

U자형 TLD 시스템의 학습제어 기법 개발

유 영 순* · 가 춘 식**

Learning Control of a U-type Tuned Liquid Damper

Yeong Soon Ryu and Chun Sik Ga

Key Words : Learning Control(학습제어), Tuned Liquid Damper(동조액체댐퍼)

Abstract

Simple and effectively developed learning control logic is used to control vibration of U type Tuned Liquid Damper system. The purpose of this paper is design optimal control system to deal with unknown errors from nonlinearity and variation that cost modeling difficulty in complex structure and is followed with the desired behavior. Finally this hybrid control method applied to U type Tuned Liquid Damper structure gives the benefit from better performance of precision and stability of the structure by reducing vibration effect. This research leads to safety design in various structure to robust unspecified foreign disturbances such as earthquake.

1. 서 론

1.1 연구 목적 및 필요성

현대 구조물의 고층화에 따라 지진이나 바람 같은 횡 하중에 의해 발생하는 진동에 의해 건물의 균열 또는 파괴가 일어나고 심한 진동은 사람들에게 불쾌감과 불안감을 일으키는 원인이 된다. 이러한 구조물의 진동은 대량 인명 피해로 이어질 수 있어 매우 중요하게 인식되어 왔고 구조물의 안전성을 최우선으로 확보하기 위한 통제와 제어 체계의 구축을 위한 새로운 기법들의 연구가 지속적으로 이루어지고 있다.

그러나 이러한 구조물들은 비선형·다변수 시스템(highly nonlinear multi-variable

system)이고 부하가 가변적이어서 정확한 모델링이 어렵다. 그래서 이러한 모델에 효과적으로 적용될 수 있는 제어 기법의 개발이 절실히 요구 되고 있다.

제어 방법에는 댐퍼(damper)와 같이 에너지를 흡수하는 장치(energy dissipating device)를 추가하여 진동을 제어하는 피동제어(passive control) 방법과 인위적인 힘을 운동방향의 반대 방향으로 작용시켜 제어하는 능동제어(active control)가 있으며 피동제어의 경우 파라미터를 미리 설정해야 하는 문제가 있지만 신뢰성, 안전성, 상대적으로 낮은 가격과 비교적 낮은 동력 하에서 작동하는 장점이 있다. 반면에 근래에 연구가 집중되고 있는 능동제어 시스템의 경우는 넓은 주파수 영역에 적용되고, 적응 구조물에서 효과적이며 피드백 작용을 하지만 높은 동력이 필요하고 불안정하며 시스템의 불확실성에 민감한 단점이 있다.

* 안동대학교 기계공학부
E-mail : ysryu@andong.ac.kr
TEL : (054)820-5908 FAX : (054)823-5495

** 안동대학교 대학원 기계공학과

이러한 문제를 해결하기 위하여 본 과제에서는 U 자형 TLD(Tuned Liquid Damper) 하부구조를 갖는 피동 제어 시스템의 진동을 능동적이고 효율적으로 조율하는데 학습 제어 알고리즘을 구현하고자 한다.

1.2 국내.외 연구 동향

구조물 제어에 있어서는 Reinhorn 등과 Soong 이 이에 관한 다양한 제어 알고리즘의 연구동향을 조사하였으며⁽¹⁻²⁾ Balas 는 고전적 최적제어 알고리즘을 유연 구조물에 적용하였으나 지반 운동 등 가진력을 고려하지 않은 제어 알고리즘이며 대형 구조물의 경우에는 많은 연산 시간이 요구된다.

Yan 등은 지진 하중을 받는 구조물에 적용하기 위하여 순간최적 알고리즘을 변위-속도, 속도-가속도 되먹임과 앞먹임의 경우에 대하여 연구하였고 Chung 등은 지진 가진력을 받는 대형 구조물에 대하여 텐던 제어를 검토하였다.⁽³⁻⁷⁾

Soong 등은 Active Bracing System 을 사용하여 지반 운동 하에서 실척 모델의 진동 제어를 실험하였다. 고정된 주파수영역의 하중에 대하여 진동 저감 효과를 가지도록 하는 수동형 진동제어(passive control)와 다양한 주파수영역의 하중에 대해서도 진동 저감 효과를 가질 수 있도록 외부 하중과 구조물의 상태변수 (state variable)를 센서로서 감지하여 구조물의 진동을 가장 효과적으로 저감 시킬 수 있는 제어력을 컨트롤러를 통하여 계산하고, 가진기(actuator)를 통하여 구조물에 가하는 능동형 진동제어(active control)가 연구되고 있으며 최근에는 수동형 진동제어의 경제성과 능동제어의 적응성을 가지는 반 능동 진동 제어와 수동형/능동형 진동 제어를 혼합한 형식의 복합형 진동 제어가 활발히 연구되고 있다.⁽⁸⁻¹¹⁾

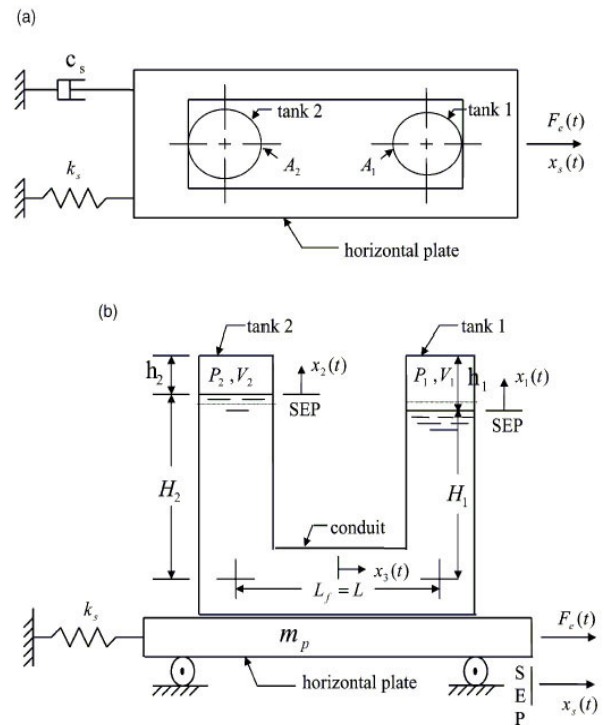


Fig. 1 Sketch for a plate carrying a U-type TLD : (a) top view (b) front view

2. 연구 내용 및 방법

2.1 U 자형 TLD 하부구조를 갖는 구조물에 대한 학습 제어 시스템 개발

Fig. 1 은 TLD 하부구조를 갖는 시스템의 간략한 그림으로 기존의 구조물인 수평 평판에 댐퍼 기능을 하는 U 자형 물탱크를 가지는 구조이다. 이는 상부에 물을 담을 수 있는 수조를 설치하고 물의 요동 주기를 건물의 주기와 동조시켜 구조물이 흔들릴 경우 수조측벽에 작용하는 유체력을 증가시키거나 두 개의 물탱크 사이의 관에 의해 압력 손실에 의한 감쇠력을 증가시키는 방법을 이용하는 것으로 이때 물탱크의 무게, 높이, 단면적 및 구조물의 무게, 스프링 상수 등의 파라미터에 의해 시스템의 운동 방정식이 결정되며 두 개의 구조물이 결합되어 비선형 시변 구조를 갖으며 외부의 힘에 따라 구조물과 물탱크의 출력오차가 제로로 수렴하도록 하는 피동 제어 시스템이다.

Table 1 Specifications of TLD system

Parameters	Symbol	Units	Values
액체의 질량 밀도	ρ	kg/m ³	997
물탱크 단면적	A_1, A_2	m ²	28.274*10 ⁻⁴
수조의 단면적	A_3	m ²	28.274*10 ⁻⁴
액위 댐퍼 높이	H_1, H_2	m	0.15
도관의 길이	L	m	1.0
마찰 길이	L_f	m	1.0
구조물 스프링 상수	k_s	N/m	9.44*10 ⁵
구조물 댐핑 계수	c_s	Ns/m	100
열 비	γ		1.4
동적 점성	μ	Kg/ms	0.89138*10 ⁻³
공압 챔버 압력	p_1, p_2	N/m ²	1.0*10 ⁴
무게(평판, 물탱크)	m_p, m_t	Kg	590, 41.5
무게(물)	m_w	Kg	14.75
중력 가속도	g	m/s ²	9.81
외부 가진력	$F_e(t)$	N	100sin(38.6)t

Lagrange 방정식을 사용하여 시스템을 모델링하면 다음과 같은 운동 방정식을 구할 수 있다.⁽⁸⁾

$$a_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 + e_1 \ddot{x}_s = 0 \tag{1}$$

$$a_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s + e_s \ddot{x}_1 + f_s \dot{x}_1 = F_e(t) + g_s |\dot{x}_1| \dot{x}_1$$

여기서,

$$a_1 = \rho A_1 H_1 + \rho A_2 H_2 \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 + \rho A_3 L \left(\frac{A_1}{A_3} \right)^2$$

$$c_1 = 8\pi\mu \left[H_1 + H_2 \left(\frac{A_1}{A_2} \right) + L_f \left(\frac{A_1}{A_3} \right) \right]$$

$$k_1 = \rho g \left[A_1 + A_2 \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right] + \gamma \left[\frac{p_1 A_1^2}{V_1} + \frac{p_2 A_2^2}{V_2} \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right]$$

$$e_1 = \rho A_1 L$$

$$a_s = m_p + m_t + m_w$$

$$e_s = \rho A_1 L$$

$$f_s = -8\pi\mu L_f \left(\frac{A_1}{A_3} \right)$$

$$g_s = \rho A_3 \left(\frac{A_1}{A_3} \right)^2$$

x_s : 구조물의 수평 변위

x_1 : 오른쪽 물탱크 수면의 수직 변위

2.2 학습 제어기 구조

식(1)의 운동 방정식에 학습 제어 법칙을 적용한다면 일반화된 힘의 입력 v 는 구조물과 물탱크에 작용하는 미분 피드백 제어기와 학습 제어 입력 U_L 를 포함하며⁽¹²⁻¹⁴⁾ 식(2)로 표현된다.

$$v_j = K_D (\dot{y}_j^* - y_j) + K_P (y_j^* - y_j) + u_{Lj} \tag{2}$$

$$= K_D (\dot{e}_j + \Gamma e_j) + u_{Lj}$$

$$= K_D z + u_{Lj}$$

여기서,

$\Gamma = K_P / K_D$: 피드백 제어기의 게인 비

K_D : 미분 제어기의 게인

K_P : 비례 제어기의 게인

$e = y^* - y$: 오차

y^* : 기준 궤적

$z = \dot{e} + \Gamma e$: sliding surface

식(2)에서 u_{Lj} 는 학습 제어기로서 다음과 같이 설계된다.

$$u_{Lj} = u_{L(j-1)} + \Lambda K_D z_{(j-1)} \tag{3}$$

여기서, Λ 는 학습 제어기의 게인

식(3)에서 학습 제어기의 현재의 제어 입력 값은 이전 주기의 오차 값으로 계산됨을 알 수 있다.

3. 모의 실험

모의 실험을 위한 설정으로 초기값은 $x_F=0[m]$, $x_s=0[m]$ 로 $100\sin(38.6)t$ 의 외력을 60 초 동안 가하였으며 이는 시스템의 고유 진동값을 38.6 rad/s를 사용함을 의미한다.⁽⁸⁾ PD 제어 기법과 학습 제어 기법을 사용하여 구조물의 횡변위와 물탱크의 수위를 제어하였다.

Fig. 2-3은 제어 입력이 가해지지 않았을 경우[경우 1], $K_D=12.7$, $\Gamma=3.8485$ 로 설정하여 고정된 PD 제어기만을 가지고 사용하여 제어한 경우[경우 2], 구조물의 횡 변위만을 $\Lambda=1$ 로 하여 10회 학습 제어한 경우 [경우 3] 그리고

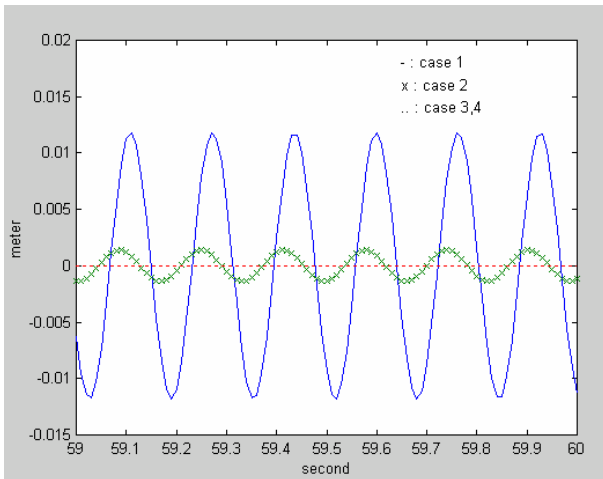


Fig. 2 The response of plate displacement with applied input torque in the TLD system

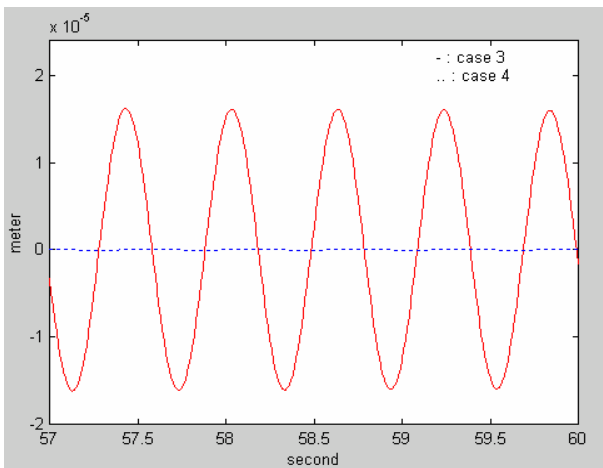


Fig. 2-1 The response of plate displacement about case 3 & case 4

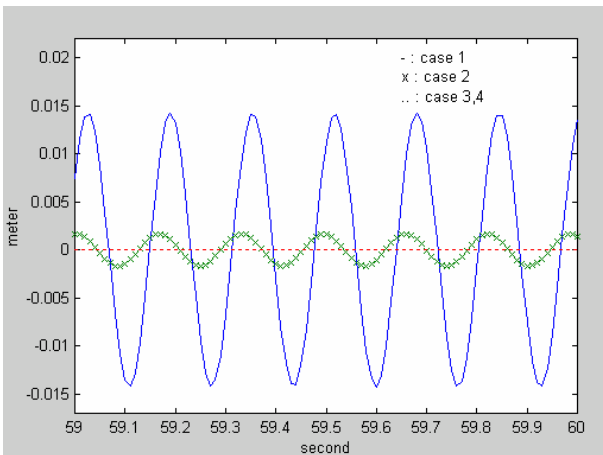


Fig. 3 The response of water level with applied input torque in the TLD system

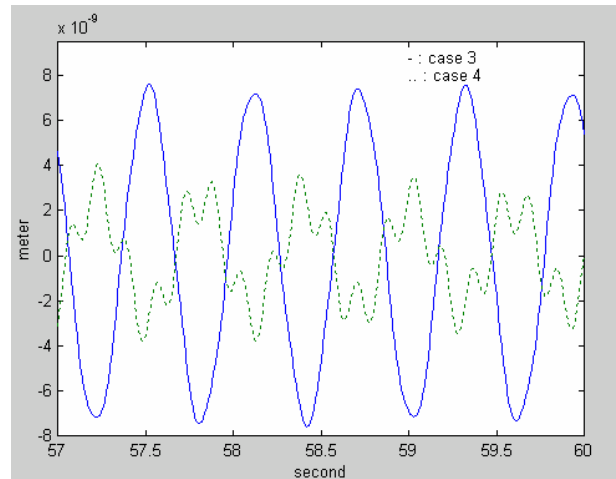


Fig. 3-1 The response of water level about case 3 & case 4

구조물의 횡 변위와 물탱크의 수위를 동시에 제어한 경우[경우 4]를 비교하여 도시하였다.

Fig. 2 는 구조물의 변위에 대한 출력을 비교 도시한 것으로 경우 1 에서 구조물은 -0.012m 와 0.012m 사이에서 주기적으로 좌우로 움직이며 경우 2 에서 변위의 감쇠를 보이나 여전히 0.0003m 와 0.0003m 사이에서 주기적으로 좌우로 여전히 움직이나 학습 제어를 적용한 경우 3 과 경우 4 에서는 현격하게 줄어듦을 볼 수 있다.

특히, 주목할 점은 Fig.2-1 에서 도시한 바와 같이 물탱크의 수위를 함께 학습 제어한 경우 거의 완전하게 제어되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3 과 Fig 3-1 은 물탱크의 수위에 대한 출력을 비교 도시한 것으로 경우 1 에서 물탱크의 수위는 -0.014m 에서 0.014m 사이를 구조물의 주기와 같은 주기로 변위를 보이며 경우 2 에서 -0.00026m 에서 0.00026m 사이의 변위를 보이나 경우 3 과 경우 4 의 경우에는 학습 제어 입력이 가해지지 않은 경우보다 변위의 감쇠 효과가 현저하게 나타남을 관찰할 수 있었다.

Fig. 4 는 구조물의 변위만을 학습 제어한 경우로써 반복 수에 따른 RMS 오차의 감소를 보여주고 있다.

여기에서 구조물의 변위의 경우 반복 수에

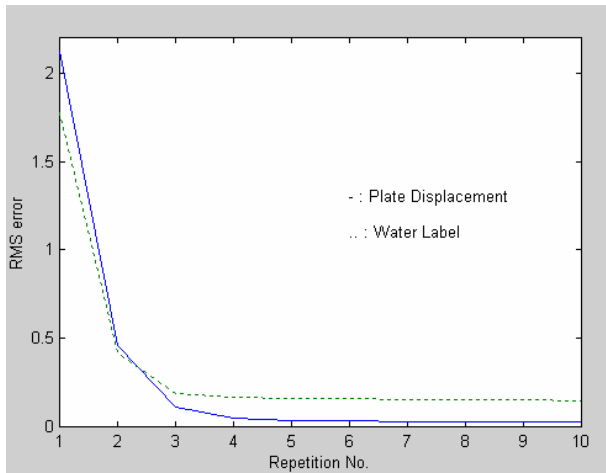


Fig. 4 RMS error using learning control plate displacement only

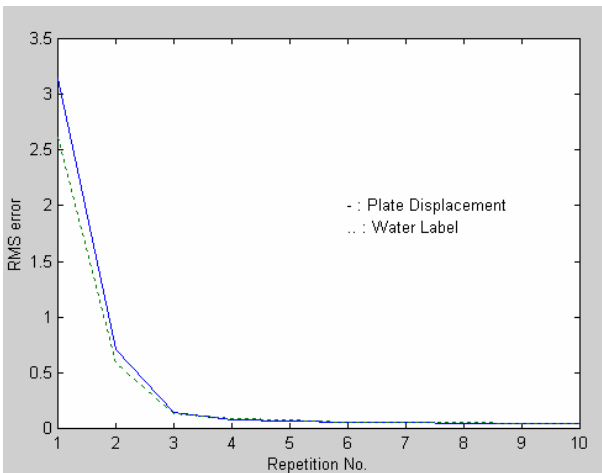


Fig. 5 RMS error using learning control both water label and plate displacement

따라 오차가 감소하나 제어하지 않은 물 수위의 경우 변함이 없음을 알 수 있다.

Fig. 5 는 구조물의 변위와 물탱크의 수위의 오차 향에 대한 학습 제어기 게인 값을 [1, 0.4]으로 설정하여 구조물의 변위와 물탱크의 수위를 함께 학습 제어한 경우로써 반복 수에 따른 RMS 오차가 모두 현격하게 감소함을 보여주고 있다. Table 2 는 10 회 반복 학습 동안 구조물의 수평 변위만 제어한 경우와 물탱크의 수위를 동시에 제어한 경우의 RMS 오차를 나타내고 있다. Fig. 6~7 은 10 번의 반복 후 60 초 동안 외란에 대한 제어를 경우 3 과 경우 4 에 대해서 비교한 것이다.

Table 2 RMS error for repetitions using Controllers

반복수	Xs control		Xs, X ₁ control	
	X ₁	Xs	X ₁	Xs
1	1.77190	2.12310	2.61830	3.15090
2	0.41465	0.45816	0.58929	0.70703
3	0.18760	0.11411	0.13161	0.14921
4	0.16500	0.04992	0.10473	0.11647
5	0.16052	0.03776	0.06786	0.06793
6	0.15756	0.03299	0.05912	0.05651
7	0.15497	0.03053	0.05434	0.05064
8	0.15255	0.02801	0.05103	0.04669
9	0.15026	0.02651	0.04861	0.04382
10	0.14805	0.02537	0.04675	0.04167

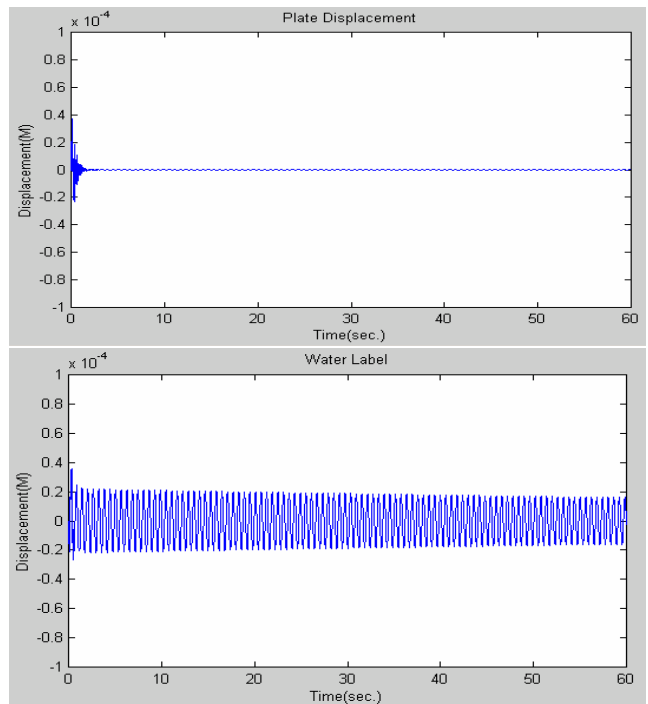


Fig. 6 The simulation results with Learning control plate displacement only

구조물의 변위만을 학습 제어한 경우에는 Fig.6 에서 도시한 바와 같이 구조물의 변위는 현격히 줄어드나 물탱크의 수위는 감소되지 않음을 볼 수 있다. 그러나 구조물의 변위와 물탱크의 수위를 동시에 제어한 경우 두 가지 모두 효과적으로 제어되고 있음을 Fig.7 과 같이 관찰할 수 있었다.

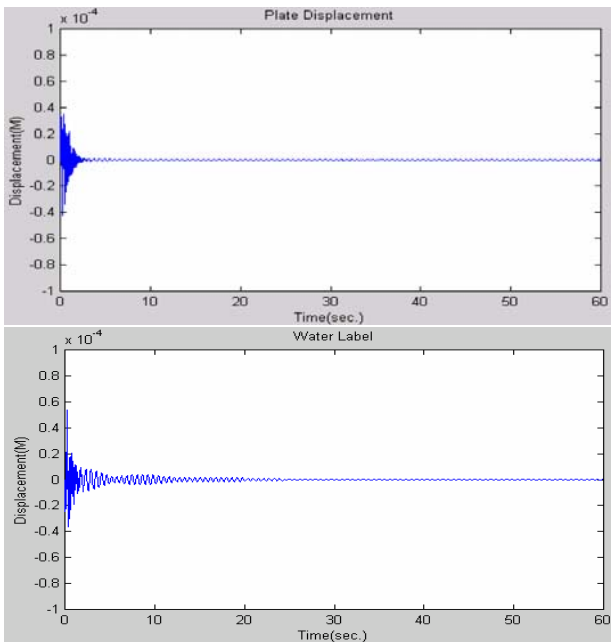


Fig. 7 The simulation results with Learning control both plate displacement and water level

4. 결론

본 논문에서는 구조물의 피동 제어에 많이 사용되고 있는 U 자형 Tuned Liquid Damper 시스템의 능동 제어에 학습 제어 기법을 사용하여 그 결과를 피드백 제어와 비교하여 우수성을 입증하였다. 또한 필요한 경우에 따라 구조물의 횡변위만을 제어한 경우와 물탱크의 수위까지를 제어한 경우로 나누어 결과를 비교 분석하였다.

이 결과로 구조물의 동적 특성에 있어 중요한 핵심 파라미터의 영향을 해석하고 시스템의 정밀성 및 안정성을 확보하여 성능을 향상시키고 구조물의 진동 영향을 저감시키는 개선 효과를 얻을 수 있었으며 향후 다양한 구조물의 경우에 있어서 강인하고 안정적인 설계가 가능하며 지진 등 외부 충격에 견딜 수 있도록 구조물의 제어 기법의 연구에 활용되도록 한다. 또한 이 결과로 인하여 구조물의 실제 적용에 있어서 구조물의 유지 및 보수에 드는 많은 경제적인 비용을 절감하여 설계 지침을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) T. T. Soong, 1990, "Active structural Control ; Theory and Prectice, Wiley, New york
- (2) J. C. H. Chung, T. T .Soong, 1980, "Structural control using active tuned mass dampers", Journal of Engineering Mech., ASCE, 106, pp1091~1098
- (3) Balendra T., Wang C M, G. Rakesh, 1998, "Vibration control of tapered buildings using TLCD", Journal of wind Engineering and industrial Aerodynamics 77&78, pp245~257
- (4) Wang C M, Yan N, balendra T.,1999, "Control of dynamic structural response using active passive composite tuned mass dampers", Journal of Vibration Control 5(3), pp475~489
- (5) Balendra T., "Vibration of buildings to wind and earthquake loads", London;Springer-Verlag, 1993
- (6) Yan N, Wang C M, Balendra T.,1999, "Optimal damper characteristic of ATMD for building under wind loads", Journal Structures Engineering, ASCE 125(12), pp1376-1383
- (7) Yan N, Wang C M, Balendra T.,2001, "Control of wind-excited towers by active tuned liquid column damper", Journal Structures Engineering 23, pp1054~1067
- (8) Jong -Shyong Wu, Mang Hsieh, 2002, "Study on the dynamic characteristic of a U-type tuned liquid damper," *Ocean Engineering* , 29, pp.689~709.
- (9) K. Kagawa, H. koukawa, K. Fujita, Y. Zersho, M.Matsuu, 1989, "Development of tuned liquid damper for ship vibration ", Trans. Of the West_Japan Soc. Of Naval Arch 78, pp251-258
- (10) K.L. hyu, H.C. Kuo, 1996, "Dynamic behavior of a U-type tuned liquid damper", Int. Shipbuilding Progress 43(436), pp331~345
- (11) Swaroop K. Yalla, Ashan Kareen, Jeffery C. Kantoz, 2001, "Semi-active tuned liquid column dampers for vibration control of structures, eng. Of Structures 23, pp1469~1479
- (12) Y. S. Ryu and R. W. Longman, 1992, "Indirect Learning Control for Nonlinear dynamical System," *Advances in the Astronautical Science*, Vol. 82. part 1, pp79~91
- (13) Y. S. Ryu and R. W. Longman, 1995, "Indirect Learning Control for Linear, Linear Time-Varing, and Nonlinear System," *Journal of Robotic Systems*, Vol. 12, text here. Put reference text here. Put reference text here. Put reference text here.
- (14) Y. S. Ryu and H. S. Ha, 2001, "Development of obust Adaptive Learning Control for Nonlinear System, " Trans. Of KSME (A), Vol.25, No.12, pp.1895~1902.