

U자형 TLD시스템에 대한 학습제어 적용

가 춘 식* · 유 영 순**

(2004년 2월 13일 접수, 2004년 10월 6일 심사완료)

Application of Learning Control for U-type Tuned Liquid Damper System

Chun Sik Ga and Yeong Soon Ryu

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

Abstract

As the structures become larger, higher and more complicated, the demand for safety level has increased. In recent years, TLD(Tuned Liquid Damper) proved to be a successful control tool for reducing structural vibrations. For this reason, the influence of some key parameters of the U-type TLD on the dynamic response is studied. And 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 non linearity 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 windy-load and earthquake.

1. 서 론

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 제어 체계의 구축을 위한 새로운 기법들의 연구가 지속적으로 이루어지고 있다.

그러나 이러한 구조물들은 비선형·다변수 시스

템이고 부하가 가변적이어서 정확한 모델링이 어렵다. 그래서 여기에 효과적으로 적용될 수 있는 제어 기법의 개발이 절실히 요구되고 있다.

한편, 댐퍼와 같이 에너지를 흡수하는 장치를 추가하여 진동을 제어하는 피동제어 방법의 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, 적용 구조물에서 효과적이며 피드백 작용을 하지만 높은 동력이 필요하고 불안정하며 시스템의 불확실성에 민감한 단점이 있다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 본 과제에서는 U자형 TLD(Tuned Liquid Damper) 하부구조를 갖는 피동 제어 시스템의 진동을 효율적으로 조율하는데 학습 제어 기법을 적용한 능동제어 시스템을 구현하고자 한다.

지금까지의 연구 동향을 살펴보면 Reinhorn 등

* 책임저자, 회원, 안동대학교 대학원 기계공학부
E-mail : otoro@lycos.co.kr
TEL : (054)820-5167 FAX : (054)823-5495

** Department of Mechanical Engineering
City University of New York

과 Soong^(1,2)이 구조물 제어에 있어서 다양한 제어 알고리즘의 연구동향을 조사하였으며, Soong⁽¹⁾ 등은 Active Bracing System을 사용하여 지반 운동 하에서 실척 모델의 진동제어를 실험하였다. Yan과 Balendra⁽³⁻⁷⁾ 등은 지진 하중을 받는 구조물에 적용하기 위하여 순간최적 알고리즘을 연구하였고, Kagawa⁽⁸⁾는 Energy Method에 의해 TLD 내부 액체의 고유진동수를 유도하였고 Shyu와 Kuo⁽⁹⁾는 공명법을 이용하여 강제 진동에서 전체 시스템의 고유진동수를 유도하였다.

Wu와 Hsieh⁽¹⁰⁾는 Lagrange 방정식으로부터 유도된 전체 진동 시스템의 운동방정식으로부터 고유진동수를 유도하였다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 U자형 TLD 시스템의 제어 모델링

Fig. 1은 TLD하부구조를 갖는 구조물의 운동방향에 반대 방향으로 작용시켜 제어하는 능동제어장치를 갖춘 하이브리드 제어 시스템의 간략한 그림으로 기존의 구조물인 수평 평판에 댐퍼 기능을 하는 U자형 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 시스템 운동 방정식이 결정되며 두 개의 구조물이 결합되어 비선형 시변 구조를 갖으며 외력에 따라 구조물과 물탱크의 출력오차가 제로로 수렴하도록 하는 피동 제어 시스템에 구조물과 물탱크의 출력오차를 제어 입력으로 하여 직접 구조물의 횡 변위를 제어하는 구동기로 이루어진 학습 제어 시스템으로써 Table 1은 주요 구성 요소와 실험 조건을 제시하고 있다.

Lagrange 방정식을 사용하여 이 시스템을 모델링하면 다음과 같은 운동 방정식⁽¹⁰⁾을 구할 수 있다.

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

$$a_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s + e_s \ddot{x}_1 + f_s \dot{x}_1 = F(t) + g_s |\dot{x}_1| \dot{x}_1 \quad (2)$$

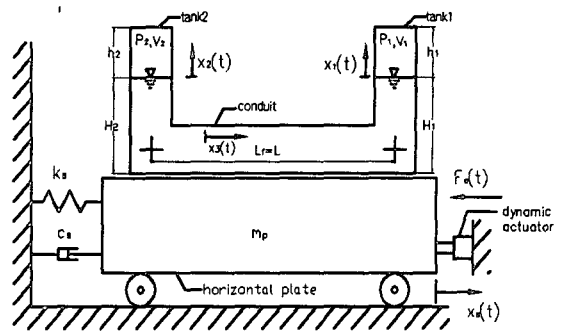


Fig. 1 Sketch for a active control model of plate carrying a U-type TLD

Table 1 Specifications of TLD system

Parameters	symbol	Units	Value
Mass density of liquid	ρ	kg/m ³	997
Cross-sectional areas of tanks, conduit	A_1, A_2, A_3	m ²	28.274×10^{-4}
Heights of liquid columns	H_1, H_2	m	0.15
Conduit length	L	m	1.0
Spring constant	k_s	N/m	9.44×10^5
Damping coefficient	C_s	Ns/m	100
Heat ratio for air	γ		1.4
Dynamic viscosity of liquid	μ	Kg/ms	0.89138
Pressure intensities	P_1, P_2	N/m ²	1.0×10^4
Mass of plate	m_p	Kg	590
Mass of tank	m_t	Kg	41.5
Mass of water	m_w	Kg	14.75
Gravity acceleration	g	m/s ²	9.81

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

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

$$k_1 = \rho g \left[A_1 + A_2 \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right] + \gamma \left[\frac{P_1 A_1^2}{V_1} + \frac{P_2 A_2^2}{V_2} \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right]$$

$$e_1 = \rho A_1 L$$

$$a_s = m_p + m_t + m_w$$

$$e_s = \rho A_1 L$$

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

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

x_s 는 구조물의 수평 변위이고 x_1 은 오른쪽 물 탱크 수면의 수직 변위로서 시스템의 출력 변수이다. $F(t)$ 는 외부 가진력으로써 풍하중과 지진파 입력과 같은 외란 요소 $F_e(t)$ 와 능동 제어 요소 $F_c(t)$ 의 합이다. 다른 파라메터의 의미는 Table 1에 주어졌다.

2.2 외부 가진력(외란) 조건

2.2.1 풍 하중

외부 가진력으로써 작용하는 풍하중은 다음과 같은 Sine함수로서 표현될 수 있으며 모의실험을 위한 Table 1의 시스템 규격에서 구조물은 38.3755 rad/sec 고유진동수를 갖으며 풍하중의 고유진동수(w_e)를 같게 하면 공진이 발생하여 최대의 횡 변위가 발생한다.

그러므로 외부 가진력의 진폭(F_0)을 100N 하는 풍 하중 실험조건은 다음과 같은 함수로 설정하였다.

$$F_w(t) = F_0 \sin w_e t \tag{3}$$

2.2.2 지진파 입력

고층 건물의 동적해석에 널리 사용되는 FFT(Fast Fourier Transform) 예제파로써 강도계 7.1에 해당하는 최대 326gal \approx 3.26m/s²의 가속도를 가지며 시스템 규격에서 구조물의 질량이 646.25kg 이므로 약 2106.8N의 최대 진폭을 갖는 지진파 입력을 사용하였다.

입력된 예제파의 FFT계수는 Table 2와 같으며 본 실험에서 사용된 예제파는 Fig. 2와 같으며 주기는 8sec로써 이는 지진파 실험의 예제로써 자주 사용되는 El centro 지진파를 모사한 것이다.

Table 2 FFT coefficients

Freq.	0	0.125	0.250	0.375	0.500	0.625	0.750	0.875	1
A	0	7.759	5.489	4.958	-6.75	-4.188	-7.239	3.971	2
B	0	-4.143	8.380	11.952	8.75	-3.856	-2.37	-4.951	0
Amp.	0	8.796	10.018	12.940	11.051	5.693	7.617	6.347	1
Phase	0	28.1	-56.8	-67.5	52.4	-42.6	-18.1	51.3	0

2.3 학습 제어기 구조

식 (1)의 운동 방정식에 학습 제어 법칙을 적용한다면 일반화된 힘의 입력 $F(t)$ 는 외부 가진력 $F_e(t)$ 와 제어 입력 v_j 의 합이고 v_j 는 구조물과 물탱크에 작용하는 비례미분 피드백 제어기와 학습 제어 입력 u_{Lj} 를 포함하며⁽¹¹⁻¹³⁾ 식 (4)로 표현된다.

$$\begin{aligned} v_j &= K_D(\dot{y}_j^* - \dot{y}_j) + K_P(y_j^* - y_j) + u_{Lj} \tag{4} \\ &= K_D(\dot{e}_j + \Gamma e_j) + u_{Lj} \\ &= K_D z + u_{Lj} \end{aligned}$$

여기서,

$\Gamma = K_P / K_D$: 피드백 제어기의 게인 비

K_D : 미분 제어기의 게인

K_P : 비례 제어기의 게인

$y^* = [x_1^* \quad x_s^*]$: 기준 궤적

$y = [x_1 \quad x_s]$

$e = y^* - y$: 오차

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

식 (4)에서 u_{Lj} 는 학습 제어기으로써 다음과 같이 설계된다.

$$u_{Lj} = u_{L(j-1)} + \Lambda K_D z \tag{5}$$

여기서, Λ 는 학습 제어기의 게인

식 (5)에서 학습 제어기의 현재 제어 입력 값은 이전 주기의 오차 값으로 계산됨을 알 수 있다. 이러한 학습 제어기의 구조를 Fig. 3의 블록 다이어그램에서 보면 한 주기의 온라인 상태에서는 피드백제어기와 학습제어기로 구성되며, 학습제어는 한 주기 동안 측정된 데이터를 가지고 오프

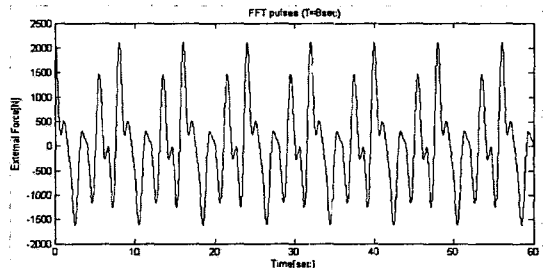


Fig. 2 FFT pulse

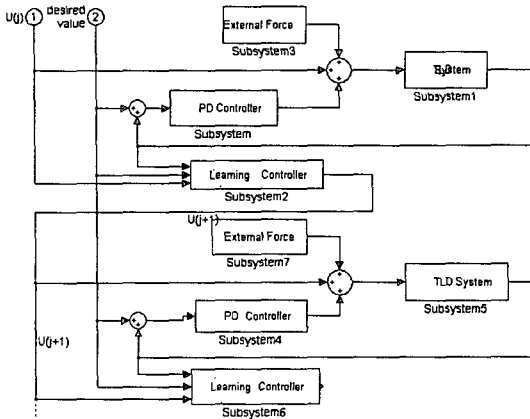


Fig. 3 Block diagram of learning control model

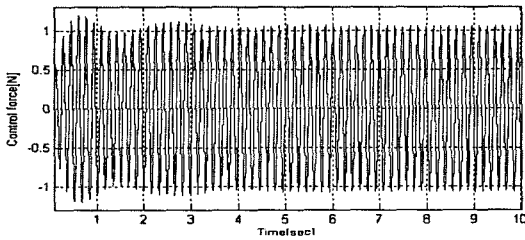


Fig. 4 Input control forces

라인 상태에서 다음 주기의 시스템 입력값을 계산한다. 한 주기에서 이런 형태의 계산은 매 주기 동안에 반복된다.

3. 모의 실험

3.1 풍 하중 입력에 대한 학습 제어 결과

모의실험을 위한 설정으로 초기값은 $x_1=0[m]$, $x_2=0[m]$ 으로 $100\sin(38.3755)t$ 의 외력을 60초 동안 가하였으며 이는 시스템의 고유 진동값과 같은 진동수로 공진에 의한 최대 변위가 일어나는 최악의 경우로 설정함을 의미한다. PD제어 기법과 학습 제어 기법을 사용하여 구조물의 횡 변위와 물탱크의 수위를 제어하였다. Fig. 4는 경우4에 대해서 10초간 제어 입력을 도시하였다.

Fig. 5-6은 제어 입력이 가해지지 않았을 경우 [경우1], $KD=12.7$, $\Gamma=3.8485$ 로 설정하여 고정된 PD제어기만을 가지고 사용하여 제어한 경우[경우 2], 구조물의 횡 변위만을 $\Lambda=1$ 로 하여 10회 학습 제어한 경우 [경우 3] 그리고 구조물의 횡 변위와 물탱크의 수위를 동시에 제어한 경우[경우

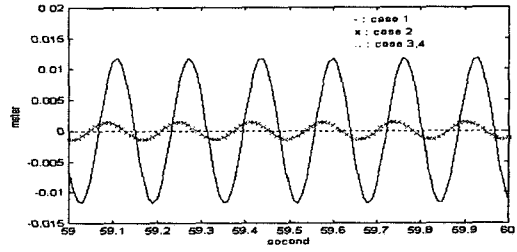


Fig. 5-1 The response of plate displacement with applied input torque in the TLD system

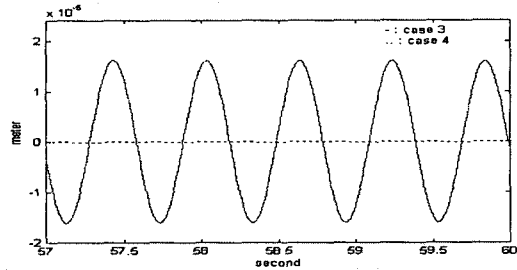


Fig. 5-2 The response of plate displacement about case 3 & case 4

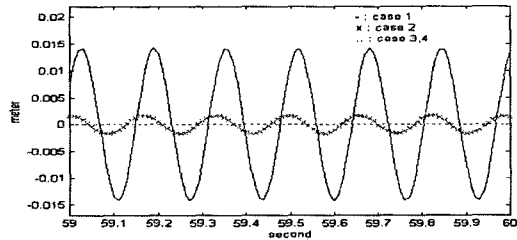


Fig. 6-1 The response of water label with applied input torque in the TLD system

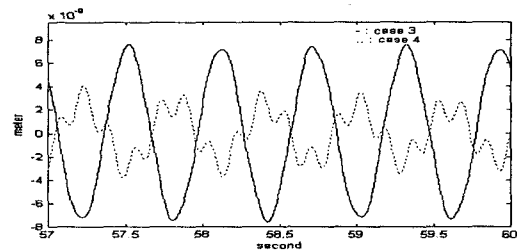


Fig. 6-2 The response of water label about case 3 & case 4

4)를 비교하여 도시하였다.

Fig. 5는 구조물의 변위에 대한 출력을 비교 도시한 것으로 경우 1에서 구조물은 $-0.012m$ 와 $0.012m$ 사이에서 주기적으로 좌우로 움직이며 경

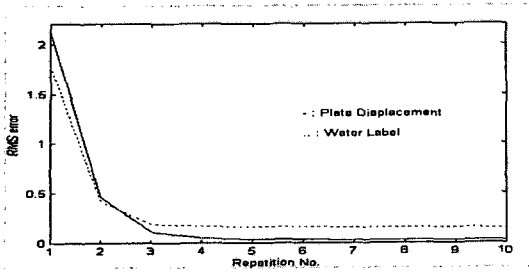


Fig. 7 RMS error using learning control plate displacement only

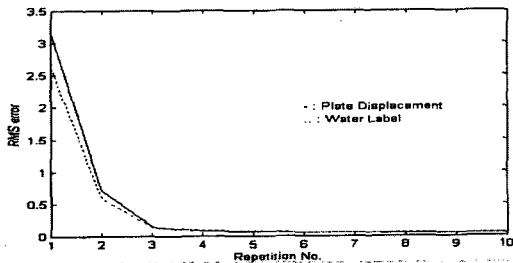


Fig. 8 RMS error using learning control both water label and plate displacement

우 2에서 변위의 감쇠를 보이거나 여전히 0.0003m와 0.0003m 사이에서 주기적으로 좌우로 여전히 움직이나 학습 제어를 적용한 경우 3과 경우 4에서는 현격하게 줄어듬을 볼 수 있다. 특히, 주목할 점은 Fig. 5-2에서 도시한 바와 같이 물탱크의 수위를 함께 학습 제어한 경우 거의 완전하게 제어되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6-1과 Fig. 6-2는 물탱크의 수위에 대한 출력을 비교 도시한 것으로 경우 1에서 물탱크의 수위는 -0.014m에서 0.014m 사이를 구조물의 주기와 같은 주기로 변위를 보이며 경우 2에서 -0.00026m에서 0.00026m 사이의 변위를 보이거나 경우 3과 경우 4의 경우에는 학습 제어 입력이 가해지지 않은 경우보다 변위의 감쇠 효과가 현저하게 나타남을 관찰할 수 있었다.

Fig. 7은 구조물의 변위만을 학습 제어한 경우로서 반복수에 따른 RMS오차의 감소를 보여주고 있다. 여기에서 구조물의 변위의 경우 반복수에 따라 오차가 감소하나 제어하지 않은 물 수위의 경우 변함이 없음을 알 수 있다.

Fig. 8은 구조물의 변위와 물탱크의 수위의 오차 항에 대한 학습 제어기 게인 값을 [1, 0.4]로 설정하여 구조물의 변위와 물탱크의 수위를 함께 학습 제어한 경우로서 반복수에 따른 RMS오차가

Table 3 RMS error for repetitions using Controllers

Repetition No.	x _s control		x _s , x ₁ control	
	x ₁	x _s	x ₁	x _s
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	0.04160

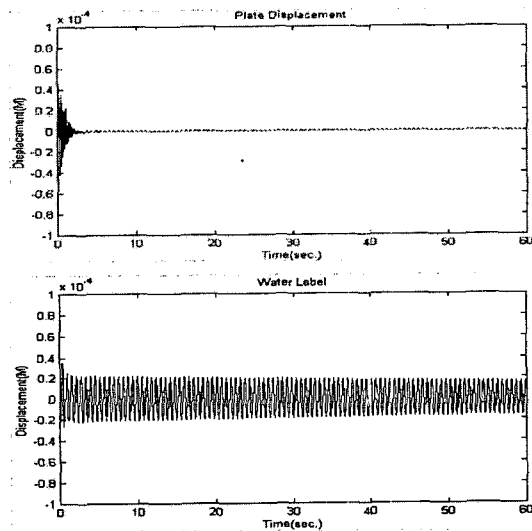


Fig. 9 The simulation results with Learning control plate displacement only

모두 현격하게 감소함을 보여주고 있다

Table 3은 10회 반복 학습 동안 구조물의 수평 변위만 제어한 경우와 물탱크의 수위를 동시에 제어한 경우의 RMS 오차를 나타내고 있다. Fig. 9~10은 10번의 반복 후 60초 동안 외란에 대한 제어를 경우 3과 경우 4에 대해서 비교한 것이다. 구조물의 변위만을 학습 제어한 경우에는 Fig. 9에서 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. 10와 같이 관찰할 수 있었다.

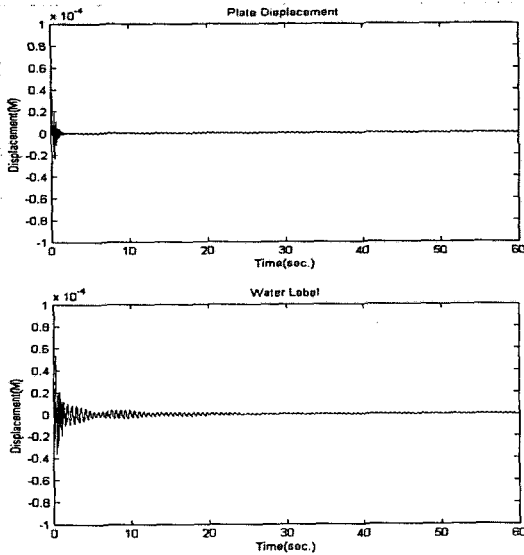


Fig. 10 The simulation results with learning control both plate displacement & water label

3.2 지진과 입력에 대한 학습 제어 결과

초기값은 $x_1=0[m]$, $x_s=0[m]$ 으로 Fig. 2와 같은 외부 가진력을 60초 동안 가하였으며 이는 강도 7정도의 지진력이 1분간 지속되는 경우로써 설정하였다. PD제어 기법과 학습 제어 기법을 사용하여 구조물의 횡 변위와 물탱크의 수위를 동시에 제어하였다. Fig. 11~12는 제어 입력이 가해지지 않았을 경우[경우1], $KD=50,000$, $\Gamma=1$ 으로 설정하여 고정된 PD제어기만을 사용하여 제어한 경우[경우2], 구조물의 횡 변위만을 $\Lambda=1$ 로 하여 10회 학습 제어한 경우 [경우 3] 그리고 구조물의 횡 변위와 물탱크의 수위를 동시에 제어한 경우 [경우 4]를 40초에서 60초 사이를 비교 도시하였다. Fig. 11은 구조물의 변위에 대한 출력을 비교 도시한 것으로 경우 1에서 구조물은 -0.0018m과 0.0024m 사이에서 좌우로 움직이며 서서히 감쇠하며 경우 2에서 -0.0001m와 0.0001사이의 변위의 감쇠를 보이며 완전한 감쇠 효과는 나타나지 않았다. 그러나 학습 제어를 적용한 경우3과 경우 4에서는 현격하게 줄어듦을 볼 수 있다. Fig. 11-2는 학습제어 후 40초에서 60초 사이의 구조물의 변위를 도시한 것이다. 도시한 바와 같이 물탱크의 수위를 함께 학습 제어한 경우에 거의 완전하게 제어되고 있으며 구조물의 변위만을 학습 제어한 경우 완전하게 제어되지 않고 있음을 볼 수 있다.

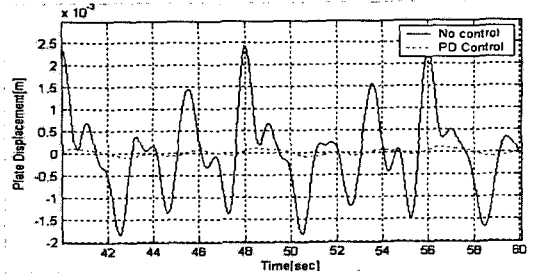


Fig. 11-1 The response of plate displacement with about case 1 & case 2

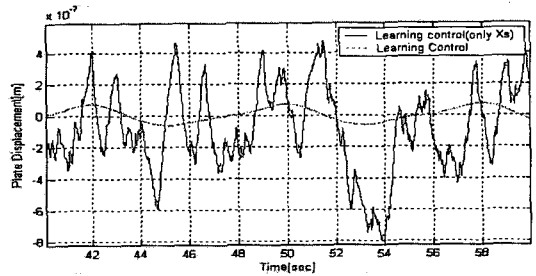


Fig. 11-2 The response of plate displacement about case 3 & case 4

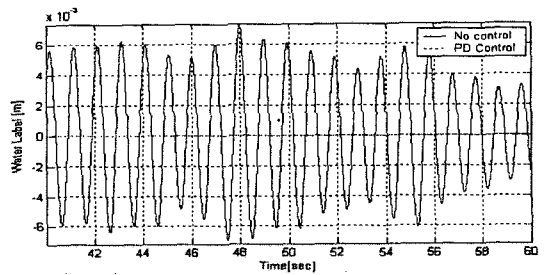


Fig. 12-1 The response of water label with about case 1 & case 2

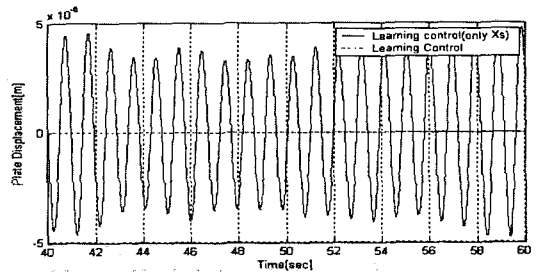


Fig. 12-2 The response of water label with about case 3 & case 4

Fig. 12-1과 Fig. 12-2는 물탱크의 수위에 대한 출력을 비교 도시한 것으로 경우 1에서 물탱크의

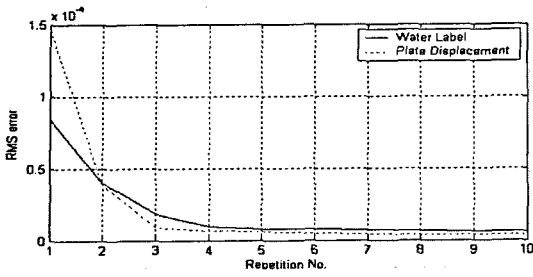


Fig. 13 RMS error using learning control plate displacement only

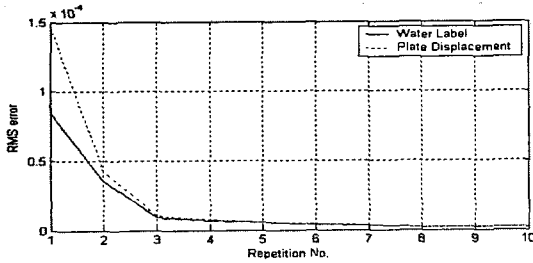


Fig. 14 RMS error using learning control both water label and plate displacement

수위는 -0.007m 에서 0.007m 사이의 변위를 보이며 경우 2에서 -0.00003m 에서 0.00003m 사이의 미소한 변위를 보인다. Fig. 12-2는 학습제어 후 40초에서 60초 사이의 물탱크의 수위의 변화를 관찰한 것이다. 도시한 바와 같이 구조물의 수위만을 학습 제어한 경우 -0.000005m 에서 0.000005m 사이의 변위를 보이나 물탱크의 수위와 구조물의 변위를 동시에 제어한 경우에는 완전하게 제어되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 13은 구조물의 변위만을 학습 제어한 경우로써 반복수에 따른 RMS오차의 감소를 보여주고 있다. 여기에서 구조물의 변위의 경우 반복수에 따라 오차가 감소하나 제어하지 않은 물 수위의 경우 변함이 없음을 알 수 있다. Fig. 14는 구조물의 변위와 물탱크의 수위를 함께 학습 제어한 경우로써 반복수에 따른 RMS오차가 모두 현격하게 감소함을 보여주고 있다

Table 4는 반복 학습 동안 구조물의 수평 변위만 제어한 경우와 물탱크의 수위를 동시에 제어한 경우의 RMS 오차를 나타내고 있다. Fig. 15~16은 학습제어 후 60초 동안 외란에 대한 제어를 경우 3과 경우 4에 대해서 비교한 것이다.

구조물의 변위만을 학습 제어한 경우에는 Fig. 15에서 도시한 바와 같이 구조물의 변위는

Table 4 RMS error for repetitions using Controllers

Repetition No.	x_s control		x_s, x_1 control	
	x_1	x_s	x_1	x_s
1	0.8364	1.4604	0.8364	1.4604
2	0.4020	0.3856	0.3546	0.4254
3	0.1870	0.0896	0.0905	0.1032
4	0.0954	0.0703	0.0698	0.0725
5	0.0802	0.0609	0.0564	0.0579
6	0.0797	0.0523	0.0393	0.0412
7	0.0724	0.0430	0.0321	0.0323
8	0.0674	0.0411	0.0202	0.0210
9	0.0600	0.0390	0.0199	0.0209
10	0.0591	0.0387	0.0182	0.0198

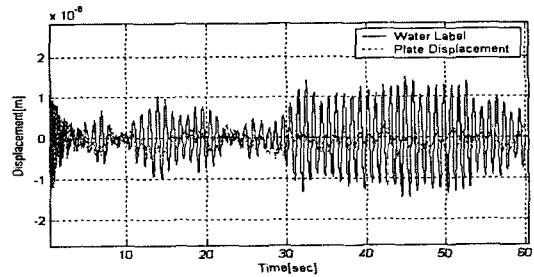


Fig. 15 The simulation results with Learning control plate displacement only

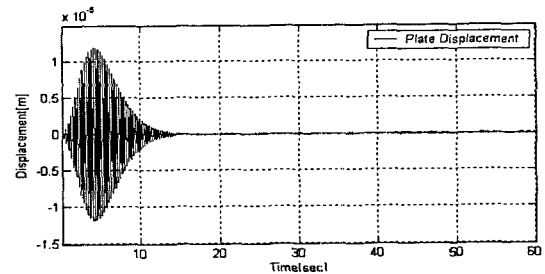


Fig. 16 The simulation results with Learning control both plate displacement and water label

줄어드나 물탱크의 수위는 발산하거나 감소되지 않음을 볼 수 있으며 수위의 변위가 구조물의 변위의 빠른 수렴을 방해함으로써 제어의 효율을 떨어뜨린다. 그러나 구조물의 변위와 물탱크의 수위를 동시에 제어한 경우 두 가지 모두 효과적으로 제어되고 있음을 Fig. 16과 같이 관찰할 수 있었다. 물 탱크의 수위도 Fig. 16과 거의 일치한다. 특히, 주목할 점은 초기 시간에 대한 제어 성능은 약간 구조물의 변위만을 제어할 경우가 좋게 나타나지만 시간이 지날수록 물탱크의 수위를

동시에 제어한 경우 구조물의 변위가 훨씬 더 안정됨을 발견할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 구조물의 피동 제어에 많이 사용되고 있는 U자형 동조 액체 댐퍼 시스템의 능동 제어에 학습 제어 기법을 사용하여 그 결과를 피드백 제어와 비교하여 우수성을 입증하였다. 또한 필요한 경우에 따라 구조물의 횡 변위만을 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 저감 시키는 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.

후 기

본 연구는 지역전략사업 석·박사 연구인력 양성 사업의 일부로 수행되었으며 관계자 여러분께도 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Soong, T. T., 1990, *Active structural Control ;Theory and Practice*, Wiley, New york.
- (2) Reinhorn, A. M., Chung, J. C., Soong, H. T., 1986, "Active Control of Building Structures During Earthquake," *Proc. of 8th ECEE*, pp. 1971~1980.
- (3) Balendra T., Wang, C. M., Rakesh, G., 1998, "Vibration Control of Tapered Buildings using TLCD," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 77&78, pp. 245~257.
- (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), pp. 475~489.
- (5) Balendra, T., 1993, *Vibration of Buildings to Wind and Earthquake Loads*, Springer-Verlag, London.
- (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), pp. 1376~1383.
- (7) Yan, N., Wang, C. M., Balendra, T., 2001, "Control of Wind-excited Towers by Active Tuned Liquid Column Damper," *Journal Structures Engineering* 23, pp. 1054~1067.
- (8) Kagawa, K. H., Koukawa, K., Fujita, Y., 1989, "Development of Tuned Liquid Damper for Ship Vibration," *Trans. Of the West_Japan Soc. Of Naval Arch* 78, pp. 251~258.
- (9) Shyu, K. L., Kuo, H. C., 1996, "Dynamic Behavior of a U-type Tuned Liquid Damper," *Int. Shipbuilding Progress* 43(436), pp. 331~345.
- (10) Wu, J. S., Hsieh, M., 2002, "Study on the Dynamic Characteristic of a U-type Tuned Liquid Damper," *Ocean Engineering* 29, pp. 689~709.
- (11) Ryu, Y. S. and Longman, R. W., 1992, "Indirect Learning Control for Nonlinear Dynamical System," *Advances in the Astronautical Science*, Vol. 82. part 1, pp. 79~91.
- (12) Ryu, Y. S. and Longman, R. W., 1995, "Indirect Learning Control for Linear, Linear Time-Varing and Nonlinear System," *Journal of Robotic system*, Vol. 12.
- (13) Ryu, Y. S., Ha, H. S., 2001, "Development of Robust Adaptive Learning Control for Nonlinear System," *Transactions of the KSME (A)*, vol.25, No.12, pp. 1895~1902.