

진동대를 이용한 TLD와 MTLTD의 성능실험에 대한 분석

An Analysis on Performance Test of TLD and MTLTD Using Shaking Table

유 장 열* 송 창 현** 유기표*** 김 영 문****
You, Jang-Youl Song, Chang-Hyun you, Ki-Pyo Kim, Young-Moon

요 약

본 논문은 건물의 형태와 동적특성을 변화시키지 않고 건물에 부가질량을 설치하여 건물의 진동을 제어하는 방법중 수동형 제진장치인 TLD(tuned liquid damper)와 MTLTD(multiple tuned liquid damper)의 진동응답을 감소시키기 위해 진동대를 이용한 성능실험을 실시하였다. 따라서 기존의 형태별(원형, 직사각형) TLD 실험의 실험 데이터를 가지고 가진 진폭(1mm, 3mm, 5mm, 10mm, 20mm)의 변화에 따른 고유진동수(0.44Hz, 0.55Hz)에 대한 MTLTD의 형태별 실험을 통하여 TLD와 MTLTD의 진동 감소효과에 대한 성능실험을 비교 분석 하였다.

Abstract

Experimental studies using tuned liquid damper(TLD) and multiple tuned liquid damper(MTLTD), which are passive control devices consisting of a rigid tank filled with liquid, are used to suppress vibration of structures. This TLD and MTLTD are attributable to several potential advantage -low costs, easy; easy to install in existing structures: effective even for small amplitude vibrations. For this, we conducted shaking table experiments for two natural frequencies (0.44Hz, 0.55Hz) according to the excitation amplitude(1mm, 3mm, 5mm, 10mm, 20mm) So, the majority of studies suggested optimized natural frequency and excitation amplitude for control devices.(TLD and MTLTD type : circle, rectangular) As the analysis result, we verified vibration reduction effects of a MTLTD by analyzing the performance experiment of TLD and MTLTD

키워드 : 동조액체댐퍼, 다중동조액체댐퍼, 고유진동수, 가진진폭

Keywords : Tuned liquid damper, Multiple Tuned liquid damper, Natural frequency, excitation amplitude

1. 서 론

최근 구조재의 재료적 특성 발달과 컴퓨터를 이용한 구조해석 기술의 발달에 따른 설계 및 시공기술이 급격히 향상된 것에 힘입어 국내에서도 제한된 부지에 비하여 보다 큰 활용공간의 확보를 위하여 초고층 건물들의 건설이 가속화 되고 있는 실정이다.

그러나 건물이 점차 초고층화 됨에 따라 그 규모가 작은 구조물 등에 비하여 유연하므로 (flexible) 정적하중에 의한 영향보다는 바람과 같은 동적하중에 의하여 매우 민감하게 거동하게 되어 거주자에게 불안감, 편두통 등을 일으키는 주요 원인으로 작용해서, 사용성(serviceability)상의 안전에 심각한 문제를 발생시킬수 있다. 따라서 고층 건물의 설계 시 이와 같은 동적 하중에 대한 구조물의 거동과 안정성을 면밀히 검토하기 위해서 바람에 의한 진동을 저감시키고 사용성을 개선하기 위한 노력으로 새로운 구조시스템의 개발, 구조물의 공기역학적인 접근방법, 진동제어장치의 적용 및 개발 등 다각적인 측면에서 초고층 건물의 풍진동 제어 방법 등에 많이 사용되고 있다. 대표적으로 바람에 의한 고층건

* 학생회원, 전북대학교 건축도시공학부 박사과정
E-mail : wmjlove1877@chonbuk.ac.kr

** 학생회원, 전북대학교 건축도시공학부 석사과정
E-mail : emphyun@naver.com

*** 정회원, 전북대학교 건축도시공학부 조교수, 공학박사
E-mail : youkp@chonbuk.ac.kr

**** 정회원, 전북대학교 건축도시공학부 교수, 공학박사
E-mail : kym@chonbuk.ac.kr

물의 구조물의 풍진동 제어를 위한 수단과 방법으로서는 건물의 형태를 변화시키는 방법으로써 건물 주변 기류의 패턴을 변경하는 방법으로 고층건물에 기류가 흘러 갈수 있는 통로를 만들어 즉, 각진 모서리 제거 및 개구부 활용하여 건물의 후면에서 발생하는 후류를 최소화 하여 진동 응답을 감소시키는 공기역학적 설계 방법이 있으며, 바람/구조물 질량비를 줄이기 위해 구조물의 질량을 증가시키는 방법과 가새 및 두꺼운 부재를 활용하여 무차원의 풍속을 줄이기 위해 강성이나 고유진동수를 증가시키는 즉, 고층건물의 동적특성인 질량(m), 강성(k), 감쇠(c)등을 조절하여 원하는 진동응답레벨이 되도록 하는 구조 시스템의 설계 방법 등이 그러하다. 그러나 이러한 방법들은 많은 비용부담이 유발되고 평면형태에 많은 제약조건들이 발생하게 된다. 따라서 건물의 형태와 동적특성을 변화시키지 않고 고층건물에 부가질량을 설치하여 건물의 진동응답을 감소시키는 방법으로써 TMD(Tuned Mass Damper)나 TLD(Tuned liquid Damper)를 대표하는 동조계 수동형(Passive)형식의 동조 댐퍼가 풍진동에 대한 고층건물의 거주성이나 사용성의 개선을 목적으로 많이 사용되고 있다. 이 중에서 물을 이용한 TLD에 대한 모델링에 대한 연구는 1980대 초 Modi와 Welt에 의해 구조물에 최초로 응용되었으며, 1991년 Sun은 직사각형 TLD에 대한 성능실험을 실시하여 TLD수조의 진동감소효과에 대한 평가를 하였다. 그리고 1993년 Fujino는 낮은 수심에 대한 진동에너지의 소산에 대한 동적인 특성에 대해서 연구를 많이 하였으며, 특히 1방향 진동대를 이용한 직사각형 STLD와 MILD의 성능실험을 실시하여 MTLG가 STLD보다 구조물의 진동감쇠에 효과적인 것을 증명하였다. 본 논문은 현재 국내에서 연구되고 있는 동조액체댐퍼 중에서도 적은 외부 가진에서도 효과가 있는 낮은 수조(Shallow Water)를 이용하여 2개의 형태(직사각형, 원형)의TLD(Tuned liquid damper)와 MTL(Multiple Tuned Liquid Damper)수조에 대하여 2개의 동일한 고유진동수(0.44Hz, 0.55Hz)변화에 따른 성능실험을 실시하여 가진진폭별 변화에 따른 밀면전단력을 분석하였다.

2. 동조액체댐퍼의 특성

구조물질량과 TLD의 질량에 의해서 결정되는 질량비와 구조물의 고유진동수에 대한 TLD의 고유진동수의 비를 동조비라고 정의를 하며 식 (1), (2)와 같이 정의를 한다.

$$\text{질량비} : \frac{m_T}{M_s} = \mu \quad (1)$$

$$\text{동조비} : \frac{f}{f_w} = \beta \quad (2)$$

여기서 물의 고유진동수 $w_T = (2\pi f_T)$ 은, 수조의 형태가 직사각형, 원통에 따라 1차 모드에 대응하는 고유진동수는 수조내 물의 높이(h)와 길이(L 또는 R)에 의해서 결정되기 때문에 식(3)과 식(4)식을 이용하여 구할 수 있다.

· 직사각형 수조의 고유진동수는

$$w_T = \sqrt{\frac{\pi g}{L} \tanh\left(\frac{\pi h}{L}\right)} \quad (3)$$

여기서, L : 장변방향의 수조 길이

h : 수조내의 물의 높이

g : 중력가속도(m/sec^2)

· 원형수조의 고유진동수는

$$w_T = \sqrt{\epsilon_{11} \frac{g}{R} \tanh\left(\epsilon_{11} \frac{h}{R}\right)} \quad (\epsilon_{11} = 1.8411) \quad (4)$$

여기서, R : 원형수조의 반지름

h : 수조내의 물의 높이

g : 중력가속도(m/sec^2)

3. 진동대 실험 및 데이터 해석

동조액체댐퍼 수조의 진동대 실험을 위하여 Sine파의 조화진동(harmonic)이 가진되는 진동대 위에 TLD와 MTLD를 설치하여 물의 슬러싱(sloshing)에 대한 실험을 하였다. 본 실험에서는 전북대학교 풍동연구실에서 보유하고 있는 서보 모터형 1방향 진동대를 사용하였으며, 최대 길이

는 2000mm이고 폭은 1500mm이다. 최대 2000kg 무게까지 실험을 실시 할 수 있으며 제어는 볼 스크류 제어방식을 사용하였다. 진동대에 변위계 (SDP-2000)를 설치하여 입력신호에 대한 변위값을 확인하도록 하였다. 그림 1은 변위계가 설치되어있는 진동대의 모습을 나타내고 있다.



그림 1. 진동대 모습

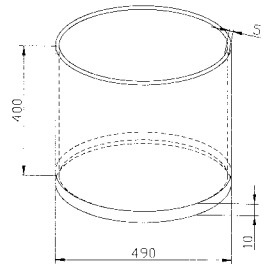
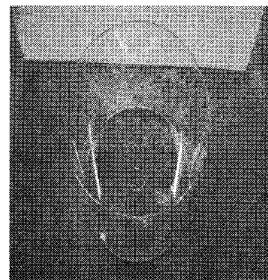
진동대 위에 설치되어진 수조의 가진 진동수에 변화에 따른 물의 슬러싱에 대하여 물의 힘을 측정하기 위하여 수조 밑에 2개의 6분력계를 설치하였다. 첫 번째 6분력계에는 물이 들어있는 수조를 두 번째 6분력계에는 수조의 무게와 동등한 더미 수조를 올려놓고 구한 2개의 데이터값을 빼주어 순수 물에 의한 밀면전단력을 측정하는 것으로 진동대의 X방향에 대해서만 측정하였다. 데이터의 측정주파수는 200Hz이며 측정시간은 100초이다. 계측기와 실험기기의 noise를 제거하기 위하여 50Hz의 low-pass filter를 사용하였다. 수조내 물의 슬러싱에 대한 밀면전단력 무차원식은 식(5)와 같으며, 수조밀면의 6분력계에서 측정된 힘을 수조내 물의 질량과 진동수 및 진폭으로 나눈값이다. 표 1은 TLD와 MTL D수조의 제원을 나타내고 있으며, 그림 2는 진동대 위에 설치될 실험체의 모습과 크기를 나타내고 있다.

$$F'_w = \frac{F_w}{m_w w^2 A} \quad (5)$$

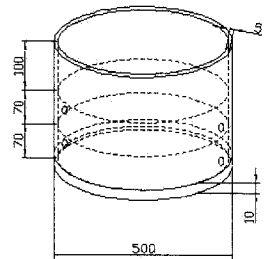
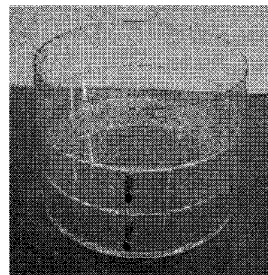
여기서 m_w = 수조내 물의 질량,
 w = 진동대의 가진 진동수,
 A = 진동대의 가진 진폭

표 1. TLD와 MTL D수조의 제원

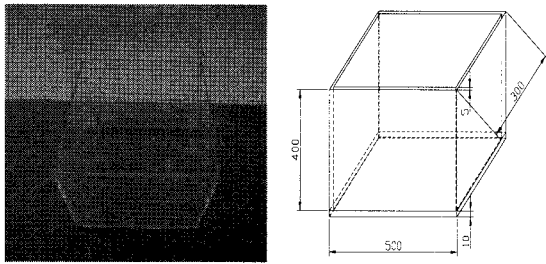
TLD 종류	L (cm)	B (cm)	물의높이(h) (cm)	수조의 고유진동수 (Hz)	$\epsilon = h/L$	A (mm)
직사각형 (TLD)	50	30	0.44Hz 1.98	0.44	0.040	1, 3, 5, 10, 20
			0.55Hz 3.12	0.55	0.062	
원형 (TLD)	49		0.44Hz 1.37	0.44	0.028	1, 3, 5, 10, 20
			0.55Hz 2.16	0.55	0.044	
직사각형 (MTL D)	50	30	1F 1.8	0.44	0.036	1, 3, 5, 10, 20
			2F 2		0.040	
			3F 2.2		0.044	
			1F 2.82	0.55	0.056	
			2F 3.12		0.062	
			3F 3.46		0.069	
원형 (MTL D)	49		1F 1.24	0.44	0.025	1, 3, 5, 10, 20
			2F 1.37		0.028	
			3F 1.51		0.030	
			1F 1.95	0.55	0.039	
			2F 2.15		0.044	
			3F 2.38		0.048	



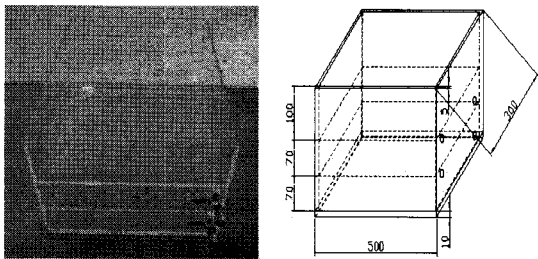
a) TLD(원형)



b) MTL D(원형)



c) TLD(사각형)



d) MILD(사각형)

그림 2. 실험체의 모습과 크기

4. 실험결과 및 분석

본 실험은 수조의 밑면에서 측정되는 가진진폭에 따른 물의 슬러싱의 변화를 알아보기 위하여 물의 높이 변화에 따른 형태별(원형, 직사각형)TLD와 MILD 수조에 대하여 2가지 고유진동수($f_w=0.44\text{Hz}, 0.55\text{Hz}$)와 가진진폭(1mm, 3mm, 5mm, 10mm, 20mm)에 의한 가진 진동수비 ($\frac{f}{f_w} = \beta$)범위가 0.6-1.4사이가 되도록 실험을 실시하여 밀면전단력을 구하였다.

4-1. 원형 TLD와 MILD의 밀면전단력

그림3은 원형 TLD와 MILD의 고유진동수 변화($f_w=0.44\text{Hz}, 0.55\text{Hz}$)에 따른 가진 별 최대 밀면 전단력의 변화를 나타내었다.

대체적으로 밀면전단력의 최대 피크값은 공진주파수($\beta=1$)와 가까운 진동수비에서 발생하고 있는 것으로 보아 공진에 대한 튜닝이 잘되고 있는 것을 알 수 있다. 이는 원형수조가 가진 진폭에 대한 방향성을 갖지 않기 때문으로 판단된다. 특히 TLD와 MILD의 각각의 고유진동수에 대해 가진

이 적은 진폭에서는 최대피크가 발생한 후 갑자기 전단력이 감소하는 현상이 계측되고 있으며, 이러한 현상은 가진 진폭 5mm범위까지 나타나고 있다. 원형 TLD와 MILD모두 수조의 고유진동수가 높을수록 낮은 가진에서의 밀면전단력값은 크게 나타나고 있으나 MILD의 경우가 낮은 가진에 있어서는 TLD의 최대 피크값 밀면전단력에 있어서 최대 20%이상 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 전체적으로 가진 진폭이 적을 경우($A=1\text{mm}, 3\text{mm}, 5\text{mm}$) 수조의 고유진동수가 클수록 밀면전단력은 크게 나타나고 있으며, 원형 수조에 있어서 MILD가 TLD에 비해 공진에 대한 튜닝이 우수하게 나타나고 있음을 확인할 수 있었다.

4-2. 직사각형 TLD와 MILD의 밀면전단력

그림4는 사각형 TLD와 MILD의 고유진동수 변화($f_w=0.44\text{Hz}, 0.55\text{Hz}$)에 따른 가진 별 최대 밀면 전단력의 변화를 나타내었다.

전체적으로 원형과 비교하여 직사각형의 TLD가 MILD보다 밀면전단력의 최대 피크값에 있어서 공진주파수($\beta=1$)에서 큰 밀면전단력이 발생하고 있어 수조의 고유진동수와 공진이 잘 되고 있는 것을 확인할 수 있다. 그러나 MILD의 경우 2가지의 고유진동수에 대하여 $\beta < 1$ 부근에서 낮은 가진진폭에 대하여 최대 밀면전단력이 나타나고 있다. 또한 TLD의 밀면전단력에 비하여 MILD의 밀면전단력이 모든 가진 진폭에 대하여 작게 나타나고 있었다. 특히 적은 가진진폭에서 발생하는 큰 밀면전단력은 수조의 고유진동수가 증가할수록 원형수조와 마찬가지로 크게 나타나고 있다. 이러한 원인은 낮은 가진에 의한 물의 슬러싱은 거의 일어나고 있지 않기 때문에 외부가진에 대한 밀면전단력이 적게 발생하고 높은 가진 일때는 물의 슬러싱 증가로 인한 수조내 벽면에서의 파쇄(wave-braking)현상으로 밀면전단력이 크게 발생하기 때문이다. 전체적으로 MILD가 TLD에 비하여 밀면전단력에 있어서 최대 피크값이 작게 나타나고 있다.

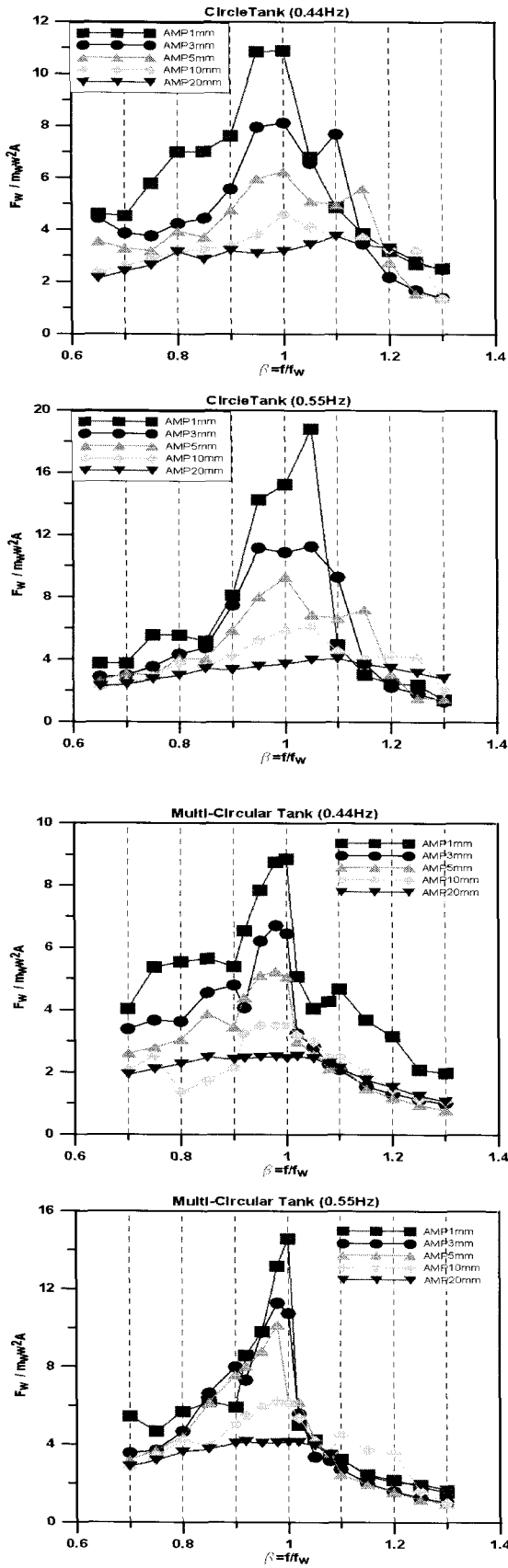


그림 3. 원형 TLD와 MTLD의 밀면전단력

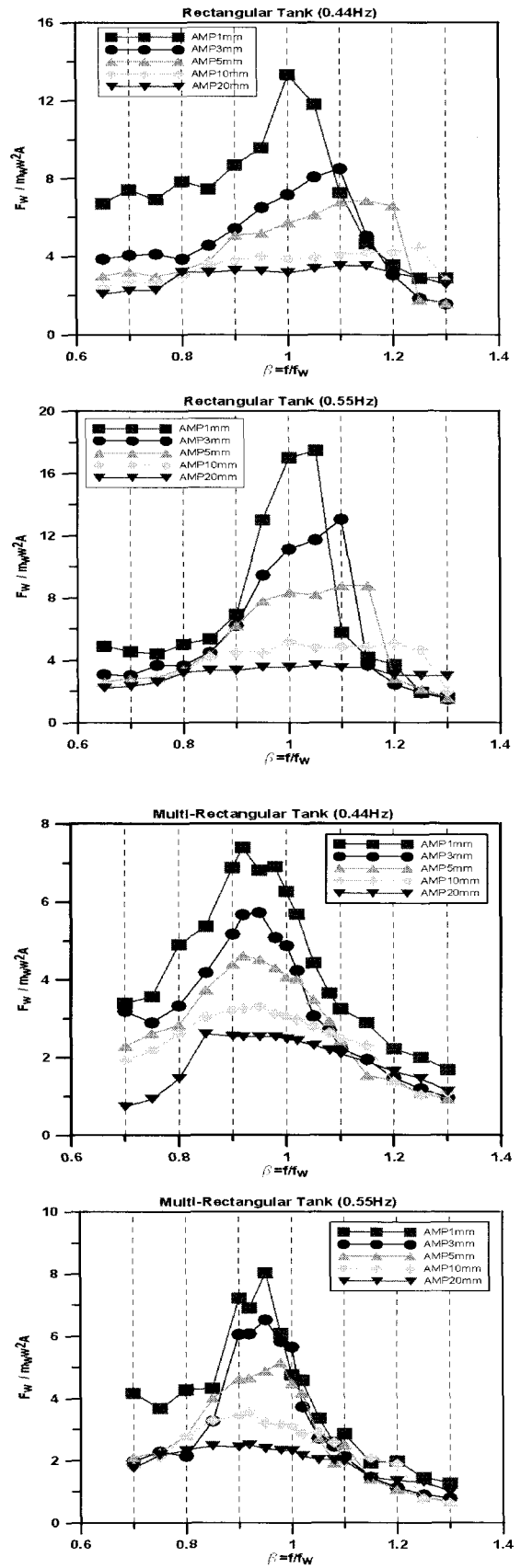


그림 4. 직사각형 TLD와 MTLD의 밀면전단력

5. 결론

원형 및 직사각형의 TLD와 MTL의 4가지 형태에 대하여 진동대 실험을 통한 밀면전단력을 구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수가 있었다. 동일한 고유진동수를 갖는 TLD와 MTL의 진동성능실험결과 모두 물의 슬러싱에 의한 진동제어 효과가 있는 것으로 판단된다. 밀면전단력의 해석결과 원형의 경우 TLD보다는 MTL에서 가진 진폭에 관계없이 동조비의 일치가 잘 이루어진 반면에 직사각형의 경우는 MTL보다는 TLD에서 오히려 가진 진폭에 관계없이 동조비의 일치가 잘 이루어지고 있었다. 특히 작은 가진 진폭에 있어서 2개의 가진진동수에 대하여 TLD의 밀면전단력과 비교하여 MTL의 밀면전단력이 적게는 20% 많게는 53%이상 감소하였으며, 원형보다는 직사각형에서 더 크게 감소하였다. 결국 MTL가 TLD에 비하여 감쇠 효과가 효율적으로 나타나고 있다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호#’06 R&D B03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. A. Kareem(1983), "Mitigation of Wind Induced Motion of Tall Building", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 11, pp 273~284.
2. A. Kareem(1990), "Reduction of Wind Induced Motion Utilizing a Tuned Sloshing Damper"Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 36, pp 725~737.
3. A.Kareem, T. Kijewski , Y.Tamura, (1999) "Mitigation of Motion of Tall Buildings with Recent Applications," Wind and Structures, 2(3), pp201-251.
4. Y. Fujino, Sun,Pacheco, B. M.(1992) "Tuned liquid damper(TLD) for Suppressing horizontal motion of structures.", Journal of Engineering Mechanics, ASCE 118(10) 1992, 2017-2030
5. Y. Fujino,(1993)"Vibration Control by Multiple Tuned Liquid Dampers(MTLs)", Journal of Structural Engineering, Vol. 119, No. 123
6. Y.Fujino,M.Abe,(1993)"Design Formulas for Tuned Mass Dampers Based on a Perturbation Technique",Earthquake Engineering and Structural Dynamics Vol22, 833-854
7. Y.H.Chen(1995)"Flexibility of TLD to High-Rise Building by Simple Experiment and Comparison", Computer & structures Vol.57 No. 5 pp 855-861
8. E. Simiu, "Wind Effect on Structures ", 3rd Ed., John Wiley & Sons.
9. Y.L.Xu,(1991) "Vibratio Control of Wind-Excited Tall/Slender Structures", University of Sydney, Ph.D.
10. Yalla, (2001)"Liquid Dampers for Mitigation of Structure Response :Theoretical Development and Experimental Validation" PhD. Nortre Dame
11. C.C.Chang,(1999) "Suppression of Vortex-Excited Vibration of Tall Building Using Tuned Liquid Dampers"Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 83, pp 225~237.
12. P.Chaiseri,Y.Fujino,B.M.Pacheco,L.M.Sun,(1995) "Interaction of Tuned Liquid Damper(TLD) and Structure-Theory, Experimental Verification and Application", Structural Engineering Earthquake Engineering. JSCE 6(2) pp. 103 -112
13. T.Wakahara,Y.Fujono,(1998)"A Simple Estimation of Across-wind Response of Tall Buildings with Tuned Liquid Damper", Journal of Wind Engineering, No76, pp 37-54
14. 김영문 역(1998) "실무자를 위한 건축물 풍동 실험 가이드북", 한국풍공학회
15. 김영문 외 2인(2002), "건축물의 내풍설계", 한림원