

실린더형 유체점성감쇠기의 설계기술에 관한 연구

조수용^{*†} · 이동환^{**}

A Study on Design Technology of a Cylinder Type Fluid Viscous Damper

Soo-Yong Cho^{*†}, Dong-Hwan Lee^{**}

Key Words : Energy absorber(에너지흡수), Fluid viscous damper(유체점성감쇠기), Structure protection(구조물보호), Earthquake(지진), Energy dissipation(에너지소산)

ABSTRACT

The fluid viscous damper is a very useful device to dissipate the seismic energy. The dissipated energy on the fluid viscous damper is proportion to the resistance force. However, the resistance force is not proportion to the velocity linearly, but it is proportion to the power of the velocity. When the power index is less than 1, more energy can be dissipated. In order to obtain a lower power index, the operating fluid should be not only a non-Newtonian fluid but also occurred the shear thinning. To predict the resistance force on the fluid viscous damper, the unsteady computational method was applied. Based on the numerical result, a fluid viscous damper of 500 kN class was developed, and its performance test was conducted. Through the this study, the developed numerical method could be a very useful tool to design an effective fluid viscous damper.

1. 서 론

최근 한국에서도 지진이 자주 발생하며, 진도 또한 상당히 크다. 이로 인하여 지진에 대한 구조물의 안정성에 대한 관심이 상당히 높아졌다. 빌딩이나 교량과 같은 대형구조물에 대하여 지진으로부터 안정성을 확보하기 위한 다양한 방법들이 적용되고 있으며, 또한 연구되어지고 있다⁽¹⁻⁴⁾. 본 연구에서는 유체점성감쇠기에 대한 연구를 수행하였으며, 유체점성감쇠기(“감쇠기”로 표현)의 형상은 Fig. 1에 나타나 있다. 감쇠기의 기본적인 구성은 실린더, 피스톤, 축으로 구성되어지며, 실린더 내부에는 유체가 있어서 피스톤의 움직임에 따라 실린더 내부에서 좌우로 이동할 수 있도록 되었다. 유체는 피스톤과 실린더사이의 좁은 간격이나 피스톤에 구멍을 뚫어서 통과시키는 등 다양한 방법이 있다.

감쇠기는 구조물의 지지프레임을 상호 연결하여 장착되어진다. 만일 지진에 의하여 구조물이 가진되면 감쇠기는 가진 에너지를 흡수하여 구조물을 보호하게 된다. 지진에너지는 구조물에서 운동에너지, 탄성변형에너지, 소성변형에너지

외 추가적인 감쇠기에 의한 에너지로 소산되어진다⁽⁵⁾. 따라서 적절한 감쇠기의 적용은 구조물에 소성변형이 발생되지 않도록 하여 구조물의 안정성을 유지할 수 있다.

구조물의 안전을 위한 지진에너지의 소산을 위한 장치 중에서 감쇠기는 작은 크기에도 높은 에너지 소산률을 얻을 수 있으며, 작용한 이 후에도 계속 사용가능하며, 새로 세워지는 건축물이나 이미 건축된 구조물에도 적용이 가능하며, 수명이 35년이상 유지되는 장점들이 있다⁽⁶⁾. 하지만 감쇠기에 얻을 수 있는 에너지 소산량은 실린더의 크기, 유체의 특성, 유체통로의 간격, 피스톤의 속도 등에 따라서 달라진다. 본 연구에서는 이러한 감쇠기의 설계변수에 대한 특성을 연구하여 적절한 감쇠기를 설계하는 기법을 개발하고자 한다.

2. 감쇠기특성 및 저항력예측

2.1 에너지 소산량

감쇠기에서의 저항력(f_d)은 피스톤이 움직이는 속도(\dot{u})에 좌우되는데, 선형적이라면 저항력은 속도에 비례하겠지

* 경상대학교 항공기 부품기술연구센터(Research Center of Aircraft Parts Technology, Gyeongsang National University)

** 한국기계연구원 시스템 다이내믹스 연구실(Research Division of System Dynamics, Korea Institute of Machinery and Materials)

† 교신저자, E-mail : sycho@gnu.ac.kr

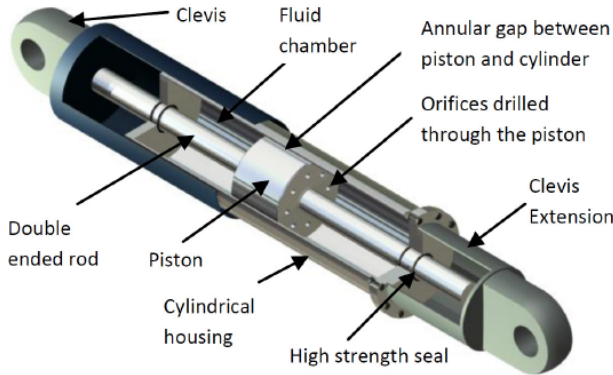


Fig. 1 Configuration of fluid viscous damper

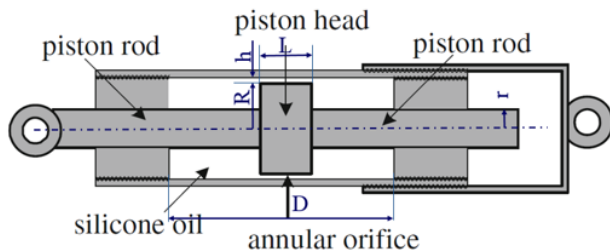


Fig. 2 Geometric parameters on the fluid viscous damper

만, 비선형적이라면 식 (1)과 같이 속도에 지수를 갖는 형태로 표현될 것이다.

$$f_d = C_0 \operatorname{sgn}(\dot{u}) |\dot{u}|^\alpha \quad (1)$$

식 (1)에서 C_0 는 감쇠계수를 의미하고, sgn 은 힘과 속도는 반대의 방향을 가지므로 이를 의미하는 사인함수이다. 지수 α 는 양의 값을 가지나 지진에 대한 장치로 사용되기 위하여서는 1이하의 낮은 값을 적용하는 것이 추천되었다⁽⁷⁻⁸⁾. 만일 지수 α 가 0이 되면 이 경우에는 단순마찰에 의한 저항이 된다.

$$u = u_0 \sin(\omega t) \quad (2)$$

만일 감쇠기에 조화변위가 식 (2)처럼 가하여 진다면 조화변위의 한 주기 동안에 발생하는 에너지의 소산량은 식 (3)과 같이 표현될 것이다.

$$E_d = \int^{2\pi/\omega} f_d du = \int^{2\pi/\omega} f_d \dot{u} dt \quad (3)$$

식 (3)의 적분결과는 식 (4)와 같이 감마함수⁽⁹⁾로 얻어졌다.

$$E_d = \frac{4P_{\max} u_0 (2^\alpha) \Gamma^2(1 + \frac{\alpha}{2})}{\Gamma(2 + \alpha)} \quad (4)$$

식 (4)에서 P_{\max} 는 최대저항력 $C_0(u_0\omega)^\alpha$ 을 의미한다. 만일 감쇠기가 선형감쇠($\alpha=1$)를 한다면 에너지 소산량 E_d 는 $3.142P_{\max}u_0$ 가 되지만, 비선형 감쇠($\alpha=0.5$)를 한다면 $3.496P_{\max}u_0$ 가 된다. 만일 지수 α 를 2까지 증가하면 E_d 는 $2.677P_{\max}u_0$ 로 줄어들게 된다. 따라서 감쇠기는 지수 α 를 1보다 적은 비선형 감쇠기가 되도록 설계하여야 함을 알 수 있다.

2.2. 저항력예측

감쇠기에서 피스톤의 움직임에 따라 피스톤의 이동방향에 있는 작동유체는 강한 압력을 받아서 이동방향과 반대방향으로 이동한다. 이 때 형성된 압력에 의하여 감쇠기에 강한 저항력이 발생하여 피스톤의 움직임을 느리게 한다. Fig. 2와 같이 감쇠기에서 유체는 피스톤과 실린더 사이의 좁은 간격(h)를 통하여 이동한다. 만일, 피스톤의 반경은 R 이며, 축의 반경은 r 이며, 피스톤 헤드의 길이는 L 로 설정하였다고 하면, 이 경우에 피스톤에 형성되는 저항력은 유체역학적으로 구할 수 있다.

작동유체의 동점성을 ν 라고 하여, 운동량 방정식을 단순화 하면 식 (5)와 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (5)$$

식 (5)에서 u 와 p 는 축방향의 속도와 압력이며, x 와 y 는 각각 축방향과 반경방향을 의미한다. y 축의 원점은 실린더의 내부벽면에 설정한다. 피스톤과 실린더 사이의 작은 간극에서의 유동은 작동유체의 유동속도에 비하여 피스톤의 이동속도가 상당히 저속이므로, 환형의 간극 벽면에서의 속도는 0으로 가정한다. 환형 간극에서의 압력구배는 피스톤 양단의 압력차와 피스톤 헤드의 길이로 설정한다.

$$\frac{\partial p}{\partial x} \cong -\frac{\Delta p}{L} \quad (6)$$

환형 간극에서의 정상상태 속도는 경계조건의 적용으로 식 (7)과 같이 얻어진다.

$$u = \frac{\Delta p}{2\mu L} (hy - y^2) \quad (7)$$

피스톤의 이동속도가 V 라면 이 이동으로 인하여 실린더의 반대방향으로 이동하여야 할 유량과 환형 간극을 통하여 나가는 유량과 일치하여야 한다.

$$\int_0^h u 2\pi R dy = V \pi (R^2 - r^2) \quad (8)$$

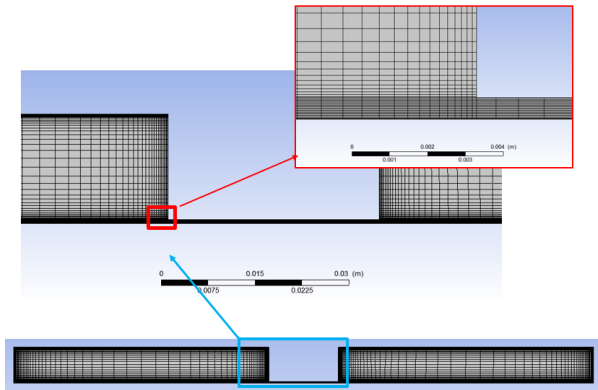


Fig. 3 Computation domain and grids

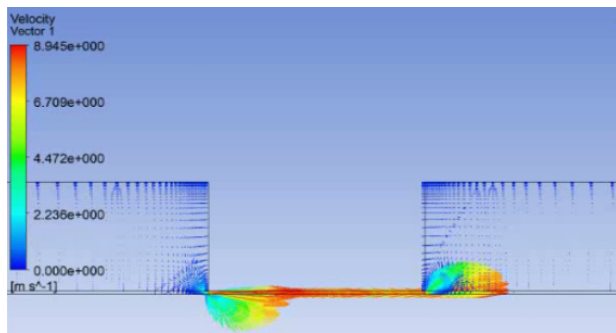


Fig. 4 Velocity vectors at 5hz movement

작동유체의 점성이 일정하다고 가정하면 식 (8)을 사용하여 실린더에서의 압력차 Δp 를 얻을 수 있다. 따라서 피스톤의 이동속도 V 에 대하여 피스톤에서의 저항력을 구할 수 있다.

$$f_d = \frac{6\mu L\pi(R^2 - r^2)^2}{h^3 R} V \quad (9)$$

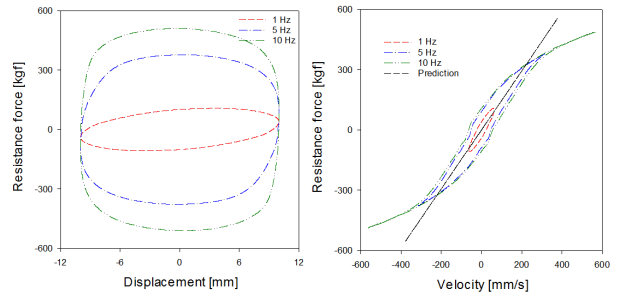
저항력의 예측을 비록 운동량방정식을 단순화하여 얻었지만, 작동유체의 점성이 일정한 경우에 피스톤의 이동속도에 대한 저항력을 예측할 수 있으므로 실제의 경우에 대하여 비교할 수 있는 참고사항으로써의 가치가 있다.

3. 수치해석 및 실험

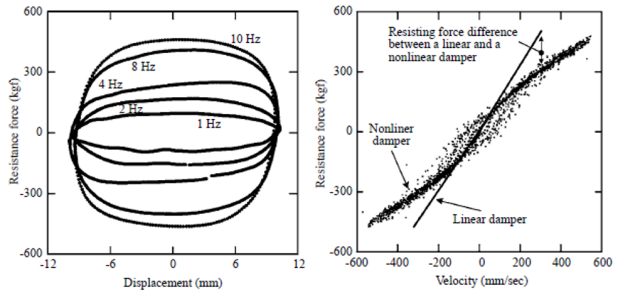
3.1 유동해석 및 비교

감쇠기가 효과적으로 작동하기 위하여는 저항력은 피스톤의 속도에 대하여 비선형적이어야 한다. 따라서 2.1절에서 선형적으로 예측한 저항력으로는 효과적인 감쇠기를 설계할 수 없다. 이를 위하여 수치해석적인 방법으로 감쇠기의 저항력을 예측하고자 한다.

3차원 압축성 운동량방정식을 사용하여 피스톤의 조화운동에 따른 비정상 과도상태의 결과로부터 피스톤의 저항력을 구한다. 계산영역은 감쇠기 실린더영역에서의 유동이 축



(a) computation



(b) experiment⁽¹⁰⁾

Fig. 5 Comparison of resistance forces

대칭이므로 원주방향으로 10도의 영역에서만 계산한다. Fig. 3은 계산영역과 격자를 보여주고 있다. 아래 부분의 전체 계산영역에서 하단은 실린더 내부의 벽면이고, 상부는 축의 표면이 되며, 가운데 부분은 피스톤의 표면이 된다. 따라서 비정상 계산에서 좌측과 우측의 실린더 벽면과 하단의 실린더 내부벽면은 고정하였으며, 그 외의 경계는 피스톤의 조화운동에 따라 이동하게 된다.

계산결과의 검증을 위하여 타 연구자의 실험결과를 참조하였다⁽¹⁰⁾. 사용된 작동유체는 동점성계수가 1000 cSt 인 실리콘 오일이 사용되었으며, 작동유체는 속도에 따라 전단담화(shear thinning)가 발생하는 비뉴턴 유체이므로 수치해석을 위하여 Carreau-Yasuda 모델을 적용하였다⁽¹¹⁾.

환형 간극에서는 작동유체가 층류이나 실린더로 들어가면 와류의 형성으로 난류가 발생할 수 있으므로 와류가 있는 유동의 예측에 많이 적용되는 SST 난류모델을 적용하였다. 계산에서 피스톤의 1 주기에 대하여 100회의 시간 간격으로 결과를 얻었다. 초기 작동으로부터 최소 5주기 이상의 계산을 수행하여 시간간격에 따른 정상상태가 도달한 결과로부터 저항력을 구하였으며 계산은 CFX V.17을 사용하였다.

Fig. 4는 피스톤이 5 hz로 조화운동을 하는 경우, 우측에서 좌측으로 이동할 때에 환형의 간극으로부터 작동유체의 이동에 따른 속도를 보여주고 있다.

Fig. 5에서는 실험의 결과⁽¹⁰⁾와 비정상 과도상태의 계산결과와 비교한 것이다. 전반적으로 피스톤의 변위나 속도에 대한 저항력의 결과는 상당히 일치함을 알 수 있다. 또한 선형으로 예측된 식 (9)의 저항력과 비교에서도 물리적으로 아

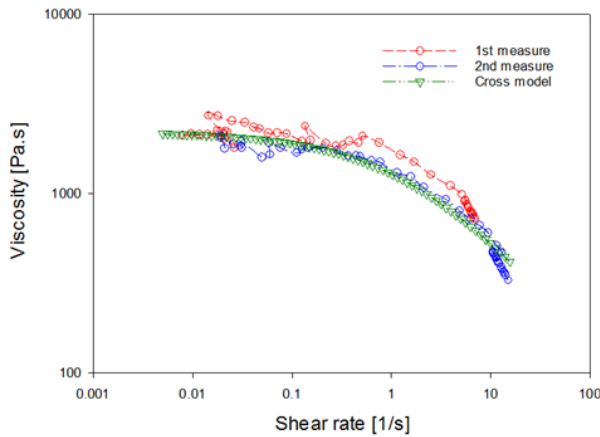


Fig. 6 Shear thinning of operating fluid

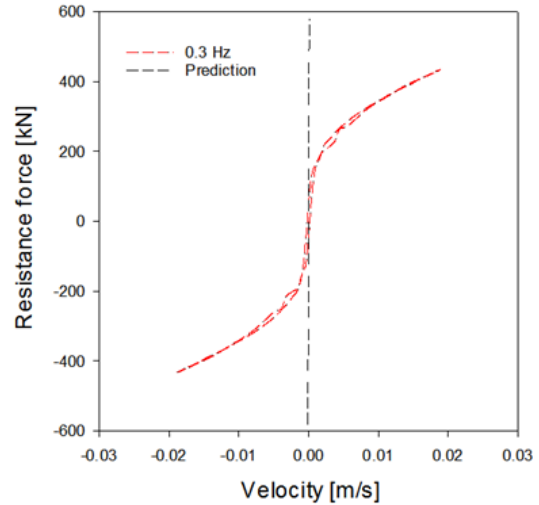


Fig. 8 Resistance force versus velocity

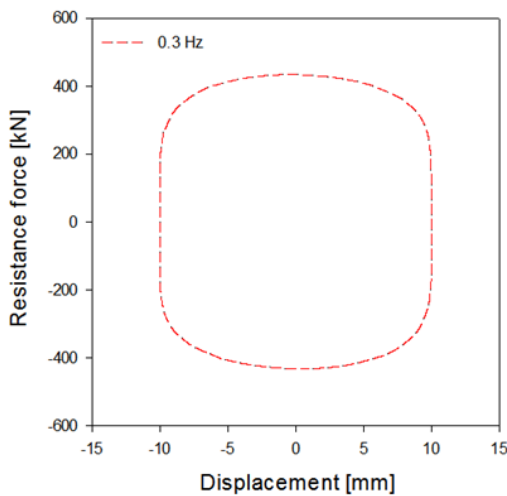


Fig. 7 Resistance force versus displacement

주 타당한 결과를 보여주고 있음을 알 수 있다. 실험에서 사용된 작동유체의 전단담화가 그다지 크지 않으므로 선형으로 예측된 결과와 동시에 표현되어 비교되고 있다. 아울러 변위에 대한 저항력과 속도에 대한 관계에서 지수 α 가 1이던 원에 가까운 관계를 나타내나 α 값이 1 이하가 되어서 사각형에 가까운 관계를 나타내고 있음을 알 수 있다.

3.2 감쇠기 설계

3.1절에서 수행된 수치해석의 방법으로 감쇠기의 치수를 변경하여, 실제 건축물이나 대형 교량과 같은 구조물에 적용할 수 있는 저항력이 500 kN 급의 감쇠기를 설계하고자 한다. 장착의 편이성과 경제성을 고려하여 감쇠기 실린더의 내경은 150mm 이하가 되도록 하였다. 여러 계산의 결과 감쇠기의 저항력에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 작동유체의 특성이었다. 따라서 동점성이 2×10^6 cSt 인 높은 점성을 갖는 실리콘오일을 선정하였으며, 점도계에서 전단담화의 특성을 측정하였다. Fig. 6은 본 연구에 적용된 작동유체의 전단담화의 특성을 보여준다.

전단담화의 특성에 대하여 본 연구에서는 Cross모델⁽¹²⁾을 사용하여 절대점성을 모델링하였다.

$$\mu = \frac{\mu_o}{1 + (0.6\dot{\gamma})^{0.65}} \quad (10)$$

식 (10)에서 μ_o 를 2,200 Pa.s 를 적용하였으며, $\dot{\gamma}$ 는 전단율을 의미한다. 모델링한 결과와 측정결과의 비교는 Fig. 6에서 보여주고 있다. 감쇠기의 피스톤이 0.3 hz의 조화운동을 한다고 가정하여 계산을 수행하였다. 최종적으로 감쇠기 실린더의 내경은 130 mm, 피스톤 헤드의 외경은 129.2 mm, 피스톤 헤드의 길이는 80 mm, 축의 직경은 60 mm로 설정하였다. 비정상 수치해석을 수행하여 얻어진 변위에 대한 저항력의 선도를 Fig. 7에서 보여주고 있다. 변위에 대한 저항력의 관계에 거의 사각형의 수준으로 변했음을 보여주고 있다.

Fig. 8은 피스톤의 속도에 대한 저항력을 보여주고 있으며 점선은 식 (9)의 선형 예측식으로 부터 얻어진 결과이다. 두 결과에서 많은 차이가 나타나고 있음을 참고로 보여주고 있는데, 실제 작동에서 작동유체의 전단담화로 속도의 증가에 따라 급격히 저항력이 낮아지고 있음을 알 수 있다. Fig. 8에서 얻어진 결과를 바탕으로 본 감쇠기에 대하여 피스톤의 속도(V)에 대하여 저항력의 관계를 회귀분석을 통하여 식 (11)과 같이 얻을 수 있었다.

$$f_d = 1795 V^{0.3586} \quad (11)$$

3.3 감쇠기 실험

3.2절의 결과를 바탕으로 감쇠기를 제작하였으며, 감쇠기의 끝단을 외부의 유압피스톤에 연결하여 변위를 주었을 때, 예측한 저항력이 얻어지는 지를 평가하였다. Fig. 9는 감쇠

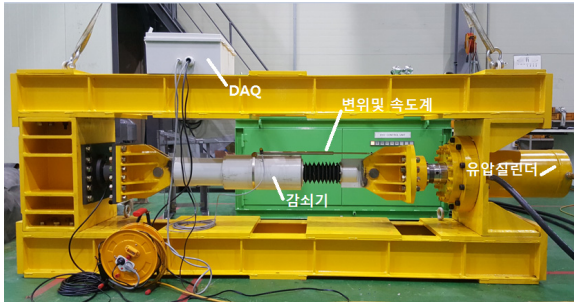


Fig. 9 Experimental facility

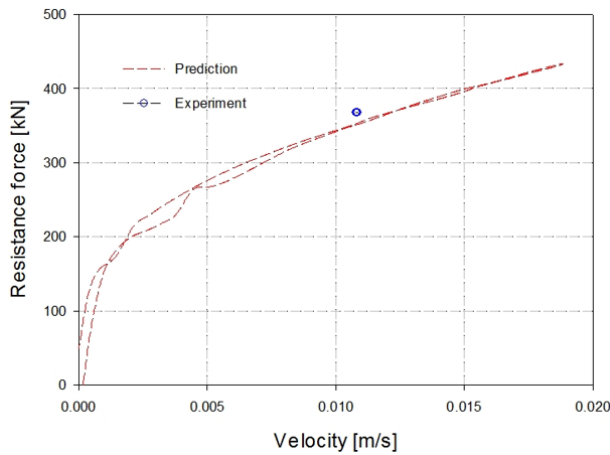


Fig. 10 Comparison of experimental result and predicted result

기의 성능을 측정하기 위한 시험장치를 보여주고 있는데, 감쇠기의 우측은 외부 유압피스톤에 연결되어 있으며, 감쇠기의 좌측은 로드셀에 연결되어 있어서 저항력을 측정할 수 있도록 하였다. 아울러 감쇠기의 상단에는 변위 및 속도계가 장착되어 있는 것을 볼 수 있다.

본 실험에 사용된 로드셀은 정격하중이 100톤이며, 정확도가 $\pm 0.2\%$ 보다 상급인 로드셀(모델: CHE-100A, 제작사: CAS)을 사용하였다. 변위 및 속도계는 최대 측정변위가 300 mm 이며, 측정의 정확도가 $\pm 0.2\%$ 보다 상급인 센서(모델: P117.300GKNU, 제작사: POSITEK)를 사용하였다.

Fig. 10에서는 측정된 결과와 예측한 결과를 비교한 그림을 보여주고 있다. 실험장치에서 감쇠기를 움직이기 위한 가동장치인 유압피스톤에서 충분한 가압력을 얻을 수 없는 결과로 인하여 한 점에 대하여서만 결과를 비교 할 수 있었다. 실험결과는 수치해석의 결과와 잘 일치하는 것으로 판단되어지며, 수치해석적인 방법으로 효과적인 감쇠기를 설계할 수 있음을 알 수 있었다. 차 후 실험장치의 보안을 수행하여 보다 많은 실험을 수행할 것이다.

4. 결 론

유체점성감쇠기는 지진에 의한 건축물이나 교량과 같은

대형 구조물의 보호를 위한 간단하면서도 수명이 긴 경제적인 장치이다. 본 연구에서는 효과적으로 감쇠기를 설계하기 위한 방법으로 비정상 수치해석을 수행하였으며, 이 결과들이 실험결과와 잘 일치함을 확인하였다. 따라서 건축물에 감쇠기를 장착하는 방법의 변경이나, 지진의 가진력에 적절히 대응할 수 있는 감쇠기를 설계할 수 있게 되었다. 차 후 설계 변수에 따라 최적의 감쇠기를 설계할 수 있는 방안에 대하여 추가적인 연구를 수행할 예정이다.

References

- (1) Kandemir, E. C. and Mazda, T., 2011, "Nonlinear Viscous Damper Application to Arch Bridge," JCES, Vol. 1, No. 3, pp. 127~131.
- (2) Lin, W. H. and Chopra, A. K., 2002, "Earthquake Response of Elastic SDF Systems with Nonlinear Fluid Viscous Dampers," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 31, pp. 1623~1642.
- (3) Hwang, J. S. and Tseng, Y. S., 2005, "Design Formulations for Supplemental Viscous Dampers to Highway Bridges," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 34, pp. 1627~1642.
- (4) Lin, W. H. and Chopra, A. K., 2003, "Asymmetric One-story Elastic Systems with Nonlinear Viscous and Viscoelastic Dampers: Simplified Analysis and Supplemental Damping System Design," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 32, pp. 579~596.
- (5) Uang, C. M. and Bertero, V. V., 1990, "Evaluation of Seismic Energy in Structures," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 19, pp. 77~90.
- (6) Lee, D. and Taylor, D. P., 2001, "Viscous Damper Development and Future Trends," The Structural Design of Tall Building, Vol. 10, pp. 311~320.
- (7) Asher, J. W., Young, R. P. and Ewing, R. D., 1996, "Seismic Isolation Design of the San Bernardino County Medical Center Replacement project," Journal of Structure and Design of Tall Buildings, Vol. 5, pp. 265~279.
- (8) Rodriguez, S. Seim, C. and Ingham T., 1994, "Earthquake Protective Systems for the Seismic Upgrade of the Golden Gate Bridge," Proceeding of the Third U.S-Japan Workshop on Protective Systems for Bridges, Berkeley, CA.
- (9) Symans, M. D. and Constantinou, M. C., 1998, "Passive Fluid Viscous Damping Systems for Seismic Energy Dissipation," Journal of Earthquake Technology, Vol. 35, No. 4, pp. 185~206.
- (10) Hou, C. Y., Hsu, D. S., Lee, Y. F., Chen, H. Y. and Lee, J. D., 2007, "Shear Thinning Effects in Annular Orifice Viscous Fluid Dampers," Journal of the Chinese

- Institute of Engineers, Vol. 30, No. 2, pp. 275~287.
- (11) Carreau, P. J., 1972, "Rheological Equations from Molecular Network Theories," Transactions of the Society of Rheology, Vol. 16, No. 1, pp. 99~128.
- (12) Cross, M. M., 1965, "Rheology of Non-Newtonian Fluids: a New Flow Equation for Pseudoplastic Systems," J. Colloid Science, Vol. 20, pp. 417~437.