

이력형 감쇠장치를 이용한 내진보강 예비설계절차

A Preliminary Design Procedure for Seismic Retrofit Using Hysteretic Dampers

정국기¹⁾ · 유은종^{2)*}

Jeong, Gook-ki¹⁾ · Yu, Eunjong^{2)*}

¹⁾한양대학교 건축공학과 석사과정, ²⁾한양대학교 건축공학과 교수

¹⁾Graduate Student, Department of Architectural Engineering, Hanyang University, ²⁾Professor, Department of Architectural Engineering, Hanyang University

/ A B S T R A C T /

The use of dampers is being considered a means to improve the seismic performance of buildings. It may take considerable time and effort to find an optimal design solution since repeated three-dimensional nonlinear time history analyses are required. Therefore, a preliminary design procedure for seismic retrofit using hysteretic dampers was proposed in this study. In the proposed procedure, the amount of retrofit (required number of dampers) is estimated from the capacity curve of the building before retrofit and allowable story drift of the building. In combining the capacity curves of the building and the dampers, the deformation demand for the dampers can be easily checked against their deformation capacity. The equations to transform the device displacement to roof displacement for the combination of capacity curves are developed. The proposed procedure was applied to the seismic retrofit design of sample buildings. The study found that the estimated capacity curve was very close to the actual capacity curve obtained from the pushover analysis, which can determine an appropriate configuration to meet the required seismic performance.

Key words: Preliminary design for seismic retrofit, Seismic retrofit using hysteretic damper, Damper design, Estimate of seismic retrofit, Metallic yield damper

1. 서론

내진성능이 부족한 비내진건물의 내진보강의 방법으로는 강성 및 강도 보강이 가장 먼저 고려되는 방법이다. 이 방법은 구조물에 작용하는 지진하중을 견딜 수 있도록 내력이 부족한 일부 구조부재를 증타하거나 철판으로 보강하는 부재보강, 혹은 전단벽이나 가새골조 등 신규 부재를 설치하는 시스템보강을 통해 구조물 전체의 강도와 강성을 증가시키는 방법이다. 따라서 보강후 구조물은 견딜 수 있는 지진하중의 크기가 증가하지만 강성증가에 따라 주기가 감소하게 되어 지진하중이 증가할 수 있다.

비내진건물의 경우 강성 및 강도보강이 가장 유력한 내진보강방법이기 하나 때로는 감쇠장치를 이용한 내진보강이 시도되기도 한다. 감쇠장치를 이용한 내진보강의 가장 큰 장점은 강성 및 강도보강에 비해 밀면전단력의 증가량이 작으므로 기초보강의 가능성이 낮아진다는 점이다. 반대로 보강

설계 및 시공정도, 품질관리 면에서 높은 정밀도와 노력이 필요하다. 감쇠장치는 개념적으로 에너지소산능력의 증가를 통해 내진성능을 향상시키므로 강도와 강성에는 변화가 없을 것으로 생각할 수 있으나 감쇠장치를 설치하기 위해서는 가새 혹은 간주 등의 지지구조가 반드시 필요하므로 강성과 강도도 증가한다. 특히 이력형 감쇠장치 혹은 변위민감형 감쇠장치의 경우는 가력속도 혹은 온도에 따른 변화가 없으므로 구조물 전체적으로 증가되는 강도와 강성은 감쇠장치의 강도 및 지지구조가 포함된 감쇠시스템의 강성과 거의 동일하다.

현재 국내의 설계기준인 KDS 41 17 00[1]에서 감쇠시스템을 적용한 구조물의 설계규정에는 3차원 비선형 시간이력해석을 통한 성능판정 방법만을 제시하고 있다. 따라서 설계자는 성능을 만족할 것으로 예상되는 설계안을 마련한 다음 이를 구조해석프로그램에서 모델링하고 3차원 비선형 시간이력해석을 통해 목표성능만족여부를 확인하게 된다. 따라서 초기설계안이 적절하지 않을 경우 시행착오과정에서 상당한 시간이 요구되며, 감쇠시스템의 이점을 살리지 못하는 설계가 될 가능성이 높다. ASCE 7-16[2]에서는 감쇠시스템을 적용한 구조물의 설계시 시간이력해석 이외에도 등

*Corresponding author: Yu, Eunjong

E-mail: eunjongyu@hanyang.ac.kr

(Received October 13, 2021; Revised December 21, 2021; Accepted December 21, 2021)

가정적해석과 응답스펙트럼법을 제시하고 있는데 건축구조물의 내진기준 해설서[3]에서 이러한 방법의 한계 및 초기설계에 적용가능성에 대해 언급하고 있다. 만약 보강전 구조물의 성능 및 적용대상 감쇠 장치의 특성, 목표 성능을 고려하여 필요한 감쇠 장치의 적정 개수와 배치 및 지지구조물의 강성등을 개략적으로 결정할 수 있는 절차가 있을 경우 현행과 같이 실무엔지니어의 경험에 의존하여 감쇠 장치를 재배치하고 시간이력해석을 반복하는 과정을 줄일 수 있을 것이다. 본 연구에서는 보강전 구조물의 비선형 정적 해석으로 구한 역량곡선을 직접적으로 활용하여, 이력형 감쇠장치의 특성을 반영하여 효과적으로 감쇠장치를 배치하고 감쇠장치와 기존구조물의 연결구조인 지지구조를 설계하는 예비설계절차를 제시하였다.

2. 기존 연구

감쇠 장치의 최적 설계와 관련하여 다수의 경우의 수를 검토하여 시행착오를 거치는 과정은 효율성이 떨어진다. 박순웅 등의 연구[4]에서는 2차원 프레임에서의 적용가능한 모든 경우의 수를 비교하였지만 이보다 복잡한 실제 구조물에서는 경우의 수가 많아져 이런 방식의 접근은 적용하기 어렵다. 이에 따라 시행착오 횟수나 시행착오 과정 중의 계산시간을 줄이기 위한 예비설계 방법들이 많이 연구되었다.

이상현 등의 연구[5]에서는 구조물의 1차 모드를 활용한 해석 결과와 목표 성능치를 기반으로 MR 감쇠 장치의 위치와 개수 등을 먼저 결정한 이후 해석을 진행하는 설계 절차를 제시하였다. 노지은과 이상현의 연구[6]에서는 FEMA 356[7]에서 제안하는 유효감쇠비 산정식을 바탕으로 응답저감을 적용하여 응답스펙트럼 해석을 한 결과를 바탕으로 목표 성능을 설정하고 감쇠 장치를 배치하였다. 이 연구에서는 보강 이전의 구조물과 보강 이후의 구조물의 비선형 시간이력해석 결과를 통해 해당 설계 방식으로 설계한 감쇠 장치가 예상된 성능과 유사한 성능을 발현하는 것을 확인하였다.

Cheer-Gern et al.의 연구[8]에서는 준능동 변위존형 감쇠 장치를 적용한 구조물의 선형화 모델링 방법을 제시하였다. Connor Jerome J. et al.은 초기 강성과 수정된 강성을 활용하여 최적 강성분포를 찾는 방법을 통해 이력 감쇠 장치의 예비설계에 대해 접근하였다[9]. 또한 Moon[10]은 소형화된 질량동조감쇠 장치를 모드 형상을 기반으로 예비 설계 하는 것에 대해 연구하였다. Teran-Gilmore et al.[11]은 변위기반 설계를 바탕으로 비좌굴가새(Buckling Restrained Brace)를 포함하는 저층 건물의 예비 설계에 대해 연구하였으며, Wei Liu et al.[12]은 FEMA 356[7] 등에서 제시하는 성능설계와 관련된 수식을 바탕으로 보다 일반화된 예비 설계 절차를 제시하였다. Kim Jinkoo et al.[13]과 Xiao Yi et al.[14]의 연구에서는 ATC 40[15]의 보강설계개념을 바탕으로 각각 점성 감쇠 장치와 점탄성 감쇠 장치에 대해 연구하였다. 이러한 기존 연구들[5-14]은 해당 감쇠장치 고유의 특성을 활용하거나 이상화된 건물모델의 해석결과에 기초한 것으로 이를 실제 건물의 보강설계에 적용하기에는 한계점을 가지고 있다.

신축건물의 설계기준인 ASCE 7-16[2]의 18장에서는 감쇠장치를 이용한 내진설계규정이 제시되어 있다. 여기서는 시간이력해석 이외에도 대안 설계법으로 등가정적해석과 응답스펙트럼법을 허용하고 있는데 등가정적 해석과 응답스펙트럼법과 같은 선형해석을 통한 설계의 기본적인 개념은 감쇠장치를 유효강성을 가진 요소로 해석모델에 포함시켜 해석을 하고 해

석결과로부터 식 (1)와 같이 각 감쇠장치가 지진력에 의해 하는 외부일을 산정한 다음 이를 식 (2)와 같이 등가감쇠로 변환하여 구조물의 감쇠비를 높게 평가하는 것이다.

$$W_k = \frac{1}{2} \sum_i F_i \delta_i \tag{1}$$

$$\beta_{eff} = \beta + \frac{\sum_j W_j}{4\pi W_k} \tag{2}$$

여기서, F_i 와 δ_i 는 유효강성을 통해 탄성 거동으로 묘사된 구조물의 작용하중과 변형량이며, W_j 는 개별 감쇠장치가 한 사이클의 동적 응답에서 소산시키는 에너지, W_k 는 탄성적으로 묘사된 구조물이 소산시키는 에너지의 총합이다. β_{eff} 는 건물의 기본 감쇠비 β 에 감쇠 장치의 등가 감쇠비를 합산하여 산정하는 유효 감쇠비이다.

ASCE 7-16[2]은 신축건물용 내진설계규정이므로 감쇠장치가 적용된 구조물의 지진력 저항시스템의 설계에 대한 규정과 함께 감쇠장치의 요구 변위, 요구하중도 산정할 수 있도록 하고 있다. 따라서 기존 구조물의 내진 보강에도 ASCE 7-16의 선형설계법을 활용하여 감쇠장치를 설계할 수 있다. 하지만, 탄성해석의 경우 모든 층에서 감쇠장치가 사용되어야 하며, 감쇠장치에 의해 추가되는 감쇠비의 최대값이 제한되는 등 여러 조건을 만족하여야 하므로 적용성이 떨어진다. 또한, 미리 설정한 응답 저감 정도와 목표 성능치를 맞추기 위해 탄성 모델을 시행착오를 걸쳐 여러번 수정해야만 하는 경우도 생긴다. 그리고, 해석하는 과정에서 구조물의 시스템에 따른 보정계수의 정밀성이 보장되지 않으면 모든 건축물에서 일반화시키기 어려운 단점이 있다.

기존 구조물의 내진평가 및 보강절차를 규정하고 있는 ASCE 41[16]에도 에너지소산장치 적용시 성능평가절차가 포함되어 있다. 이때 해석방법으로는 선형정적 및 동적해석, 비선형 정적 및 동적해석 등 다양한 절차를 사용할 수 있도록 하고 있다. 선형절차에서 감쇠장치를 모델링하고 감쇠 장치의 효과를 구조물의 성능에 반영하는 기본개념은 ASCE 7-16[2]과 동일하게 식 (1)과 (2)에 바탕을 두고 있다. 비선형 절차의 경우 감쇠장치의 비선형 하중-변위관계를 해석모델에 포함시켜야하며 감쇠장치의 지지(연결)구조물도 모델링할 것을 요구하고 있다. 따라서 강성이 증가되는 효과를 파악할 수 있으나 보강설계시 필요한 보강량의 산정에 대한 특별한 언급은 없다.

ATC 40[15]에서는 비선형 정적해석을 통해 구해지는 역량곡선을 활용하여 보강량을 산정하는 절차가 제시되어 있다. 보강방법은 크게 강도/강성을 보강하는 경우, 중요부재를 횡구속하여 변형능력을 증가시키는 경우, 면진 혹은 에너지소산장치를 사용하여 지진요구량을 감소시키는 경우, 구조물의 질량을 감소시키는 경우 등의 방안을 제시하고 각 경우 가정된 보강후 역량곡선과의 비교를 통해 보강요구량, 즉, 요구되는 강성, 강도, 혹은 감쇠비를 산정하는 기본 개념을 제시하고 있다.

Fig. 1은 ATC 40에 제시된 감쇠장치를 위한 내진보강개념을 나타낸 그래프이다. 즉, 기존구조물의 역량곡선은 동일하다고 가정하고 서로 다른 감쇠비에 대한 요구곡선을 그린 다음 성능을 만족할 만한 변위에 해당하는 감쇠비를 구한다. 이후 요구되는 감쇠비를 얻을 수 있도록 감쇠장치를 설치한

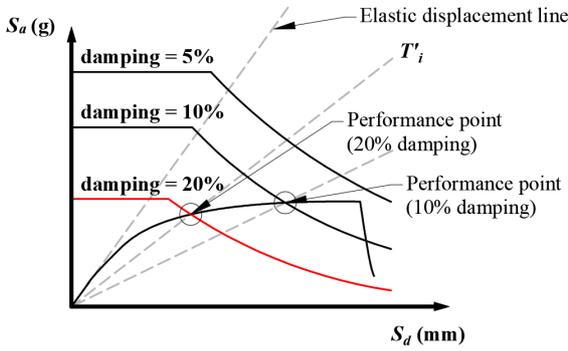


Fig. 1. Concept of preliminary retrofit design with energy dissipation units in ATC40

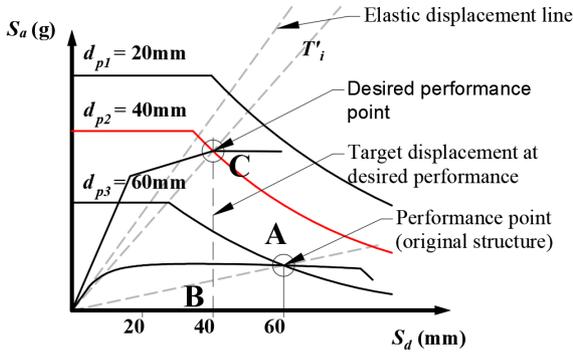


Fig. 2. Concept of preliminary retrofit design with strengthening and stiffening in ATC40

다. 하지만 이 절차는 감쇠장치의 설치 후에도 강성 및 강도의 변화가 없는 경우이므로 감쇠능력이 상대적으로 큰 속도민감형 감쇠장치가 사용될 경우 적용가능하다. 해당 그래프의 가로축은 스펙트럼변위 S_d 를 나타내며 세로축은 스펙트럼가속도 S_a 를 나타낸다.

강도 및 강성보강의 경우 초기설계개념, 즉 보강량의 산정절차는 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. 기존구조물의 경우 성능점에서의 변위가 과다하므로 목표성능을 만족할 것으로 예상되는 성능점을 가정한 다음 그 변위에 해당하는 요구곡선을 그리고 보강후 구조물의 역량곡선을 가정한다. Fig. 2와 같이 목표성능을 만족할 것으로 기대하는 목표변위 B와 비교하여 초기 성능점 A의 변위가 초과한다면 목표변위 안에 들어 올 수 있는 성능점 C를 목표로 하여 강성과 강도를 보강한다.

필요한 보강량은 보강전후 성능점의 y축 값, 즉 S_a 값의 차이로부터 식 (3)과 같이 산정할 수 있다. 즉,

$$V_{required} = \frac{S_{au}'}{S_{au}} V_u \quad (3)$$

여기서, S_{au} 는 기존 구조물의 성능점에 해당하는 스펙트럼 가속도, S_{au}' 는 보강후 구조물의 성능점에 해당하는 스펙트럼 가속도, $V_{required}$ 는 필요한 밀면전단력, V_u 는 기존구조물의 밀면전단력이다.

ATC 40[15]에서는 강성/강도 보강시 필요한 밀면전단력을 만족시키기 위한 보강량을 보강전후 구조물의 탄성주기의 차이로부터 구한다. 즉, 보강후 구조물의 탄성주기는 역량곡선의 탄성부분에 해당하는 기울기로부터

구하는데 그 직선을 연장하여 5% 감쇠비에 해당하는 요구곡선과 만나는 지점의 좌표로부터 구한다.

$$T_i' = \frac{2\pi}{\sqrt{g}} \sqrt{\frac{S_{di}'}{S_{ai}'}} \quad (4)$$

여기서 T_i' 는 보강 후의 주기이며, g 는 중력가속도 S_{di}' 와 S_{ai}' 는 보강 이후의 S_d 값과 S_a 값이다. 보강후 구조물의 강성은 식 (5)과 같이 보강전후 구조물 주기의 차이로부터 구할 수 있다.

$$K' = K \left(\frac{T_i'}{T_i} \right)^2 \quad (5)$$

여기서, K 와 T_i 는 각각 보강전 구조물의 강성 및 주기, K' 와 T_i' 는 각각 보강후 구조물의 강성과 주기를 나타낸다.

이와 같이 보강후 구조물에서 필요한 강성과 강도를 구한 후 이를 만족하도록 전단벽이나 가새골조의 크기 등을 산정하는 보강설계를 진행한다. 이렇게 구해진 보강설계안을 사용하여 정밀한 구조해석을 통해 목표성능 만족여부를 확인한다.

이력형 감쇠장치의 경우 에너지소산효과와 함께 강도 및 강성보강효과도 동시에 나타난다. 이는 감쇠장치 자체가 강도 및 강성을 가지고 있으며 기존 구조물과의 연결을 위해 사용되는 가새 혹은 지지구조물이 사용되기 때문이다. 본 연구에서는 이러한 특성을 반영하여 이력형 감쇠장치 사용시 예비설계절차를 제시하였다.

3. 이력형 감쇠장치 및 감쇠시스템

3.1 이력형 감쇠장치의 특성

이력형 감쇠장치는 금속의 항복을 통해 에너지를 소산시키는 장치로 다양한 형태를 가지고 있다. Fig. 3의 (a)는 이력형 감쇠장치의 일종으로 철판을 그림과 같이 천공하여 슬릿형태로 만들고 장치의 상하면에 전단력을 작용시켜 전단항복을 발생시키면서 에너지소산능력을 얻는 형태로 일명 금속항복형 슬릿 댐퍼(metallic slit damper)라고도 불린다. 이러한 이력형 감쇠장치에는 구조물의 항복에 선행하기 위해 일반적으로 저강도 강재가 사용된다.

감쇠장치의 특성치는 장치원형시험을 통해 구하도록 KDS 기준[1]에 규정되어 있다. 이력형 감쇠장치는 가력 속도와 온도에 민감하지 않으므로, 설계를 위해 필요한 특성치는 항복변위 δ_y 와 항복하중 f_y , 파단 변형량 혹은 한계변형량 δ_{max} 과 한계 상태에서의 하중 f_{max} 등이 있다. Fig. 3(b)는 이력 거동하는 감쇠 장치의 특성치를 표현하였다.

3.2 지지구조

설계기준에서는 “감쇠장치”와 “감쇠장치를 다른 구조요소에 연결하기 위해 사용되는 요소”를 합하여 감쇠시스템으로 정의하고 있다. 본 논문

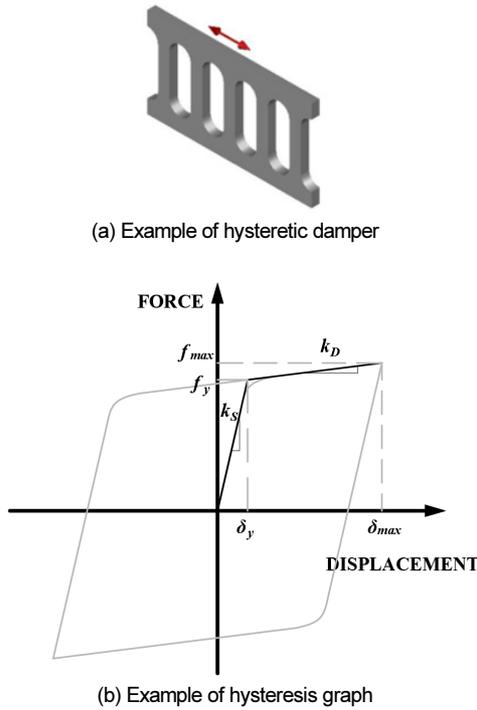


Fig. 3. Hysteretic damper

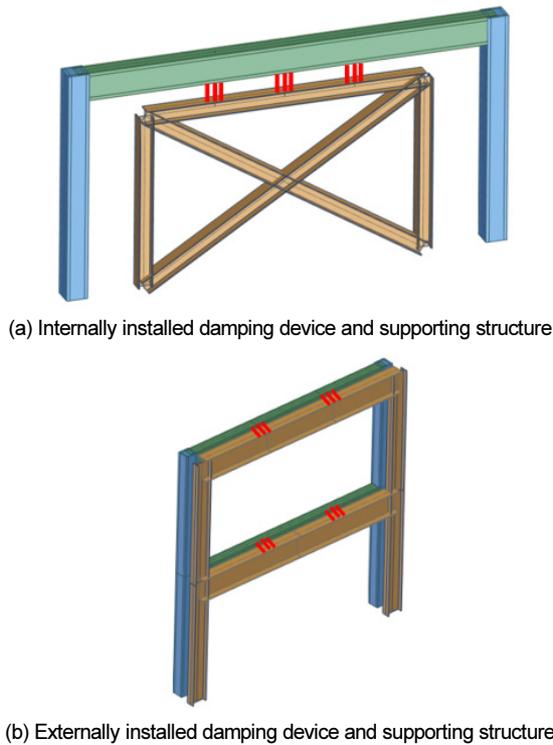


Fig. 4. Types of supporting structures

언급하는 “지지구조”는 이러한 “감쇠장치를 다른 구조요소에 연결하기 위해 사용되는 요소”를 의미한다. 설계기준에서는 감쇠력의 정확한 전달을 위해 지지구조는 성능목표를 규정하는 지진에 대하여 탄성상태를 유지할 것을 요구하고 있다.

지지구조는 가새나 간주와 같이 층과 층사이에 설치되는 부재인 경우가 일반적이지만 경우에 따라서는 보강대상구조물의 외부에 독립적으로 설치

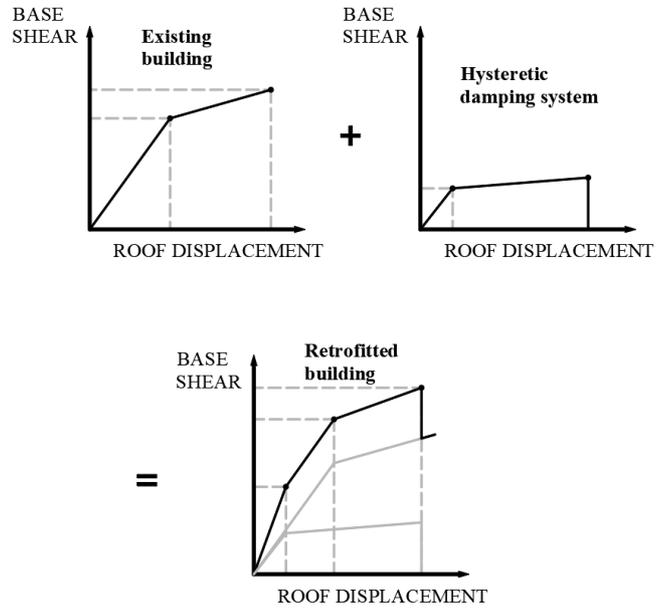


Fig. 5. Idealized capacity curve of structures with hysteretic damper

되는 구조물로 설계할 수도 있다. Fig. 4(a)는 지지구조가 기존 구조물의 프레임 안에 들어가는 일반적인 경우를 나타내고 있으며, Fig. 4(b)는 지지구조가 건물 외벽 바깥에 설치된 경우 감쇠 장치가 지지구조물과 기존 구조물의 사이에서 수평부재의 옆면에 설치된 경우를 나타낸 것이다. 본 논문에서 전자는 내부설치형 지지구조, 후자는 외부설치형 지지구조로 구분한다. 감쇠장치에 가해지는 상대변위는 내부설치형 지지구조의 경우 설치된 층의 상대층간변위이며, 외부설치형 지지구조의 경우 보강대상구조물의 층변위와 지지구조의 층변위사이의 상대변위가 된다. 모든 경우 지지구조의 변형이 고려되어야 한다.

수동형 에너지소산장치인 이력형 감쇠장치의 경우 지진력에 의해 구조물에 변위가 발생하고 그에 따라 감쇠장치에서 제어력이 발생한다. 앞서 언급한 바와 같이 지지구조는 탄성상태를 유지해야하므로, 지지구조물에서 지반까지의 모든 하중 전달 경로에서 구조 부재의 내력이 충분할 경우, 발생한 제어력이 지반으로 전달되는 하중전달경로상의 문제가 없다. 따라서 조 기항복을 유도한 이력형 감쇠장치의 특성상 기존 건물의 역량곡선에 감쇠장치의 용량만큼 강도증진효과가 추가된다. 즉, 이력형 감쇠장치 설치후 역량곡선은 감쇠장치의 용량만큼 위쪽으로 이동하게 된다. ASCE 41[16]에서는 변위지배형 감쇠장치가 사용된 구조물에 비선형 절차를 적용할 경우 강성보강효과를 확인할 수 있다고 언급하고 있으나 실제로는 감쇠장치의 항복이 초기에 발생하므로 강성보강효과는 큰 의미가 없다. 보강후 구조물의 역량곡선에서 항복점의 위치가 앞으로 당겨짐으로 인한 에너지소산량의 증가효과가 있으나 이 효과는 성능점 산정시 역량곡선의 면적으로부터 유효감쇠비를 산정하는 과정을 통해 반영가능하다. 따라서, 이력형 감쇠장치가 적용된 구조물의 역량곡선은 Fig. 5과 같이 이상화할 수 있다.

Fig. 5과 같이 감쇠장치의 하중-변위특성을 기존 구조물과 중첩시킬 경우 감쇠장치의 하중-변위특성에는 지지구조의 변형이 고려되어야 한다. 즉, 감쇠장치의 상대변위는 지지구조의 강성을 고려하여 산정되어야 하며 그 값은 직렬 연결된 스프링의 전체강성과 동일하게 구할 수 있다. 감쇠장치는 항복전후 강성이 달라지나 지지구조는 언제나 탄성이다. 따라서, 감쇠장치

와 지지구조가 복합된 감쇠시스템의 항복전후 강성은 직렬연결된 스프링의 경우와 동일하게 구하면 식 (6) 및 식 (7)과 같다.

$$k_1 = \frac{k_s k_f}{k_s + k_f} \quad (6)$$

$$k_2 = \frac{k_D k_f}{k_D + k_f} \quad (7)$$

여기서 k_f 는 감쇠 장치를 지지하는 구조물의 강성이며, k_s 와 k_D 는 각각 감쇠 장치의 항복 이전과 항복 이후의 강성이다. k_1 과 k_2 는 감쇠장치와 지지구조물을 포함한 감쇠시스템의 강성이다.

4. 예비설계절차

감쇠장치가 사용되는 구조물은 반드시 성능기반 내진설계의 설계절차에 따라 해석되고 목표성능 만족여부를 검토한다. 목표성능 만족기준은 시설안전공단의 기존 시설물 내진성능 평가요령[17] 혹은 교육부의 학교시설 내진성능평가 및 보강 매뉴얼[18]에 규정되어 있는데, 공통적으로 허용층간변위각의 만족여부와 부재별 연직하중지지능력 모두를 확인하도록 하고 있다. 부재별 성능수준은 성능점에서 구조물 전체부재의 성능수준을 확인해야하므로 역량곡선상에서 표현할 수 있는 방법이 없다. 하지만 비내진 건물의 경우 적용되는 허용층간변위각이 상당히 엄격하므로 내진보강후 성능점을 허용층간변위각을 기준으로 설정할 수 있을 것이다. 즉, 보강전 구조물 성능점 산정후 허용층간변위각을 나타내는 수직선과 요구곡선이 만나는 점을 목표 성능점으로 가정하고 보강량을 산정할 수 있다. 물론 이러한 가정은 모든 경우 반드시 옳은 것이 아니므로 초기설계이후 부재별 성능수준확인 후 성능이 부족할 경우 보강량을 증가시키는 방향으로 설계안을 변경해야 한다.

위에서 언급한 고려사항을 바탕으로 본 연구에서는 이력형 감쇠장치를 사용한 내진보강시 다음과 같은 예비설계 절차를 제안한다.

(a) 보강량 산정

허용층간변위각을 기준으로 보강후 구조물의 성능점을 가정하고 ATC40[15]의 강도/강성보강과 유사하게 필요한 강도를 산정한다. 즉, 필요한 보강량

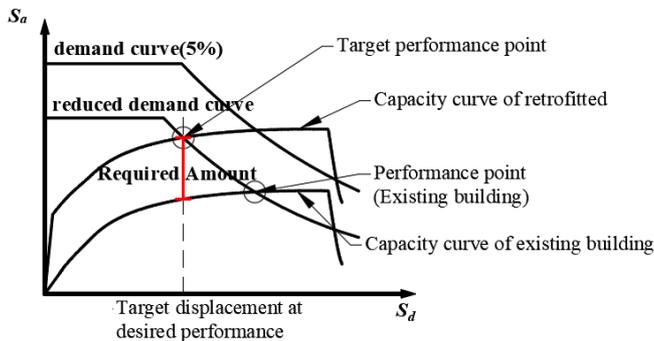


Fig. 6. Concept of proposed method

은 Fig. 6에서 허용층간변위각을 나타내는 수직선이 보강전 구조물의 역량 곡선과 만나는 지점과 요구곡선과 만나는 지점사이의 수직거리에 구조물의 질량을 곱한 값에 해당한다. 실제로는 이력형 감쇠장치가 구조물보다 조 기 항복하여 에너지소산량 및 유효감쇠비가 증가할 수 있으나 이는 보강이 전에 파악하기 힘들기 때문에 이러한 효과를 무시한다. 따라서, 보강전후 요구곡선이 동일하다고 가정하고 허용층간변위각을 나타내는 수직선과 요구곡선의 교점을 보강후 구조물의 목표성능점으로 가정하고 보강전 역량 곡선과 수직선의 교점과 보강후 목표성능점의 y좌표의 차이를 증가되어야 하는 스펙트럼가속도로 볼 수 있다.

이 방법은 ATC 40의 강도/강성보강시 보강량 산정과 유사한 개념이나 이후 절차는 이력형 감쇠장치의 특성을 고려하여 단순화 할 수 있다. 즉, 주 기차이 → 강성차이 → 보강부재 설계로 이어지는 절차 대신 요구되는 강도로부터 바로 필요한 감쇠장치의 전체용량이 결정된다. 이는 초기에 감쇠 장치의 항복이 발생하므로 성능점 부근에서는 감쇠장치가 반드시 항복하기 때문이다.

(b) 감쇠장치 수량 산정 및 배치

단위 감쇠 장치의 특성치(항복전후 강성 및 강도, 항복변위, 최대변위)가 주어질 경우 (a)에서 구한 보강량으로부터 필요한 감쇠장치의 수를 산정할 수 있다. KDS 기준에서 감쇠장치 적용시에는 상한설계특성치와 하한설계 특성치를 구분하여 사용하도록 하고 있다. 감쇠장치의 수량은 감쇠장치의 성능을 보수적으로 평가하는 하한설계특성치를 사용하여 구한다. 필요한 감쇠장치의 수를 구한 후 설계자가 제반 요건을 고려하여 감쇠장치의 층별 배치 및 지지구조의 형태를 결정한다.

이때 외부설치형과 내부설치형에 따라 필요한 감쇠장치가 의미하는 바와 배치 방식이 달라진다. 외부 설치형의 경우 기존 구조물과 지지구조물이 병렬적으로 거동하므로 감쇠장치의 작용력이 온전히 지지구조를 따라 지 면으로 전달되는 하중전달경로를 가지므로 기존 구조물의 부재에는 영향을 미치지 않는다. 따라서 외부 설치형의 경우에는 전체 층에 설치된 감쇠장 치가 성능 발휘를 하는 것을 기대할 수 있으므로 요구되는 감쇠장치의 수를 각층에 분배하여 설치할 수 있다.

하지만, 내부 설치형의 경우 기존 구조물의 층과 층사이에 설치되므로 감 쇠장치에서 발생한 작용력이 아래층의 구조부재로도 전달된다. 따라서, 상 부로부터 전달되는 층전단력이 과도할 경우 기존 구조물의 수직부재에 소 성변형이 집중될 수 있다. 따라서 상부층에서 누적되어 전해지는 전단력을 하부층에서 수용할 수 있도록 배치되어야 한다. 따라서 이러한 현상을 방지 하기 위해서는 요구되는 감쇠장치의 전체 숫자만큼 1층에 감쇠장치를 배치 하고, 1차 모드의 층지진하중에 대한 층전단력을 계산하여 층전단력의 비 율에 따라 상부 층의 감쇠장치를 추가로 배치하여야 한다. 각 층의 층전단력 은 식 (8)-(10)에 따라 산정한다.

모드 층지진력은 KDS 41 17 00의 7.3.3.3에 따라 식 (8)과 같으며 여기 서 수직분포계수는 식 (9)와 같다.

$$F_{xm} = C_{vxm} V_m \quad (8)$$

$$C_{vxm} = \frac{w_x \phi_{xm}}{\sum_{i=1}^n w_i \phi_{im}} \quad (9)$$

여기서 F_{xm} 는 m차 모드의 x층의 모드 하중, C_{vxm} 는 m차 모드의 수직분포 계수, V_m 는 m차 모드의 밑면 전단력이다. w_i, w_x 는 각각 i층과 x층의 유효 중량이며, ϕ_{im} 는 m차 모드벡터의 i층 성분, ϕ_{xm} 는 m차 모드벡터의 x층 성분이다.

따라서 각 층의 층전단력은 이를 누적하여 식(9)과 같이 계산된다. 이 값은 구조물이 1차모드로만 변형할 경우 발생하는 층전단력을 의미한다. 푸시오버해석이라고 불리는 비선형 정적해석에는 구조물의 1차모드만을 고려하므로 이 값이 비선형 정적해석시 각층에 작용하는 층전단력이라고 볼 수 있다.

$$V_k = \sum_{i=0}^{N-k} F_{k-i} \quad (10)$$

여기서 V_k 는 k층의 층전단력, F_k 는 k층에 작용하는 층지진하중, N 은 전체 층의 개수이다.

식(8)-(10)에서 사용되는 모드형상은 보강전 구조물의 모드형상이므로 보강에 의해 층강성이 변화할 경우 그 만큼의 오차를 가질 수밖에 없다. 예 비설계단계에서 이러한 오차를 감소시킬려면 보강후 구조물의 모드형상을 사용하는 반복 계산이 필요할 것이다. 하지만, 어차피 비선형 시간이력해석을 통한 검토가 필요하므로 보강에 의한 모드형상의 변화가 크지 않을 것으로 예상되면 바로 비선형 시간이력해석 과정으로 진행할 수 있다.

(c) 지지구조 설계

지지구조는 탄성을 유지해야 한다. 감쇠장치의 상한설계특성치에 해당하는 최대하중을 지지구조에 가력하고 이 하중을 탄성범위에서 지지할 수 있도록 지지구조를 설계한다. 내부설치형 지지구조의 경우 형태에 따라 캔틸레버의 강성과 전단건물의 강성의 사이에 해당하는 값을 가질 것이다. 외부설치의 경우, 구조해석 프로그램을 활용한 골조설계가 필요하다. 즉, 각 층별로 감쇠장치의 개수와 강도(상한계 특성치)의 곱을 외력으로 보고 부재설계를 수행한다.

지지구조가 강체에 가까울수록 감쇠장치에 작용하는 상대변위가 커지므로 초기에 감쇠장치가 작동한다. 하지만 외부설치시 지지구조의 강성이 클 경우 상층부의 감쇠장치가 초기에 작동하고 한계변위를 초과할 가능성이 커진다. 따라서 하층부의 감쇠장치도 작동이 가능하도록 적절한 강성으로 설계하는 편이 유리할 것으로 판단된다.

(d) 장치별 이력곡선을 보강전 구조물의 역랑곡선과 중첩

감쇠장치의 항복전후강성과 지지구조의 강성을 고려하여 감쇠장치의 역랑곡선 산정한다. 구조물의 역랑곡선과 중첩시키기 위해서는 감쇠장치 역랑곡선의 x축은 구조물의 역랑곡선의 x축과 동일하게 지붕층 변위로 변환되어야 한다. 이때 감쇠장치의 상대변위산정시 지지구조의 강성, 즉, 감쇠장치에서 발생한 감쇠력에 의한 지지구조의 변형이 고려되어야 한다.

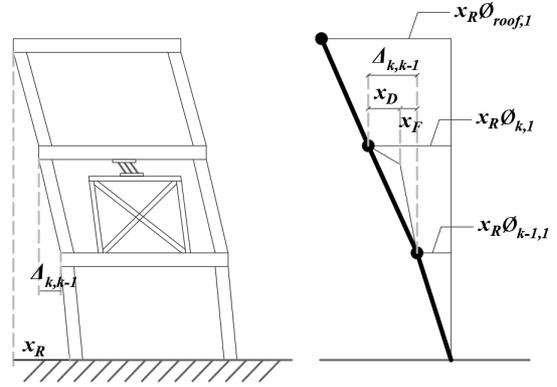


Fig. 7. Relative displacements in internally installed damping device and supporting structure

d-1) 내부설치의 경우

가새 혹은 간주형과 같이 내부에 설치되는 지지구조의 경우 감쇠장치와 설치된 층의 각 부분의 변위를 나타내면 Fig. 7과 같다.

k층에 설치된 감쇠 장치의 경우, k층의 층간변위는

$$\Delta_{k,k-1} = (\phi_{k,1} - \phi_{k-1,1})x_R \quad (11)$$

여기서, x_R 는 지붕층 횡변위, $\phi_{k,1}$ 는 기존구조물의 비선형 정적 해석에서 k번째 층의 변위와 지붕변위의 비율을 의미한다. 변형 형상의 경우 보강후 구조물의 변형 형상이어야 정확하지만 아직 미지수 이므로 보강전 구조물의 변형 형상을 사용한다. 여기서, 변형형상은 비선형 정적해석을 통해 나타나는 각 층의 변위비를 의미한다.

k층의 층간변위는 감쇠 장치의 변위 x_D 와 지지구조의 변위 x_F 의 합과 같다. 즉,

$$\Delta_{k,k-1} = x_D + x_F \quad (12)$$

감쇠 장치의 변위 x_D 와 지지구조의 변위 x_F 는 감쇠 장치의 작용력 P_D 에 따라 달라지며, 감쇠장치의 작용력은 또다시 x_D 의 함수이다. 즉,

$$P_D = \begin{cases} k_S \cdot x_D & \text{for } x_D < x_{Dy} \\ P_{Dy} + k_D(x_D - x_{Dy}) & \text{for } x_D > x_{Dy} \end{cases} \quad (13)$$

이다. 여기서 x_{Dy} 는 감쇠 장치의 항복변위이며, P_{Dy} 는 감쇠 장치의 항복하중이다. k_S 와 k_D 는 감쇠장치의 항복 이전과 이후의 강성이다.

지지구조는 언제나 탄성이므로 지지구조의 변위는 P_D/k_F 이다. 따라서 식(12)는 식(14)로 변환된다.

$$\Delta_{k,k-1} = x_D + \frac{P_D(x_D)}{k_F} \quad (14)$$

식(14)과 식(11)에 의해 식(15)를 구할 수 있다.

$$x_R = \frac{1}{\phi_{k,1} - \phi_{k-1,1}} \left(x_D + \frac{P_D(x_D)}{k_F} \right) \quad (15)$$

즉, 감쇠 장치의 특성치(항복변위, 최대변위)를 x_D 에 넣고 구해지는 x_R 과 P_D 그래프를 지붕층변위와 밀면전단력으로 표현된 구조물의 역량곡선과 중첩하여 보강후 구조물의 역량곡선을 추정할 수 있다.

d-2) 외부설치의 경우

외부설치의 경우 지지구조의 변위는 해당층 뿐 아니라 다른 층의 감쇠 장치의 하중에 의해서도 영향을 받는다. 따라서 식(15)을 참고하여 외부설치의 경우 변환식은 식(16)과 같은 형식이 된다. 이때 감쇠 장치에 작용하는 상대변위는 층간변위가 아니고 지지구조와 같은 레벨에 있는 기존 구조물과의 상대변위임에 주의하여야 한다.

$$x_{R,k} = \frac{1}{\phi_{k,1}} \left(x_{D,k} + \sum_{i=1}^N f_{k,i} P_{D,i}(x_{D,k}) \right) \quad (16)$$

여기서, $x_{R,k}$ 는 k 층에 위치한 감쇠장치의 변위가 $x_{D,k}$ 일때의 지붕변위 값이다. $x_{D,k}$ 는 k 층에 설치된 감쇠장치의 변위를 나타내며 $f_{k,i} P_{D,i}(x_{D,k})$ 는 i 번째의 감쇠 장치의 작용력에 대한 k 층의 변위를 의미하는 유연도 $f_{k,i}$ 를 가지는 지지구조가 k 층에서 거동하는 변위이다.

식(16)은 k 층에 위치한 감쇠 장치의 하중-변위 관계를 구조물의 역량곡선과 중첩시키기 위해 x 축을 x_R 즉 지붕층변위로 환산하기 위한 변환식이다. 하지만, 식(16)에서 볼 수 있듯이 각층의 감쇠장치에서 발생하는 변위가 결정되어야 환산이 가능하므로 각층의 감쇠장치에서 발생하는 변위를 미지수로 하는 연립방정식을 먼저 풀어야 한다.

각층 감쇠장치변위를 행렬식으로 표현하면 식(17)와 같다.

$$\{x_D\} = \{\phi\}x_R - [F]\{P_D\} \quad (17)$$

만약, 모든층의 감쇠 장치가 항복한 상태라면 감쇠장치의 감쇠력 P_D 는 소성변형량 x_D^p 을 사용하여 식(18)로 표현가능하다.

$$P_D = k_D x_D^p + P_{Dy} \quad (18)$$

여기서, $k_D x_D^p$ 는 항복 이후 감쇠 장치의 소성 거동 중 증가하는 하중을 의미하며 P_{Dy} 는 감쇠장치의 항복하중이다.

식(18)를 식(17)에 대입하고 소성변형량 x_D^p 에 대해 풀면 식(19)과 같다.

$$[[F]k_D + [I]]\{x_D^p\} = \{\phi\}x_R - \{x_{Dy}\} - [F]\{P_{Dy}\} \quad (19)$$

식(19)을 사용하여 각 감쇠장치의 소성변형량을 구할 수 있으며 이후 소성변형량에 항복변위를 더한 전체변형량을 식(16)에 대입하면 감쇠장치의 변위에 대응하는 지붕층변위를 구할 수 있다. 이를 구조물이 역량곡선과 중첩하여 보강후 구조물의 역량곡선을 구한다. 구해진 역량곡선을 ADRS 형식으로 변환하기 위해서는 모드형상이 필요하다. 보강 이후 구조물의 모

드형상은 달라지지만 구조해석전에는 알 수 없으므로 ADRS 형태로 변환할 때 보강전 구조물의 모드형상을 사용할 수 밖에 없다. 따라서 보강량이 많거나 일부층에 집중하여 보강된 경우 모드형상의 차이에 의해 예측된 역량곡선은 실제 해석결과와 차이를 보일 수 있다.

이후의 설계절차는 KDS의 규정에 따른 본설계이다. 즉, 비선형시간이력해석을 통해 보강후 구조물의 성능수준 만족여부를 확인한다. 이때 규준에 규정된 바와 같이 상한치, 하한치 해석이 필요하다. 상한치해석결과로부터 지지부재의 탄성유지여부, 감쇠장치 설치부위 부재의 보강필요여부, 기초보강필요여부 등이 검토되어야 하며, 하한치 해석결과로부터 구조물의 층간변위가 허용치 이내인지 연직하중 저항성능에 근거한 성능수준을 만족하는지 확인하고 모든 요구조건이 만족된 경우 보강설계를 종료한다.

5. 예제 구조물

Fig. 8은 본 연구에서 제안된 예비설계절차를 설명하기 위한 예제구조물이다. 단변 방향의 경간길이는 4.5 m, 장변방향의 경간길이는 6 m이며, 각층의 층고는 3.3 m이다. 구조물의 질량은 각 개별부재의 지중 및 7 kN/m²의 바닥하중을 고려한 하중에 대응하는 질량으로 산정하였다. 예제건물이

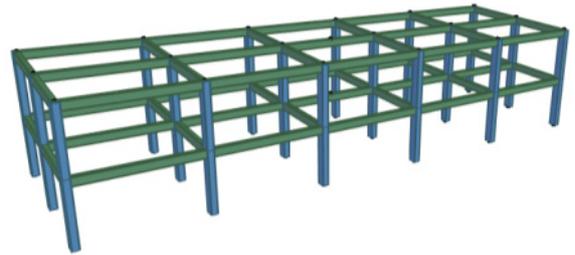
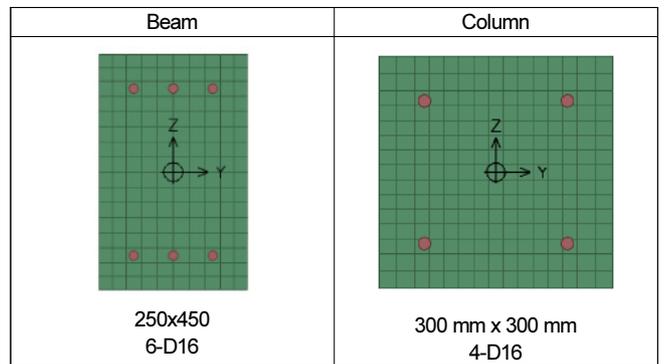
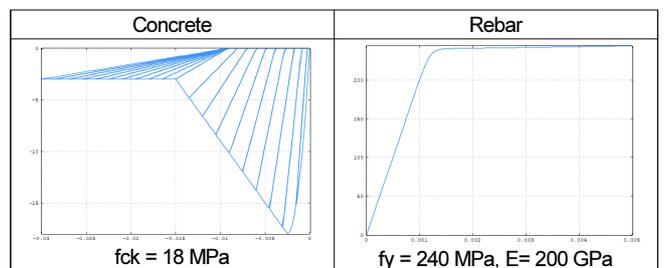


Fig. 8. Example building



(a) Section of element



(b) Material properties

Fig. 9. Element sections and material properties

Table 1. Input parameters of ‘Concrete01’ material in OpenSees

Input parameter		Remarks
fpc	-18	The maximum compressive strength (MPa)
epsc0	-0.0025	Strain at the maximum compressive strength
fpcu	-3	Residual strength (MPa)
epscu	-0.015	Extreme strain

Table 2. Input parameters of ‘Steel02’ material in OpenSees

Input parameter		Remarks
Fy	240	Yield strength (MPa)
R0	18	Parameters to describe curved portion between elastic and plastic region
CR1	0.925	
CR2	0.15	
b	0.005	Ratio of stiffness before and after yield
E0	200000	elastic modulus (MPa)

위치한 지역의 유효지반가속도는 0.22 g이며 지반조건은 S4로 가정하였다. 목표성능은 최대고려지진 (MCE) 작용시 붕괴방지이다. 예제 건물의 허용층간변위각은 1.05%로 가정하였다.

예제건물의 기둥부재는 허용층간변위각 보다 작은 변위각에서는 전단 파괴가 발생하지 않는 것으로 가정하고 Fig. 9.(a)와 같이 섬유요소로 모델링하였다. 보 부재의 경우도 섬유요소로 모델링하였다. 콘크리트의 응력-변형률 관계는 Fig. 9(b)와 같이 압축 변형률 0.0025에서 최대강도 18 MPa가 발생되며, 변형률 0.015에서 잔여강도 3 MPa를 가지도록 모델링하였다. 기둥하단의 경계조건은 모두 고정단으로 가정하였다. 예제 구조물은 장변방향으로만 내진보강이 필요한 것으로 가정하고 예비설계 과정을 나타내었다. 구조해석에는 OpenSees[19]를 사용하였으며, 전후 처리 과정을 위해 Scientific Toolkit for OpenSees (STKO)[20] 프로그램을 활용하였다.

보강전 구조물의 모드형상 [$\phi_{11}, \phi_{12}, \phi_{13}$]은 [0.462, 0.702, 1]이며 1차 모드의 질량 참여율은 85.8%로 나타났다. 이 값은 식 (8)-(10)에 따라 1차 모드의 지진하중의 연직분포 및 층전단력을 계산하는데 사용한다.

OpenSees 해석 프로그램 내의 Concrete01, Steel02 재료 설정 명령어 [21]를 사용하여 앞서 언급된 콘크리트와 철근의 물성치를 입력하였으며 이때 적용한 값들은 Tables 1 및 2와 같다.

5.1 보강예제 A

보강예제 A는 외부설치의 경우이다. 즉, 건물외부에 지지구조를 설치하고 지지구조와 기존건물사이에 감쇠장치를 설치하는 경우이다. 설계 예제에서 가정한 감쇠장치의 제원은 항복 변위 $\delta_y = 5$ mm, 항복하중 $f_y = 45$ kN, 한계 변형량 $\delta_{max} = 55$ mm, 한계 상태에서의 하중 $f_{max} = 70$ kN이다.

(a) 보강량 산정

비선형 정적해석을 통해 보강전 구조물의 역량곡선을 구하고 성능점을 산정하였다. 요구곡선은 MCE 수준의 지진에 대해 지반조건 S4와 유효지

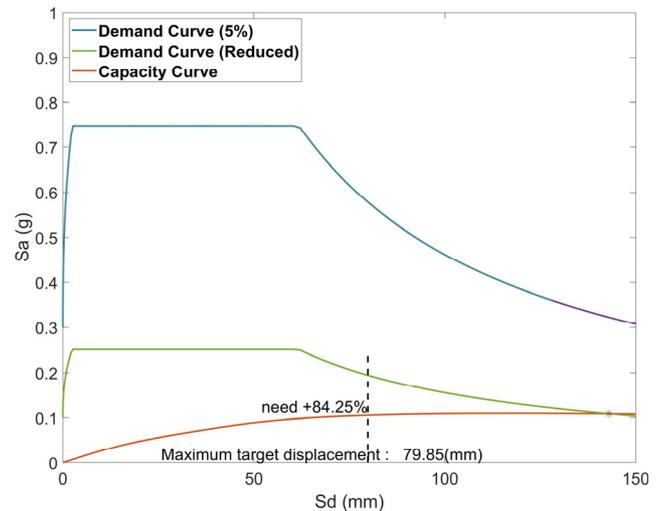


Fig. 10. Amount of retrofit

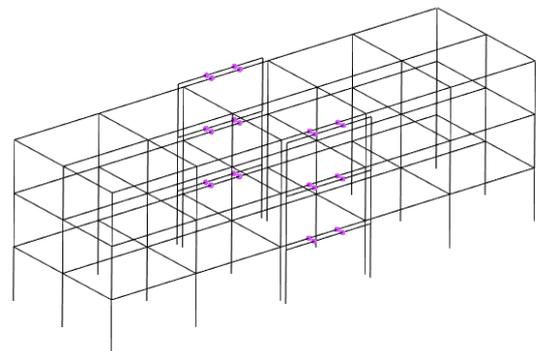


Fig. 11. Placement of dampers (Model A)

반가속도 0.22 g를 적용하여 KDS 41 17 00기준에 따라 구하였다. 성능점 산출 과정은 ATC 40의 절차를 따랐다. Fig. 10에 볼 수 있듯이 기존 구조물의 성능점은 $S_a = 0.109$ g, $S_d = 142.9$ mm 로 허용층간변위각 1.05%에 해당하는 스펙트럼 변위 $S_d = 79.85$ mm를 크게 초과하여 목표성능을 만족하지 못하였다. 허용층간변위각 1.05%에 따른 응답스펙트럼 변위의 목표값 $S_d = 79.85$ mm에서의 각 층의 변위 비율 [$\phi_{11}, \phi_{12}, \phi_{13}$]은 [0.593 0.87 1]이며 이 값은 식 (11)-(19)에 따라 지붕 변위에 따른 감쇠장치의 변형량 및 작용 하중을 계산하는데 사용한다.

필요한 보강량, 즉 추가로 요구되는 밀면전단력은 4절의 (a)에 설명된 바와 동일하게 Fig. 10과 같이 산정하였다. 즉, 허용층간변위각을 나타내는 수직선과 요구곡선이 만나는 점을 보강후성능점으로 가정할 경우 현재 밀면전단력의 84.25%가 추가로 필요하며 그 값은 약 412 kN에 해당하는 것으로 계산되었다.

(b) 감쇠장치 수량 산정 및 배치

감쇠장치의 f_y 와 f_{max} 의 평균값에 0.85를 곱한 하한설계특성치를 기준으로 하면 감쇠장치 1기는 약 49 kN의 하중을 부담한다. 따라서 $419/49 = 8.55$ 로 9기의 감쇠장치가 필요한 것으로 계산되었다. 이에 따라 1층과 2층에는 4개, 3층에는 2개의 감쇠장치를 대칭적으로 배치하고 예비설계절차를 진행하였으나 4절의 절차 중 d-2)의 과정에서 감쇠장치가 목표성능점이

전에 허용변위를 초과하여 파단됨에 따라 지지구조의 강성을 조절하고 Fig. 11와 같이 12개의 감쇠장치를 배치하는 것으로 변경하였다.

(c) 지지구조 설계

지지구조는 감쇠장치 최대강도 f_{max} 에 1.2의 변동계수를 곱한 상한계설 계특성치에 해당하는 하중이 작용할 때 지지구조물이 탄성상태가 되도록 설계하였다. 설계결과는 Fig. 12와 같다.

구조해석프로그램을 사용하여 지지구조의 각층에 단위하중을 작용시켰을 때 발생하는 층변위를 모아 유연도계수 행렬을 구하였다. 산정된 유연도계수 행렬은 식 (20)과 같다.

$$[F] = \begin{bmatrix} 24.02 & 29.05 & 29.86 \\ 29.05 & 67.18 & 74.46 \\ 29.86 & 74.46 & 116.00 \end{bmatrix} * 10^{-5} mm/N \quad (20)$$

(d) 장치별 이력곡선을 보강전 구조물의 역랑곡선과 중첩

식 (19) 및 식 (16)을 이용하여 감쇠장치별 변형량을 구하고 이를 지붕층 변형량으로 치환한다음 역랑곡선과 중첩하였다. Fig. 13은 이러한 중첩을 통해 예상한 보강후 구조물의 역랑곡선과 실제 구조해석을 통해 구한 역랑곡선을 비교한 그래프이다.

그래프에는 스펙트럼변위로 변환된 장치별 역랑곡선도 함께 표시되어 있다. 3층에 설치된 감쇠장치의 경우 스펙트럼 변위가 93 mm 일 때 한계변형량 55 mm에 도달하여 파단이 발생하는 것으로 산정되었다. 실제 구조해석결과 3층 감쇠 장치의 파단은 $S_d=102$ mm에서 발생하였다.

Fig. 14은 해석프로그램으로 산출된 역랑곡선을 사용하여 성능점을 구해본 결과이다. 산정된 성능점의 변위는 초기설계시 목표성능점의 변위보

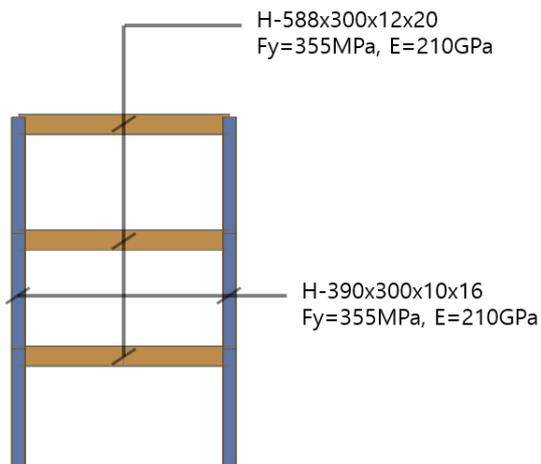


Fig. 12. Design of supporting structure (Model A)

다 작았다. 해석에 의한 역랑곡선으로 성능점을 산정한 후 목표성능을 만족하는지 확인하였다. Fig. 14와 같이 $S_d=76.31$ mm, $S_a=0.263$ g에서 성능점이 형성되었다.

Table 3은 비선형 정적절차에 의해 구해진 성능점에서의 성능점에서 구조물의 변형과 부재력을 사용하여 목표성능만족여부를 평가한 것이다. 학교 시설 보강 매뉴얼[18]을 참고하여 허용층간변형각만족여부와 수직부재와 수평부재의 성능수준별 연직하중 지진능력을 확인하였다. 표에 나타난 바와 같이 MCE 수준의 지진에 대해 붕괴방지 성능을 만족하였다. 1층의 층간변위는 1.01%로 거의 허용치에 근접하나 2층 및 3층의 층간변위는 그보다 훨씬 낮은 값으로 나타났다. 하지만, 국내기준에서 감쇠장치가 설치된

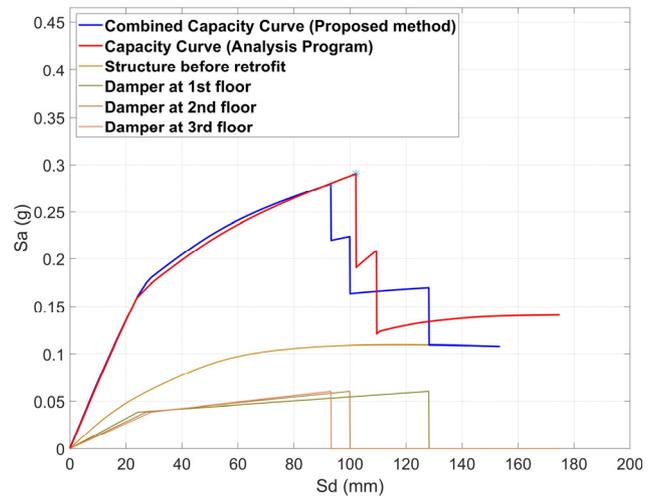


Fig. 13. Superposition of capacity curves (Model A)

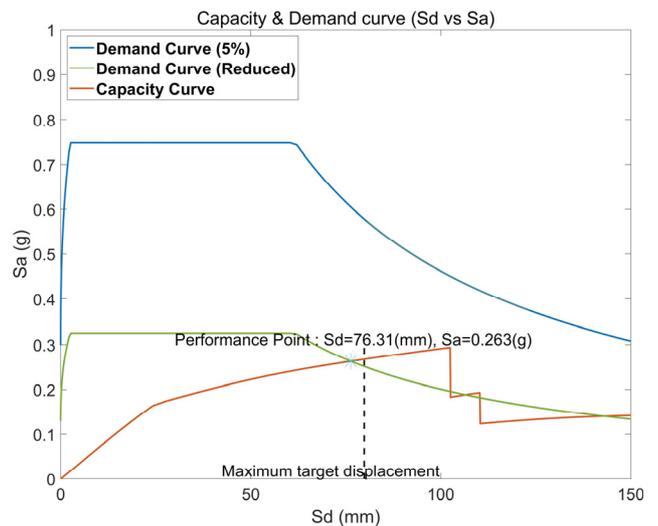


Fig. 14. Determination of performance point after retrofit (Model A)

Table 3. Seismic performance evaluation (Model A)

Category		1st story	2nd story	3rd story	Performance	
Story drift		1.01%	0.65%	0.31%	CP	
Gravity load resistance	Horizontal members	IO: 100%	IO: 100%	IO: 100%	IO	LS
	Vertical members	LS: 100%	IO: 100%	IO: 100%	LS	

구조물은 반드시 3차원 비선형 시간이력해석을 통해 목표성능만족여부를 판단하도록 하고 있다. 따라서 위와 같이 예비설계된 구조물이 실제로 내진 성능을 만족하는지에 대한 검토는 비선형 시간이력해석을 통해 확인하여야 하며 Table 3은 목표성능만족여부를 간접적으로 파악하기 위한 자료로 활용할 수 있다.

5.2 보강 예제 B

보강 예제 B는 내부설치의 경우이다. 감쇠 장치의 제원은 항복 변위 $\delta_y = 5\text{ mm}$, 항복하중 $f_y = 45\text{ kN}$, 한계 변형량 $\delta_{max} = 55\text{ mm}$, 한계 상태에서의 하중 $f_{max} = 70\text{ kN}$ 이다. 보강을 통해 요구되는 밀면전단력의 크기는 보강 예제 A와 동일하게 412 kN이다. 외부설치의 경우와 같이 감쇠장치의 f_y 와 f_{max} 의 평균값에 0.85를 곱한 하한설계특성치를 기준으로 하면 약 9기의 감쇠장치가 필요하여 10기 감쇠장치를 Fig. 15와 같이 1층에 10기 배치한다. 각 층의 층질량과 1차모드의 변위 현상 [0.462, 0.702, 1]을 바탕으로 횡력의 연직 분포를 계산하였다. 해당 모델에서 각 층의 질량 분포는 거의 동일하므로 횡력의 연직분포는 식 (9)에 따라 0.462 : 0.702 : 1 비율의 관계가 성립한다. 상부층에서부터 누적된 층전단력을 계산시 식 (10)에 따라 각 층 전단력의 비율은 2.164 : 1.702 : 1로 계산된다. 1층에 감쇠장치가 10개 배치되므로 상부층의 필요 배치 개수를 알기 쉽게 해당 비율을 다시 적으면 10 : 7.86 : 4.62이므로 2층에 8개 3층에 4개의 감쇠 장치를 추가로 배치하였다. Fig. 15은 이와 같은 감쇠장치 배치를 보여준다.

지지구조물 또한 예제건물 A과 마찬가지로 상한계설계특성치에 해당하는 감쇠 장치하중을 작용시 탄성범위내에 있도록 설계하였다. 지지구조물은 1층과 2층 모두 Fig. 16과 같이 설계하였다. 이때 지지구조물이 연성

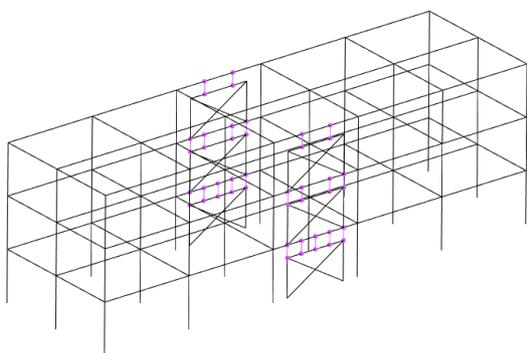


Fig. 15. Placement of dampers (Model B)

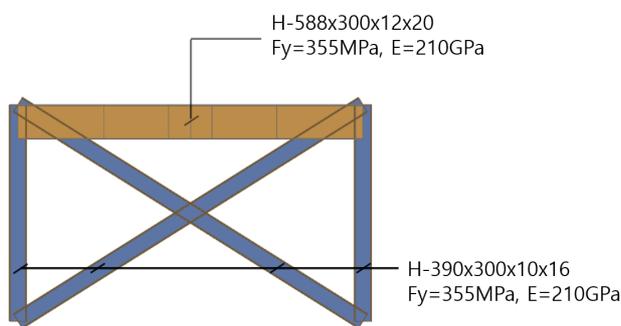


Fig. 16. Supporting structure design (Model B)

도 계수는 식 (21)과 같다.

$$[F] = [1.11] * 10^{-5} \text{ mm/N} \tag{21}$$

Fig. 17은 본 연구에서 제안한 절차를 통해 1층 감쇠장치의 역량곡선을 중첩시켜 구한 역량곡선과 실제 구조해석을 통해 구한 역량곡선을 비교한 그래프이다. 보강 예제 B에서의 추정 역량곡선 그래프도 실제해석프로그램에서 구한 역량곡선 그래프와 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 추정 그래프에서 1층에 설치된 감쇠장치가 응답스펙트럼 변위 115.7 mm에서 한계변형량 55 mm에 도달하여 파단이 발생하는 것으로 산정되었다. 실제 구조해

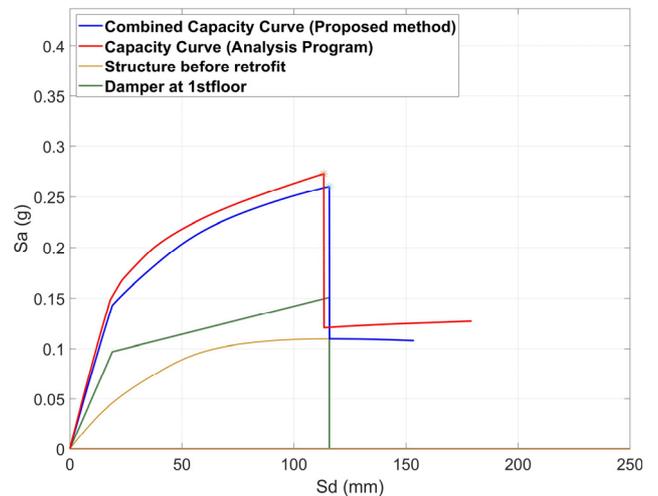


Fig. 17. Superposition of capacity curves (Model B)

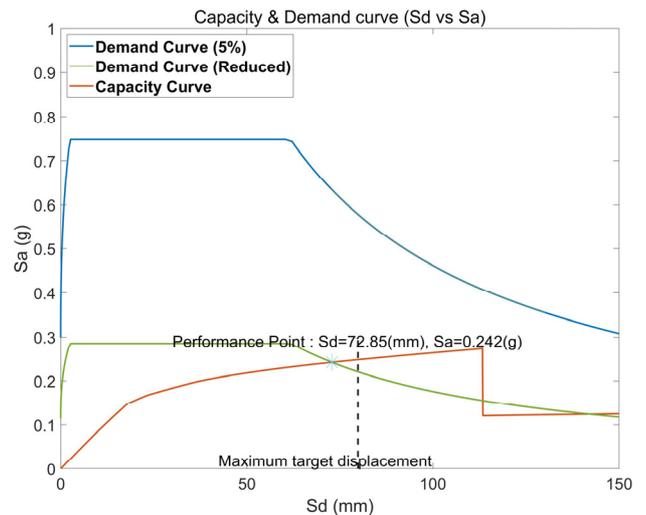


Fig. 18. Determination of performance point after retrofit (Model B)

Table 4. Seismic performance evaluation (Model B)

Category		1st story	2nd story	3rd story	Performance	
Story drift		1.03%	0.56%	0.30%	CP	
Gravity load resistance	Horizontal members	IO: 100%	IO: 100%	IO: 100%	IO	LS
	Vertical members	LS: 100%	IO: 100%	IO: 100%		

석결과 1층의 감쇠 장치의 파단은 $S_d=113.3$ mm에서 발생하였다. 추정된 그래프에서 성능점은 $S_d=77.27$ mm, $S_a=0.234$ g였으며, 실제 해석결과 Fig. 18과 같이 $S_d=72.85$ mm, $S_a=0.242$ g에서 형성되었다. 이후 앞에서와 같이 성능평가를 진행하여 Table 4와 같은 결과를 얻었다.

6. 결론

감쇠 장치를 포함한 구조물을 3차원 시간이력해석의 시행착오를 통해 설계하는 건 상당한 시간을 소비한다. 따라서 본 연구에서는 보강전 구조물의 비선형 정적 해석 결과를 이용하여 이력형 감쇠장치를 이용하는 내진보강의 예비 설계 절차를 제안하였다. 제안된 예비 설계 절차를 요약하면 아래와 같다.

- (a) 보강량 산정: 허용변위각을 기준으로 성능점을 가정하고 이로부터 보강량을 산정
- (b) 감쇠장치 수량 산정 및 배치: 산출된 보강량(밀면전단력)으로부터 필요한 감쇠장치의 수량 산정
- (c) 지지구조 설계: 내부설치 혹은 외부설치의 형태로 감쇠장치를 기존 구조요소와 연결하기 위한 구조물을 설계.
- (d) 장치별 이력곡선을 보강전 구조물의 역량곡선과 중첩: 감쇠장치의 변위를 지붕층변위로 변환하고 기존 구조물의 역량곡선과 중첩.

제안된 예비설계절차를 예제건물에 적용하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 본 연구에서 제시한 예비설계 절차는 이력 거동 감쇠 장치의 예비설계를 위한 방안으로서, 이를 사용할 경우 기존 구조물의 비선형 정적 해석을 통한 성능평가 이후, 추가적인 모델링 작업 진행 이전에 기존 구조물의 역량곡선과 감쇠 장치의 특성치를 이용하여 감쇠 시스템의 예비설계를 효과적으로 진행할 수 있다. 제안된 예비설계절차의 핵심은 허용층간변위각을 기준으로 성능점을 가정하고 이로부터 보강량 즉, 필요한 감쇠장치의 수량을 산정한다는 점이다. 또한 지지구조의 강성을 고려하여 감쇠 장치의 요구변형이 허용치 이내인지 쉽게 확인할 수 있다는 점이다.
- 2) 예비 설계 절차를 이용해 도출한 역량곡선의 개형과 실제 모델을 해석한 역량곡선의 개형은 보강을 통해 변형형상이 크게 변화하지 않을 경우 매우 유사한 모습을 보였다.

/ REFERENCES /

1. KDS 41 17 00. Seismic building design code, KCSC, c2019.
2. ASCE/SEI 7-16. Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures, ASCE, c2017.

3. Seismic Building Design Code and Commentary(KBC). AIK, c2019.
4. Park SE, Park MH, Kim JK. Optimum of Damper Position for Steel Frame Structure on Seismic Design. KSIC. 2009;12(4):187-192.
5. Lee SH, Min KW, Lee R, Lee HG, Sung KG, Kim DK. Preliminary design procedure of Mr dampers for controlling seismic response of building structures. In: Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions (ERMR 2004). WORLD SCIENTIFIC; c2005.
6. Roh JE, Lee SH. Preliminary design procedure for practical application of dampers using earthquake response spectrum. J Earthq Eng Soc Korea. 2019;23(2):109-117.
7. FEMA356. Federal emergency management agency. FEMA, c2000.
8. Go CG, Sui CH, Shih MH, Sung WP. A linearization model for the Displacement Dependent Semi-active Hydraulic Damper. J Vib Control. 2010;16(14):2195-214.
9. Connor JJ, Wada A, Iwata M, Huang YH. Damage-controlled structures. I: Preliminary design methodology for seismically active regions. J Struct Eng (NY). 1997;123(4):423-431.
10. Moon KS. Vertically distributed multiple tuned mass dampers in tall buildings: performance analysis and preliminary design. Struct Des Tall Spec Build [Internet]. 2009; Available from: <http://dx.doi.org/10.1002/tal.499>
11. Teran-Gilmore A, Virto-Cambray N. Preliminary design of low-rise buildings stiffened with buckling-restrained braces by a displacement-based approach. Earthq Spectra. 2009;25(1):185-211.
12. Liu W, Tong M, Lee GC. Simple procedure for preliminary design of structural damper. In Proc. 13th World Conference on Earthquake Engineering. c2004.
13. Kim J, Choi H, Min KW. Performance-based design of added viscous dampers using capacity spectrum method. J Earthq Eng. 2003;7(1):1-24.
14. Xiao Y, Zhou Y, Huang Z. Efficient direct displacement-based seismic design approach for structures with viscoelastic dampers. Structures. 2021;29:1699-1708.
15. ATC 40. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. ATC, c1996.
16. ASCE 41-17. Seismic evaluation and retrofit of existing buildings. ASCE, c2017.
17. Guidelines for evaluating seismic performance of existing facilities (buildings). KISTEC, c2019.
18. Evaluation of seismic performance and reinforcement manuals for school facilities. MOE, c2019.
19. OpenSees 3.3.0. Open System for Earthquake Engineering Simulation. Available from: <https://opensees.berkeley.edu>
20. STKO. Scientific Toolkit for OpenSees. Available from: <https://asdea.soft.net/?product=stko>
21. OpenSeesWiki. Available from: <https://opensees.berkeley.edu/wiki>