

공기 스프링 댐퍼 시스템(ASDS)의 개발

Development of Air Spring Damper System(ASDS)

김동백^{1*} · 박흥식²Dong Baek Kim^{1*}, Heung Sik Park²

¹Professor, Construction Engineering Research Institute/ Department of Civil & Environment Engineering, Hankyong National University, An Seong, Republic of Korea

²Lecturer, Construction Engineering Research Institute/ Department of Civil & Environment Engineering, Hankyong National University, An Seong, Republic of Korea

*Corresponding author: Dong Baek Kim, dbkim@hknk.ac.kr

ABSTRACT

Purpose: The Air Spring Damper System (ASDS) is proposed when existing concrete structures that have not been seismic resistant for economic and technical reasons or low-rise concrete structures that are difficult to earthquake. **Method:** To conduct a study on the damping force antigen in the kinetic equation of free vibration, we analyze whether this device has damping ability as a damper experimentally and theoretically, and examine the possibility of field application. **Result:** The air damper system is considered to be more economical than steel hysteresis dampers even if the number of dampers increases due to its easy manufacture and construction and low restrictions on shape, size, material, etc. **Conclusion:** In an air spring damper system, it is essential to reduce the diameter of the air inlet/outlet hole to improve the damping ratio, and in this case, if the diameter exceeds a certain lower limit, consideration of the compressibility of air is required, so further research is needed.

Keywords: Seismic Resistant, Free Vibration, Damping Force, Damping Ratio, Compressibility of Air

요약

연구목적: 경제적, 기술적 이유로 내진설계가 되지 않은 기존의 콘크리트 구조물이나 내진설계나 면진 시공이 어려운 저층의 콘크리트 구조물이 지진력을 받을 때, 액체가 아닌 공기를 이용한 감쇠장치인 공기 스프링 댐퍼 시스템(Air Spring Damper System, ASDS)을 제안하고 한다. **연구방법:** 자유진동의 운동방정식에서 감쇠력(Damping Force) 항인 $f_D = c\dot{v}$ 에 대한 연구를 수행하고자 하며, 이 장치가 댐퍼로서의 감쇠능력을 갖는 지에 대하여 실험적, 이론적으로 분석하며 현장적용에 대한 가능성 여부를 검토한다. **연구결과:** 에어 댐퍼 시스템은 제작 및 시공이 간편하고 형상, 크기, 재료 등에 제한이 적어서 댐퍼의 개수가 증가하더라도 강제 이력형 댐퍼에 비하여 월등히 경제적이다 사료된다. **결론:** 공기 스프링 댐퍼 시스템에서는 감쇠비를 향상시키기 위하여 공기 입출용 구멍의 직경을 줄이는 것이 필수이지만, 직경이 어느 이하의 크기로 줄어들면 공기의 압축성에 대한 고려가 필요하므로 공기 입출용 구멍의 직경과 공기 압축성의 상관성에 대하여 추가적인 연구가 필요하다.

핵심용어: 내진설계, 자유진동, 감쇠력, 감쇠비, 공기의 압축성

Received | 2 November, 2021

Revised | 6 December, 2021

Accepted | 8 December, 2021

OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

국내 지진 피해 사례의 대부분이 내진설계가 되어있지 않은 중·저층 RC 구조물인데(Kim et al., 2019), 경제적인 부담으로 실시 가능성이 희박하며, 내진설계가 적용되지 않은 민간 소유 RC 구조물의 내진보강을 지원하기 위하여 시공이 쉽고 경제적인 내진 보강방법이 필요한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 경제적 및 기술적 이유로 내진설계가 되지 않은 저층의 콘크리트 구조물이 지진력을 받을 때, 지진력의 상당 부분을 소산하고 구조물의 파괴를 지연하여 피신할 수 있는 시간을 갖게 할 수 있는 공기 스프링 댐퍼 시스템(Air Spring Damper System, ASDS)를 제안한다. 또, 이 장치가 댐퍼로서의 안정성(Safety)과 감쇠능력을 갖는지에 대하여 실험적 및 이론적으로 분석하며 현장적용에 대한 가능성 여부를 검토하고 후속의 댐퍼 연구를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

연구내용 및 방법

본 연구에서 제안하고자 하는 공기 스프링 댐퍼 시스템(ASDS)은 구멍이 있는 실린더와 피스톤을 이용하여 공기 배출량과 소요된 시간을 측정한다. 후 감쇠비를 확인하고 이를 중·저층 철근콘크리트 구조에 적용하여 지진에 대한 안전성(Safety)을 확보하고자 하는 개념이다. 또한, 공기 스프링 댐퍼 시스템은 동역학적인 관점에서 볼 때 단 질량 집중 단 자유도 계의 강제기초 병진운동 시스템에 해당된다(Clough et al., 2014). 따라서, 공기 스프링 댐퍼 시스템을 병진운동으로 가정한다면, 이 시스템은 Fig. 1과 같이 생각할 수 있다. 구조물의 질량을 m , 시간의 함수로서 변위를 $v(t)$, 스프링 상수를 k , 감쇠 계수를 c 라 할 때, 관성력(Inertia Force) 항은 $f_I = m\ddot{v}^t$, 감쇠력(Damping Force) 항은 $f_D = c\dot{v}$, 탄성력(Elastic Force) 항은 $f_S = kv$ 이라 하면, 병진운동을 받는 단 자유도 집중 질량계의 운동방정식에서 $\ddot{v}^t = \ddot{v}_g + \ddot{v}$ 이므로 유효 지진력은 $P_{eff} = -m\ddot{v}_g$ 이며 이때의 운동방정식은 식 (1)과 같이 된다. 관성력(Inertia Force) 항을 $f_I = m\ddot{v}^t$, 감쇠력(Damping Force) 항을 $f_D = c\dot{v}$, 탄성력(Elastic Force) 항을 $f_S = kv$ 이라 하면, Fig. 1과 같은 시스템의 응답 스펙트럼 개념을 정의하기 위한 구조물의 운동방정식은 식 (2)과 같다.

$$f_I + f_D + f_S = P_{eff} \tag{1}$$

$$m\ddot{v}^t + c\dot{v} + kv = P_{eff} \tag{2}$$

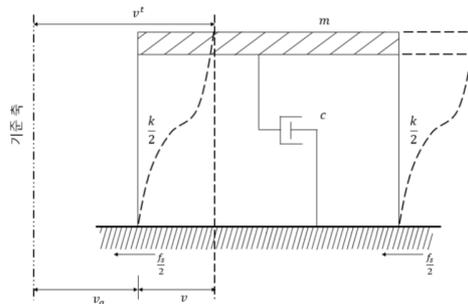


Fig. 1. Support excitation at single degree of freedom

공기 스프링 댐퍼 시스템의 성능시험

에어 스프링 댐퍼 시스템(ASDS)의 개요

본 연구에서 사용한 ASDS 시험체의 개략적인 제원은 최대직경 240mm, 최소직경 153mm, 높이 105mm인 고무튜브 2개로 구성되어 있으며 Air Tank 로 공기를 배출하기 위하여 시험체에는 각각 6mm, 8mm, 10mm, 12mm, 14mm, 16mm, 18mm, 20mm, 22mm, 24mm의 구멍이 있다. 또한, 시험체에는 고무 튜브에서 빠진 공기를 저장할 별도의 Air Tank가 설치되어 있고, 여기에도 각각 6mm, 8mm, 10mm의 구멍이 있으며 튜브에서 배출된 공기가 여기로 모인다. 재하(載荷, Loading)는 하중제어 방식으로 수행했으며, 하중단계는 122.5N을 기준으로 여기에 100N씩 522.5N까지 5단계로 진행하였다. 각각의 구멍 직경을 가진 시험체에 대하여, 하중 단계별로 높이가 210mm인 시험체 내부의 공기가 모두 배출될 때까지의 시간을 측정하고 이 결과를 공기의 배출속도로 환산하여 시험체의 감쇠계수를 알고자 한다. 물론, 여기서 실린더 내부의 공기는 원하는 만큼 전부 또는 일부만 Air Tank로 배출할 수 있다.

공기 스프링 댐퍼와 Air Tank의 재료 및 제원

ASDS는 최대직경 240mm, 최소직경 153mm, 높이 105mm인 고무 튜브 2개로 구성되어 있으며, 공기를 배출하기 위한 Air Tank는 변형이 발생하지 않는 300mm×300mm×200mm의 금속 상자로 제작하였다. 본 연구에서는 시험체의 최대 높이인 210mm까지 공기를 배출할 수 있도록 Air Tank를 제작하였지만, 예상되는 수평변위의 크기에 따라 공기의 배출량을 조절할 수 있도록 Air Tank의 크기는 변경할 수 있다. 또한, 각 시험체에는 직경이 각각 6mm, 8mm, 10mm, 12mm, 14mm, 16mm, 18mm, 20mm, 22mm, 24mm의 공기 입출용 구멍이 있으며, 각각의 Air Tank에도 같은 크기의 공기 입출용 구멍이 있는데, Air Tank의 물리적 특성과 제원은 Fig. 2 및 Fig. 3과 같다.

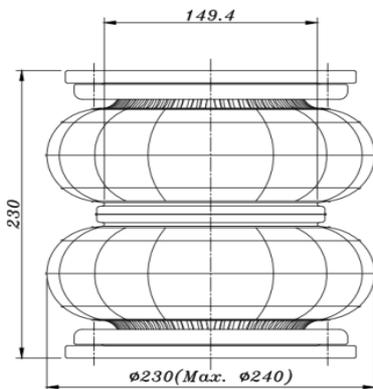


Fig. 2. Dimension and details of ASDS

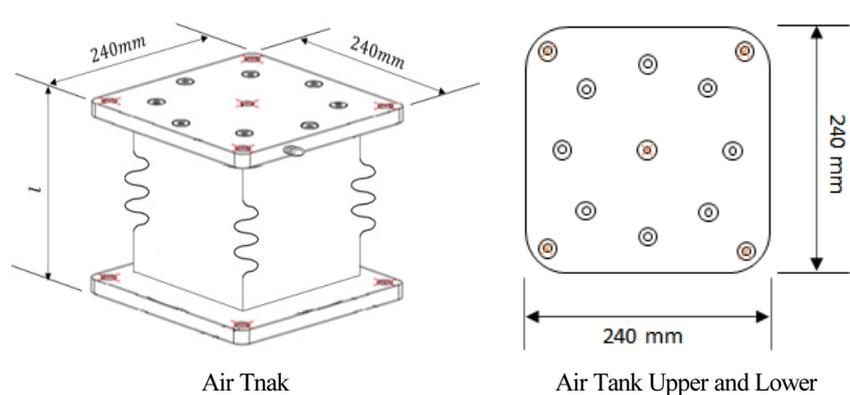


Fig. 3. Dimension and details of air tank

에어 스프링 댐퍼 시스템(ASDS)의 제작

가로 300mm, 세로 300mm, 두께 16mm인 상하 플레이트 사이에 최소폭 150mm, 최대폭 230mm, 높이 115mm인 탄성고무 재질의 튜브 타입 에어 스프링 2개를 직렬로 연결하여 높이가 230mm인 ASDS의 기본형상을 만들었다. 각각의 ASDS에

는 에어 탱크(Air Tank)가 공존하며, 에어 탱크의 용량은 댐퍼의 공기 배출량을 0%에서 100%까지 자유롭게 조절할 수 있게 설계되었다. ASDS의 공기 입출용 구멍의 직경은 최소 6mm부터 2mm 간격으로 24mm까지 10가지 경우를 계획했으며, 하중 단계는 125N을 기준으로 하여 단계별로 100N을 증가시키는 방법으로 5단계로 설정하고, 각 하중 단계별 공기의 입출량에 대한 시간을 측정할 수 있도록 시험체를 제작하였다(Hyeong Seol Book Company, 2015). 또한, Air Tank는 300mm×300mm×200mm×8mm의 금속으로 제작하였으며, ASDS에 연결하여 시험체를 구성할 수도 있고 ASDS와 분리하여 설치할 수도 있다. 각각의 ASDS의 상부 및 하부 플레이트에는 Air Tank 및 액츄에이터 또는 지그(Zig)에 연결하기 위한 직경 25mm의 볼트 구멍이 4씩 존재하며 Air Tank에도 동일한 직경의 볼트 구멍이 있으며, 이 시험체의 설계도면과 제작된 형상은 다음의 Fig. 4와 같다.

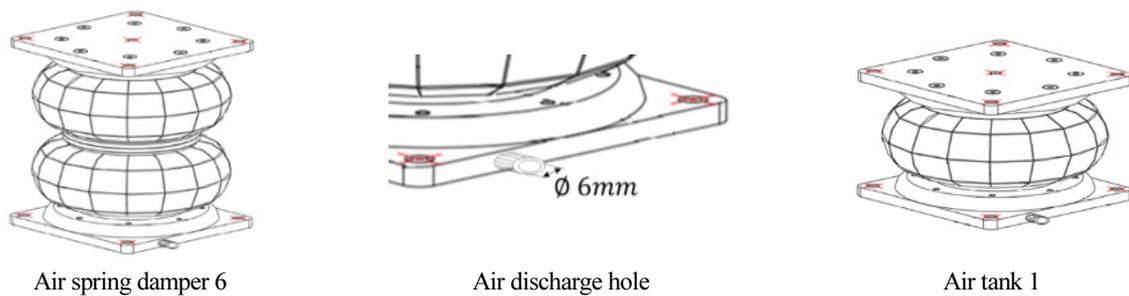


Fig 4. Dimension of ASDS with 6mm air hole

실험결과와 분석 및 고찰

각 실험체가 210mm 변위를 겪을 때의 시간과 시간의 3회 평균치 및 평균속도를 정리하면 다음의 Table 1에 속도차(Δx)로 정리하였으며, 이러한 결과를 그래프로 나타내면 Fig. 5와 같다. 동적 운동방정식의 감쇠력 항인 힘과 속도의 관계($f_D = c\dot{v}$)는 이론적으로 직선이어야 하는데, 실험 결과에서 보는 바와 같이 실험체의 하중 - 속도 관계는 직선으로 취급해

Table 1. Damping Coefficient, Required Numbers and Damping Ratio of Each Specimen

시험체	항목	하중차 Δy	속도차 Δx	감쇠계수 c	한계감쇠 c_c	댐퍼1개의감쇠비 ξ_1	소요 댐퍼수 N_D	댐퍼의 감쇠비
ASDS6		622.5	105	5.929	9,053	0.000655	275	0.180
ASDS8		622.5	145	4.293	9,053	0.000474	380	0.180
ASDS10		622.5	161	3.866	9,053	0.000427	422	0.180
ASDS12		622.5	178	3.497	9,053	0.000386	466	0.180
ASDS14		622.5	238	2.616	9,053	0.000289	623	0.180
ASDS16		622.5	278	2.239	9,053	0.000247	729	0.180
ASDS18		622.5	309	2.015	9,053	0.000223	807	0.180
ASDS20		622.5	331	1.881	9,053	0.000208	865	0.180
ASDS22		622.5	381	1.634	9,053	0.00018	1,000	0.180
ASDS24		622.5	441	1.412	9,053	0.000156	1,154	0.180

도 무리가 없다고 판단되며, 이러한 사실은 공기 배출구 직경 6mm 이상에서는 공기의 압축성이 실험 결과에 미치는 영향은 미미하다는 것을 의미한다.

하중-속도의 관계도에서 그래프의 기울기는 감쇠계수(c)를 의미하는데, 공기 입출 구멍이 클수록 직선의 기울기는 감소함으로 직경이 클수록 감쇠계수가 작아짐을 의미한다. 따라서, 공기 입출구의 직경이 작을수록 그래프의 기울기가 커짐으로 이론적으로는 공기 입출구의 직경이 작을수록 감쇠계수(c)가 커지는데, 속도(v)와 감쇠계수(c)의 관계를 그래프로 나타내면 Fig. 6과 같다.

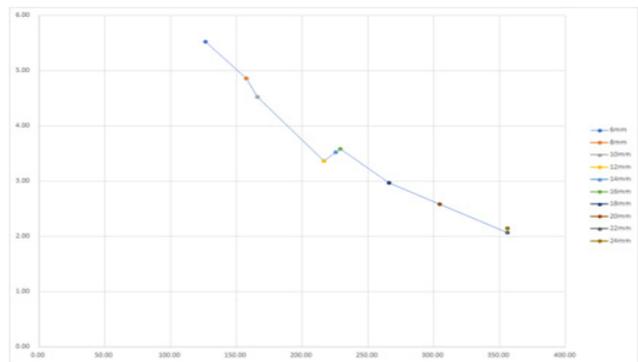
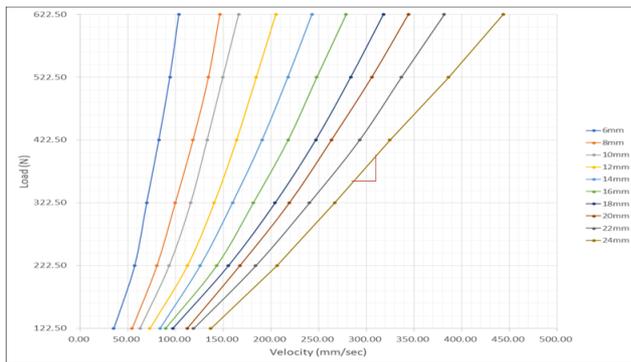


Fig. 5. Load-velocity diagram of 10 specimens with each air hole Fig. 6. Diagram of load-velocity with damping coefficients

댐퍼의 감쇠성능에 대한 해석적 검토

비감쇠 단자유도 진동체

길이 30m, 폭 15m, 높이 9m 3층 철근콘크리트 구조물을 해석적으로 검토하기 위한 예제 구조물로 선택하면, 이 구조물의 자중과 고정하중은 약 $W=2,120\text{ton}$ 이며(Kim et al., 2017), 이 구조물에 각각의 다른 직경의 공기 구멍을 가진 ASDS를 설치했을 때, 해석적 검토과정은 다음과 같다.

저층 RC 구조물 주기는 일반적인 값으로 $T=0.3(\text{sec})$ 로 가정할 수 있으며, 예제 구조물을 집중질량의 단자유도계로 설정하면 이때 구조물의 고유 진동수(Natural Frequency)는 다음과 같다.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{0.3} = \frac{20\pi}{3} (\text{rad/sec}) = 20.93(\text{rad/sec})$$

감쇠비 설정

감쇠비(ξ)의 크기가 댐퍼의 효율을 의미한다면, 본 연구에서 사용하는 댐퍼(ASDS)는 시공성이나 경제적인 면에서는 장점이 있지만, 감쇠 효율은 우수하지 못하다고 예상하여 감쇠비를 $\xi < 20\%$ 로 제한한다.

예제 구조물의 내진에 필요한 댐퍼의 개수는 다음과 같이 계산할 수 있다. 감쇠계수 c 는 실험에서 시험체의 힘-속도의 그래프를 직선으로 가정할 때 기울기에 해당하는 값이며, 임계 감쇠계수 c_c 은 다음의 식(3)과 같이 구할 수 있다.

$$c_c = 2m\omega = 2\sqrt{m \cdot k} \tag{3}$$

공기 입출 구멍의 직경이 6mm인 시험체(ASDS6) 1개의 감쇠계수(c_1)는 Fig. 5 그래프의 기울기로부터

$$c_1 = \frac{622.5}{105} = 5.93(N.sec/mm), c_c = 2\sqrt{m \cdot k} = 2m\omega = 2 \times 216.3 \times 20.93 = 9,053(N.sec/mm)$$

이때, 감쇠비는 다음의 식 (4)과 같이 계산할 수 있다.

$$\xi = c/c_c, \xi_1 = c/c_c = \frac{5.93}{9,053} = 6.55 \times 10^{-4} \tag{4}$$

댐퍼의 효율을 낮게 가정하여 감쇠비를 0.2이하인 0.18로 할 때, 필요한 댐퍼의 개수 N_D 는 다음의 식 (5)과 같이 계산할 수 있다. 위의 방법들로 각 시험체 10개에 소요되는 댐퍼 수, 속도, 감쇠계수, 한계 감쇠, 감쇠비 등과 함께 시험결과를 모두 정리하면 다음의 Table 1과 같다.

$$N_D = \frac{\xi}{\xi_1} \tag{5}$$

상대응답변위이력(v)

Fig. 1과 같이 지반에 변위가 발생하면 이때의 지반변위 이력은 다음과 같이 나타낼 수 있다

$$v_g = y_0 \sin \bar{\omega} t \tag{6}$$

이 시스템에서 구조체가 진동할 때의 응답변위를 v^t 라고 하면 상대변위는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v = v^t - v_g \tag{7}$$

동적 운동방정식으로부터 이 시스템의 상대응답변위 v 를 산정하면,

$$m\ddot{v} + c(\dot{v}^t - \dot{v}_g) + k(v^t - v_g) = 0, m(\ddot{v}^t - \ddot{v}_g) + c(\dot{v}^t - \dot{v}_g) + k(v^t - v_g) = -m\ddot{v}_g \tag{8}$$

$$m\ddot{v} + c\dot{v} + kv = -m\ddot{y}_g = F_{eff}(t), m\ddot{v} + c\dot{v} + kv = my_0\bar{\omega}^2 \sin \bar{\omega}t = F_0(\text{amplitude}) \tag{9}$$

여기서 ω 는 고유진동수, $\bar{\omega}$ 는 작용하중 진동수, β 는 진동수비라 할 때

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}, \omega^2 = \frac{k}{m}, \beta = \frac{\bar{\omega}}{\omega}, \frac{m\bar{\omega}^2}{k} = \frac{\bar{\omega}^2}{\omega^2} = \beta^2 \text{이며, 식(9)의 미분방정식을 풀면 } v(t) \text{는 다음의 식(10)과 같다.}$$

$$v = \frac{my_0\bar{\omega}^2/k \sin(\bar{\omega}t - \theta)}{\sqrt{(1 - \beta^2)^2 + (2\beta\xi)^2}} = \frac{m/k\bar{\omega}^2 y_0 \sin(\bar{\omega}t - \theta)}{\sqrt{(1 - \beta^2)^2 + (2\beta\xi)^2}} \text{ 또는 } \frac{v}{y_0} = \frac{\beta^2 \sin(\bar{\omega}t - \theta)}{\sqrt{(1 - \beta^2)^2 + (2\beta\xi)^2}} \tag{10}$$

또, 식(10)에서 지반 최대변위(y_0)에 대한 응답변위의 최대비(증폭비)를 계산하면 다음의 식(11)과 같다.

$$\frac{v_{\max}}{y_0} = \frac{\beta^2}{\sqrt{(1 - \beta^2)^2 + (2\beta\xi)^2}} \tag{11}$$

질량이 m , 스프링 강성(스프링 계수)이 k 인 진동체의 고정지점에 일정한 진폭(y_0)과 진동수($\bar{\omega}$)를 갖는 조화함수 형태의 지반변위를 가하면 진동체에는 진폭 v 의 상대변위(층변위/지반변위)가 발생한다. 이때 진동체의 스프링에 발생하는 최대 힘(지진력)은 $F_{EQ} = kv$ 이며, 만약 지반운동에 대한 상대변위 v 를 감소시키면 진동체에 발생하는 지진력을 감소시킬 수 있으므로, 댐퍼를 사용하여 감쇠비를 증가시키면 상대변위의 크기를 줄일 수 있다.

Fig. 7은 감쇠비($\xi = c/c_c$)가 0에서 0.5까지 0.05씩 변하는 10단계, 진동수비($\beta = \bar{\omega}/\omega$)를 0에서 5까지 6단계로 변화시킬 때 진동체의 상대변위증폭비(v/y_0)를 진동수비(β)에 대하여 나타낸 것이다. 진동수비가 1근처(공진)에서 상대변위 증폭비가 가장 크며 1 근처에서 멀어지면 급격히 감소한다. 특히, 일반적인 콘크리트 구조체의 경우 감쇠비 $\xi = 0.05$ 정도인데, 감쇠비가 0.05일때의 상대변위 증폭비가 가장 크고 감쇠비가 증가하면 상대변위 증폭비는 크게 감소한다. 따라서, 지반

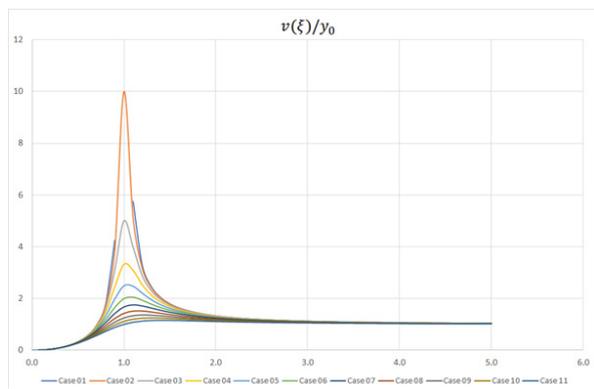


Fig. 7. Diagram of v_{ξ}/y_0 with variation of damping ratio

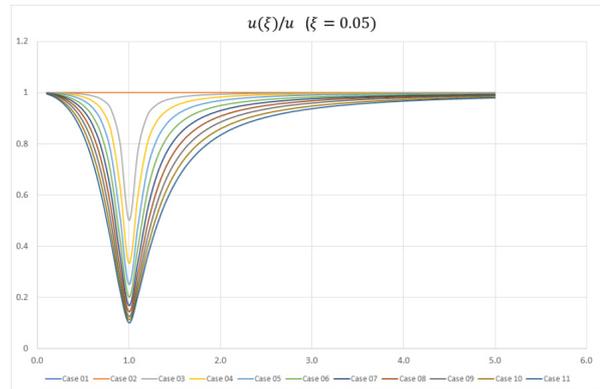


Fig. 8. Relative Displacement Ratio of $\xi = 5\%$ with Relative Displacement Ratio of Damping Ratio

진동수와 유사한 진동수를 갖는 구조체에 댐퍼를 설치하면 상대변위를 크게 줄여서 발생하는 지진력을 줄일 수 있음을 알 수 있다. Fig. 8은 5% 감쇠비의 상대변위증폭비에 대하여 여타 감쇠비를 갖는 경우의 상대변위증폭비를 정규화($v(\xi)/v(\xi=0.05)$)하여 나타낸 그림이며, 댐퍼를 적용하여 감쇠비가 증가된 구조물의 상대변위가 일반 콘크리트 구조체에 비하여 어느 정도 감소하는지 그 효과를 비로 정량화한 그림이다. 이 경우도, $\beta = 1$ 인 공진 부근에서의 감쇠효과가 가장 크고 감쇠비가 증가할수록 감쇠효과가 증가하는 것을 알 수 있다.

예제 구조물의 동적거동 해석

해석개요 및 지진파의 생성

길이30m, 폭15m, 높이 9m의 3층 예제 구조물에 선택된 댐퍼(ASDS6)을 설치하고, 댐퍼의 성능을 파악하기 위하여 동적 해석을 실시한다. 각 층을 Element1, Element2, Element3로 모델링하고 각 층의 상단을 Node2, Node3, Node4로 모델링하였으며(Fig. 9), 생성된 지진하중 EQ1, EQ2, EQ3가 각각 작용할 때 실험체(ASDS)에 대하여 각 층의 최대변위(Max.)와 최소변위(Min.)를 측정하여 그 결과를 분석하였다.

S2지반의 설계응답스펙트럼에 부합하도록 시간이력 해석에 필요한 입력 지진파는 “내진설계 일반(KDS 17 10 00)” 규정에 따라 최소 3개 이상 사용하되 설계 스펙트럼을 대상으로 스케일링 하여 사용하였고, 3차원 해석의 경우에는 식 (12)와 같이 서로 직교하는 2개의 지진파 한 쌍을 동시에 가진 해(Solution)이어야 하며, 2개의 직교하는 지진파를 설계 스펙트럼과 비교해야 하는데, 직교하는 지진파 한 쌍을 세트로 하여 최소 3개 이상의 세트에 대한 응답 스펙트럼을 각각 구하고 한 쌍의 응답 스펙트럼에 대해 SRSS 스펙트럼을 작성한다.

$$f_{env}(t) = \begin{cases} (t/t_1)^2 & (t < t_1) \\ 1 & (t_1 \leq t < t_2) \\ e^{-c(t-t_2)^2} & (t_2 \leq t) \end{cases} \quad (12)$$

본 연구에서는 인공지진 생성 소프트웨어인 SIMQKE를 사용하여 Fig. 10과 같이 설계 스펙트럼으로부터 지반 가속도 또는 입력지반운동을 생성하였으며 생성된 SRSS 스펙트럼들의 평균값이 설계 스펙트럼과 비교하여 작지 않도록 스케일을 조

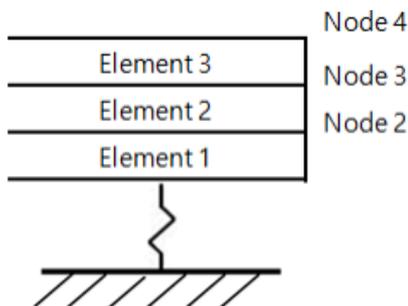


Fig. 9. Modeling of Example Structure

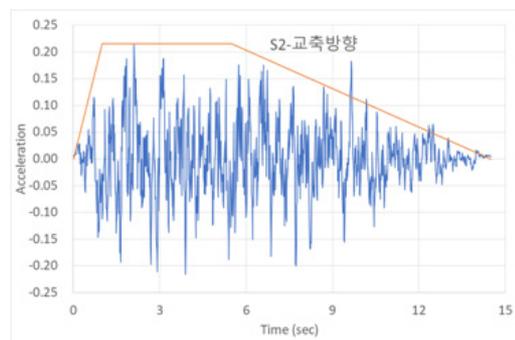


Fig. 10. Generation of artificial seismic waves

절한 후 동적거동 해석을 수행하였다.

해석결과의 분석

선택된 댐퍼(실험체 ASDS6)를 예제 구조물에 적용하여 동적거동 해석을 실시한 결과, 댐퍼를 설치하지 않은 경우(Case1)는 3층의 최대절대변위가 15.2mm이며, 감쇠비 18%인 시험체(댐퍼)를 모두 3층에 설치하였을 경우(Case 2)는 3층의 최대변위가 5.7mm로서 비감쇠대비 효과는 37.5%로 나타났다. 또한, 댐퍼를 각 층에 6%씩 나누어 설치하였을 경우는 3층의 최대변위가 8.35mm로서 비감쇠 대비 효과는 54.9% 수준이다. 그러나, 감쇠비 18%인 댐퍼를 모두 1층에 설치하였을 경우는 3층의 최대 절대변위가 14.42mm로서 비감쇠 대비 효과는 94.7% 수준으로 효율이 가장 저조하므로 1층에 모두 설치하는 것은 비효율적이다. 따라서, 현장에서의 댐퍼를 설치할 때 시공성을 고려하면 1층에 댐퍼를 설치하는 것이 합리적이지만 감쇠효과가 크지 않아 가능하면 3층에 댐퍼를 설치하는 것이 바람직하다. 이러한 결과를 정리하면 Table 2와 같으며, 3층 건물 내부에 댐퍼를 설치하는 실제적인 방안과 이때의 감쇠효과에 대한 분석은 추가연구가 필요하다.

Table 2. Minimum and Maximum Displacements of 3rd Floor with Damping Condition

해석 CASE	감쇠조건	최대절대변위 (mm)	비감쇠 대비	비감쇠대비효율	
1	비감쇠	1층	2.75	-	-
		2층	8.48	-	-
		3층	15.22	-	-
2	-	1층	1.10	40.0%	60.0%
	-	2층	3.23	38.1%	61.9%
	18%	3층	5.70	37.5%	62.5%
3	6%	1층	1.58	57.5%	42.5%
	6%	2층	4.69	55.3%	44.7%
	6%	3층	8.35	54.9%	45.1%
4	-	1층	2.59	94.2%	5.8%
	-	2층	8.01	94.5%	5.5%
	18%	3층	14.42	94.7%	5.3%

결론

본 연구에서는 액체 대신 공기를 매질로 사용하여 에어 스프링 댐퍼 시스템(ASDS)을 개발하고, ASDS에서 공기 입출 시 저항을 나타내는 감쇠력 특성을 실험을 통하여 검증하였으며, 3층의 콘크리트 건물을 대상으로 하여 ASDS의 설치 위치에 따른 감쇠효과를 응답이력 해석을 수행하여 분석하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 중-저층 건물의 내진 보강용으로 시공성이 우수하고 저가인 ASDS를 개발하였다.
- 2) ASDS의 감쇠력은 공기 입출 시의 저항력으로 표현되는데 이는 공기 입출입 구멍의 크기와 연관이 있으므로, 감쇠계수를 산정하기 위하여 공기 입출용 구멍의 직경을 변수(6~24mm)로 하는 ASDS를 제작하여 성능실험을 수행한 결과,

공기 입출용 구멍 크기가 작을수록 감쇠계수는 증가하며 공기구멍이 24mm일 때 최저 1.412($N \cdot sec/mm$)에서 6mm 일 때 최고 5.929($N \cdot sec/mm$)로 증가하였다.

- 3) 진동주기가 3초인 구조체의 임계감쇠계수(C_{cr})에 ASDS6 1개의 감쇠비(ξ_1)를 산정하면 6.55×10^{-4} 로 상당히 작음 데, 이는 점성이 없는 공기를 사용하였기 때문이다. 18%의 감쇠비를 얻기 위해 필요한 에어댐퍼의 개수는 275개로 많지만, 본 연구에서 개발한 에어댐퍼는 제작이 쉽고, 형상, 크기, 재료 등에 제약이 적기 때문에 다수의 ASDS를 묶어서 적용하는 것이 가능하므로 경제적이다.
- 4) 3층 RC건물을 대상으로 하여 감쇠비 18%를 갖는 ASDS를 각기 다른 위치에 설치하는 경우의 감쇠효과를 응답이력 해석으로 분석하였는데, 3층에 설치하는 경우 비감쇠 대비 응답변위가 37.5%(효율 62.5%)로 감쇠효과가 가장 좋으며, 이는 감쇠력이 응답속도에 비례하기 때문에 응답속도가 가장 큰 3층에 설치하는 것이 가장 효과적임을 의미한다.
- 5) ASDS에서는 감쇠비 향상을 위하여 공기 입출용 구멍의 직경을 줄이는 것이 필수이지만, 직경이 어느 한도 이하로 작아지면 공기의 압축성에 대한 고려가 필요하며, 공기 입출구의 직경과 공기의 압축성에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

Acknowledgement

이 논문은 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2018R1D1A1B07047803)이며 이에 감사드립니다.

References

- [1] Clough, R.W., Penzien, J. (2014). Dynamics of Structures. Pearson Higher Education, UK, pp. 15-60.
- [2] Hyeong Seol Book Company (2015). Materials of Civil Engineering, Korea, pp. 451-458.
- [3] Kim, D.B., Kim, M.G., Song, D.G. (2017). "An experimental study on the size and length effect of high strength concrete specimens." Journal of the Korean Society of Disaster Information, Vol. 14, No. 3, pp. 366-375.
- [4] Kim, D.B., Lee, I.D., Choi, J.H. (2019). "A study on the seismic performance improvement of mid and low-rise rc grid structures using steel slab hysteretic damper." Journal of the Korean Society of Disaster Information, Vol. 15, No. 3, pp. 129-134.