

U자형 TLD시스템에 대한 적응제어 적용 Application of Adaptive Control for the U Type TLD

가춘식† · 신영재*

Chun-Sik Ga and Young-Jae Shin

Key Words : Adaptive Control(적응제어), Tuned Liquid Damper(동조액체댐퍼).

ABSTRACT

The Structures or buildings nowadays draw more complexity in design due to space limitation and other factor that affect the height and dimensions, that results to instability. So the various methods have been carried out to improve the safety factor from an earthquake or a boom until recently. But, it is very hard to get model precisely because these structures are the non-linear and multi-variable systems.

For this reason, we developed the active control system that is applied the adaptive control method on the U type Tuned Liquid Damper(TLD) passive control system. It is proven that the proposed active control strategy of the plate carrying U type TLD system is the more effective control method to suppress the vibration of the structure. The entire hybrid control system is composed of the actuator acted in the opposite direction of the TLD system's motion direction and the active control device with an air pressure adjuster.

This paper proposed the adaptive control methods to improve the problem of U type TLD system which is used widely for the passive control of the building. And it is proved by the simulation. In advanced, it is developed the pressure control method that is improved the hybrid controller's performance by using air chamber pressure controller. These methods take the advantage of the decrease of the maximum displacement by using the controller as soon as the impact is loaded. This is a very important element for the safety design and economic design of structures.

1. 서론

현대 구조물의 고층화에 따라 횡 하중에 의해 발생하는 진동에 의해 건물의 균열 또는 파괴가 일어난다. 그러나 이러한 구조물들은 비선형이고 부하가 가변적이어서 정확한 모델링이 어려웠다. 그래서 이러한 모델에 효과적으로 적용될 수 있는 제어 기법을 개발하고자한다.

한편, 지금까지의 연구 동향을 살펴보면, 1980년대 초에 Soong⁽¹⁾ 연구를 시작으로 구조물에 적용 가능한 다양한 제어 알고리즘이 되었다. Balendra⁽²⁾ 등은 일반적인 최적제어 알고리즘을 유연한 구조물에 적용하였고 Yan⁽³⁾ 등은 지진 하중을 받는 구조물에 적용하기 위한 순간최적 알고리즘을

연구하였고 Chung⁽⁴⁾등은 지진가진력을 받는 대형 구조물에 대한 제어를 검토하였다. Kagawa⁽⁵⁾등은 에너지법에 의해 TLD내부의 액체에 대하여 고유진동수를 유도하였다. Kuo⁽⁶⁾등은 Lagrange법에 의해 전체 TLD시스템의 운동방정식을 유도하였다. Yalla⁽⁷⁾등은 구조물의 제어에 Semi-Active TLD를 사용하여 최적제어 알고리즘들을 연구하였다. Wu⁽⁸⁾등은 강제진동에 대하여 U자형 TLD시스템의 수평 평판의 운동 방정식을 유도하였다.

본 연구에서는 TLD를 갖는 구조물에 적합한 적응제어 알고리즘을 설계하고 이를 이용해 직접 횡변위를 제어하면서 동시에 TLD의 공기챔버 압력을 제어하도록 하였다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 U자형 TLD시스템의 제어 모델링

Fig. 1은 TLD하부구조를 갖는 구조물의 운동방향에 반대

† 책임저자; 정회원, 안동대학교 기계공학부
E-mail : otori@lycos.co.kr
Tel : (054) 820-5168, Fax : (054) 820-5167

* 안동대학교 기계공학부

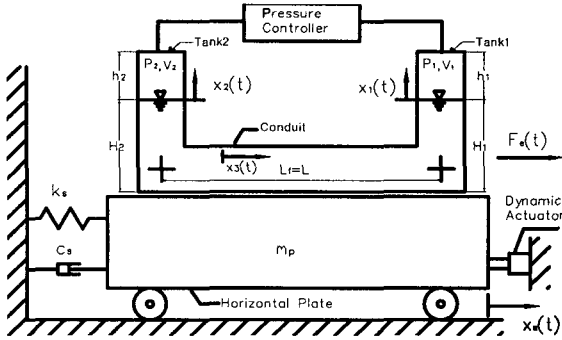


Fig.1 Sketch for the purposed active control model

방향으로 작용시켜 제어하는 능동제어장치를 갖춘 시스템의 그림으로 기존의 구조물인 수평 평판에 댐퍼 기능을 하는 U자형 물탱크를 얹힌 구조물과 제어장치로 구성되어진다.

이는 상부에 수조를 설치하고 물의 요동 주기를 건물의 주기와 동조시켜 구조물이 흔들릴 경우 수조측벽에 작용하는 유체력을 증가시키거나 두 개의 물탱크 사이의 관에 의한 압력 손실에 의한 감쇠력을 증가시키는 방법을 이용하는 피동 제어 구조에 물탱크와 수평평판의 출력오차를 입력으로 하여 직접 구조물의 횡 변위를 제어하는 구동기와 공기 챔버 압력 제어기로 구성된 능동제어 시스템이다. Table 1은 주요 구성 요소와 실험 조건을 제시하고 있다.

Lagrange 방정식을 사용하여 이 시스템을 모델링하면 다음과 같은 식(1,2)의 운동 방정식을 구할 수 있다.⁽⁸⁾

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

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

여기서, x_s 는 구조물의 수평 변위이고 x_1 은 오른쪽 물탱크 수면의 수직 변위로서 시스템의 출력 변수이다.

$F_e(t)$ 는 외부 가진력이며 본 논문에서는 순간적인 충격력으로써 Direc Delta 함수로 가정하였다. 다른 파라미터의 의미는 Table 1에 주어졌다.

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

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

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

$$e_1 = \rho A_1 L, \quad a_s = m_p + m_t + m_w$$

$$e_s = \rho A_1 L, \quad e_s = \rho A_1 L$$

$$f_s = 8\pi\mu L_f \left(\frac{A_1}{A_3} \right), \quad g_s = \rho A_3 \left(\frac{A_1}{A_3} \right)^2$$

Table 1 Specifications of TLD system

Parameters	Symbol	Units	Value
Mass density of liquid	ρ	kg/m ³	997
Cross-sectional areas	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			1.4
Dynamic viscosity	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

2.2 U자형 TLD시스템의 적응제어 모델링

U자형 TLD 시스템의 운동방정식을 가진력에 대하여 정리하면, 식(2)의 \ddot{x}_s 을 식(1)에 대입해서 $F(t)$ 에 대해 정리하면, 식(4)과 같다.

$$\ddot{x}_1 = -\frac{1}{A} (B\dot{x}_1 + Cx_1 - D - E \times F(t)) \quad (3)$$

$$F(t) = -\frac{1}{E} (A\ddot{x}_1 + B\dot{x}_1 + Cx_1 - D) \quad (4)$$

$$A = \begin{pmatrix} a_1 - \frac{e_1 e_s}{a_s} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} c_1 - \frac{e_1 (f_s - g_s \dot{x}_1)}{a_s} \end{pmatrix}$$

$$C = k_1, \quad D = -\frac{e_1}{a_s} (c_s \dot{x}_s + k_s x_s)$$

$$E = -\frac{e_1}{a_s}$$

식(4)의 운동방정식에 연속시간에서의 적응제어 법칙을 적용한다면 일반화된 힘의 입력은 TLD에 작용하는 비례미분피드백제어기와 다음의 식(5)에서와 같이 표현되는 적응제어 입력 u_A 를 포함한다.

$$\begin{aligned} \nu &= K_D (\dot{y}^* - \dot{y}) + K_P (y^* - y) + u_A \\ &= K_D (\dot{e} + \Gamma e) + u_A \\ &= K_D z + u_A \end{aligned} \quad (5)$$

$\Gamma = K_P / K_D$: feedback 제어기의 게인 비

K_D, K_P : 미분, 비례제어기의 게인

$e = y^* - y$: 오차

y^* : 기준 궤적

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

그리고 u_A 는 적응제어기로서 다음과 같이 설계된다.

$$u_A = \frac{\hat{A}}{\hat{E}} (\dot{x}_1^* + \Gamma \dot{e}) + \frac{\hat{B}}{\hat{E}} (\dot{x}_1^* + \Gamma e) + \frac{\hat{C}}{\hat{E}} (x_1^*) - \frac{\hat{D}}{\hat{E}} \quad (6)$$

$$\hat{A} = \hat{p}_1 - \frac{\hat{p}_4 \hat{p}_8}{\hat{p}_5}$$

$$\hat{B} = \hat{p}_2 - \frac{\hat{p}_4}{\hat{p}_5} (\hat{p}_9 - \hat{p}_{10} |\dot{x}_1|)$$

$$\hat{C} = \hat{p}_3$$

$$\hat{D} = \frac{\hat{p}_4}{\hat{p}_5} (\hat{p}_6 \dot{x}_s + \hat{p}_7 x_s)$$

$$\hat{E} = \frac{\hat{p}_4}{\hat{p}_5}$$

파라미터 추정값 \hat{p} 은 식(7)을 적분하여 실시간으로 계산되어진다.

$$\dot{\hat{p}} = \Phi^{-1} W^T (x_s, \dot{x}_s, x_1, \dot{x}_1, \ddot{x}_1, \dot{x}_1^*, \ddot{x}_1^*) z \quad (7)$$

식(4)을 다시 쓰면 식(6)과 같고 여기서, 행렬W는 아래 식(8)의 추정하고자하는 모델에 기초한 적응제어기의 파라미터들을 계수로 하는 항들로 표현된다.

$$u_A = \frac{\hat{p}_1 - \frac{\hat{p}_4 \hat{p}_8}{\hat{p}_5}}{\frac{\hat{p}_4}{\hat{p}_5}} (\Gamma \dot{x}_1) + \frac{\hat{p}_2 - \frac{\hat{p}_4}{\hat{p}_5} (\hat{p}_9 - \hat{p}_{10} |\dot{x}_1|)}{\frac{\hat{p}_4}{\hat{p}_5}} (\Gamma x_1) - \frac{\hat{p}_4}{\hat{p}_5} (\hat{p}_6 \dot{x}_s + \hat{p}_7 x_s) \quad (8)$$

본 연구에서 추정하고자하는 파라미터는 식(9)과 같이 표현된다.

$$\dot{\hat{p}} = \Phi^{-1} W^T (p_1 \Gamma \dot{x}_1 + p_2 \Gamma x_1, -\dot{x}_s, -x_s, -\Gamma \dot{x}_1, -\Gamma x_1, |\dot{x}_1| \Gamma x_1) * (\dot{x}_1 + \Gamma x_1) \quad (9)$$

3. 모의 실험

충격 함수를 외란으로 설정하고 정적평형상태에서 1초 후에 가하였다. Table 2의 시스템 규격조건에서 순수한 U자형 TLD시스템의 구조물의 횡측 변위와 물탱크 내 수위의 거동을 관찰하고(경우.1) 두 번째로 충격과 입력에 대하여 비례미분제어기와 적응제어기의 게인값을 각각 $\Gamma=0.26$, $KD=3.3$, $\Phi=1$ 로 하여 적응제어기를 썼을 때(경우.2)와 세 번째, 적응제어기를 쓰면서 동시에 비례미분 제어기를 이용해 공기챔버의 압력을 동시에 제어했을 때(경우.3)를 50초 동안 비교

Table 2 Comparison of the response for impact

	초기 최대 변위		50초 후 최대 변위	
	plate displacement	water level	plate displacement	water level
case.1	8.763×10^{-4}	1.173×10^{-3}	4.382×10^{-4}	6.995×10^{-4}
case.2	5.7224×10^{-5}	3.71×10^{-5}	4.819×10^{-6}	1.595×10^{-6}
case.3	5.7224×10^{-5}	3.71×10^{-5}	0	0

관찰하였다.

Table 2는 위의 3가지 경우에 대하여 충격함수에 대한 구조물의 최대변위와 물탱크의 수위 변화를 기록하였다. 초기에 나타나는 최대변위와 50초 후 최대 변위를 비교한 것은 변위의 수렴성을 보이기 위한 것이다. Fig.2~8은 충격함수에 대한 10초 동안의 거동 특성이다. 여기서 횡축은 시간

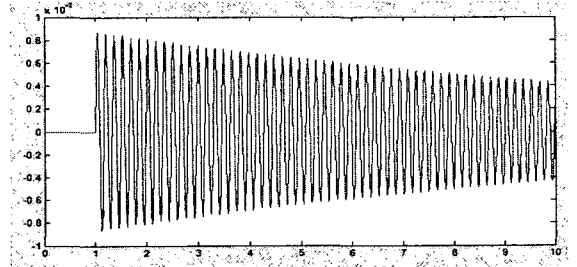


Fig.3 Response of TLD for impact (case.1)-plate displacement

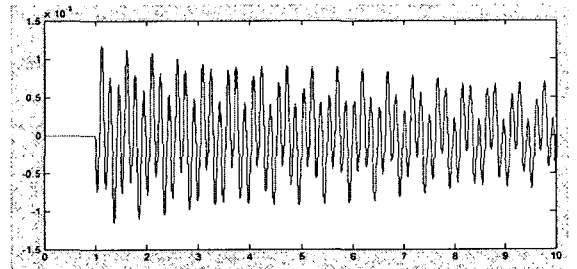


Fig.4 Response of TLD for impact (case.1)-water level

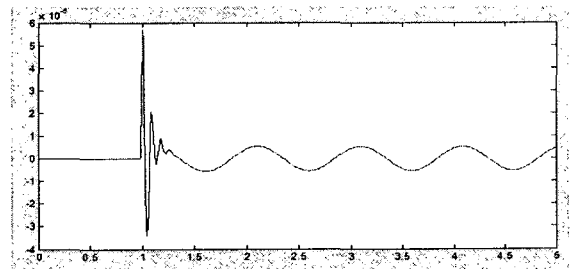


Fig.5 Response of TLD for impact (case.2)-plate displacement

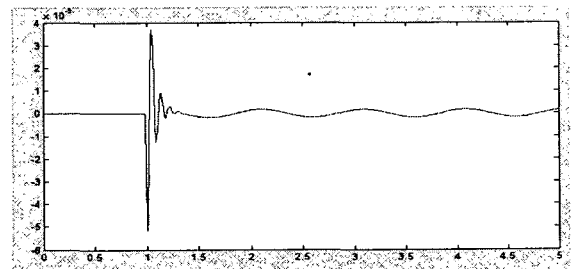


Fig. 6 Response of TLD for impact (case.2)-water level

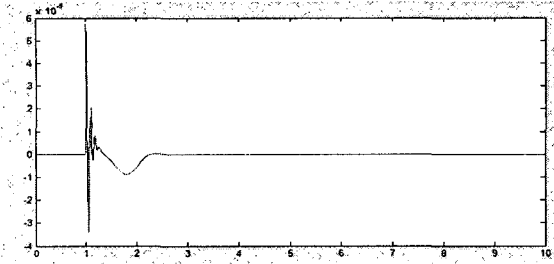


Fig.7 Response of TLD for impact (case.3)-plate displacement

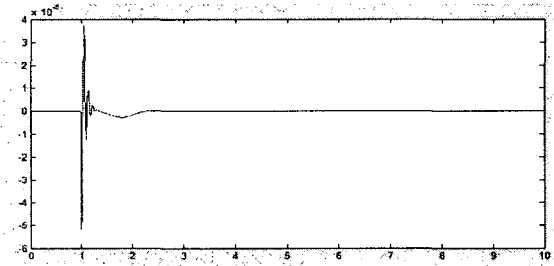


Fig.8 Response of TLD for impact (case.3)-water level

이며 종축은 변위를 나타낸다.

Table2를 보면 충격과 입력에 대하여 적응제어를 썼을 경우 초기의 최대 변위는 8.763×10^{-4} 에서 5.722×10^{-5} 로 약간 줄어들었으나 50초 후 관찰한 변위는 별 차이가 없음을 알 수 있다.

그러나 공기챔버의 압력을 적응제어기와 함께 병행하여 사용함으로써 초기 최대변위가 적응제어기와 같은 결과를 보이면서 정상상태오차는 0으로 빠르게 수렴하고 있다. 이로써 이전의 적응제어기에서 보였던 정상상태에서의 불안정함도 제거되었다.

Fig. 5과 Fig. 7를 비교해 보면 압력제어를 동시에 했을 경우 구조물의 초기 변위는 적응제어만 썼을 경우와 크게 차이가 없지만 빠르게 0으로 수렴하며 3초 이후에는 완전히 수렴하고 있음을 알 수 있다. Fig. 6과 Fig. 8을 비교해 보면 물탱크의 수위도 구조물의 변위와 유사한 수렴성을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 구조물과 액체가 동조하고 있음을 알 수 있다. 압력제어기의 제어 압력은 최대 6000 $[N/m^2]$ 안에서 가하여지며 0으로 빠르게 수렴하고 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 구조물의 피동 제어에 많이 사용되고 있는 U자형 동조 액체 댐퍼 시스템의 능동 제어에 학습제어 기

법 및 적응제어 기법을 사용하여 피동제어에 비교하여 능동제어의 장점을 보여주고 또한 일반적인 피드백 제어방법과 비교하여 본 논문에서 제시한 제어기의 우수성을 입증하였다. 또한 동조액체댐퍼의 수위가 중요한 거동특성으로 이를 제어 변수로 사용함으로써 단순히 구조물의 횡 변위만을 제어한 경우보다 물탱크의 수위를 동시에 제어한 경우에 훨씬 제어 효과가 크게 나타남을 보이고 있다. 그리고 TLD시스템의 거동 특성에 물탱크의 공기챔버 내 압력의 변화가 큰 영향을 주며 이러한 압력을 적응제어기와 동시에 사용함으로써 제어 효과를 극대화 시킬 수 있음을 발견하였다.

참 고 문 헌

- (1) Chung, J. C. H. and Soong, T. T., 1980, "Structural Control Using Active Tuned Mass Dampers", Journal of Engineering Mech., ASCE, 106, pp. 1091~1098.
- (2) Balendra, T., 1993, "Vibration of Buildings to Wind and Earthquake Loads", London ; Springer-Verlag
- (3) Shankar, K. and Balendra, T., 2002, "Application of the Energy Flow Method to Vibration Control of Buildings with Multiple Tuned Liquid Dampers", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 90, pp. 1893~1906.
- (4) Yan, N., Wang, C. M. and Balendra, T., 1999, "Optimal Damper Characteristic of ATMD for Building under Wind Loads", Journal Structures Engineering, ASCE 125(12), pp. 1376~1383.
- (5) Kagawa, K., Koukawa, H., Fujita, K., Zersho and Matsuu, Y. M., 1989, "Development of Tuned Liquid Damper for Ship Vibration", Trans. Of the West Japan Soc. Of Naval Arch 78, pp. 251~258.
- (6) Shyu, K. L. and Kuo, H.C., 1996, "Dynamic Behavior of a U-type Tuned Liquid Damper", Int. Shipbuilding Progress 43(436), pp. 331~345.
- (7) Swaroop K. Yalla, A. K. and Jeffery, C. K., 2001, "Semi-Active Tuned Liquid Column Dampers for Vibration Control of Dtructures", Eng. Of Structures 23, pp. 1469~1479.
- (8) Wu, J. S. and Hsieh, M., 2002, "Study on the Dynamic Characteristic of a U-type Tuned Liquid Damper", Ocean Engineering, 29, pp. 689~709.