

가새형 소성변형감쇠기의 설계 방법에 관한 연구

Design of Energy Absorbing Braces

김진구* 이강준**
Kim, Jinkoo Lee, Kangjoon

ABSTRACT

Unbond brace hysteretic dampers are generally used to prevent or decrease structural damage in buildings subjected to strong earthquake by its energy dissipating hysteretic behavior. According to a previous research, the optimum ratio of device yield strength to story yield strength of the combined system has been identified as the most important parameter for characterizing the performance of this device. In this research, the validity and the applicability of the previous research has been investigated and a new approach has been proposed through earthquake response analysis of a steel structure installed with unbond brace type hysteretic damper.

1. 서 론

소성 변형 감쇠기는 항복 응력이 낮고 연성능력이 큰 철골부재로 구성되며, 재료의 안정된 하중-변위 이력거동에 의하여 진동에너지를 소산하여 지진에 대한 구조물의 응답을 줄이고 손상을 방지한다. 즉 작은 지진이나 바람하중에 대해서는 철골 가새와 같이 강성을 증가시키는 역할을 하고 큰 지진에 대해서는 구조부재가 항복하기 전에 먼저 항복하여 구조 부재들에 요구되는 소성변형 요구량을 줄인다. 현재 개발되어 있는 소성 변형 감쇠기로는 X형이나 역삼각형의 얇은 판들이 겹쳐진 ADAS (Added Damping and Stiffness)^{(1),(2)}와 철골부재를 철골 튜브속에 설치하고 그 사이를 콘크리트로 채워 압축력을 받을 때 좌굴이 발생하지 않아 안정된 이력거동에 의한 에너지 소산능력을 높인 가새형 감쇠기 (unbond brace, buckling restrained brace, energy absorbing brace)등이 있다⁽⁶⁾ (그림 1). 두 방식의 형태는 다르지만 에너지 소산 방식이 재료자체의 하중-변위 이력거동에 의한 것이라는 점에서는 유사하다고 할 수 있다. 특히 가새형 감쇠기는 제작에 정밀한 기술이나 큰 비용이 필요치 않으며 기둥과 기둥 사이에 가새로 간단히 설치할 수 있기 때문에 신축건물 뿐 아니라 기존 건물의 내진성능을 향상시키기 위한 효율적인 진동제어 방법이라 할 수 있다.

이러한 소성변형감쇠기에 관한 연구는 주로 감쇠기 자체의 물리적 특성이나 모델링 방법에 국한되어 왔으며 구조물에 설치되었을 때의 거동이나 설계방법에 관한 연구는 매우 부족한 상태이다. 기존의 연구결과에

* 정희원 · 성균관대학교 건축공학과, 조교수
** 성균관대학교 건축공학과, 석사과정

따르면 소성변형 감쇠기의 주요 성능 지수에는 감쇠기의 항복변위, 구조물과의 항복강도비 및 강성비 등이 있다^{(3),(4)}. 이러한 설계변수들은 구조부재의 항복을 방지하고 전체 시스템의 에너지 소산 능력을 극대화한다는 측면에서 중요하다. Inoue and Kuwahara⁽⁴⁾는 소성감쇠기가 설치된 간단한 구조물의 힘과 변위관계를 이용하여 유효감쇠비를 최대로 하는 소성감쇠기의 최적 강도비를 구하였다. 본 연구에서는 가새형 소성변형감쇠기를 대상으로 강도비 및 강성비의 영향 및 이를 이용한 감쇠기의 설계 방법에 대하여 연구하였다.

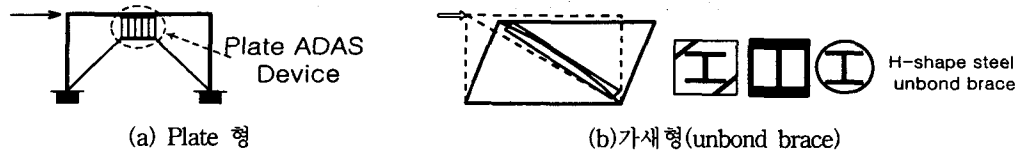


그림 1. 소성변형감쇠기

2. 소성변형감쇠기의 최적 강도비

소성변형 감쇠기가 설치된 구조물의 강성비 및 힘-변위 관계는 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 서로 다른 강성과 항복강도로 완전 탄소성 거동하는 감쇠기와 구조물이 합쳐져 전체 시스템의 거동은 2개의 선형 구간과 완전 소성 구간을 갖는다.

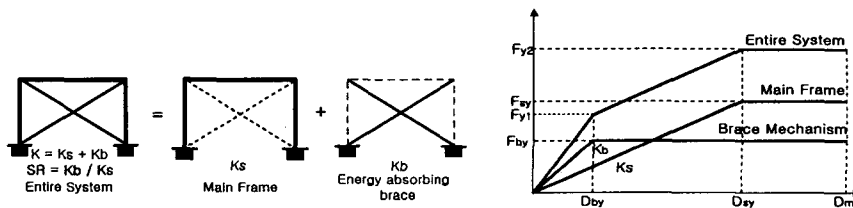


그림2. 소성변형 감쇠기와 구조물의 조합

F_{sy} 와 F_{by} 를 각각 층과 소성변형 감쇠기의 항복강도, D_{sy} 와 D_{by} 를 층과 감쇠기의 항복변위, K_s 와 K_b 는 층과 감쇠기의 횡 강성이라고 할 때, 전체 구조 시스템의 항복점들인 F_{y1} 과 F_{y2} 는 다음과 같다.

$$F_{y1} = F_{by} + K_s \cdot D_{by} \quad \text{--- (1)}$$

$$F_{y2} = F_{by} + F_{sy} \quad \text{--- (2)}$$

한편 강성비(SR)와 강도비(β)는 다음과 같이 정의한다.

$$SR = K_b / K_s \quad \text{--- (3)}$$

$$\beta = F_{by} / F_{y2} \quad \text{--- (4)}$$

구조물의 피해를 방지하기 위해서는 소성변형 감쇠기가 먼저 소성 거동을 시작해야 하므로 감쇠기의 항복변위는 구조물의 항복변위 보다 낮아야 하며 따라서 감쇠기와 구조물의 강도비와 강성비는 다음 조건을 만족해야 한다.

$$\beta < \frac{SR}{SR+1} \quad \text{(5)}$$

정상상태에서 감쇠기가 설치된 구조물 전체의 반복적인 이력 거동을 그림3과 같이 나타내면 식(6)과 같이 등가의 점성 감쇠비(equivalent viscous damping ratio)로 나타낼 수 있다.

$$\xi_{eq} = \frac{E_p}{4\pi E_e} \quad (6)$$

여기서 E_p 는 한 사이클 동안에 전체 시스템에 의하여 소산되는 에너지량이고, E_e 는 변형 에너지다. 이 값들은 그림3에서 각각의 면적을 계산하여 구할 수 있다.

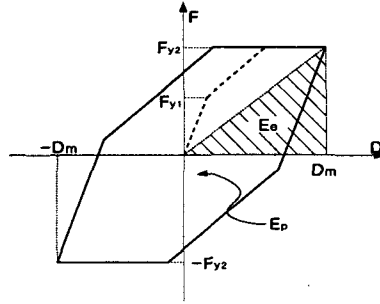


그림3. 소성변형 감쇠기가 설치된 구조물의 정상상태 이력거동

$$4\pi\xi_{eq} = \frac{(E_{pb} + E_{ps})}{(E_{eb} + E_{es})} \quad (7)$$

$$\frac{\pi}{2}\xi_{eq} = 1 - \frac{D_{sy}F_{sy}}{D_m(F_{by} + F_{sy})} - \frac{D_{by}F_{by}}{D_m(F_{by} + F_{sy})} \quad (8)$$

여기서 감쇠기와 구조물의 연성률을 각각 μ_b , μ_s 라고 하면

$$\mu_b = D_m/D_{by} = \mu_s D_{sy}/D_{by} \quad (9)$$

이와 같은 관계가 성립하고, 모든 항복변위를 강성비와 항복강도로 나타내면 식(8)은 다음과 같이 된다.

$$\frac{\pi}{2}\xi_{eq} = 1 - \frac{1}{\mu_s} \left(\frac{F_{sy}}{F_{by} + F_{sy}} \right) - \frac{1}{\mu_s SR} \frac{F_{by}}{F_{sy}} \left(\frac{F_{by}}{F_{by} + F_{sy}} \right) \quad (10)$$

이 식을 식(2)와 식(4)의 관계를 이용하여 강도비로 표현할 수 있다.

$$\frac{\pi}{2}\xi_{eq} = 1 - \frac{1}{\mu_s}(1 - \beta) - \frac{1}{\mu_s SR} \left(\frac{\beta^2}{1 - \beta} \right) \quad (11)$$

그림 4와 5는 강성비 1, 2, 3, 그리고 연성률(μ_s) 2와 3에 대하여 β 와 ξ_{eq} 의 관계를 나타내고 있다. SR과 μ_s 가 클수록 E_p 가 커지므로 ξ_{eq} 는 증가한다. 또한 ξ_{eq} 는 특정한 β_{opt} 에서 최대값을 갖게 되는데, 이 값은 구조물의 에너지 소산능력을 최대로 하는 강도비이므로 소성변형 감쇠기의 설계에 있어서 감쇠기의 최적 강도가 되며 이때의 β 값은 식 (11)에서 강성비 SR이 상수라고 가정했을 때 β 로 편미분한 식을 0으로 놓고 구할 수 있다:

$$\beta_{opt} = 1 - \frac{1}{\sqrt{SR+1}} \quad (12)$$

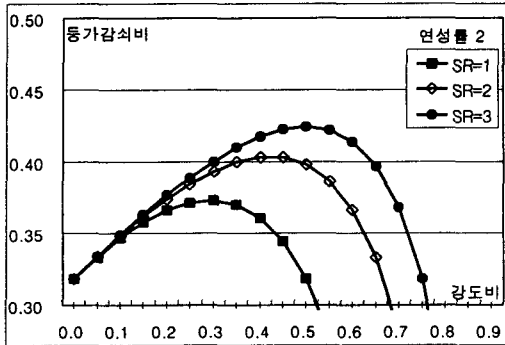


그림4. β 와 ξ_{eq} 의 관계 (연성률 2)

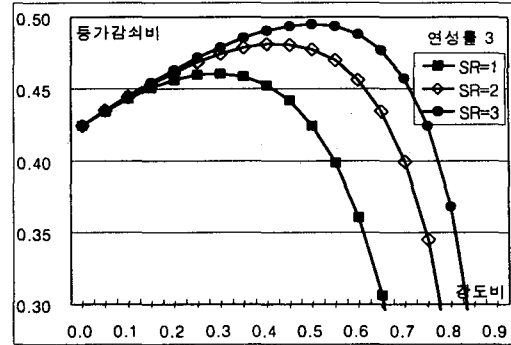


그림5. β 와 ξ_{eq} 의 관계 (연성률 3)

식 (12)에 식 (5)의 상한선보다 큰 감도비를 대입하고 식 (11)을 이용하여 등가 감쇠비를 구할 경우 감쇠기 장치 이전보다 등가 감쇠비가 작아짐을 알 수 있다.

여기까지는 Inoue and Kuwahara⁽⁴⁾의 연구결과와 동일하다. 그러나 다음 절에 기술한 바와 같이 가새형 소성변형감쇠기의 경우 강성비와 감도비는 서로 독립적이지 않고 밀접한 관계가 있으므로 감쇠기 설계에 식 (12)의 관계를 적용할 수 없으며 감도비가 아닌 다른 설계변수가 필요하다.

3. 가새형 소성변형감쇠기의 설계

3.1. 감도비와 강성비의 관계

앞서 구한 최적 감도비는 강성비와 최대 변위(D_m)에 따라 달라진다. 그러나 축방향 힘을 받는 가새형태의 소성변형 감쇠기의 경우에는 감도비와 강성비가 서로 독립적으로 변화할 수 없으므로 위에서 구한 감도비를 최적값이라 할 수 없다. 이를 검증하기 위하여 먼저 식(3)과 축방향으로 저항하는 가새 부재의 강성과 단면적의 관계에 의하여 가새의 단면적 A_b 를 구하면 다음과 같다:

$$A_b = \frac{K_b' L_b}{E_b} = \frac{K_b L_b}{E_b \cos^2 \theta} = \frac{(SR K_s) L_b}{E_b \cos^2 \theta} \quad (13)$$

여기서 K_b 와 K_b' 은 가새의 횡방향 및 축방향 강성, E_b 는 가새에 사용된 재료의 탄성계수, L_b 는 가새의 길이, θ 는 가새가 구조물의 횡 방향과 이루는 각도이다. 따라서 가새형 감쇠기의 항복강도(F_{by})와 항복변위(D_{by})는 다음과 같다:

$$F_{by} = \frac{(SR K_s) L_b}{E_b \cos^2 \theta} \sigma_{by} \quad (14)$$

$$D_{by} = \frac{F_{by}}{K_b} = \frac{L_b}{E_b} \sigma_{by} \quad (15)$$

여기서 σ_{by} 는 가새에 사용된 재료의 항복 응력이다. 식(14)와 식(2)를 이용하여 감도비를 나타낸 식(4)를 다시 정리하면 감도비와 강성비의 관계식을 다음 식 (16)과 같이 구할 수 있다. 식 (16)으로 구한 β 는 식 (5)

의 강도비 상한값 보다 작으므로 소성변형감쇠기의 요건을 만족한다.

$$\beta = \frac{C_2 SR}{C_1 + C_2 SR} \quad (16)$$

여기서 C_1 과 C_2 는 재료나 구조물의 조건에 따른 상수이며 다음과 같다:

$$C_1 = F_y E_b \cos^2 \theta \quad C_2 = K_s L_b \sigma_{by}$$

강도비(β)와 강성비(SR) 사이에 위와 같은 관계가 설립하므로 유효감쇠비식 (11)을 이 관계를 이용하여 식 (17)과 같이 강도비만의 함수로 나타내면 다음과 같다:

$$\frac{\pi}{2} \xi_{eq} = 1 - \frac{1}{\mu_s} \left(1 + \frac{C_2 - C_1}{C_1} \beta \right) \quad (17)$$

식 (17)은 강도비에 관한 1차식이 되어 식(11)과는 달리 강도비가 증가함에 따라서 ξ_{eq} 역시 선형으로 증가한다(그림 6). 이는 일반적인 소성변형감쇠기를 대상으로 얻어진 그림 4, 5의 결과와 상이함을 알 수 있다.

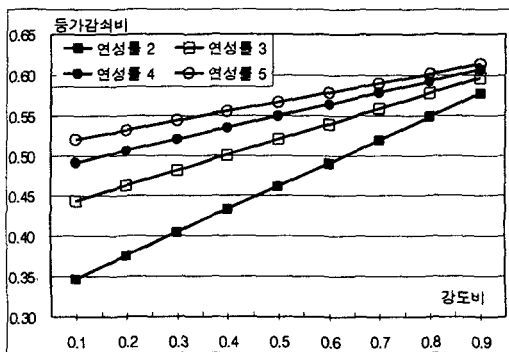


그림6. 가새형 감쇠기의 β 와 ξ_{eq} 의 관계

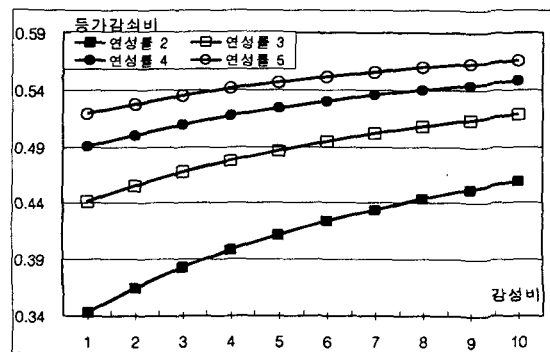


그림7. 가새형 감쇠기의 SR과 ξ_{eq} 의 관계

그림 4와 5에 의하면 일반적인 소성감쇠기의 경우 특정한 강성비에 대하여 강도비는 여러 값이 주어 질 수 있고, 그 값들 중에서 식(12)에 해당하는 강도비가 최적 강도비가 되며 이 값은 구조물에 상관없이 강성비가 같으면 일정하게 된다. 그러나 가새형인 경우 식(16)과 같이 강성비가 정해지면 하나의 강도비만을 갖게 되고 강성비가 같아도 구조물의 강성 및 항복강도 등에 따라서 강도비가 달라진다. 결국 가새형 소성변형 감쇠기의 경우 강도비는 독립 변수가 아니라 강성비와 구조물 및 재료 조건에 따라 변하는 종속 변수이다. 또한 가새의 항복강도 역시 재료가 주어지면 식(14)와 같이 강도비와 상관없이 강성비에 의하여 정해질 수 있다. 따라서 가새형 소성변형 감쇠기의 경우 ξ_{eq} 를 강도비에 관하여 나타내는 것보다 강성비로 표현하는 것이 합리적이다. 강도비 대신 식(16)를 이용하여 식(11)을 강성비로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\pi}{2} \xi_{eq} = 1 - \frac{1}{\mu_s} \left(\frac{C_2}{C_1} + \frac{C_1 - C_2}{C_2 SR + C_1} \right) \quad (18)$$

이 식을 이용하여 강성비 SR에 따른 ξ_{eq} 의 변화를 보면 그림 7과 같으며 강도비(그림 6)에 대하여 표현한 바와 같이 강도비가 증가함에 따라 증가한다. 이것은 그림 4나 5에 나타난 일반적인 소성감쇠기의 경우와 같이 어떠한 최적값을 갖는 것은 아니며 다만 강성비증가에 따른 ξ_{eq} 의 증가폭이 줄어드는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 유효감쇠비를 바탕으로 가새형 감쇠비를 설계할 경우 일반적인 소성감쇠기와 달리 강도비나 강성비의 최적 값이 명확히 나타나지 않으며, 식 (5)의 제한조건을 만족하는 범위에서 응답의 감소 효과, 목표로 하는 성능수준, 경제성 등을 만족하는 강성비를 찾아서 설계해야 할 것이다.

3.2. 최대변위의 변화

Inoue and Kuwahara⁽⁴⁾는 유효 감쇠비의 식 (11)에서 연성률 μ_s , 즉 최대 변위를 임의로 가정하고 식(12)와 같이 최적 강도비를 구하였다. 가새형 소성변형 감쇠기의 경우 강성비와 강도비가 밀접한 관계가 있으며 연성률 μ_s 역시 강성비 또는 강도비에 따라서 변할 수 있다. 이것은 일반적인 소성감쇠기에도 적용되는 현상으로, 특정한 강성비에 대하여 강도비가 변하면 최대변위 즉 μ_s 역시 변하게 되므로 그림 4나 5의 결과는 실제로 나타나기 어렵다. 그러나 강성비와 강도비의 관계처럼 μ_s 와 강도비 사이의 관계식을 손쉽게 구할 수는 없는데, 이것은 μ_s 가 특정한 하중에 의하여 구조물에 나타나는 최대변위 값으로 구해지기 때문이다.

이러한 문제를 규명하기 위하여 감쇠기가 설치된 단층 구조물을 해석하였다. 일반적인 감쇠기에 대하여 유도된 식 (12)를 이용하여 각 강성비별 최적 강도비로 설계된 가새형 감쇠기와, 가새의 항복용력이 주어진 상태에서 강성비를 조절하여 설계한 경우를 비교하여 결과를 비교하였다. 해석 모델로는 4m 층고와 6m 경간에 보와 기둥을 가진 단층 골조를 정적 탄소성 해석하여 층의 항복강도 (F_{sy})와 항복변위 (D_{sy})를 찾아내어 층강성(K_s)을 구하였다 (표1). 강성비는 1에서 6까지 설정하고 식 (13)을 이용하여 가새의 단면적을 구하였다. 최적 강도비를 이용한 설계는 각각의 강성비에 대하여 식(12)에 따라서 최적 강도비를 구하고 식 (4)와 식(2)를 적용하여 감쇠기의 강도를 결정한 후, 식 (14)를 이용하여 최적 항복용력을 산정하였다 (표2). 재료의 조건이 주어진 경우에 대해서는 항복용력을 1000kg/cm²로 주고 식 (14)를 이용하여 각 강성비에 해당하는 감쇠기를 설계하였다. 이와 같이 설계한 감쇠기들을 설치한 해석모델에 El Centro(1940, 남북성분)지진을 가하고 동적 시간이력 해석을 수행한 후 최대변위와 각 구조 부재들의 연성도 요구량 (ductility demand)을 비교하여 최적 강도비를 이용한 설계 방식을 검토하였다.

표1. 층 항복강도, 층 항복변위, 층강성

F_{sy} (kg)	D_{sy} (cm)	K_s (kg/cm)
44145.000	31.196	13812.578

표2. 각 강성비별 최적 항복용력

SR	1	2	3	4	5	6
σ_{opt} (kg/cm ²)	3855.217	3406.715	3102.439	2876.119	2698.172	2552.922
β_{opt}	0.293	0.423	0.500	0.553	0.592	0.622

표 2에 따르면 강성비가 증가할수록 각 강성비에 해당하는 최적 강도비는 증가하지만 최적 응력 값은 감소하는 것을 알 수 있다. 식 (13)과 (14)에서 강성비 증가에 따른 단면적의 증가량이 강도비 증가에 따른 강도의 증가량 보다 크기 때문에 항복용력은 오히려 감소하게 된다. 그림 8에 의하면 강성비가 증가할수록 최대변위가 작아지지만 그 감소 폭은 줄어드는데 이것은 강성비에 대한 유효 감쇠비 관계 (그림 7)과 같은 양상이다. 또한 각 강성비별 비교에서 식 (12)에서 구한 최적 항복용력을 이용한 경우 보다 고정된 값 1000 kg/cm²를 이용한 경우 응답이 더 작은 것을 알 수 있다. 이것은 최적강도비를 산정할 때 강도비와 강성비의 연관성을 무시하고 최대 연성률 μ_s 를 상수로 가정했기 때문이라고 할 수 있다. 따라서 적절한 감쇠기의 설

계를 위해서는 먼저 특정한 강성비에 해당하는 감쇠기를 설치하고, 구조물을 해석하여 그 응답 변화를 검토한 후 강성비를 조절하여 적절한 감쇠기를 설계해야 할 것이다.

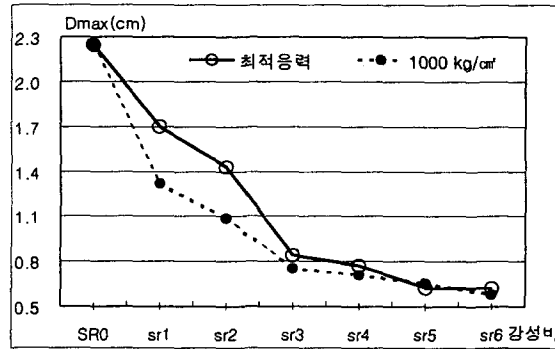


그림 8. 가새형 감쇠기의 설치에 의한 최대변위

3.3. 진동제어 효과의 비교

그림 9와 10은 강성비에 따른 구조부재와 감쇠기의 연성 요구량을 나타낸다. 이른바 최적 강도비를 사용하여 감쇠기를 설계한 경우에는 구조부재에 요구되는 연성 요구량이 더 큰 것을 볼 수 있는데 이는 구조부재에 더 많은 손실이 가해졌음을 의미한다. 이것은 최적 강도비에 해당하는 감쇠기의 항복응력이 더 커서 감쇠기의 항복거동이 적게 나타나기 때문이다 (그림10). 참고문헌⁽⁴⁾에서 제시한 방법과 같이 감쇠기와 구조물이 합쳐진 전체의 거동에 근거하여 산정된 최적 강도비를 이용한 설계방법은 감쇠기나 구조물 각각의 거동을 고려하지 않았기 때문에, 구조부재의 피해를 방지한다는 소성변형감쇠기의 근본적 역할을 충분히 만족시킬 수 없다. 따라서 가새형 소성변형 감쇠기에 있어서는 구조물의 전체 거동에 근거한 등가 감쇠비를 최대화하는 강도비보다 부재의 연성 요구량과 같이 소성변형감쇠기의 특성을 표현할 수 있는 응답을 고려하여 설계하는 것이 합리적이라 할 수 있다.

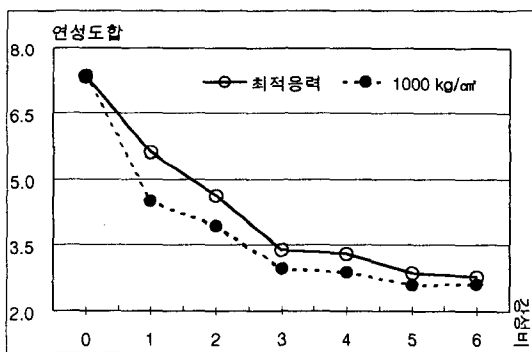


그림 9. 보와 기둥의 연성요구량의 변화

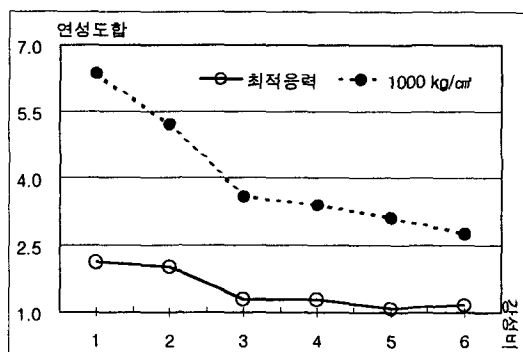


그림 10. 감쇠기의 연성요구량의 변화

4. 결 론

본 연구에서는 가새형 소성변형감쇠기의 설계에 있어 Inoue and Kuwahara⁽⁴⁾가 제안한 구조물 전체의 등가 감쇠비를 최대로 하는 최적 강도비를 이용하는 방법의 타당성을 검토하고 좀더 합리적인 설계방법을 제시하였으며 그 결과를 정리하면 다음과 같다:

1. 가새형 감쇠기의 특성상 강도비와 강성비는 밀접한 관련이 있기 때문에 기존의 방식에 의한 최적 강도비는 큰 의미가 없다.
2. 구조물의 최대변위는 강도나 강성에 따라서 변화하는데 이 값을 임의로 설정하고 구한 최적 강도비는 정확한 값이 아니다.
3. 가새형 소성변형 감쇠기는 강성비를 주요 변수로 설계하는 것이 합리적이며, 동적 해석을 통하여 응답을 구한 후 그 효과를 검토함으로써 강성비의 적절한 값을 구하는 것이 적절한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구 과제(과제번호:1999-1-310-001-3)의 일환으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Housner, G. W. et al. "Structural Control: Past, Present, and Future", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.123, No. 9, Sep 1997, pp. 897-971.
2. Dargush G. F., Soong T. T., "Behavior of metallic plate dampers in seismic passive energy dissipation systems", *Earthquake Spectra*, Vol. 11, No. 4, Nov 1995, pp. 545-568.
3. Ch. Xia and Hanson, R. D., "Influence of ADAS element parameter on building seismic response", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 7, July 1992, pp. 1903-1918.
4. Inoue, K. and Kuwahara, S., "Optimum strength ratio of hysteretic damper", *Earthquake engineering and structural dynamics*, Vol. 27, No. 6, Jun 1998, pp. 577-588
5. Nakashima, M., Saburi, K. and Tsuji, B., "Energy input and dissipation behaviour of structures with hysteretic dampers", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 25, No. 5, May 1996, pp. 483-496.
6. Trembly, R., Degrange, G., and Blouin, J., "Seismic rehabilitation of a four-storey building with a stiffened bracing system", 8th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Department of Civil Engineering, University of B.C., Vancouver, June 1999, pp. 549-554.