

# 강성저감형 비탄성 단자유도 구조물에 설치된 완전탄소성 감쇠기의 제진성능

## Seismic Control of Stiffness-degrading Inelastic SDOF Structures with Fully Elasto-Plastic Dampers

박지훈<sup>1)</sup> · 김훈희<sup>2)</sup> · 김기면<sup>3)</sup>

Park, Ji Hun · Kim, Hun Hee · Kim, Ki Myon

**국문 요약** >> 본 논문에서는 철근콘크리트 구조물과 같이 강성저감으로 인해 낮은 에너지 소산능력을 갖는 구조물의 제진성능을 비선형시간이력해석을 통해 조사하였다. 원구조물은 modified Takeda 이력모델을 갖는 단자유도시스템으로 이상화하였고, 완전탄소성 모델로 이력감쇠장치를 모델링하였다. 수치해석결과의 통계를 기초로 등가선형화에 의한 제진응답 평가의 적용성을 검증하였고, 제진보강 구조물의 응답예측을 위한 경험식을 제시하였다. 결과적으로 등가선형화를 통한 변위응답 평가보다는 본 연구에서 제시한 경험식을 이용하여 요구연성도를 추정하는 것이 더 정확하다. 경험식에서 얻어진 적정 감쇠기 항복강도는 완전탄소성시스템에 대한 최적 항복강도와는 상당한 차이를 가진다. 획득 가능한 연성도 저감효과는 원구조물의 고유주기가 짧을수록, 지진의 상대적 강도가 약할수록 우수한 것으로 나타났다.

**주요어** 제진, 탄소성 감쇠기, 등가감쇠비, 강성저감, 요구연성도

**ABSTRACT** >> The seismic control effect of reinforced concrete structures with low energy dissipating capacity due to stiffness degradation is investigated through nonlinear time history analysis. The primary structure is idealized as a SDOF system of modified Takeda hysteresis rule and an elasto-perfectly-plastic nonlinear spring is added to represent a hysteretic damping device. Based on statistics of the numerical analysis, equivalent linearization techniques are evaluated, and empirical equations for response prediction are proposed. As a result, estimation of the ductility demand with proposed empirical equations is more desirable than the equivalent linearization techniques. The optimal yield strengths based on empirical equations are significantly different from the optimal yield strength of elasto-perfectly-plastic systems. Also, the results indicate that the reduction effect of the ductility demand is more remarkable for smaller natural periods.

**Key words** Seismic control, Elasto-plastic damper, Equivalent damping ratio, Stiffness degradation, Ductility demand

### 1. 서론

에너지소산형 감쇠기를 이용한 제진기술은 감쇠효과를 통해 구조물에 작용하는 지진하중을 저감시키는 역할을 하며, 다양한 형태의 감쇠기가 개발되어 적용되고 있다.<sup>(1)</sup> 제진설계에 있어서 감쇠기에 의한 제진효과를 예측하는 것은

매우 중요하다. 대부분의 제진설계에 있어서 감쇠기의 이력거동에 의한 에너지소산 효과는 등가감쇠비의 형태로 설계에 반영되어 왔다. 2003 NEHRP Provision<sup>(2)</sup> 및 이를 토대로 신축건물의 제진설계방법을 제시한 ASCE 7-05<sup>(3)</sup>에서는 구조물 및 감쇠기의 이력거동에 의한 에너지 소산효과를 등가감쇠비로 환산한 뒤 그에 해당되는 응답저감계수로 유효주기에 대한 탄성응답을 나눠 줌으로써 제진응답을 산정하도록 하고 있다. 그러나 구조물과 감쇠기가 모두 비탄성 이력거동을 하는 경우에 비탄성 이력거동에 의한 에너지 소산량을 어떻게 구할 것인가에 대해서 명확하게 정의하고 있지 않다.

2003 NEHRP Provision의 기초가 된 Ramirez 등<sup>(4),(6)</sup>의

<sup>1)</sup> 정희원·인천대학교 도시건축학부, 조교수  
(교신저자: jhpark606@incheon.ac.kr)

<sup>2)</sup> 인천대학교 도시건축학부, 석사과정

<sup>3)</sup> 인천대학교 도시건축학부, 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2010년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2010. 3. 26 / 수정일 1차 : 2010. 5. 31, 2차 : 2010. 6. 9 /  
게재확정일 : 2010. 6. 9)

연구 및 Whittaker 등<sup>(5)</sup>의 연구에서는 구조물의 이력거동에 해당되는 등가감쇠비와 감쇠기의 이력거동에 의한 등가감쇠비를 기본감쇠비와 단순히 합하여 전체 등가감쇠비로 간주하였으며, 이와 같이 평가된 등가감쇠비가 3층 및 6층 철골모멘트골조 구조물의 제진응답을 상당히 정확하게 평가함을 보고하였다. 그러나 이들 연구에서는 원구조물이 감쇠기와 유사한 완전탄소성 형태의 이력특성을 갖는 철골구조물을 대상으로 검증을 수행하여 반복 변위 발생 시 강성 및 강도가 저감되는 철근콘크리트 구조물에 대해 적절한 검증이 이루어 지지 않았다.

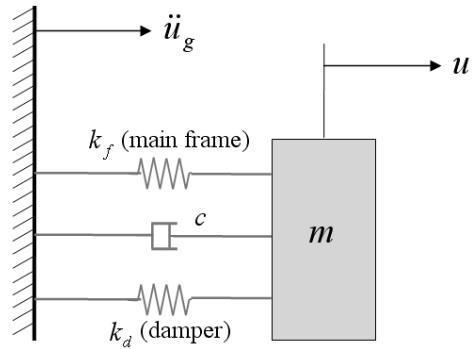
기존건축물의 내진보강에 관련해서는 FEMA-440<sup>(7)</sup>에서 FEMA-356<sup>(8)</sup> 및 ATC-40<sup>(9)</sup>의 방법론을 수정하여 등가주기 및 등가감쇠비, 변위응답수정계수를 경험식에 기초하여 수정 제시하고 있으며, ASCE 41-06<sup>(10)</sup>에서 이를 반영하고 있으나, 제진장치가 설치된 건물과 같이 이질적인 두 요소가 병존하는 구조물이 아닌 단일 특성을 갖는 비탄성 단자유도 계만을 대상으로 하고 있다.

국내에서도 김진구 등<sup>(11)</sup>이 ATC-40의 등가감쇠비 산정식에 따라 소성감쇠기의 설계절차를 제시하였고, 민경원과 김형섭<sup>(12)</sup>은 ATC-40의 등가감쇠비 산정식을 이용하여 마찰감쇠기의 설계절차를 제시하였다. 또한 김형섭 등<sup>(13)</sup>은 ATC-55의 개선된 등가선형화 식을 적용하여 보정된 마찰감쇠기 마찰력 산정식을 제안하였다. 다만 이들 연구는 원구조물을 완전탄소성 구조물로 가정하여 원구조물과 감쇠기의 이력특성이 유사한 경우를 대상으로 하고 있다.

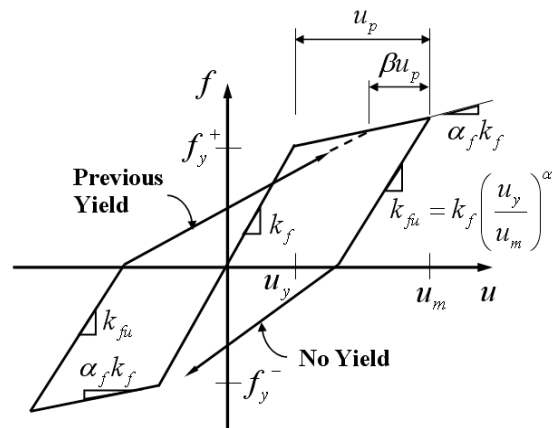
본 연구에서는 에너지소산능력이 낮아 내진보강이 필요한 철근콘크리트 구조물을 대상으로 한다. 원구조물을 강성저감형 단자유도 진동계로 이상화하고, 완전탄소성의 이력특성을 갖는 변위의존형 감쇠기 설치 시의 지진응답을 비선형시간이력해석을 통해 산출하였다. 수치해석결과의 통계를 기초로 등가선형화에 의한 제진응답 평가의 적용성을 검증하였고, 연성도에 기초하여 제진보강 구조물의 응답을 산출하기 위한 경험식을 제시하였다.

## 2. 단자유도 구조물의 이력모델

본 연구에서는 철근콘크리트 구조물의 제진보강효과를 정량적으로 검토하기 위하여 그림 1과 같이 각각 원구조물과 감쇠기에 해당되는 두 비선형 스프링이 병렬로 연결된 단자유도 진동계를 사용하여 제진보강된 철근콘크리트 구조물을 모델링하였다. 원구조물은 철근콘크리트 구조물로서 반복하중 재하 시 균열 진전으로 인한 강성저감 특성을 모

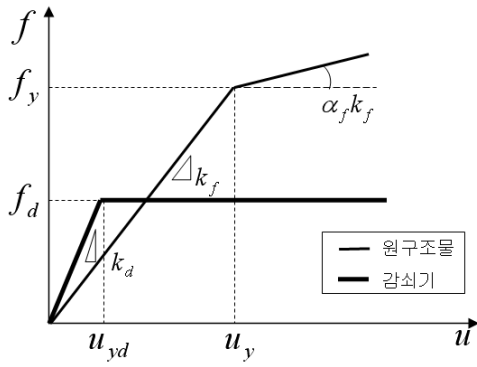


〈그림 1〉 감쇠기가 설치된 비탄성 단자유도구조물



〈그림 2〉 small Takeda 이력모델

델링하기 위하여 이선형의 수정 Takeda 모델을 채택하였다. 수정 Takeda 모델은 강성이 저감되는 정도에 따라 크게 large Takeda 모델과 small Takeda 모델로 구분할 수 있으며, 전자는 보, 후자는 압축력을 받는 기둥에 적합한 모델이다.<sup>(14)</sup> 수정 Takeda 모델의 이력거동 특성은 그림 2와 같다. 제진보강을 대상으로 하는 철근콘크리트 구조물은 이력거동 시의 강성 및 에너지 소산능력이 상대적으로 떨어지는 구조물이므로 본 연구에서는 small Takeda 모델을 적용하였다. 특히 이 모델의 주요 매개변수인  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 재하강성과 재하강성을 결정하는데 쓰이며, 각각 0.5와 0.0을 적용하였다. 이 값은 small Takeda 모델의 재하강성과 재하강성을 가장 저평가하는 값이다.<sup>(15)</sup> 감쇠기는 변위의존형으로서 금속항복형 댐퍼나 마찰형 댐퍼의 경우에 강성 저감현상 없이 에너지를 소산시키도록 제작, 설치되므로 완전탄소성 모델 (Fully Elasto-Plastic)을 적용하였다. 감쇠기 및 원구조물의 하중-변위 관계는 그림 3과 같다. 여기서  $f_d$ 와  $f_y$ 는 각각 감쇠기와 원구조물의 항복강도로서  $f_d < f_y$ 이므로 감쇠기가 먼저 항복하여 에너지를 소산시킨다. 감쇠기는 항복 후 강성을 0으로, 원구조물은 항복 후 강성비  $\alpha_f$ 에 따라서 0보다 큰 강성을 가질 수 있는 것으로 모델링하였다.



〈그림 3〉 감쇠기와 원구조물의 하중-변위관계

### 3. 단자유도 구조물의 등가감쇠비 산정

#### 3.1 구조물의 점성감쇠

일반적으로 수많은 원인에서 기인하는 구조물의 감쇠는 포괄적으로 점성감쇠로 모델링하며, 구조물의 거동은 완전히 선형탄성인 것으로 가정하고 있다. 그러나 지진하중으로 인해 비탄성 거동을 하게 되는 구조물은 부재의 항복, 제하, 재재하 과정에서 매순간 접선강성이 변화하므로 감쇠계수가 상수인 것으로 가정하게 되면, 그에 따라 발생하는 감쇠력은 실제 구조물의 감쇠력과 상당한 오차를 가지게 된다. 본 연구에서는 Priestley 등<sup>(16)</sup>의 제안에 따라 단자유도 구조물의 감쇠계수를 접선강성에 비례하는 것으로 가정하였으며, 탄성응답 시 점성감쇠비는 0.05로 가정하였다. 그러나, 비탄성응답의 예측을 위한 등가선형화 기법의 적용 시에는 구조물의 진동주기 산정을 위해 접선강성이 아닌 최대변위에서의 활선강성을 적용하며, 이를 고려하여 구조물의 점성감쇠비를 수정해야 한다. 본 연구에서는 지진응답에 대한 비탄성 시간이력해석을 통해 Grant 등<sup>(17)</sup>이 제안한 다음 식을 통해 구조물의 점성감쇠비를 산정하였다.

$$\xi_{cl} = 0.05\mu_f^\lambda \tag{1}$$

여기서,  $\mu_f$ 는 구조물의 연성도이고,  $\lambda$ 는 상수로서 Grant 등<sup>(17)</sup>은 small Takeda 모델과 완전탄소성 모델에 대해 각각 -0.378과 -0.341을 제안하였다. 본 연구에서는 감쇠기 미설치 시에는 전자의 값을, 설치 시에는 수정 Takeda 모델과 완전탄소성 모델이 병렬연결되므로 두 값의 평균을 적용하였다.

#### 3.2 구조물의 이력거동에 의한 등가감쇠비

단자유도 구조물의 이력거동에 의한 등가감쇠비는 많은

연구자들에 의해 제안되어 왔다. Dwairi 등<sup>(14)</sup>은 본 연구에서 채택하고 있는 small Takeda 및 완전탄소성 모델을 포함한 다양한 이력모델에 대하여 비선형시간이력을 통해 등가감쇠비를 제안하였으며, 연성도 및 활선강성으로 정의되는 유효주기에 의해 결정된다. Priestley 등<sup>(16)</sup>은 Dwairi 등의 제안식에서 유효주기가 1 sec보다 큰 경우에 주기의존성이 미약하다는 점과, 이러한 경우가 실제 구조설계에서 대부분을 차지함을 고려하여 탄성감쇠비를 5%인 구조물을 대상으로 좀더 단순화된 식을 제시하였으며, 다음과 같다.

$$\xi_{eq} = 0.05 + C \left( \frac{\mu_f - 1}{\pi \mu_f} \right) \tag{2}$$

여기서,  $C$ 는 상수로서 small Takeda 이력모델의 경우에 0.444를 적용한다. 위 식 (2)에서 구조물의 점성감쇠는 접선강성에 비례하며, Grant 등이 제안한 식과 동일한 것으로 가정하고 있으므로 구조물의 이력거동에 의한 등가감쇠비만을 따로 쓰면 다음과 같다.

$$\xi_{hf} = 0.05 + 0.444 \left( \frac{\mu_f - 1}{\pi \mu_f} \right) - \xi_{cl} \tag{3}$$

#### 3.3 감쇠기의 이력거동에 의한 등가감쇠

변위의존형 감쇠기는 앞서 기술한 바와 같이 완전탄소성 모델이 적용된다. Whittaker 등<sup>(5)</sup>은 2000 NEHRP Provisions의 검증 연구에서 일반적으로 널리 쓰이는 Jacobsen의 등가감쇠비 산정식을 이용하였다. 이 등가감쇠비는 이력곡선의 면적에 기초하고 있으며, 감쇠기를 완전탄소성 시스템으로 모델링하는 경우에 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\xi_{hd} = \frac{2}{\pi} \frac{\frac{f_d}{f_y} \left( 1 - \frac{1}{\mu_d} \right)}{\left( 1 + \alpha_f (\mu_f - 1) \right) + \frac{f_d}{f_y}} \tag{4}$$

여기서,  $f_y, f_d$ 는 각각 원구조물과 감쇠기의 항복강도,  $\alpha_f$ 는 원구조물의 항복 후 강성비,  $\mu_f$ 와  $\mu_d$ 는 각각 원구조물과 감쇠기의 연성도를 나타낸다.

반면에 Priestley 등은 단자유도구조물의 비선형시간이력해석결과를 토대로 완전탄소성 시스템에 대해서 식 (2)의 계수  $C=0.670$ 을 제시하였다. 따라서 Priestley 등<sup>(16)</sup>의 등가감쇠비를 적용하면 감쇠기의 등가감쇠비는 다음 식과 같다.

$$\xi_{hd} = 0.05 + 0.670 \left( \frac{\mu_d - 1}{\pi \mu_d} \right) - \xi_{cl} \quad (5)$$

### 4. 해석조건

#### 4.1 구조물 속성

본 연구에서는 비선형 단자유도 구조물의 제진보강 효과를 정량화하기 위하여 다양한 주기 및 강도를 가지는 구조물을 대상으로 비선형시간이력해석을 수행하여 감쇠기 속성변화에 따른 응답특성 변화를 조사하였다. 단자유도 구조물은 단위크기의 질량을 가지며, 주기는 0.1, 0.3, 0.7, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 및 3.0 sec이다. 항복강도는 다음 식을 통해 산출하였고,  $f_o$ 는 동일주기 대응선형시스템의 최대탄성저항력,  $R$ 은 항복강도 감소계수로서 2, 3.33, 5를 적용하였다.

$$f_y = f_o / R \quad (6)$$

원구조물의 항복 후 강성비  $\alpha_f$ 는 0.0, 0.05, 0.20을 적용하였다. 감쇠장치의 영향을 고려하기 위한 감쇠장치의 강성은

구조물 강성의 1.0 및 5.0배의 두 가지 값을 적용하였으며, 전자는 전단벽 등으로 인해 원구조물의 강성이 커서 감쇠기에 의한 강성증가 효과가 크지 않은 경우이고, 후자는 원구조물의 강성이 매우 작아서 가새형 감쇠기의 설치에 의해 강성이 크게 향상되는 경우에 해당된다. 감쇠기의 항복강도  $f_d$ 는 다음과 같이 원구조물 항복강도  $f_y$ 로 정규화된 항복강도비로 나타낸다.

$$r_f = f_d / f_y \quad (7)$$

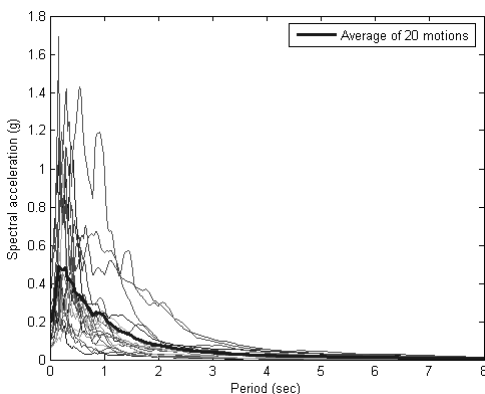
항복강도비는 0.1에서 1.0까지 0.1씩 증가시켰다. 비선형시간이력해석은 RUAUMOKO<sup>(15)</sup>를 이용하여 수행하였다.

#### 4.2 지진하중

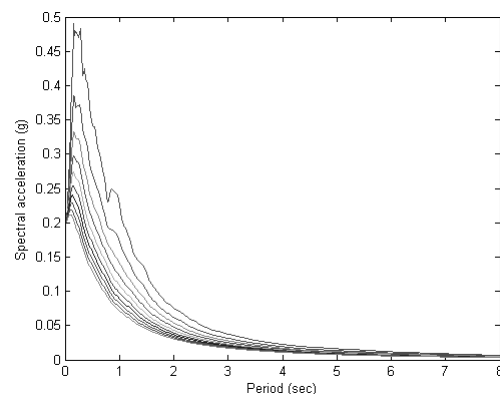
지진하중은 FEMA 440<sup>(8)</sup>에서 제시하고 있는 California 지역의  $S_c$  지반에 대한 20종의 실측 지반가속도로서 표 1과 같다. 각각의 응답스펙트럼과 평균응답스펙트럼은 그림 4와 같다. 원구조물과 감쇠기의 비탄성 거동을 고려한 등가선형시스템의 응답스펙트럼해석을 수행하기 위하여  $S_c$  지반의

〈표 1〉 California 지역의  $S_c$ 지반에 대한 20종의 실측 지반가속도<sup>(8)</sup>

| Date     | Earthquake Name | Magnitude(Ms) | Station Name     | Date     | Earthquake Name | Magnitude(Ms) | Station Name       |
|----------|-----------------|---------------|------------------|----------|-----------------|---------------|--------------------|
| 10/15/79 | Imperial Valley | 6.8           | El Centro        | 10/17/89 | Loma Prieta     | 7.1           | Fremont            |
| 02/09/71 | San Fernando    | 6.5           | Pasadena         | 10/17/89 | Loma Prieta     | 7.1           | Monterey           |
| 02/09/71 | San Fernando    | 6.5           | Pearblossom Pump | 10/17/89 | Loma Prieta     | 7.1           | Yerba Buena Island |
| 06/28/92 | Landers         | 7.5           | Yermo            | 10/17/89 | Loma Prieta     | 7.1           | Anderson Dam       |
| 10/17/89 | Loma Prieta     | 7.1           | APEEL7           | 04/24/84 | Morgan Hill     | 6.1           | Gilroy             |
| 10/17/89 | Loma Prieta     | 7.1           | Gilroy #6        | 04/24/84 | Morgan Hill     | 6.1           | Gilroy #6          |
| 10/17/89 | Loma Prieta     | 7.1           | Saratoga         | 07/08/86 | Palmsprings     | 6.0           | Fun Valley         |
| 10/17/89 | Loma Prieta     | 7.1           | Gilroy           | 01/17/94 | Northridge      | 6.8           | Littlerock         |
| 10/17/89 | Loma Prieta     | 7.1           | Santa Cruz       | 01/17/94 | Northridge      | 6.8           | Castaic            |
| 10/17/89 | Loma Prieta     | 7.1           | San Francisco    | 01/17/94 | Northridge      | 6.8           | Lake Hughes #1     |



〈그림 4〉 20종 지반가속도의 5% 감쇠비 응답스펙트럼



〈그림 5〉 감쇠비별 평균응답스펙트럼 (감쇠비: 0.05~0.5@0.05)

상기 실측 지반가속도에 대하여 감쇠비를 5%씩 증가시켜가며 선형탄성시간이력해석을 수행하여 감쇠비별로 평균응답스펙트럼을 산출하였으며, 그림 5에 나타내었다. 등가선형시스템의 응답은 등가감쇠비 및 등가선형주기를 토대로 그림 5의 응답스펙트럼을 보간하여 산정하였다.

### 5. 등가선형시스템의 적용성 검토

감쇠기에 의한 에너지소산량 증가 및 고유주기 저감 효과를 등가감쇠비 및 활선강성으로 치환하여 평가하는 등가선형시스템의 유효성을 검토하기 위해 등가선형시스템의 지진응답과 비선형시스템의 변위응답을 비교하였다. 등가선형시스템의 지진응답은 최대변위에서의 활선강성에 기초한 주기를 적용하여 그림 5의 평균화된 응답스펙트럼으로부터 구하였고, 이를 비선형해석결과로 나누어 변위응답비를 산정하여 그림 6에 나타내었다. 여기서,  $D_{eq}$ 와  $D_{nl}$ 는 각각 등가선형해석과 비선형해석의 평균 최대변위응답이다.

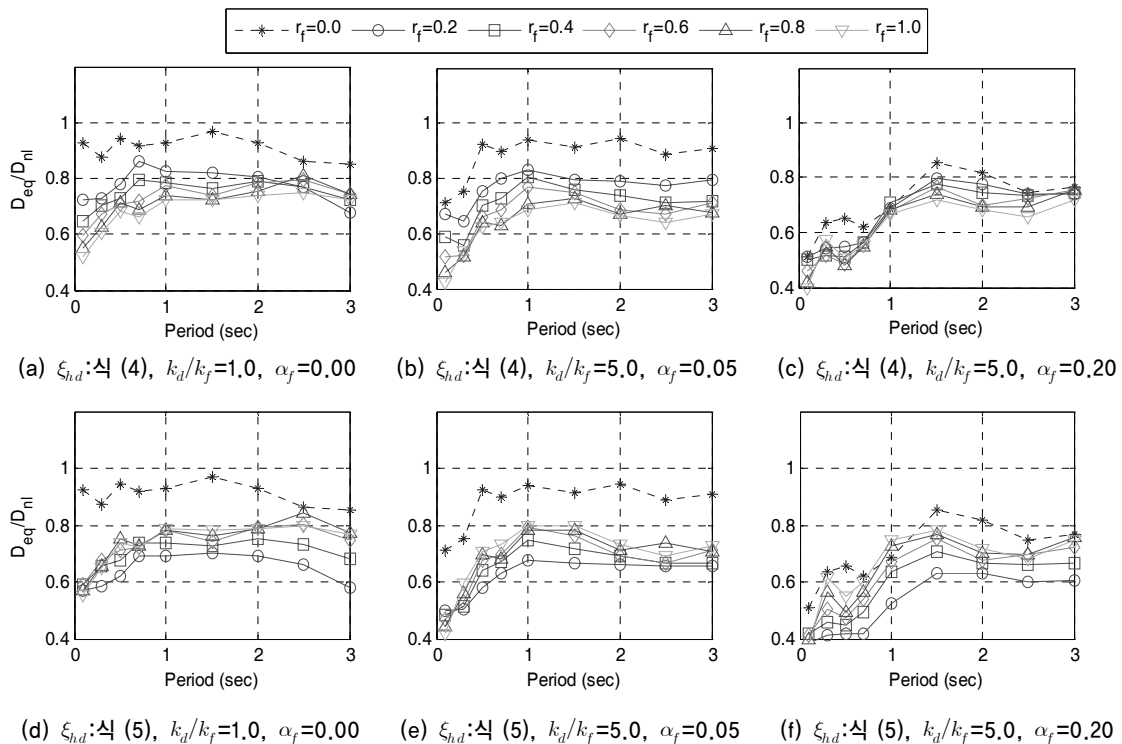
감쇠기가 설치되지 않은 경우는  $r_f = 0.0$ 에 해당하며, 상대적으로 1.0에 가까운 값을 나타내나 항복 후 강성비가 0.20으로서 큰 경우에는 오차가 커짐을 알 수 있다. 특기할 만한 것은 감쇠기의 등가감쇠비를 이력곡선의 면적에 의한 이론적 등가감쇠비 식 (4)로 산출하는 경우에는 높은 감쇠기 항복강도에서 큰 오차가 발생하고, 완전탄소성 시스템의

연성도에 의한 경험식 (5)으로 산출하는 경우에는 낮은 감쇠기항복강도에서 큰 오차가 발생하는 것으로 나타났다. 변위응답비에 따른 오차는 단주기에서 가장 크고, 최대 오차는 초기강성비에 따라서 50~60%에 달한다. 장주기에서도 감쇠기 항복강도에 따라서 약 30~40%의 응답을 과소평가하는 것으로 나타났다. 오차가 과소평가하는 쪽으로 발생하므로 등가선형화에 의한 변위응답 평가보다는 다음 장에서 제시한 경험식을 이용하여 요구연성도를 추정하는 것이 바람직할 것으로 보인다. 다만, 다자유도 구조물에 능력스펙트럼법을 적용하여 제진보강 효과를 평가하고자 하는 경우에 등가감쇠비 산정 시 본 해석결과를 토대로 적절한 등가감쇠비 보정계수를 도입하는 방법을 고려할 수 있을 것이다.

### 6. 연성도 저감효과

#### 6.1 원구조물의 요구연성도

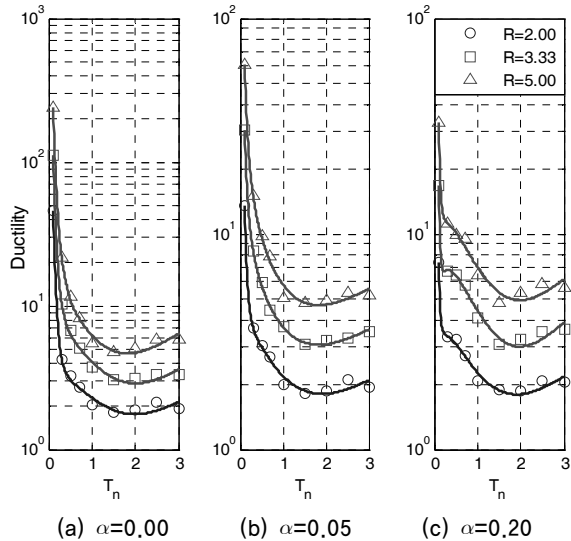
제진보강 시의 요구연성도는 원구조물의 요구연성도에 제진보강에 의한 변위저감률을 곱하여 산정할 수 있다. 본 연구에서는 제진보강 시의 요구연성도를 산정하기 위하여 원구조물의 연성도에 관한 경험식과 변위저감률에 관한 경험식을 곡선적합을 통해 산출하였다. 본 연구에서 가정된 단자유도 원구조물의 적용 지반가속도에 대한 요구연성도를 항복강도 감소계수별로 나타내면 그림 7과 같다. 주기가



〈그림 6〉 등가선형시스템과 비선형시스템의 최대변위비 (R=5.0)

〈표 2〉 원구조물의 요구연성도 곡선적합식 계수

| $\alpha$ | 0.00  |       |       | 0.05  |       |       | 0.20  |       |       |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|          | 2.00  | 3.33  | 5.00  | 2.00  | 3.33  | 5.00  | 2.00  | 3.33  | 5.00  |
| $a_0$    | 112   | 212   | 335   | 52.9  | 61.6  | 93.5  | 70.0  | 194   | 280   |
| $a_1$    | -7.63 | -14.4 | -23.1 | -2.32 | -1.26 | -1.33 | -3.01 | -8.95 | -12.9 |
| $a_2$    | 0.192 | 1.97  | 3.83  | 0.225 | 0.272 | 0.514 | 0.191 | 0.559 | 0.885 |
| $a_3$    | -171  | -326  | -519  | -82.9 | -100  | -154  | -110  | -307  | -443  |
| $a_4$    | 68.1  | 130   | 210   | 34.3  | 43.4  | 67.5  | 45.7  | 126   | 182   |



〈그림 7〉 원구조물의 요구연성도

증가할수록 강도가 감소하며 1초 이후에는 큰 변화가 없다. 주기가 0.1초인 구조물은 요구연성도가 대부분 10을 크게 초과하고 있으며, 요구연성도 저감 필요성이 크다. 원구조물 요구연성도의 곡선적합식은 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$\mu_{fo} = a_0 + a_1 T_n^{-1} + a_2 T_n^{-2} + a_3 T_n^{0.2} + a_4 T_n^{0.4} \quad (8)$$

여기서  $T_n$ 은 구조물의 고유진동수이고, 곡선적합식의 각 계수는 표 2와 같으며, 곡선적합의 결과는 그림 7에서 확인할 수 있다.

**6.2 제진보강에 의한 요구연성도 저감효과**

감쇠기의 연성도 저감효과를 파악하기 위하여 원구조물의 요구연성도를 감쇠기 미설치 시의 요구연성도로 정규화한 요구연성도비를 그림 8에 나타내었다. 원구조물의 고유 주기가 짧을수록 요구연성도 저감효과는 증가한다. 감쇠기 항복강도가 증가함에 따라 요구연성도비는 점차 감소하나 감소율은 둔화되어 정규화된 감쇠기 항복강도 0.8~1.0 사이에서는 제진효과에 큰 차이가 없다.

감쇠기 항복강도에 따라 예상되는 연성도 감소율을 예측

할 수 있도록 각각의 요구연성도비를 다음과 같은 식으로 곡선적합하였다.

$$\frac{\mu_f}{\mu_{fo}} = 1 + b_0 \sqrt{r_f} + b_1 r_f + b_2 r_f^2 \quad (9)$$

곡선적합식의 계수는 표 3과 같고, 그림 8에서 볼 수 있는 바와 같이 요구연성도비를 잘 근사화하고 있다.

**6.3 목표 요구연성도 획득을 위한 항복강도비**

제진보강 시의 요구연성도는 원구조물의 요구연성도 근사식 (8)과 제진장치 설치에 따른 요구연성도 저감률을 나타내는 요구연성도비 식 (9)를 곱하여 근사적으로 산출할 수 있으며, 이를 이용하여 역으로 목표 요구연성도를 획득하기 위한 감쇠기 항복강도를 산정할 수 있다. 먼저 경험식 (8)과 (9)를 곱해서 얻어진 요구연성도 근사값을 검증하기 위해 그림 9에서 실제 해석값과 비교하였다. 경험식 이용 시 전반적으로 요구연성도를 잘 근사화하고 있으나, 일부 주기에서 발생하는 오차는 원구조물의 요구연성도 근사식 (8)의 오차로 인한 것으로 볼 수 있다.

목표 연성도를  $\mu_{tf}$ 로 정의한다면 이 목표연성도를 얻기 위한 항복강도비는 식 (9)를 이용하여 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$r_f = x^2 \quad (0 < x \leq 1.0) \quad (10)$$

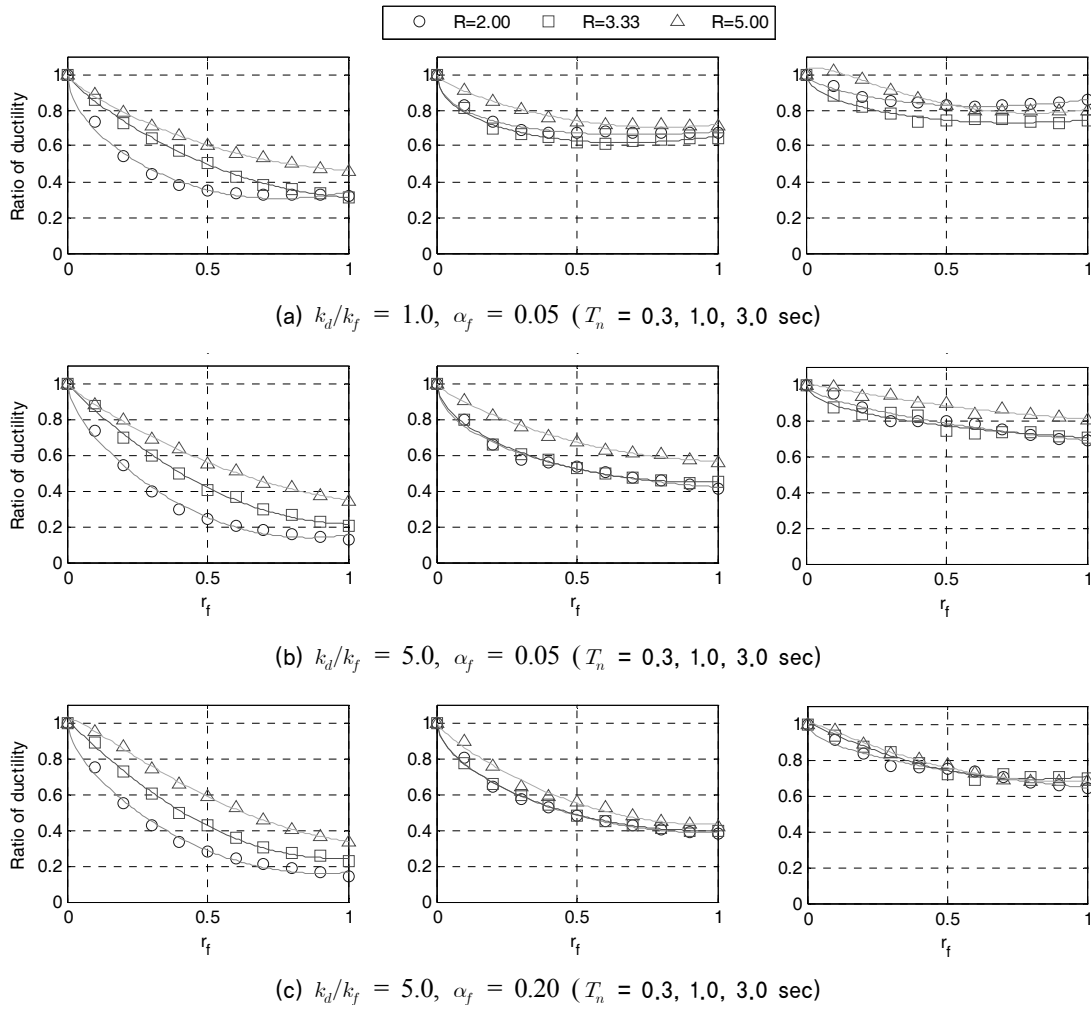
여기서

$$b_2 x^4 + b_1 x^2 + b_0 x + 1 - \mu_{ft} / \mu_{fo} = 0 \quad (11)$$

상기 4차 방정식은 근의 공식이 존재하므로 이를 이용하여 간편하게 요구 항복강도비를 산정할 수 있다.<sup>(18)</sup>

**6.4 감쇠기 최적 항복강도비**

최적의 감쇠기 항복강도를 산정하기 위하여 상기 요구연성도비의 근사식의 미분값이 0이 되는 감쇠기 항복강도를



〈그림 8〉 요구연성도비  $\mu_f/\mu_{f0}$

〈표 3〉 요구연성도비  $\mu_f/\mu_{f0}$ 의 곡선적합식 계수

| $k_d/k_f$<br>( $\alpha_f$ ) | R    | Coefficients | $T_n$  |        |          |         |        |         |          |         |         |
|-----------------------------|------|--------------|--------|--------|----------|---------|--------|---------|----------|---------|---------|
|                             |      |              | 0.10   | 0.30   | 0.50     | 0.70    | 1.00   | 1.50    | 2.00     | 2.50    | 3.00    |
| 1.00<br>(0.00)              | 2.00 | $b_0$        | -0.761 | -0.544 | -0.564   | -0.706  | -0.890 | -0.244  | -0.352   | -0.725  | -0.236  |
|                             |      | $b_1$        | -0.707 | -1.03  | -0.268   | 0.127   | 0.583  | 0.00410 | 0.184    | 0.583   | -0.129  |
|                             |      | $b_2$        | 0.546  | 0.887  | 0.281    | 0.207   | -0.026 | 0.0592  | 0.0147   | -0.104  | 0.226   |
|                             | 3.33 | $b_0$        | -0.304 | -0.404 | -0.513   | -0.625  | -0.842 | 0.0456  | -0.381   | -0.330  | -0.0853 |
|                             |      | $b_1$        | -0.667 | -0.549 | -0.156   | 0.188   | 0.411  | -0.604  | 0.216    | -0.0105 | -0.417  |
|                             |      | $b_2$        | 0.272  | 0.239  | 0.179    | 0.0604  | 0.0799 | 0.458   | -0.00560 | 0.154   | 0.315   |
|                             | 5.00 | $b_0$        | 0.211  | -0.272 | -0.00320 | -0.531  | -0.266 | -0.0706 | -0.038   | 0.0162  | 0.563   |
|                             |      | $b_1$        | -1.53  | -0.895 | -0.937   | 0.106   | -0.269 | -0.269  | -0.441   | -0.778  | -1.56   |
|                             |      | $b_2$        | 0.701  | 0.564  | 0.462    | 0.0889  | 0.251  | 0.145   | 0.280    | 0.466   | 0.755   |
| 1.00<br>(0.05)              | 2.00 | $b_0$        | 0.033  | -0.917 | -0.523   | -0.751  | -0.770 | -0.238  | -0.331   | -0.716  | -0.206  |
|                             |      | $b_1$        | -1.53  | -0.254 | -0.298   | 0.183   | 0.417  | -0.0227 | 0.137    | 0.569   | -0.176  |
|                             |      | $b_2$        | 0.668  | 0.514  | 0.287    | 0.165   | 0.0326 | 0.0747  | 0.0430   | -0.101  | 0.240   |
|                             | 3.33 | $b_0$        | -0.264 | -0.171 | -0.412   | -0.420  | -0.753 | -0.0581 | -0.394   | -0.450  | -0.444  |
|                             |      | $b_1$        | -0.477 | -1.01  | -0.243   | -0.0456 | 0.236  | -0.438  | 0.195    | 0.265   | 0.0441  |
|                             |      | $b_2$        | 0.146  | 0.495  | 0.202    | 0.139   | 0.171  | 0.378   | 0.0116   | 0.0129  | 0.144   |
|                             | 5.00 | $b_0$        | -0.125 | -0.181 | -0.349   | -0.490  | -0.158 | -0.165  | -0.466   | 0.112   | 0.439   |
|                             |      | $b_1$        | -0.661 | -0.718 | -0.266   | -0.105  | -0.469 | -0.155  | 0.323    | -0.923  | -1.27   |
|                             |      | $b_2$        | 0.277  | 0.363  | 0.189    | 0.221   | 0.346  | 0.101   | -0.0350  | 0.597   | 0.639   |

〈표 3〉 요구연성도비  $\mu_f/\mu_{fo}$ 의 곡선적합식 계수(계속)

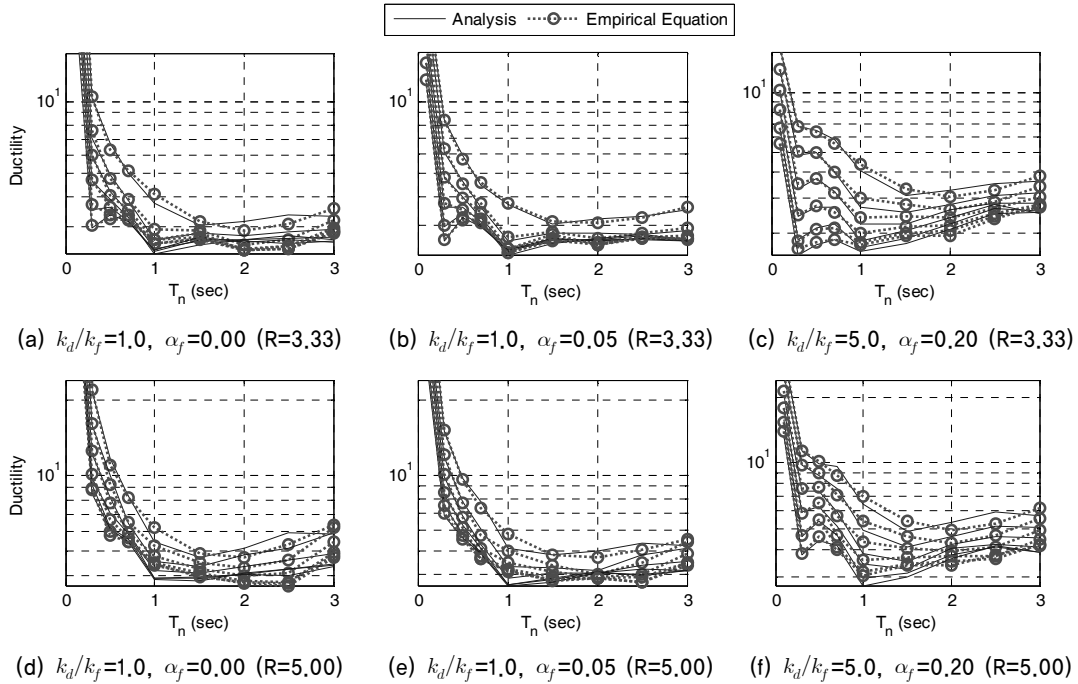
| $k_d/k_f$<br>( $a_f$ ) | R    | Coefficients | $T_n$  |         |         |         |         |         |          |         |         |
|------------------------|------|--------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|
|                        |      |              | 0.10   | 0.30    | 0.50    | 0.70    | 1.00    | 1.50    | 2.00     | 2.50    | 3.00    |
| 1.00<br>(0.20)         | 2.00 | $b_0$        | -0.492 | -1.01   | -0.580  | -0.655  | -0.916  | -0.288  | -0.318   | -0.635  | -0.279  |
|                        |      | $b_1$        | -0.771 | 0.0714  | -0.445  | -0.0776 | 0.600   | -0.0806 | 0.0651   | 0.439   | -0.167  |
|                        |      | $b_2$        | 0.481  | 0.304   | 0.447   | 0.258   | -0.0515 | 0.156   | 0.125    | -0.046  | 0.257   |
|                        | 3.33 | $b_0$        | -0.118 | -0.190  | -0.275  | -0.583  | -0.900  | -0.354  | -0.386   | -0.423  | -0.333  |
|                        |      | $b_1$        | -0.992 | -1.09   | -0.634  | -0.204  | 0.409   | 0.145   | 0.141    | 0.120   | -0.116  |
|                        |      | $b_2$        | 0.452  | 0.635   | 0.350   | 0.269   | 0.0681  | 0.0575  | 0.0561   | 0.0744  | 0.201   |
|                        | 5.00 | $b_0$        | -0.162 | 0.173   | -0.0650 | -0.144  | -0.353  | -0.200  | -0.330   | -0.0251 | 0.0816  |
|                        |      | $b_1$        | -0.752 | -1.28   | -0.596  | -0.819  | -0.542  | -0.248  | -0.0303  | -0.807  | -0.892  |
|                        |      | $b_2$        | 0.321  | 0.537   | 0.230   | 0.485   | 0.454   | 0.239   | 0.118    | 0.568   | 0.544   |
| 5.00<br>(0.00)         | 2.00 | $b_0$        | -0.276 | -0.171  | -0.371  | -0.578  | -0.878  | 0.0326  | -0.146   | -0.599  | -0.208  |
|                        |      | $b_1$        | -1.47  | -1.92   | -0.984  | -0.402  | 0.196   | -1.183  | -0.472   | 0.358   | -0.147  |
|                        |      | $b_2$        | 0.808  | 1.24    | 0.560   | 0.295   | 0.100   | 0.700   | 0.247    | -0.126  | 0.0438  |
|                        | 3.33 | $b_0$        | 0.296  | -0.459  | -0.344  | -0.584  | -0.730  | -0.0430 | 0.00930  | -0.569  | -0.0452 |
|                        |      | $b_1$        | -1.35  | -0.618  | -0.875  | -0.0845 | 0.00750 | -0.581  | -0.341   | 0.778   | -0.171  |
|                        |      | $b_2$        | 0.306  | 0.274   | 0.618   | 0.0592  | 0.163   | 0.208   | 0.0167   | -0.392  | 0.0130  |
|                        | 5.00 | $b_0$        | 1.29   | -0.378  | 0.00610 | -0.326  | -0.267  | 0.234   | -0.642   | -0.848  | -0.540  |
|                        |      | $b_1$        | -3.20  | -0.905  | -1.06   | -0.289  | -0.475  | -0.852  | 1.23     | 1.23    | 0.723   |
|                        |      | $b_2$        | 1.35   | 0.661   | 0.426   | 0.150   | 0.295   | 0.312   | -0.826   | -0.545  | -0.247  |
| 5.00<br>(0.05)         | 2.00 | $b_0$        | -0.140 | -0.692  | -0.224  | -0.592  | -0.823  | -0.0415 | -0.127   | -0.612  | -0.218  |
|                        |      | $b_1$        | -1.19  | -0.884  | -1.24   | -0.369  | 0.176   | -1.071  | -0.517   | 0.361   | -0.154  |
|                        |      | $b_2$        | 0.479  | 0.731   | 0.677   | 0.272   | 0.0667  | 0.659   | 0.270    | -0.120  | 0.0603  |
|                        | 3.33 | $b_0$        | -0.300 | -0.0406 | -0.210  | -0.392  | -0.693  | -0.0890 | -0.200   | -0.362  | -0.379  |
|                        |      | $b_1$        | -0.428 | -1.47   | -0.862  | -0.305  | -0.0904 | -0.530  | -0.124   | 0.253   | 0.0668  |
|                        |      | $b_2$        | 0.0930 | 0.725   | 0.435   | 0.135   | 0.230   | 0.190   | -0.00890 | -0.0942 | 0.0164  |
|                        | 5.00 | $b_0$        | -0.300 | -0.0941 | -0.204  | -0.334  | -0.153  | 0.0611  | -0.091   | -0.123  | 0.0351  |
|                        |      | $b_1$        | -0.379 | -0.940  | -0.576  | -0.380  | -0.600  | -0.805  | -0.111   | -0.184  | -0.342  |
|                        |      | $b_2$        | 0.158  | 0.382   | 0.197   | 0.225   | 0.318   | 0.405   | -0.028   | 0.104   | 0.115   |
| 5.00<br>(0.20)         | 2.00 | $b_0$        | -0.537 | -0.688  | -0.208  | -0.395  | -0.654  | -0.226  | -0.189   | -0.528  | -0.350  |
|                        |      | $b_1$        | -0.643 | -0.762  | -1.51   | -0.823  | -0.262  | -0.732  | -0.405   | 0.195   | -0.0403 |
|                        |      | $b_2$        | 0.366  | 0.614   | 0.936   | 0.514   | 0.302   | 0.469   | 0.209    | -0.0388 | 0.0344  |
|                        | 3.33 | $b_0$        | -0.209 | 0.0976  | 0.159   | -0.419  | -0.674  | -0.133  | -0.237   | -0.246  | 0.0677  |
|                        |      | $b_1$        | -0.782 | -1.73   | -1.62   | -0.555  | -0.217  | -0.601  | -0.187   | -0.120  | -0.868  |
|                        |      | $b_2$        | 0.322  | 0.879   | 0.735   | 0.304   | 0.287   | 0.316   | 0.0605   | 0.0811  | 0.509   |
|                        | 5.00 | $b_0$        | -0.192 | 0.332   | 0.0806  | 0.0902  | -0.158  | -0.0959 | -0.258   | 0.118   | 0.131   |
|                        |      | $b_1$        | -0.710 | -1.60   | -0.825  | -1.30   | -0.941  | -0.616  | -0.122   | -0.997  | -0.894  |
|                        |      | $b_2$        | 0.323  | 0.602   | 0.190   | 0.667   | 0.533   | 0.340   | 0.0615   | 0.595   | 0.443   |

찾았다. 많은 경우에 정규화된 감쇠기 항복강도의 적용범위인 0과 1.0 사이에서 극소값이 나타나지 않았으며, 이 경우에는 적용 범위 내에서 요구연성도비 근사식이 최소가 되는 1.0을 최적으로 간주하였다. 이 값은 제진보강에 의해 구조물의 강도가 2배로 증진됨을 의미하며, 이 값을 전후하여 요구연성도 저감효과가 크게 둔화되기 때문에 합리적인 선택이 될 수 있다고 판단하였다.

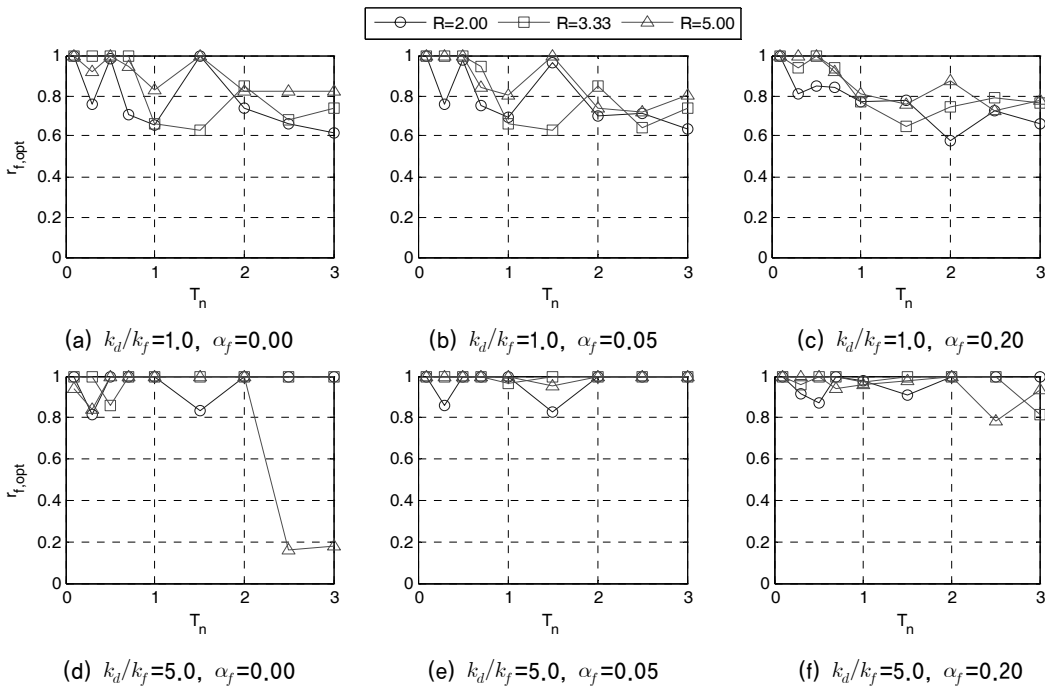
선정된 최적의 정규화된 감쇠기 항복강도를 그림 10에

나타내었다. 초기강성비가 1.0인 경우에 비해 5.0인 경우의 최적 항복강도가 1.0에 더 가까운 값을 가지는 것으로 나타났다. 따라서 초기강성비가 클수록 감쇠기의 강도가 응답제어에 미치는 효과는 증가한다고 볼 수 있다. Inoue와 Kuwahara<sup>(19)</sup>는 이력댐퍼의 이력법칙에 기초한 등가감쇠비를 최대화하는 최적항복강도비의 식을 제안하였으며, 본 연구에서 정의한 감쇠기와 구조물의 초기강성비를 사용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.





〈그림 9〉 요구연성도 ( $r_f=0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ )

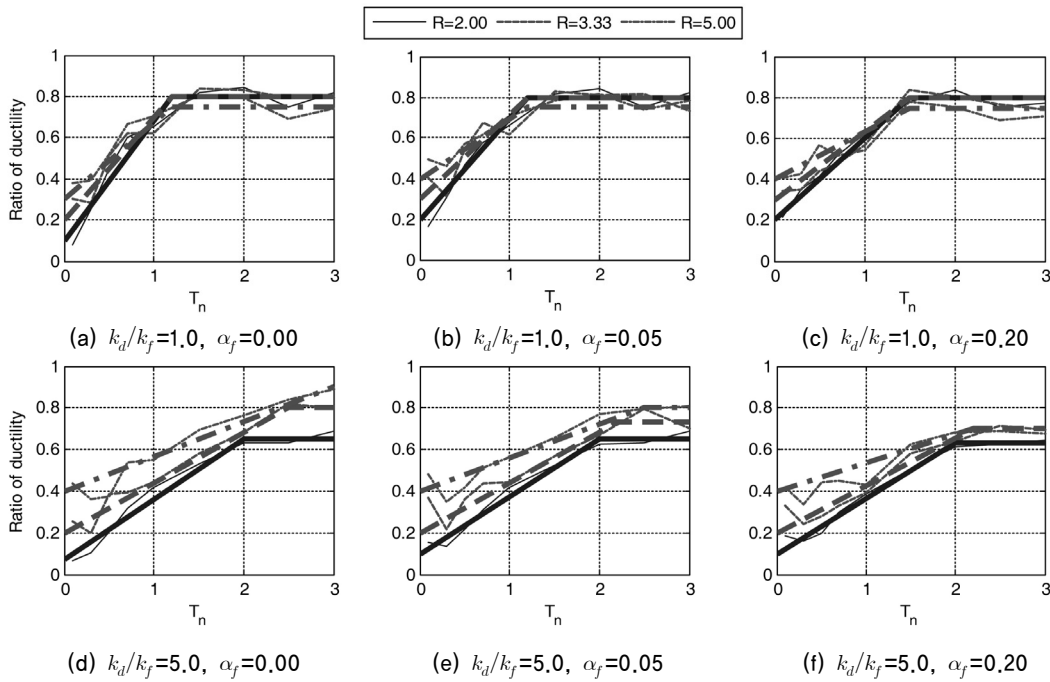


〈그림 10〉 감쇠기의 최적항복강도비

$$r_{f,opt,IK} = \frac{k_d/k_f}{1 + \sqrt{1 + k_d/k_f}} \quad (12)$$

이 식에서 최적항복강도비는 순수하게 초기강성비에 의해 결정되며, 가진입력의 특성이나 구조물의 주기와는 무관하게 결정된다. 본 연구에서 적용된 강성비 1.0 및 5.0을 대입하면 최적강도비는 각각 0.414 및 1.45가 된다. 그러나 그

림 10에서 볼수 있듯이 강성비 1.0일 때의 최적항복강도비는 0.414 보다 크고 강성비 5.0일 때의 최적강도비는 1.45 보다 작은 경우가 상당 수 나타나고 있다. Inoue와 Kuwahara는 계측 지반가속도를 이용하여 상기 식의 유효성을 검증하였으나, 원구조물이 완전탄소성 시스템으로서 반복변형에 따른 강성저감효과가 고려되지 않았기 때문에 본 연구에서 산출된 최적항복강도비와 차이를 가지는 것으로 판단된다.



〈그림 11〉 가득 연성도 저감율

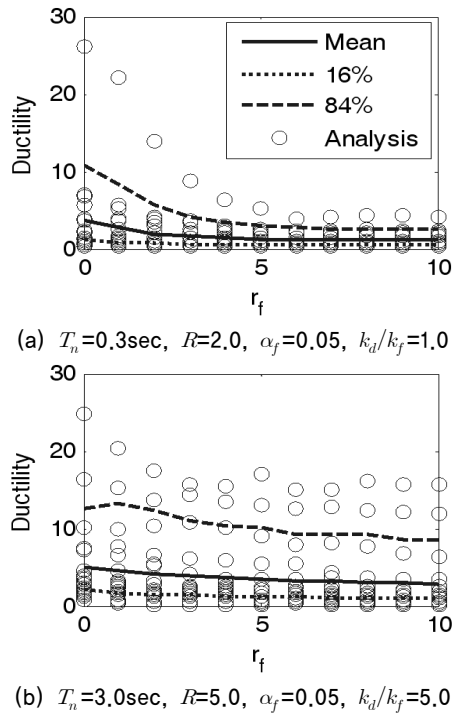
6.5 가득 연성도 저감율

감쇠기를 통해 획득 가능한 제진효과의 상한선을 알아보기 위하여 앞서 연성도의 근사식에서 얻어진 요구연성도비의 최소값을 그림 11에 나타내었다. 또한 항복강도 감소계수가 작은 경우, 다시 말해서 구조물 강도 대비 지진하중의 세기가 작을수록 요구연성도 저감효과는 상대적으로 크다. 단주기 영역으로 갈수록 요구연성도비의 최소값은 크게 감소하여 고유주기가 짧은 구조물일수록 제진효과가 매우 클 수 있다. 그러나 장주기 영역에서는 주기에 따른 요구연성도비가 거의 차이가 없이 일정한 것으로 나타났다.

일정한 요구연성도비를 갖는 장주기 영역의 시작을 나타내는 모서리 주기는 초기강성비  $k_d/k_f$ 가 1.0인 경우에 1.2~1.5 sec의 값을 가지나  $k_d/k_f = 5.0$ 인 경우에는 2 sec 이상으로 증가하여 1.0초 내외의 주기를 갖는 구조물의 제진효과가 향상된다. 반면에 단주기 및 장주기 영역에서는 항복강도 감소계수  $R = 5.0$ 인 경우에 이와 같은 효과가 크지 않고,  $R = 2.0$ 인 경우에는 전 주기에서 초기강성비  $k_d/k_f$  증가에 따른 연성도 저감효과 향상을 관찰할 수 있다.

7. 지진파에 따른 변동성

본 연구에서는 표 1에 나타낸 바와 같은 California 지역의 Sc 지반에 대한 20종의 실측 지반가속도를 적용하였으며, 상기 분석결과는 응답의 평균값을 대상으로 하였다. 비



〈그림 12〉 초과확률별 연성도 및 연성도의 변동성

록 유사한 규모라 하더라도 지진의 특성에 편차가 커서 그림 4와 같이 응답스펙트럼에 상당한 편차가 있다. 따라서 지진파에 따른 변동성을 분석하기 위해서 최대응답의 분포를 로그정규분포로 가정하고 평균 및 초과확률 16% 및 84%에 해당되는 연성도를 산출하여 개별 지반운동에 대한 응답과 함께 그림 12에 나타내었다. 그림 12 (a)는 전단벽과 같이

강성 및 강도가 상대적으로 큰 구조물, (b)는 모멘트골조와 같이 강성 및 강도가 상대적으로 작은 구조물을 나타낸다.

그림 12에서 평균값에 비해서 초과확률 84%에 해당되는 응답이 상당히 큰 것을 확인할 수 있다. 다만, 그림 12 (a)에서는 하나의 지진파가 유난히 큰 응답을 나타내는 것을 볼 수 있다. 따라서 이 지진파는 통계에서 제외하는 것을 고려할 수 있으나 그림 12 (b)에서는 최대 응답을 나타내는 지진파와 평균 응답 사이에 다수의 응답이 고르게 분포하고 있어 전술한 지진파를 제외하는 것은 적절하지 않다고 볼 수 있다. 다만 지진파에 따른 응답의 변동성이 매우 크므로 보다 신뢰도 있는 응답 추정을 위해 지진파의 스케일링 및 변동성을 고려한 확률적 응답 추정에 대한 연구가 필요하다.

## 8. 결론

본 연구에서는 철근콘크리트 구조물과 같이 반복가력 시 강성이 저감되는 구조물을 단자유도 진동계로 모델링하고, 비선형 시간이력해석 결과의 분석을 통하여 변위의존형 감쇠기 설치 시의 제진효과를 정량적으로 제시하였다. 본 연구에서 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 상이한 이력특성을 가지는 원구조물과 변위의존형 감쇠기의 통합된 등가감쇠비를 얻기 위해 기존의 등가감쇠비 산정식을 이용하여 각각의 등가감쇠를 산정한 뒤 그대로 더하는 경우 구조물의 고유주기에 따라서 변위응답 저감효과를 30~60%까지 과대평가하는 경향이 있으며, 단주기 구조물일수록 오차는 증가한다.
2. 제진보강 시 요구연성도를 근사화하기 위하여 원구조물의 요구연성도 및 감쇠기에 따른 요구연성도비의 경험식을 제안하고 특정 요구연성도 획득을 위한 감쇠기의 항복강도비 결정 방법을 제시하였다.
3. 수치해석을 통해 얻어진 적정 감쇠기 항복강도는 감쇠기 초기강성이 클수록 증가하며 완전탄소성 시스템에 대한 최적 항복강도와 상당한 차이를 가진다.
4. 제진보강의 적용성을 판단할 수 있도록 항복강도 감소계수 및 주기별로 가득 연성도 저감효과를 제시하였다. 가득 연성도 저감효과는 원구조물의 고유주기가 짧을수록 우수하며, 감쇠기의 초기강성 증가를 통해 1.0 sec 내외의 주기에서 큰 제진효과 증대를 거둘 수 있다.
5. 본 연구에서는 FEMA 440에서 제시한  $S_c$  지반 조건에 해당되는 계층지진을 활용하였으나, 향후 타 지반조건에 대한 고려와 보다 다양한 구조물 및 감쇠기 특성에 대한

포괄적 연구가 필요하다. 또한 다자유도 구조물에 적용하기 위한 연구 및 검증이 필요하다.

6. 본 연구에서 지진파에 따른 제진응답의 변동성이 매우 큰 것으로 나타났으며, 신뢰도 높은 응답 추정을 위해 지진파의 스케일링 및 변동성을 고려한 확률적 응답 추정에 대한 연구가 필요하다.

## 감사의 글

이 논문은 2007년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2007-331-D00518).

## 참고 문헌

1. Symans, M.D., Charney, F., Whittaker, A.S., Constantinou, M.C., Kircher, C.A., Johnson, M.W., and McNamara, R.J., "Energy dissipation systems for seismic applications: current practice and recent development," *J. of Str. Eng., ASCE*, Vol. 134, No. 1, 3-21, 2008.
2. BSSC, NEHRP recommended provisions ofr seismic regulations for new buildings and other structures 2003 Ed. part 1: provisions. FEMA 450, FEMA, Washington, D.C., 2004.
3. ASCE, Minimum design loads for buildings and other structures. ASCE/SEI 7-05, Reston, Virginia, 2005.
4. Ramirez, O.M., Constantinou, M.C., Gomez, G.D., Whittaker, A.S., and Chrysostomou, C.Z., "Evaluation of simplified methods of analysis of yielding structures with damping systems," *Earthquake Spectra*, Vol. 18, No. 3, 501-530, 2002.
5. Whittaker, A.S., Constantinou, M.C., Ramirez, O.M., Johnson, M.W., and Chrysostomou, C.Z., "Equivalent lateral force and modal analysis procedures of the 2000 NEHRP Provisions for buildings with damping systems," *Earthquake Spectra*, Vol. 19, No. 4, 959-980, 2003.
6. Ramirez, O.M., Constantinou, M.C., Whittaker, A.S., Kircher, C.A., Johnson, M.W., and Chrysostomou, C.Z., "Validation of the 2000 NEHRP Provisions' equivalent lateral force and modal analysis procedures for buildings with damping systems," *Earthquake Spectra*, Vol. 19, No. 4, 981-999, 2003.
7. ATC, Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures. FEMA-440, FEMA, Washington, D.C., 2005.
8. ASCE, Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. FEMA-356, FEMA, Washington, D.C., 2000.
9. ATC, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. ATC-40 Report, ATC, Redwood City, California. 1996.
10. ASCE, Seismic rehabilitation of existing buildings. ASCE/SEI 41-06, ASCE, Reston, Virginia, 2007.

11. 김진구, 김유경, 최현훈, “성능수준 만족을 위한 가새형 소성 감쇠기의 설계” 한국지진공학회 논문집, Vol. 5, No. 6, 47-54, 2001.
12. 민경원, 김형섭, “지진하중을 받는 구조물의 성능에 기초한 마찰 감쇠기 설계” 한국지진공학회 논문집, Vol. 7, No. 6, 17-24, 2003.
13. 김형섭, 민경원, 이상현, 박지훈, “비탄성 지진응답 제어를 위한 ATC-55에 기반한 마찰감쇠기 설계절차.” 한국지진공학회 논문집, Vol. 9, No. 1, 9-16, 2005.
14. Dwairi, H.M., Kowalsky, M.J. and Nau, J.M., “Equivalent damping in support of direct displacement-based design,” *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 11, 512-530, 2007.
15. Carr, A.J., “Ruaumoko manual Volume 5: Appendices,” University of Canterbury, 2007.
16. Priestley, M.J.N., Calvi, G.M., and Kowalsky, M.J., “Displacement-based seismic design of structures,” IUSS Press, Pavia, Italy, 2007.
17. Grant, D.N., Blandon, C.A., and Priestley, M.J.N., “Modelling inelastic response in direct displacement-based design,” *Report 2005/3*, IUSS press, 104, 2005.
18. Beyer, W.H., CRC standard mathematical tables and formulae 29th ed, CRC Press, 1991.
19. Inoue, K., Kuwahara, S., “Optimum strength ratio of hysteretic damper,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 27, 577-588, 1998.