최상층에서 발생하는 진동가속도를 대상으로 평가한다. KBC에서는 거주성에 대한 규정은 있으나 거주성을 평가하기 위해 필요한 가속도의 산정방법을 구체적으로 제시하고 있지 않다.

(2) AIJ

일본건축학회가 규정한 거주성평가기준으로서 바람에 의하여 발생하는 건축물의 수평진동에 대한 거주성평가는 먼저 설계자와 건축주의 판단에 따라 목표성능(인간이 가속도를 지각하는 확률)을 설정하고, 다음 그림의 거주성평가곡선의 10분 평균풍속의 1년 재현주기풍속이 분 경우 건축물 최상층에서 발생하는 최대응답가속도를 건축물의 고유진동수에 따라 적용하여 평가하도록 하고 있다.

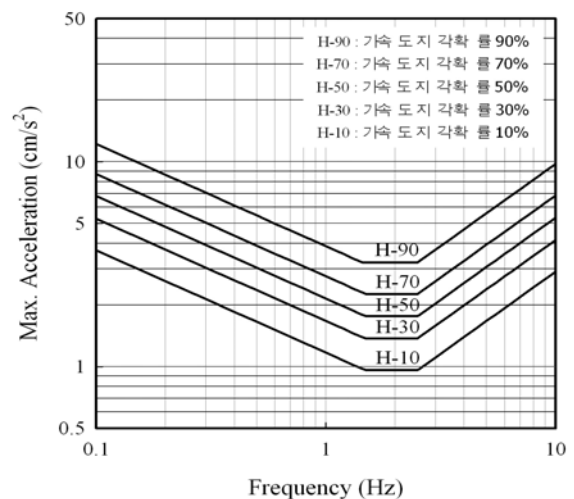


그림 7 AIJ 거주성평가곡선

(3) NBCC

캐나다는 1시간 평균풍속의 10년 재현주기풍속이 분 경우 건축물 최상층에서 발생하는 진동가속도에 대한 가속도 한계는 주거용 건물은 중력가속도의 1%, 사무용 건물은 중력가속도의 3%로 할 것을 권장하고 있다.

(4) ISO 6897

ISO 6897이 규정한 거주성능평가기준으로 일반건물인 경우 5년 재현기대풍속의 바람이 10분 이상 불었을 때 건물에 발생하는 진동가속도에 의해 거주성능에 문제가 발생하지 않기 위해서는 건물 최상층에서 발생하는 진동가속도의 표준편차가 그림 8의 최하단부 실선보다 밑에 위치해야 한다.

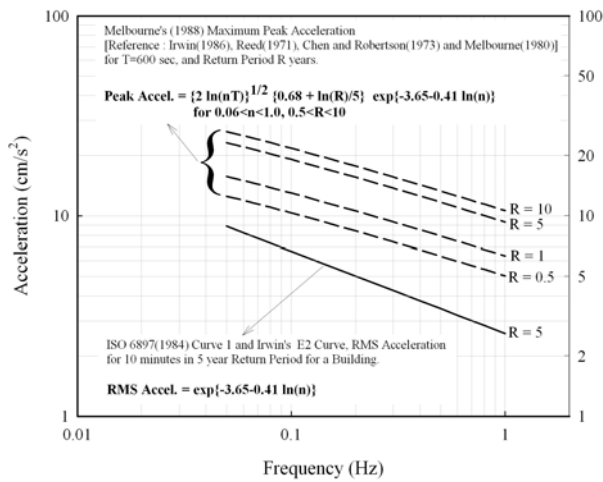


그림 8 ISO 6897 거주성능평가곡선

(5) ISO 10137

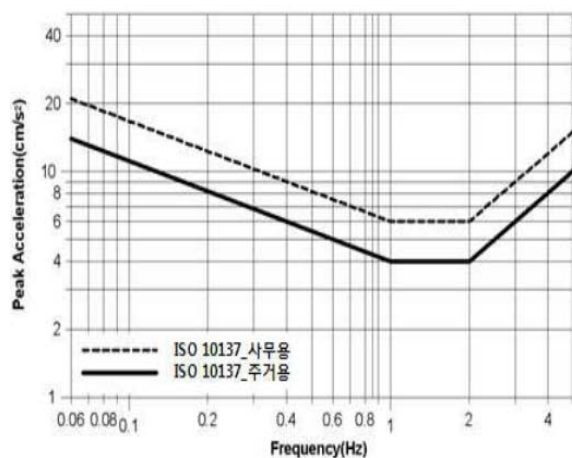


그림 9 ISO 10137 거주성능평가곡선

ISO 10137이 규정한 거주성능평가기준으로 1년 재현기대풍속의 바람이 10분이상 불었을 때 건물에 발생하는 진동가속도의 최대치로 제안하고 있다. ISO 10137과 AIJ를 비교하면 ISO 10137 주거용 건축물의 평가기준이 AIJ의 H-90 성능평가곡선과 유사하게 나타난다.

2.3 부가질량형 감쇠장치

풍진동은 풍하중의 변동성분에 의해 발생하게 되는데 풍하중의 변동성분은 주로 낮은 진동수 성분이 큰 비중을 차지하기 때문에 건축물의 고유진동수가 낮을수록 풍진동의 크기는 증가한다. 건물의 진동수는 강성과 질량의 상대적 크기에 의해 영향을 받으며 질량에 반비례하고 강성에 비례한다. 따라서 강성을 증가시킬 필요가 있으나 고층건물에 필수적으로 요구되는 고강도재료의 이용은 부재단면의 감소를 가져와 강성을 감소시키게 된다. 따라서 강성은 재료보다는 구조시스템의 개선을 통해 증가시켜야 한다. 그러나 구조시스템을 통한 고유진동수 증가량에는 한계가 있으며, 재료의 투입과 공기를 단축하면서 경제적으로 풍진동을 감소시킬 수 있는 방안이 요구되고 있으며, 이러한 목적에서 감쇠증진을 위한 제진장치가 적극적으로 도입되고 있는 실정이다.

일반적으로 내진설계 시에는 구조물의 소성변형을 통해 많은 에너지가 소산되는 것으로 가정하나, 풍진동에 대한 사용성 검토시에는 이와 같은 부재손상에 의한 에너지 소산효과를 기대할 수 없으므로 구조물의 감쇠는 내진설계 시보다 크게 낮아져서 1% 미만의 감쇠비를 갖는 건물도 흔히 볼 수 있다.

국내에서는 90년대 이후 진동제어에 대한 이론적 연구를 시작으로 건축구조물의 내풍성능 및 거주성능을 개선하기 위한 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 여러 가지 제진장치 타입에 대한 제어이론과 수치해석을 통한 성능개선을 평가하고, 축소모형에 대한 실험실 수준의 성능검증연구가 이루어지다가 90년대말 실구조물에 적용하는 단계에 이르렀으며 최근에는 초고층 아파트에 대한 제진장치 적용 타당성 검토가 적극적으로 이루어지고 있다. 그에 따라 적용사례 또한 증가하고 있는 추세이다. 국내에 적용된 제진장치의 타입으로는 부가질량형 감쇠장치형태가 주로 사용되었으며, 국내 제진장치 적용사례는 표 1과 같다.

다음은 풍하중에 대한 구조물의 응답저감에 유리하다고 알려져 있는 질량형 제진장치를 중심으로 기술하며, 질량형 제진장치 중에서도 수동형 제진장치인 동조질량감쇠기(TMD)와 동조액체감쇠기(TLD, TLCD)를 소개하고, 국내외 설치사례에 대해서 간단히 소개하기로 한다.

표 1 국내 제진장치 적용사례

구조물	소재지	장치유형	설치년도	높이
인천국제공항 관제탑	인천	질량형(HMD)	1999	100.4m
양양공항 관제탑	양양	질량형(TMD)	2000	80.1m
갤러리아 팰리스	서울	가새댐퍼(VED)	2003	46층
센텀시티	부산	질량형(TMD)	2004	40층
현대 하이페리온	부산	질량형(TLD)	2005	42층
롯데 호텔	울산	질량형(AMD)	2007	20층
포스코 더 퍼스트 월드	인천	질량형(TLCD)	2008	64층
포스코건설 본사사옥	인천	질량형(TMD)	2009	33층

HMD : Hybrid mass damper(능동형)
 TMD : Tuned mass damper(수동형)
 TLD : Tuned liquid damper(수동형)
 VED : Visco elastic damper(수동형)
 AMD : Active mass damper(능동형)
 TLCD : Tuned liquid column damper(수동형)

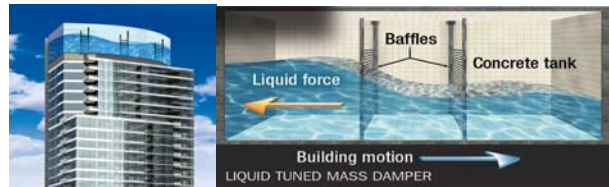
(1) TMD(Tuned mass damper)

건축물에 활용되고 있는 TMD는 그림 10과 같이 별도의 부가질량체를 스프링 및 가이드 레일을 사용해서 기계적으로 건축물에 연결하여 일정한 고유진동수를 갖는 부가질량체의 운동을 통해 건축물의 진동에너지를 흡수한다.

TMD는 다양한 형식으로 제작될 수 있다. 부가질량체를 마찰이 적은 가이드레일 위에 설치하거나 진자형식으로 매달 수도 있다.

(2) TLD(Tuned liquid damper)

수동형 감쇠장치 중의 하나인 동조액체감쇠장치는 물탱크 안에 물을 담아 물의 움직임에 의해 발생하는 조화하중(control force)과 전체 시스템의 감쇠비를 증가시켜 구조체의 진동을 완화시켜준다. 동조액체감쇠장치는 모든 건물에 존재하는 물탱크를 이용하여 건물에 물을 공급하는 물탱크의 역할과 건물의 진동을 제어하기 위한 제진시스템의 역할을 동시에 수행할 수 있도록 하며, 설치비용이 저렴하다는



장점이 있다.

(3) TLCD(Tuned liquid column damper)

TLCD는 TLD 내의 액체 운동에너지를 극대화하기 위해 고안된 특별한 형태이다. U자 형태로 이루어져 있으며, 관내 액체의 흐름과 관내 유관(orifice)으로 인한 유체의 압력을 이용하여 구조물에 작용하는 에너지를 소산시키는 장치이다. TLD에 비해서 설치공간이 작아지고 가운데 공간을 다른 용도로 활용할 수 있는 장점이 있는 여전히 건축물과의 진동주기를 동조시키기 어려운 단점이 있다. 이러한 단점을

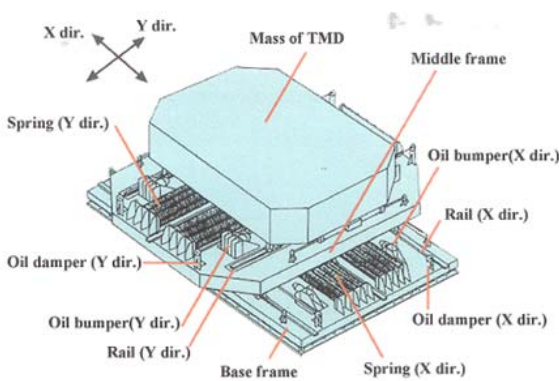


그림 10 가이드레일과 코일스프링형식 TMD

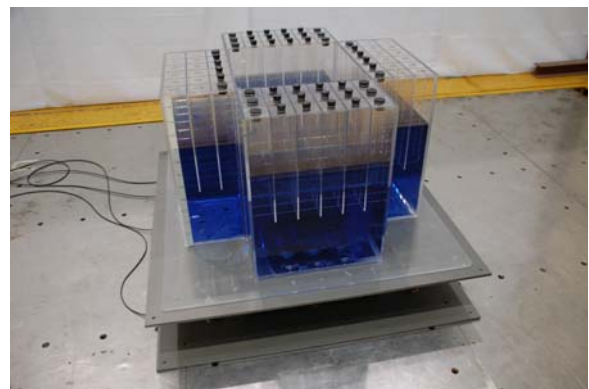


그림 12 M-TLCD

해결하기 위해서 현대건설(주) 연구개발본부에서는 TLCD 기동부를 여러 개의 공간으로 분할하여 다양한 진동주기의

구현이 가능한 M-TLCD(Multi-cell tuned liquid column damper)를 개발하였다.

(4) 국내외 설치사례

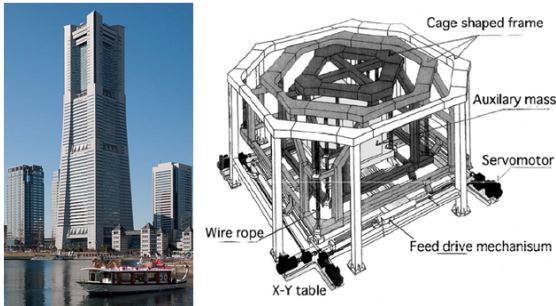


그림 13 Landmark Tower (HMD, 요코하마, 1993년)

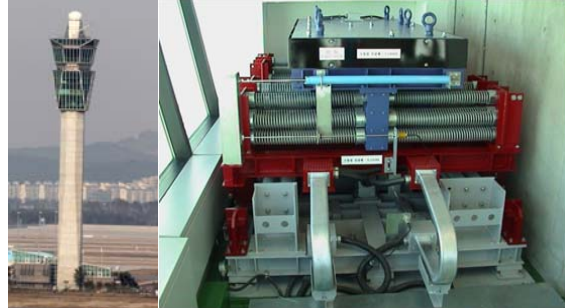


그림 14 인천국제공항 관제탑 (HMD, 인천시, 1999년)

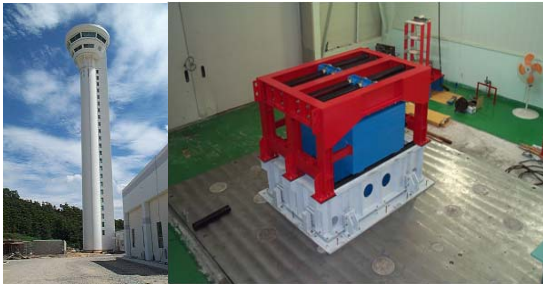


그림 15 양양국제공항 관제탑 (TMD, 양양시, 2000년)

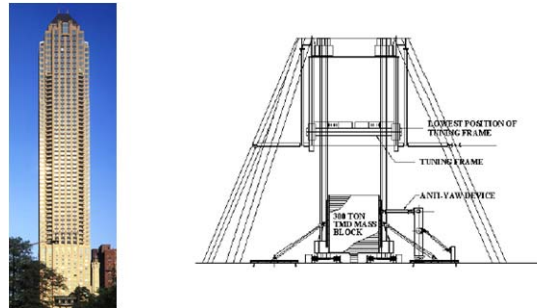


그림 16 Park Tower (TMD-진자형식, 시카고, 2000년)

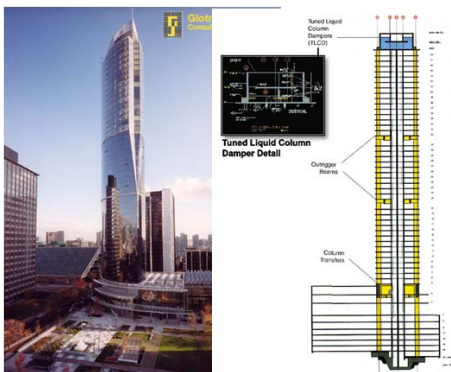


그림 17 One Wall Center (TLCD, 밴쿠버, 2001년)

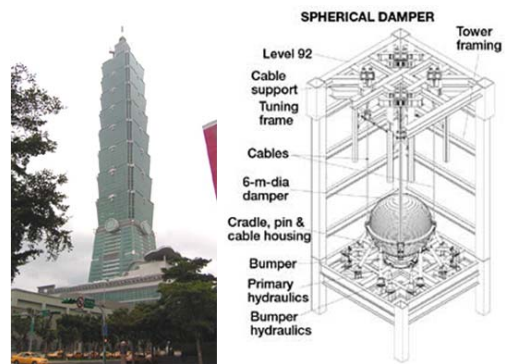


그림 18 Taipei Financial Center(TMD-진자형식, 대만, 2004년)



그림 19 센텀시티 (TMD, 부산시, 2004년)

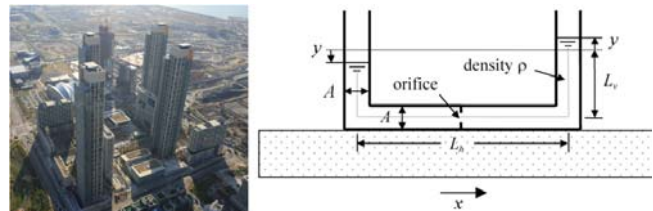


그림 20 포스코 더샵 퍼스트월드 (TLCD, 인천시, 2008년)



그림 21 포스코건설 본사사옥
(TMD, 인천시, 2009년)

3. 결론

건축물 내풍설계의 목적은 강풍시 구조물의 안정성을 확보하고, 나아가서는 거주자의 사용성까지 확보하는데 있다. 또한 건축물이 건설되어지기 전에 실험을 통하여 구조물에 작용하는 풍하중을 정확히 파악하여 구조설계나 외장재 설계에 반영함으로써 합리적인 구조체 및 외장재를 설계하는데 있다. 특히 우리나라와 같이 매년 3~4차례 태풍이 통과하는 지역에서는 풍동실험을 통하여 구조물의 진동이나 외장재의 탈락과 같은 풍피해가 발생하지 않도록 설계하고 시공되어야 한다. 건축물 풍동실험은 설계의 신뢰성을 높일 뿐만 아니라, 대부분의 경우 외장재 및 구조골조의 경제적인 설계를 가능하게 할 것이다.

바람에 대한 구조물의 내풍성능 향상을 위하여 구조물

자체의 강성이나 연성을 증대시키는 소극적인 방법에서 탈피하여 구조물에 다양한 제진기술이 활발히 적용되고 있다. 제진장치는 구조물의 진동을 저감시켜 건축물의 사용성을 증대시키는 목적 외에 적극적인 적용을 통한 구조물의 구조시스템 최적화까지 가능한 유효한 수단이 될 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 한국풍공학회, 엔지니어를 위한 내풍공학, 2010
2. 대한건축학회, 건축구조기준 및 해설, 2009
3. ISO 6897-1984(E), Guideline for the evaluation of the response of occupants of fixed structures, especially buildings and off-shore structures, to low-frequency horizontal motion(0.063 to 1Hz), ISO, Geneva, 1984
4. ISO 10137-2007(E), Base for design of structures- Serviceability of building and walkways against vibrations, ISO, Switzerland, 2007
5. 日本建築センター, 實務者のための風洞實驗ガイドブック, 東京, 1994
6. Dong-Ik Kim, Kyung-Won Min, Ji-Hun Park, Hye-Ri Lee, Jae-Keon Kim, Kyu-Seok Hwang, Yong-Sik Gil, Tunable Tuned Liquid Column Dampers with Multi Cells for Wind Vibration Control of Tall Buildings, SPIE Smart Structures and Material, 2012.3 