

斜張橋의 振動制御를 위한 流動型 感衰 裝置

윤 정 방* 방 은 영**

1. 서언

재료와 시공 기술의 진보로 인하여 더욱 크고 유연한 구조물들의 건설이 증가하는 추세에 있다. 이러한 구조물들은 진동특성의 관점에서 보면, 고유진동수가 작아지고 구조물 자체의 진동 감쇠특성이 감소하여, 바람, 지진등의 동하중에 민감하게 진동한다. 교량공학 분야에서, Tacoma Narrows Bridge의 붕괴 이후 현수교의 풍하중에 의한 진동에 대하여 많은 연구가 진행되어 왔고, 많은 사장교가 건설되면서 사장교의 교탑과 거더 및 케이블의 풍하중에 의한 진동문제의 중요성이 더욱 많이 인식되었다.

고체질량의 운동을 이용하는 Tuned Mass Damper(TMD, [1,2])는 사장교의 진동을 제어하는 목적으로도 많이 이용되어 왔으나, 최근에는 물의 유동을 이용하여 진동을 제어하는 유동형 감쇠장치(Tuned Liquied Damper; TLD, [3-7])가 개발되어 토목구조물에 적용되고 있다. 유동을 이용하여 진동을 제어하는 체계는 인공위성이나 선박에 이미 이용되었던 것이나, 토목구조물에 도입된 것은 80년대 후반이며 지금까지는 주로 고층 건물이나 탑 구조물의 진동을 제어 하는 데 도입된 단계이다. 본 고는 사장교의 진동제어에 있어서, 유동형 감쇠장치의 원리와 효과에 대하여 소개하려 한다.

2. 유동형 감쇠장치의 개요

구조물 자체의 재료적 감쇠 특성이 구조물의 진동을 제어하기 어려운 상태가 되면, 부가적인 감쇠 장치가 필요하게 된다. 유동형 감쇠장치(TLD)는 강체 수조 안의 유동이 구조물의 진동을 흡수하여 진동을 제어하는 장치로서 그림 1과 같은 수조의 모양을 하고 있다.

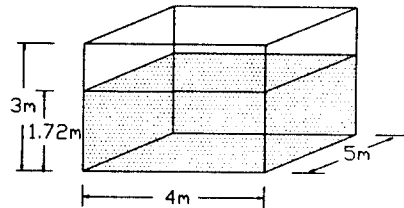


그림 1. 유동형 감쇠장치(TLD)의 형태

기존에 많이 사용 되어온 TMD는 그 자체가 구조체이므로 설치와 철거에 어려움이 있지만, TLD는 비교적 단순하여 공간만 허락하면 설치에 용이하다. 물을 제거하면 진동제어 기능이 없어지므로 일시적인 사용에 유리하고 경제적이다. 또한 구조적인 성격이 적어서 유지 관리비용이 적게 든다. 구조물의 노후나 보수로 인하여 구조물의 진동 특성이 변화했을 때, 또는 설계와 시공의 오차가 발생했을 때, 물의 수위를 조절함으로써 쉽게 구조물의 실제조건과 동조시킬 수 있는 장점이 있다. 단점으로는 TMD에 비하여 많은 공간이 필요하고

* 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

** 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

물의 고유진동수가 비교적 작기 때문에 고주파수 영역에 적합하지 않다는 것이다.

현재까지 수조안의 유체의 거동과 수조 벽체의 상호작용을 연구한 목적은 지진, 파동등의 하중이 작용될 때 유동으로 인하여 벽체의 하단에 가해지는 전단력과 모멘트를 구하기 위한 것이었다. 즉, 벽체의 안전도를 분석하기 위한 목적었다. 연구 초기에 Housner는 수평방향의 지진에 의하여 수조의 벽체 하단에 작용되는 모멘트와 전단력을 구하기 위하여, 벽체를 강체로 가정한 후 수조안의 유체를 대류 성분과 충격 성분으로 구분하여 그림 2와 같은 집중질량 해석모델을 제안하였다[8]. 이후에 Haroun등이 벽체의 유연성을 고려하여 연구하였다[8]. TLD는 이것이 설치될 구조물에 비하여 규모가 작고 강체의 벽체를 사용하므로, 이를 Housner의 집중질량 해석모델을 사용하여 TLD를 모형화하여도 타당한 결과를 얻을 수 있다.

TLD는 수평방향의 진동에 대하여 효과를 갖는 감쇠 장치이므로, 수평변위가 가장 큰 두 교탑의 상부에 그림 3과 같이 위치시킨다. 그 결과 교탑의 수평방향 진동과 거어더의 상하 진동을 제어할 수 있다.

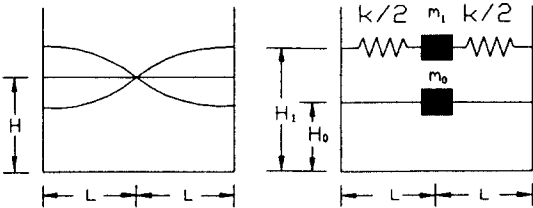


그림 2. TLD의 모형화

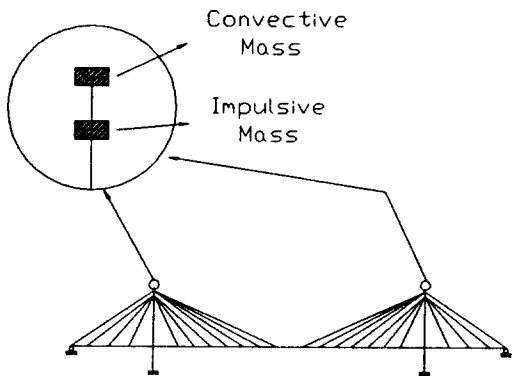


그림 3. TLD의 사장교의 상호작용 해석을 위한 모형

3. 풍하중에 대한 사장교의 동적해석

사장교에 작용되는 주요 풍하중으로는, 거어더에 작용되는 수직방향의 양력(Lift Force)과 교탑에 작용되는 수평방향의 항력(Drag Force)을 들 수 있다. 이 중 거어더의 수직거동에 큰 영향을 주는 것은 전자이다.

사장교를 교탑과 거어더로 구분하여 풍하중에 대한 운동방정식을 세우면 식(1)과 같이된다.

$$\begin{bmatrix} m_p & 0 \\ 0 & m_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{v} \\ \ddot{h} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_v \\ c_h \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{v} \\ \dot{h} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_v \\ k_h \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v \\ h \end{Bmatrix} = [C_1] \begin{Bmatrix} u(z,t) \\ u(x,t) \end{Bmatrix} + [C_2] \begin{Bmatrix} v(z,t) \\ w(x,t) \end{Bmatrix} \quad (1)$$

위 식에서 v 와 h 는 각각 교탑의 수평 변위와 거어더의 수직변위이며; m_p 와 m_d 는 교탑과 거어더의 집중질량이고; u, v, w 는 풍속의 세 방향 변동 성분이며; $[C_1]$ 과 $[C_2]$ 는 풍력에 관련있는 계수 행렬이다.

풍하중에 의한 사장교의 거동은 풍속의 동적 변동성분에 대한 풍속스펙트럼(Wind Spectrum)을 바탕으로 한 추계론적 기법으로 해석할 수 있다. 이로부터 구한 거동의 스펙트럼(Power Spectral Density; PSD)으로부터 거동의 표준편차와 최대 거동을 산정할 수 있다[9-11].

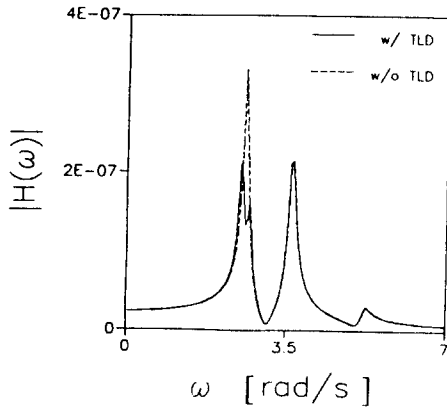
4. TLD의 원리와 효과

수조내의 유동에 대한 자유진동수는 아래와 같이 TLD의 유동방향 폭($2L$)과 물의 깊이(H)의 함수로 구해진다.

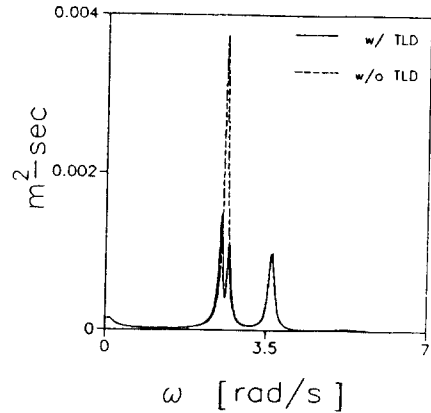
$$\omega^2 = \sqrt{\frac{5}{2}} \frac{g}{L} \tanh\left(\sqrt{\frac{5}{2}} \frac{H}{L}\right) \quad (2)$$

그러므로 TLD의 폭과 물의 깊이를 조절하여 TLD와 사장교의 진동수를 동조시킬 수 있다.

풍속스펙트럼은 저주파수영역의 스펙트럼 값이 크고 고주파수로 갈수록 감소하는 경향을 나타내므로, 사장교의 풍하중에 대한 거동은 대부분 첫째 진동모우드의 영향이다. 그러므로 뒀에 대한 첫째 모우드의 진동수와 TLD의 진동수를 동조시

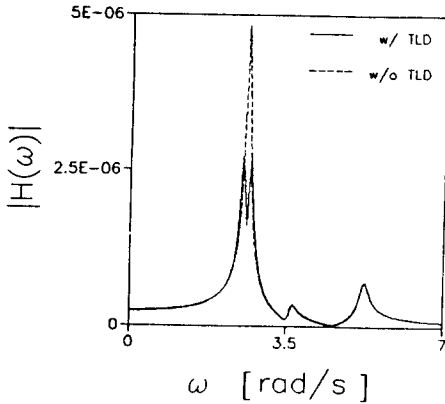


(a) 교탑의 주파수응답함수

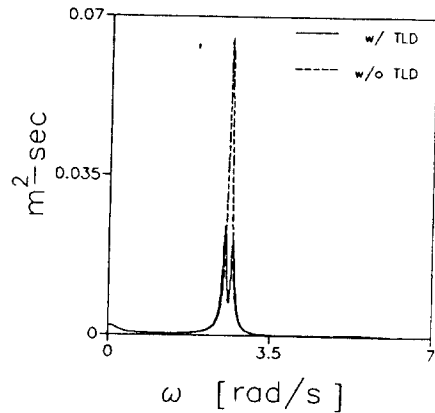


(b) 교탑의 응답 PSD

그림 4. TLD에 의한 교탑의 주파수응답함수와 응답 PSD의 변화



(a) 기어더의 주파수응답함수



(b) 기어더의 응답 PSD

그림 5. TLD에 의한 기어더의 주파수응답함수와 응답 PSD의 변화

킬 때 가장 좋은 진동제어 효과를 기대할 수 있다. 대부분의 사장교의 기본 진동수는 0.3-1.0Hz에 속하므로, TLD가 설치될 교탑에서의 가용공간과 필요한 대류성분질량을 고려하여 TLD의 폭(2L)을 결정하여야 한다.

그림 4와 5는 각각 TLD를 사용하지 않은 상태와 TLD를 사용한 상태에 대하여 교탑상부의 수평거동과 기어더 중앙부 수직거동의 주파수응답함수와 응답 PSD를 나타낸 것이다[11].

그림 4-a의 각 정점은 순서대로 각 모우드의 고유진동수에 해당된 것이며, TLD의 설치에 의해서 하나의 정점이 두부분으로 나뉘면서 수직축의 값이 감소하여 진동이 감소하는 효과를 나타낸다.

교탑상부의 응답 PSD는 첫번째와 두번째 모우드의 영향이 지배적이며, 기어더의 중앙부의 거동은 첫번째 모우드의 영향이 대부분임을 알 수 있다. 풍속스펙트럼은 고주파수에서는 아주 작으므로, 고주파수의 모우드에 의한 거동은 작은 것을 알 수 있다. 기어더 중앙부의 수직거동의 경우, 두번째 모우드는 역대칭 모우드이므로 그 영향이 나타나지 않는다. 따라서 TLD를 첫번째 모우드에 동조시키게 되며, 이때에 TLD의 효과는 두번째 모우드의 영향도 받는 교탑 보다는 대부분 첫번째 모우드의 영향만을 받는 기어더의 거동에 대하여 더큰 효과를 알 수 있다.

5. 결론

본 고에서는 풍하중을 받는 사장교의 진동을 제어할 목적으로 사용하는 TLD의 효과와 원리를 소개하였다. 사장교의 경우 완공 후 보다 시공중에 더 위험한 구조물이므로, 비록 완공후에 진동을 별도로 제어할 필요가 없는 경우라도 시공중에 일시적으로 진동제어를 할 경우에 편리하게 이용될 수 있다. TLD는 물의 수위를 변화 시킴으로, 시공 단계에 따라 변하는 사장교의 진동특성에 간편하고 효과적으로 대응할 수 있다. 아울러 교량의 노후나 설계오차 발생시에도 이에 따라 TLD의 특성의 수정이 용이하며, 구조적으로도 단순하기 때문에 유지관리가 간편한 장점이 있다.

참 고 문 헌

1. Robert J. McNamara, "Tuned Mass Dampers for Buildings", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.103, No.ST9, Sep.1977, pp1785-1798.
2. Praveen K. Malhortra and Maritin Wieland, "Tuned Mass Damper for Suppressing Wind Effects in a Cable-Stayed Bridge", International Conference on Cable-Stayed Bridges, Babgok, November, 18-20, 1987, pp. 557-568.
3. Piyawat Chaiseri, Benito Pachco, Yozo Fujino, and L. M. Sun, "Damper for Bridge Tower Utilizing Water Motion as Energy Dissipater", International Conference on Cable-Stayed Bridges, Bangkok, November, 18-20, 1987, pp.545-556.
4. Yozo Fujino and Kunio Fujii, "Tuned Liquid Damper and its Application to Tower-like Structures", ASCE, San Francisco, May, 1-5, 1989, pp.490-499.
5. Toshiyuki Noji, Hidetoshi Yoshida, Eiji Tatsumi, Hideyuki Kosaka, and Hiroshi Hagiuda, "Vibration Control Damper Using Sloshing of Water", ASCE, San Francisco, May, 1-5, 1989, pp.1009-1018.
6. Fujikazu Sakai and Shingo Takaeda, "Tuned Liquid Column Dampers for Cable-Stayed Bridges", Innovation in Cable-Stayed Bridge, Fukuoka, 18-19, April, 1991, pp.197-205.
7. Qu Weilian, Shing Vibration Responses of "Control for Wind Vibration Responses of Highrise Structures and Tall Buildings by U-Shape Water Tank", The Third East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, Shanghai, 23-26 April, 1991, p.1531-1536.
8. G. W. Housner, "Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers", Bulletin of Seismological Society of America, Vol.47, 1957.
9. 현창헌, 윤정방 "랜덤 풍하중에 대한 사장교의 동력학적 연구", 대한토목학회 논문집, 제4권 제2호, 884.12.
10. Emil Simiu & Robert H. Scanlan, Wind Effects on structures, John Wiley & Sons, 1986.
11. 방은영, "사장교의 진동제어를 위한 유동감쇠장치의 효과 관한 연구", 석사학위 논문, 한국과학기술원, 1992.2.