한국지진공학회 논문집 | 제16권 제2호 (통권 제84호) | 2012년 4월, pp.1~13
ISSN 1226-525X eISSN 2234-1099 http://dx.doi.org/10.5000/EESK.2012.16.2.001

에너지 소산형 감쇠기가 설치된 단자유도 비선형 시스템의 지진취약도 함수

Seismic Fragility Functions of a SDOF Nonlinear System with an Energy Dissipation Device

박지훈[1] · 윤수용[2]
Park, Ji-Hun · Yun, Soo-Yong

국문 요약 >> 본 연구에서는 에너지 소산형 감쇠기가 설치된 철근콘크리트 구조물의 지진응답 저감효과를 확률적으로 평가하기 위하여 지진취약도 함수를 도출하였다. 가속도민감 영역과 속도민감 영역에 속하는 대표 고유주기를 갖는 비선형 단자유도 시스템으로 모델링된 철근콘크리트 구조물을 대상으로 강도와 강성의 불확실성을 고려하였다. 원구조물에 다양한 강성과 감쇠를 갖는 변위의존형 감쇠기를 부가하여 비선형시간이력해석을 수행하였으며, 해석결과의 통계를 바탕으로 로그정규분포 형태의 지진취약도 함수를 도출하였다. 원구조물의 종류별로 감쇠기의 설계변수에 따른 지진취약도 함수의 변화를 검토하고 이를 통해 손상확률의 저감효과를 분석하였다.

주요어 지진취약도 함수, 확률, 비선형 단자유도 시스템, 변위의존형 감쇠기

ABSTRACT >> Seismic fragility functions are derived for probabilistic evaluation of seismic control performance of energy dissipation devices installed in reinforced concrete structures. Displacement-dependent dampers are added to the nonlinear single-degree-of-freedom systems with different natural periods and hysteretic characteristics of which stiffness and strength has uncertainty. Nonlinear time history analysis is conducted for those SDOF systems and the result is processed statistically to obtain seismic fragility functions in the form of log normal distribution. Variation of seismic fragility functions for different parameters of SDOF systems and dampers are investigated and the seismic control performance is assessed probabilistically.

Key words Seismic fragility function, Probability, Nonlinear SDOF system, Displacement-dependent damper

1. 서 론

지진과 구조물 역량에 내재된 다양한 불확실 요소를 고려하여 내진성능평가를 확률적으로 접근하기 위한 방법으로서 다양한 지진취약도 함수가 제안 및 적용되고 있다. 지진취약도 함수는 지진의 세기에 따른 손상확률의 변화를 나타내는 함수이다. 여기서 지진의 세기는 PGA나 스펙트럴 변위 등이 채택되어 사용되어 왔으며, 손상도는 경미한 손상이나 심각한 손상 등으로 구분하여 손상도 수준별로 지진취약도 함수를 도출하게 된다. 지진취약도 함수는 현재 넓은 지역의 건물군에 발생하는 지진피해를 추산하기 위한 소프트웨어인 HAZUS에 탑재되어 널리 사용되고 있다.(1)

지진취약도 함수에 관한 연구는 이미 1980년대부터 수행되었으며, 전산해석기술의 발전에 따라 관련 연구들이 증가해오고 있다. Hwang and Jaw는 PGA에 기반한 로그정규분포 형태의 지진취약도 함수를 제안하였다.(2) Kircher 등은 HAZUS에 적용된 건축물의 구조형식, 재료 및 높이에 따른 분류 및 단자유도로의 이상화를 수행하고, 이를 기초로 스펙트럴 변위에 기반한 지진취약도 함수를 제안하였다.(3) Akkar 등은 터키 지역의 32개 표본 중저층 건물을 해석하여 내진역량의 불확실성을 산출하고 이를 기초로 지진취약도 함수를 제안하였다.(4) Dimova and Negro는 실험결과를 토대로 건물의 시공정밀도에 포함된 불확실성을 고려한 건물의 지진취약도함수를 제안하였다.(5) Porter 등은 기초 자료의 통계적 신뢰도를 고려한 취약도 함수의 작성법을

[1] 정회원·인천대학교 도시건축학부, 조교수 시설물안전기술연구소 소장 (교신저자: jhpark606@incheon.ac.kr)
[2] 인천대학교, 학사과정

본 논문에 대한 토의를 2012년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2011. 12. 27 / 수정일 1차: 2012. 3. 7, 2차: 2012. 3. 13 / 게재확정일 : 2012. 3. 13)

ⓒ 2011EESK www.eesk.or.kr

제안하였다.[6] FEMA에서는 HAZUS를 이용하여 미국 전역을 대상으로 연간 지진피해액을 추산하였으며, 유사한 연구들이 다양한 지역을 대상으로 수행되었다.[7]

국내에서도 윤의택 등이 서울시의 특정 구역을 대상으로 HAZUS의 역량곡선 및 지진취약도 함수를 적용하여 지진피해를 추정하는 연구를 수행하였다.[8] 박주남과 최은수는 5층의 철근콘크리트 모멘트골조 형식 구조물을 대상으로 Latin Hypercube 샘플링 기법을 적용하여 지진취약도 함수를 도출하였다.[9] 장동휘 등은 전단벽 철근콘크리트 전단벽 구조물을 대상으로 비선형 시간이력해석과 비선형 정적해석에 따른 지진취약도 함수를 비교분석하였다.[10]

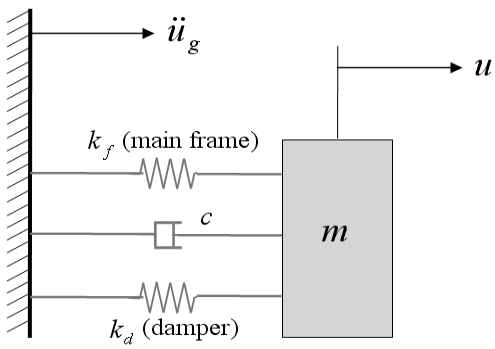
지진취약도 함수에 관한 다양한 연구에도 불구하고 아직 부가적인 감쇠기가 설치된 건물에 대한 연구는 많지 않다. Guneyisi and Altay는 점성감쇠기가 설치된 12층 RC 모멘트골조 건물을 대상으로 지진취약도 함수를 도출하였다.[11] Barnawi and Dyke는 MR감쇠기가 설치된 20층 철골모멘트골조 건물을 대상으로, Miyamoto 등은 점성 감쇠기가 설치된 단층 철골모멘트골조 구조물을 대상으로 지진취약도 함수를 도출하였다.[12],[13] 그러나 대부분의 연구들이 특정한 구조물에 대해서 연구를 수행하여 다양한 속성을 갖는 구조물에서의 제진효과를 확률적 관점에서 파악하는 데에는 한계를 갖고 있다.

본 연구에서는 서로 다른 고유주기를 갖는 철근콘크리트 구조물을 단자유도 비선형 시스템으로 이상화하고 다양한 강성과 감쇠를 갖는 변위의존형 감쇠기를 적용하여 비선형 시간이력해석을 수행하였다. 해석결과의 통계치를 바탕으로 지진취약도 함수를 도출하였으며, 이를 비교하여 변위의존형 감쇠기의 손상확률 저감효과를 확률적 관점에서 분석하는 변수연구를 수행하였다.

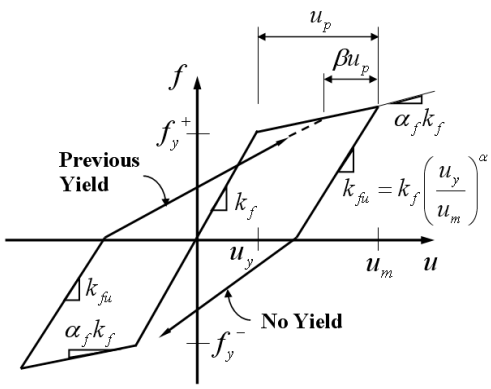
2. 해석대상 구조물

2.1 단자유도 구조물

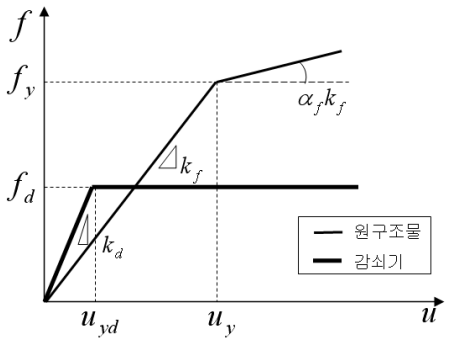
본 연구에서는 제진장치가 설치된 구조물의 지진취약도 저감효과를 정량적으로 검토하기 위하여 그림 1과 같이 각각 원구조물과 감쇠기에 해당되는 두 비선형 스프링이 병렬로 연결된 단자유도시스템을 사용하여 제진장치가 설치된 구조물을 모델링하였다. 원구조물은 철근콘크리트 구조물로서 반복하중 재하 시 균열 진전으로 인한 강성저감 특성을 모델링하기 위하여 이선형의 수정 Taketa 모델을 채택하였으며, 그 이력거동 특성은 그림 2와 같다. 수정 Taketa 모델은 강성이 저감되는 정도에 따라 크게 Large Takeda 모델



〈그림 1〉 감쇠기가 설치된 비탄성단자유도 시스템



〈그림 2〉 small Takeda 이력모델



〈그림 3〉 감쇠기와 원구조물의 하중-변위관계

과 Small Taketa 모델로 구분할 수 있으며, 전자에 비해 후자의 강성저감이 상대적으로 크고 에너지 소산능력은 더 작다. 전자의 모델은 보, 후자의 모델은 압축력을 받는 기둥에 적합한 모델로 알려져 있으며[14], 본 연구에서는 Small Taketa 모델을 적용하였다. 이 모델의 주요 매개변수인 α와 β는 각각 제하(Unloading) 강성과 재재하(Reloading) 강성과 관련되며, 이들 강성을 가장 저평가하는 값이다.[15]감쇠기는 변위의존형으로서 금속항복형 댐퍼나 마찰형 댐퍼의 경우 강성 저감현상을 최소화하면서 에너지를 소산시키도록 제작, 설치되므로 완전탄소성 모델(Fully Elasto-Plastic)을 적용하였다. 감쇠기 및 원구조물의 하중-변위 관계는 그림 3과 같다. 여기서 f_d와 f_y는 각각 감쇠기 및 원구조물의 항복

강도로서 $f_d < f_y$이므로 감쇠기가 먼저 항복하여 에너지를 소산시킨다.

2.2 구조물 속성

단자유도 시스템의 고유주기 T_n은 중저층 건축물을 가정하여 원구조물을 기준으로 0.3과 1.0sec을 채택하였고, 질량은 단위크기로 가정하였다. 원구조물의 항복강도 f_y는 동일한 주기를 갖는 대응선형 시스템의 최대탄성저항력을 항복강도감소계수 R로 나누어 산정하였으며, 적용된 항복강도감소계수는 0.5, 0.7, 1.0, 2.0, 3.3, 5.0, 7.0, 10의 8가지이다.

$$f_y = f_o / R \tag{1}$$

여기서, f_o는 대응선형시스템의 최대탄성저항력, R은 항복강도감소계수이다. 구조물 자체에 내재된 역량(Capacity)의 불확실성을 고려하여 정규분포를 가정한 배율을 원구조물의 항복강도 및 강성에 곱하여 지진취약도 작성 시에 필요한 경우의 수를 증가시켰다. 적용된 배율은 정규분포를 가정하여 비초과확률 5%부터 95%까지 10%씩 증가시킨 값에 대응되는 0.5888, 0.7409, 0.8314, 0.9037, 0.9686, 1.0314, 1.0963, 1.1686, 1.2591, 1.4112이다. 원구조물의 항복 후 강성비 α_f는 0.0, 0.2를 적용하였다. 구조물의 감쇠비는 0.05를 적용하였다.

감쇠기의 초기강성 k_d는 다음과 같이 원구조물 강성 k_f에 대한 강성비 r_k로 나타내었으며, 1.0 및 5.0배의 두 가지 값을 적용하였다.

$$r_k = k_d / k_f \tag{2}$$

감쇠기는 완전탄소성 시스템으로서 항복 후 강성은 0이다. 감쇠기의 항복강도 f_d는 다음과 같이 원구조물 항복강도f_y로 정규화된 항복강도비r_f로 나타내었으며, 0.1에서 0.5까지 0.1씩 증가시켰다.

$$r_f = f_d / f_y \tag{3}$$

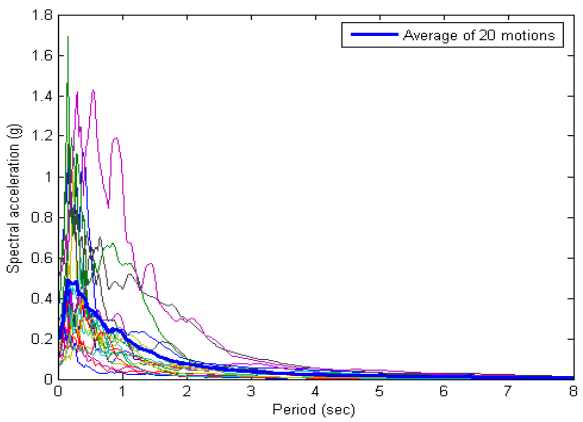
여기서 원구조물의 항복강도는 역량의 불확실성을 반영하기 위한 배율을 곱하지 않은 중앙값으로서, 배율의 하한치가 0.5888이므로 이를 곱한 가장 작은 원구조물의 항복강도도 감쇠기 항복강도의 상한치보다는 크게 된다. 감쇠기의 경우에는 강성 및 강도의 불확실성이 상대적으로 크지 않다고 판단하여 별도의 배율을 곱해주지는 않았다.

2.3 지진하중

지진하중은 FEMA 440에서 제시하고 있는 California 지역의 지반조건 C에 대한 20종의 실측지반가속도로서 표 1과 같다. 적용된 지반가속도 기록에 대한 5% 감쇠비의 응답스펙트럼을 평균 응답스펙트럼과 함께 그림 4에 나타내었다.[16] 지반운동의 세기를 변화시키기 위해 별도의 배율을 곱해주지는 않았으나, 원구조물의 강도 산정 시 8종의 항복

〈표 1〉 California 지역 지반조건 C에 대한 20종 실측 지반가속도

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



〈그림 4〉 20종 지반 가속도의 응답스펙트럼(감쇠비 : 5%)

강도감소계수 R을 적용하였기 때문에 다음 장에서 설명하게 되는 바와 같이 구조물의 손상을 일종의 정규화된 응답인 연성도로 평가한다면 실질적으로 8종의 지반운동 세기를 적용한 것과 같은 효과로 볼 수 있다. 비선형시간이력해석은 RUAUMOKO를 이용하여 수행하였으며, 0.005 sec간격으로 Newmark 법 및 Newton Raphson 반복법을 적용하였다.[15]

3. 지진취약도 함수

3.1 손상도 정의

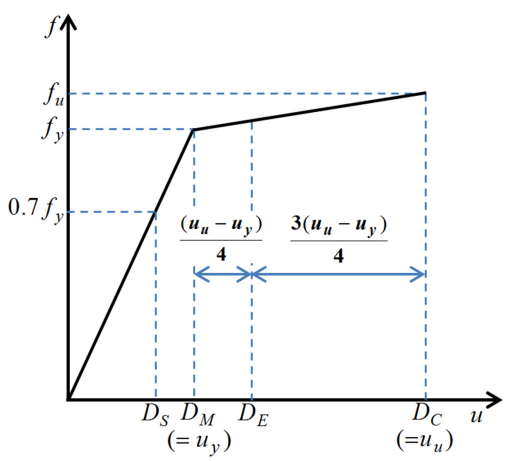
지진취약도 함수는 지진의 강도와 구조물에 일정 수준 이상의 손상이 발생할 확률 간의 관계를 나타낸다. 손상도의 분류는 HAZUS와 마찬가지로 경미(Slight), 중파(Moderate), 대파(Extensive), 완파(Complete)의 4단계로 구분하였다. 지진하중의 상대적인 세기를 항복강도감소계수를 통해 고려하였으므로 손상도를 판정하는 지표는 정규화된 변위인 연성도를 사용하였다. 각각의 손상도를 나타내는 연성도 값은 Barbat 등의 연구를 참조하였으며, 다음의 식과 같이 나타낼 수 있고, 그림 5에 나타내었다.[17]

$$\text{경미} : \mu_S = 0.7 \tag{4}$$

$$\text{중파} : \mu_M = 1.0 \tag{5}$$

$$\text{대파} : \mu_E = \frac{u_y + 0.25(u_u - u_y)}{u_y} = 0.75 + 0.25\mu_C \tag{6}$$

$$\text{완파} : \mu_C = u_u / u_y \tag{7}$$



〈그림 5〉 손상상태 정의

여기서 u_u는 이선형화된 원구조물의 극한변위로서 항복변위 u_y에 극한변위와 항복변위의 비율을 의미하는 연성계수를 곱하여 산정하였다. 일반적인 내진설계 기준에서 반응수정계수는 초과강도계수와 연성계수를 곱한 값이다.[18] 본 연구에서는 KBC 2009를 참조하여 철근콘크리트 중간모멘트골조의 반응수정계수 5를 초과강도계수 3으로 나누어 얻어진 연성계수 값 1.67을 적용하였다.[19]

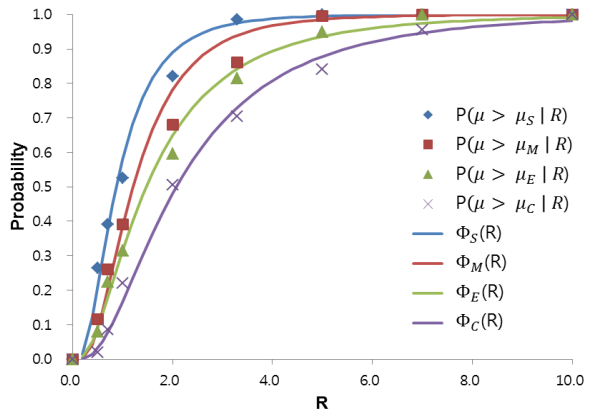
3.2 지진취약도 함수의 도출

비선형시간이력해석 수행을 통해 얻어진 변위 응답 값을 식 (4) ~ (7)에 의해 산정된 손상도 기준변위와 비교하여 손상도 초과여부를 판정하였다. 하나의 구조물 대표속성을 기준으로 내진역량의 불확실성을 고려하여 10개의 역량스펙트럼군을 생성하였고, 하나의 입력지진강도에 대하여 20종의 지반가속도군을 적용하였으므로, 구조물의 속성과 입력지진강도의 조합 1개당 총 200개의 비선형 시간이력 해석결과를 얻었다. 이를 토대로 각 손상도의 기준변위 초과확률을 산출하여 지진취약도 함수를 도출하였다. 지진취약도 함수의 독립변수는 지진의 강도를 나타낼 수 있는 최대지반가속도나 스펙트럴 변위를 사용하는데 본 연구에서는 항복강도감소계수 R을 적용하였다. 이는 항복강도감소계수가 단위질량을 갖는 비선형 단자유도시스템의 항복강도와 대응선형시스템의 의사가속도의 비율이기 때문에 실질적으로 최대지반가속도를 독립변수로 택하는 것과 동일한 결과를 산출하게 된다. 일반적으로 지진취약도 함수는 로그 정규분포 형태의 식으로 나타내게 되며, R을 독립변수로 채택 시 다음과 같이 쓸 수 있다.

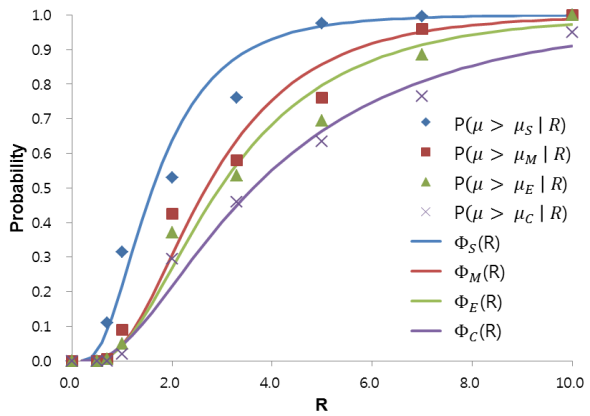
$$P(D > D_O | R) = \Phi\left(\frac{\ln R - \overline{\ln R}}{\beta}\right) \tag{8}$$

여기서 D는 최대변위응답, D_O는 손상도기준변위, $\overline{\ln R}$는 $\ln R$의 평균, β은 $\ln R$의 표준편차, Φ는 누적정규분포함수이다. 그림 6(a)는 제진장치를 설치하지 않은 $T_n = 0.3\,\text{sec}$인 단자유도 시스템의 손상확률과 이를 곡선적합한 지진취약도 함수, 그림 6 (b)는 같은 단자유도 시스템에 $r_f = 0.5$인 감쇠기 설치 시의 손상확률과 지진취약도 함수를 나타낸다. 그림 6 (a)와 (b)를 비교 시 각각의 손상도 발생 확률이 감쇠기 설치에 의해 상당히 저감됨을 알 수 있으며, 전반적으로 곡선적합이 적절하게 이루어지고 있다.

3.3 감쇠기에 의한 지진취약도 함수의 변화



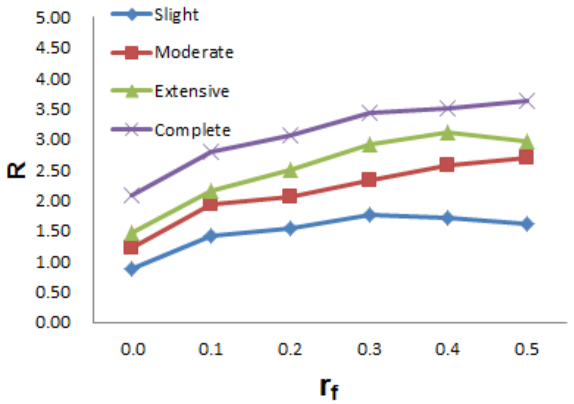
(a) r_k=1.0, r_f=0.0



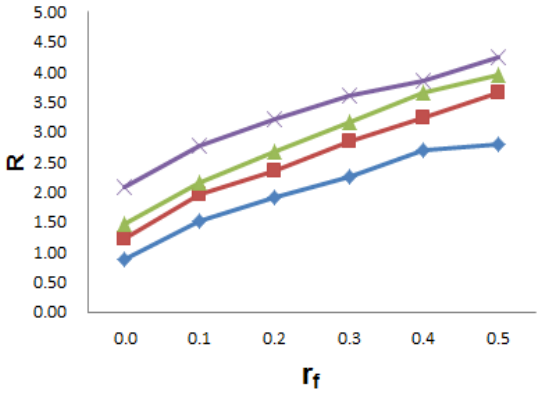
(b) r_k=1.0, r_f=0.5

〈그림 6〉 손상확률과 지진취약도 함수(T_n=0.3sec, α_f=0.0)

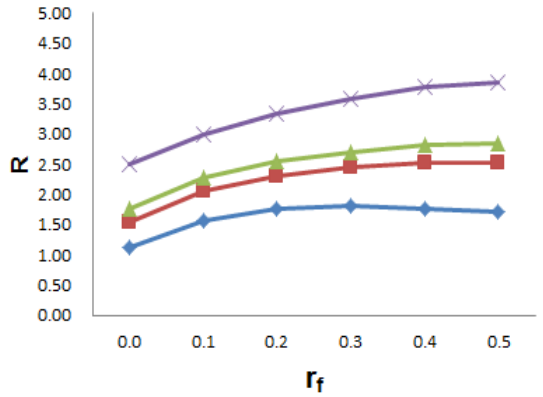
감쇠기 항복강도비 r_f의 증가에 따른 R의 평균치의 변화를 그림 7에 나타내었다. R의 평균치는 해당 손상도가 발생할 확률이 0.5가 되는 항복강도감소계수로서 클수록 지진취약도 함수가 우측으로 수평이동 하므로 손상이 발생할 확률이 작아지게 된다. 이 그림에서 감쇠기 항복강도비 증가에 따라 R의 평균치는 대부분 증가한다. 그러나 r_k가 1.0인 경우에는 상대적으로 경미한 손상도일수록 R의 평균치의 증가가 급격히 둔화되는 모습을 보이고 있으며, r_k를 5.0으로 증가시키면 상대적으로 경미한 손상도의 R 평균치가 두드러지게 향상된다. 이는 경미한 손상도의 기준 연성도가 1로서 다른 손상도에 비해 가장 작고, r_f를 증가시키다 보면 감쇠기의 항복변위가 원구조물의 항복변위에 근접하여 결과적으로 강성비 r_k를 증가시켜 감쇠기의 조기 항복을 유도하지 않으면 경미한 손상이 발생하는 원구조물 항복변위 수준에서는 에너지 소산량이 많지 않기 때문에 제진효과가 더 이상 향상되지 않는 것으로 볼 수 있다. 반면에 상대적으로 심각한 손상도의 평균 항복강도감소계수는 크게 향상되지 않으며, 이는 해당 손상도 기준변위에 비해 감쇠기의 항복변위가 강성비에 관계없이 매우 작으므로 강성비에 의해 에



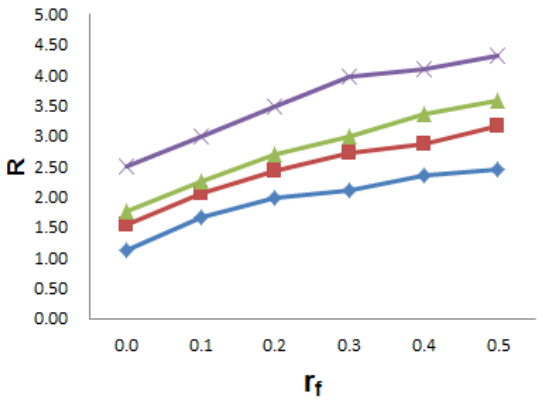
(a) T_n=0.3 sec (r_k=1.0)



(b) T_n=0.3 sec (r_k=5.0)



(c) T_n=1.0 sec (r_k=1.0)



(d) T_n=1.0 sec (r_k=5.0)

〈그림 7〉 감쇠기 설치로 인한 R의 평균치의 변화(α_f=0.0)

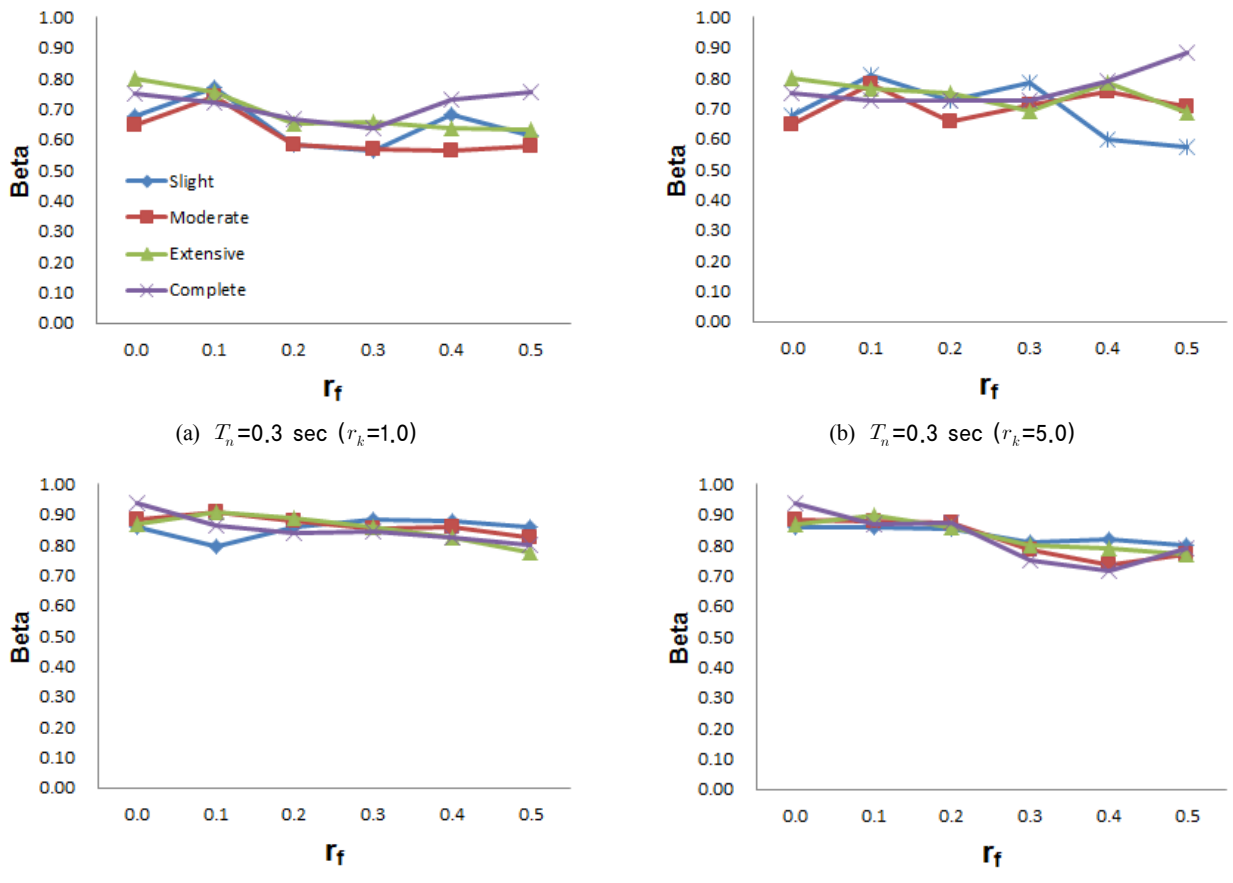
너지 소산성능이 크게 향상되지 않기 때문이다.

감쇠기 항복강도비 증가에 따른 로그정규분포의 표준편차 β의 변화를 그림 8에 나타내었다. β는 감소 시에 취약도 함수의 기울기가 급격해지며, 이는 평균 이하의 R값에 대해서는 손상확률의 감소를, 평균 이상의 R값에 대해서는 손상확률의 증가를 의미한다. 표준편차는 감쇠기 항복강도비의 증가에 따라 약간 감소하는 추세를 보이나 예외적인 경우가 있으며, 손상도 수준간의 대소관계가 일정한 경향을 보이지는 않는 것으로 나타났다.

감쇠기 설치에 따른 지진취약도 함수의 변화를 T_n= 0.3 sec 및 1.0 sec에 대해서 그림 9와 10에 각각 나타내었다. 전반적으로 감쇠기 설치 시 손상확률이 뚜렷이 저감되는 것을 알 수 있으며, R이 0에 가까운 매우 작은 값인 경우에는 원구조물의 손상확률이 작기 때문에 감쇠기에 의한 손상확률의 저감량이 작다. 또한 R이 10에 가까워지면 하중이 커지기 때문에 손상확률은 1로 근접하고, 감쇠기에 의한 확률의 저감량이 작아진다.

그림 9 (a)와 (b)는 T_n= 0.3 sec인 비교적 짧은 단주기 구조물에 항복강도비 r_f가 0.3인 감쇠기를 적용한 경우의 취약도 함수로써 각각 손상도 '경미'와 '완파'에 대한 것이다. 두 경우 모두 감쇠기 설치 시 손상확률이 상당히 감소하는 것을 볼 수 있다. 손상도 '경미'의 경우에는 감쇠기와 원구조물의 강성비 r_k를 1.0에서 5.0으로 증가시킴으로써 넓은 구간에 걸쳐서 추가적인 손상확률의 저감효과가 나타난다. 반면에 손상도 '완파'의 경우에는 양자 간의 차이가 크지 않으며, 평균치 이하의 R에 대해서는 추가적인 손상확률 감소가 거의 없다. 그림 9 (c) 및 (d)는 같은 구조물에서 감쇠기 항복강도비 r_f를 0.5로 증가시킨 경우의 지진취약도 함수이다. 그림 9 (a) 및 (b)와 비교 시 강성비 1.0인 경우에는 감쇠기 항복강도 증가에 따른 손상확률의 추가적인 저감효과가 크지 않은 것을 볼 수 있다. 반면에 강성 증대에 따른 손상확률의 추가적인 저감 효과가 좀 더 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 경미한 손상도일수록 손상도 기준변위가 감쇠기의 항복변위에 가까워지므로 강성비를 증가시켜 감쇠기의 조기항복을 유도할 필요가 있음을 의미한다.

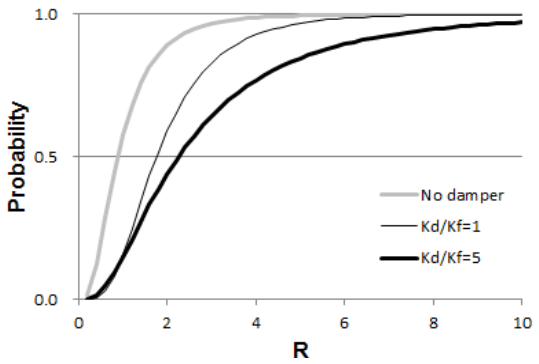
그림 10 (a)와 (b)는 T_n= 1.0 sec인 구조물에 항복강도비 r_f가 0.3인 감쇠기를 적용한 경우의 취약도 함수로써 각각



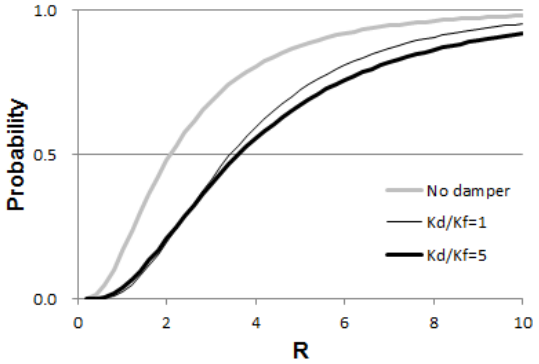
(a) T_n=0.3 sec (r_k=1.0) (b) T_n=0.3 sec (r_k=5.0)

(c) T_n=1.0 sec (r_k=1.0) (d) T_n=1.0 sec (r_k=5.0)

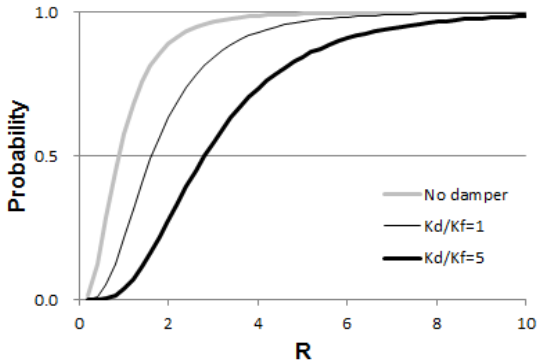
〈그림 8〉 감쇠기 설치로 인한 로그정규분포 표준편차 β의 변화 (α_f=0.0)



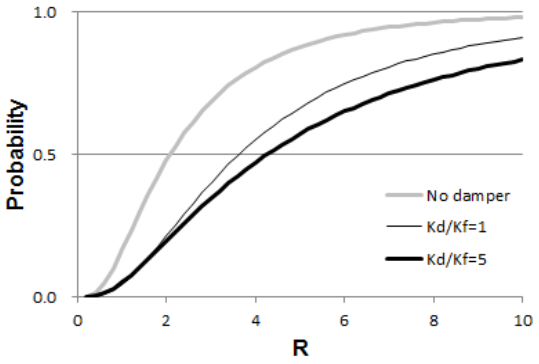
(a) 손상도 '경미' (r_f=0.3)



(b) 손상도 '완파' (r_f=0.3)

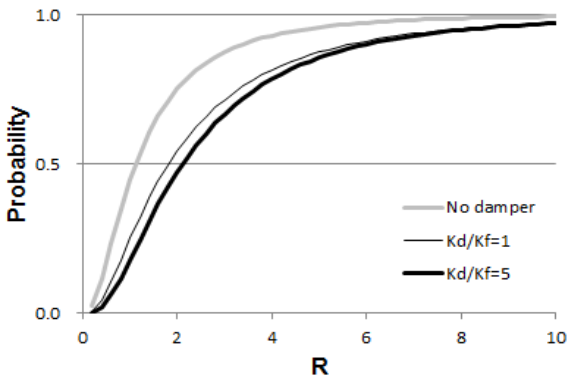


(c) 손상도 '경미' (r_f=0.5)

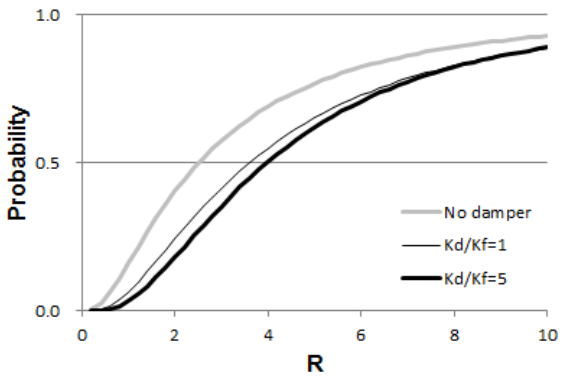


(d) 손상도 '완파' (r_f=0.5)

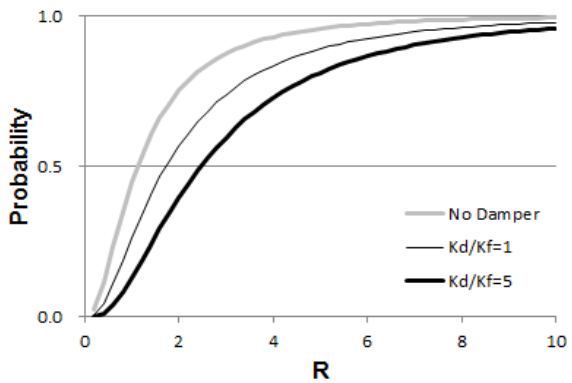
〈그림 9〉 감쇠기 설치에 따른 지진취약도 함수의 변화 (T_n=0.3 sec, α_f=0.0)



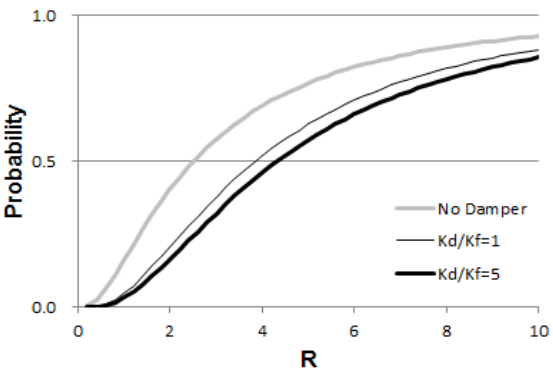
(a) 손상도 '경미' (r_f=0.3)



(b) 손상도 '완파' (r_f=0.3)



(c) 손상도 '경미' (r_f=0.5)



(d) 손상도 '완파' (r_f=0.5)

〈그림 10〉 감쇠기 설치에 따른 지진취약도 함수의 변화 (T_n=1.0 sec, α_f=0.0)

손상도 '경미'와 '완파'에 대한 것이다. T_n= 0.3 sec의 경우와는 달리 손상도 '경미'에 대해서도 감쇠기 강성 증가의 효과는 크지 않은 것으로 나타났다. 그림 10 (c)와 (d)는 같은 구조물에 항복강도비 r_f가 0.5인 감쇠기를 적용한 경우의 취약도 함수로서 각각 손상도 '경미'와 '완파'에 대한 것이다. T_n= 0.3 sec의 경우(그림 9 (c)와 (d))와 비교하면 감쇠기 항복강도비를 증가시켜도 손상확률의 저감은 상대적으로 크지 않다.

4. 감쇠기의 손상확률 저감효과

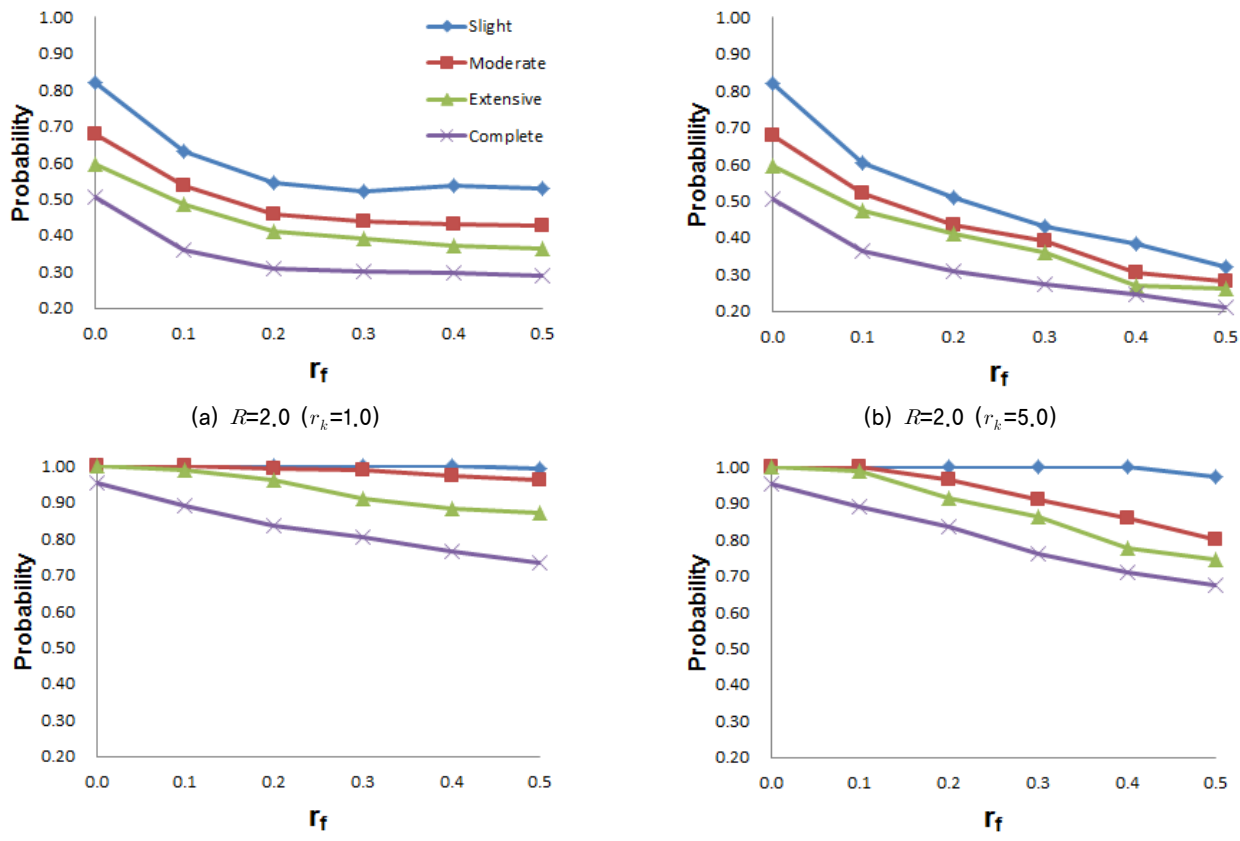
감쇠기의 강도를 증가시킴에 따른 손상확률 측면에서의 제진효과를 가속도 민감 구간에서의 고유주기를 갖는 원구조물(T_n = 0.3sec)과 속도 민감 구간에서의 고유주기를 갖는 원구조물(T_n = 1.0sec)로 구분하여 분석하였으며, 구조물 대비 지진의 상대적 세기, 감쇠기의 강성비, 원구조물의 항복 후 강성 등의 영향 등을 분석하였다.

4.1 고유주기가 0.3 sec인 구조물

감쇠기 강도 증가에 따른 구조물의 손상도 발생 확률의 변화를 지진하중의 상대적 크기를 나타내는 R이 2.0 및 7.0인 경우에 대하여 검토하였으며, 그림 11에 도시하였다. 여기서 강성비 r_k가 1.0으로서 작은 경우와 5.0으로서 상대적으로 큰 경우를 비교하였다.

R이 2.0인 경우를 살펴보면 r_k가 1.0인 경우에 감쇠기 항복강도비 r_f의 값이 0.2 이상으로 증가하면 손상확률은 추가적인 감소가 거의 없다. 반면에 r_k가 5.0인 경우에는 항복강도비 r_f의 증가에 따라 지속적으로 손상확률이 감소하는 것을 알 수 있다. 그림 11 (a), (b)에서 손상도별로는 확률의 감소량에 큰 차이가 없음을 알 수 있으나, 경미한 손상일수록 손상확률의 감소량이 약간 더 큼을 알 수 있다.

R이 7.0인 경우를 살펴보면 경미한 손상 발생확률은 강성비 r_k의 값에 무관하게 거의 1.0으로서 적용된 감쇠기 강도의 범위 내에서는 감쇠기 설치를 통해 확률이 거의 저감되지 않는 공통된 양상을 보인다. 반면에 중파 이상의 손상확률은 감쇠기 항복강도비 r_f가 증가하면 강성비 r_k의 값에 따른 차이가 발생하는데 특히 '중파'와 '대파' 수준의 손상도에서 두드러지게 나타난다. 이는 손상확률이 특정 수준의 변위응답 초과여부에 의해 결정되므로 감쇠기에 의해 저감된 연성도 응답 중 일부가 이들 손상도의 기준 연성도보다



〈그림 11〉 감쇠기 강도비 r_f의 증가에 따른 손상확률 변화(T_n=0.3sec, α_f=0.0)

〈표 2〉 원구조물의 항복 후 강성비 α_f의 변화에 따른 손상확률 (r_k= 5.0)

고유주기 T_n	R	손상상태	항복 후 강성비	감쇠기 항복강도비 (r_f)					
				0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.3	2.0	경미	0.0	0.820	0.605	0.510	0.430	0.385	0.320
			0.2	0.820	0.605	0.510	0.425	0.385	0.320
		완파	0.0	0.505	0.365	0.310	0.275	0.245	0.210
			0.2	0.505	0.370	0.310	0.275	0.235	0.210
	7.0	경미	0.0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.975
			0.2	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.975
		완파	0.0	0.955	0.890	0.835	0.760	0.710	0.675
			0.2	0.945	0.890	0.835	0.755	0.705	0.675
1.0	2.0	경미	0.0	0.800	0.670	0.505	0.355	0.330	0.340
			0.2	0.800	0.670	0.505	0.355	0.330	0.340
		완파	0.0	0.355	0.210	0.165	0.150	0.150	0.150
			0.2	0.365	0.220	0.160	0.150	0.150	0.150
	7.0	경미	0.0	1.000	0.930	0.915	0.950	0.910	0.900
			0.2	1.000	0.930	0.915	0.950	0.910	0.900
		완파	0.0	0.855	0.850	0.845	0.850	0.850	0.775
			0.2	0.865	0.850	0.845	0.850	0.850	0.810

낮아져서 발생한 것이다. 그러나 다른 손상도의 경우에는 감쇠기 항복강도비 r_f의 증가에 따라 연성도가 감소하더라도 손상도 기준치 이하로 감소하지 않아 손상확률의 변화가 거의 없다.

결론적으로 동일한 감쇠기 항복강도라 하더라도 강성을 증가시킴으로써 추가적인 손상 확률 저감효과를 얻을 수 있다. 또한 강성이 제한된 상태에서는 유효한 손상확률 저감효과를 얻을 수 있는 항복강도의 상한치가 나타난다. 또한 본 연구에 적용된 완전탄소성 형태의 감쇠기는 경미한 손상을 제어하는데 있어서는 한계가 있다. 또한 이와 같은 현상을 종합하면 제진효과를 얻는데 있어서 손상도 기준변위와 감쇠기 항복변위의 차이가 중요한 요소로서 차이가 크면 감쇠기 항복강도 증대가 효과가 있고, 반면에 그렇지 않으면 강성비 r_k를 증가시켜 그 차이를 증대시켜줄 필요가 있음을 의미한다.

다음으로는 원구조물의 항복 후 강성비 α_f가 미치는 영향을 알아보기 위해 α_f 값 0.0과 0.2에 대하여 '경미'와 '완파'에 해당되는 손상 발생확률을 표 2에 정리하였다. 여기서 감쇠기와 원구조물의 강성비 r_k는 5.0이다. α_f가 0.0에서 0.2로 증가할 지라도 구조물에 감쇠기 설치 시의 손상확률 저감 효과는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 따라서 고유주기가 0.3 sec 내외인 단주기 구조물에서는 원구조물의 항복 후 강성비가 손상확률에 거의 영향을 미치지 않는다고 볼 수 있다.

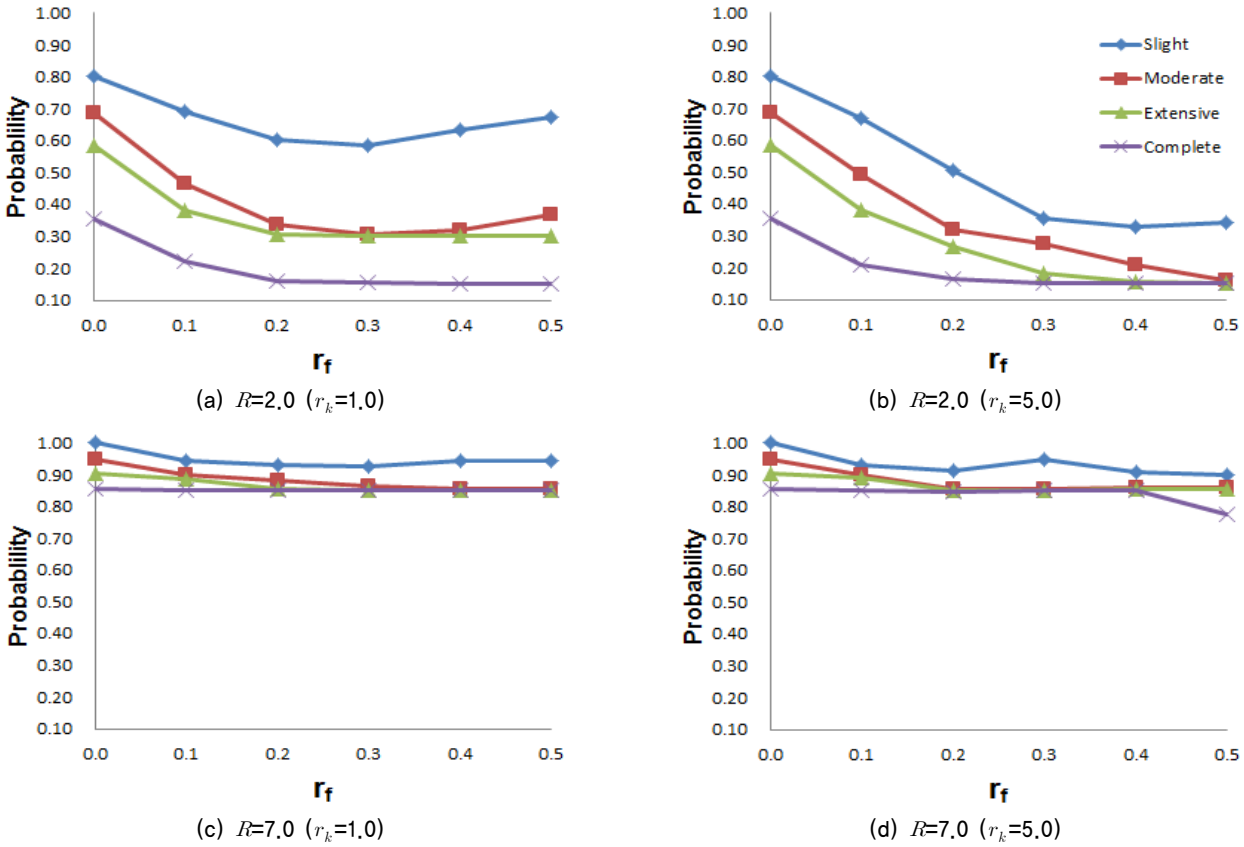
4.2 고유주기가 1.0 sec인 구조물

고유주기가 1.0 sec인 원구조물을 대상으로 감쇠기 항복강도 증가에 따른 구조물의 손상도 발생 확률의 변화를 R= 2.0 및 7.0인 경우에 대하여 검토하였으며, 그림 12에 나타내었다.

그림 12 (a) 및 (b)에서 항복강도감소계수 R= 2.0인 경우에는 감쇠기 설치에 의해 상당한 손상확률이 저감됨을 확인할 수 있으며, 반면에 그림 12 (c) 및 (d)에서 항복강도감소계수 R= 7.0인 경우에는 감쇠기 설치에 의한 손상확률의 저감량은 0.1 미만으로 제진장치의 효과가 크지 않은 것으로 나타났다. 후자의 경우에 제진효과가 크지 않은 것은 탄성주기가 길기 때문에 비탄성 변위가 크게 증가함에 따라 유효 주기가 극히 길어져서 응답스펙트럼상에서 감쇠의 영향이 크지 않은 영역에 속하기 때문인 것으로 판단된다.

강성비 r_k의 영향은 그림 12 (a)와 (b)를 비교함으로써 알 수 있다. r_k가 1.0인 경우에는 '경미'와 '중파'의 손상 발생확률이 항복강도비 r_f가 증가함에 따라 감소 후 다시 증가하는 양상을 나타내며, '대파' 및 '완파'의 경우에는 r_f가 일정한 값을 넘어서면 손상발생 확률의 변화가 거의 없다. 따라서 r_f의 값을 결정함에 있어서 특정한 손상의 발생확률만을 참조하지 않고 복수의 손상 발생 확률을 참조할 필요가 있으며, 그림 12 (a)에서는 $r_f = 0.2$가 적절한 값이라고 볼 수 있다.

감쇠기의 강성비를 r_k를 5.0으로 증가시킨 그림 12 (b)에



(a) R=2.0 (r_k=1.0) (b) R=2.0 (r_k=5.0)

(c) R=7.0 (r_k=1.0) (d) R=7.0 (r_k=5.0)

〈그림 12〉 감쇠기 강도비 r_f의 증가에 따른 손상확률변화(T_n=1.0sec, α_f=0.0)

서는 r_f의 증가에 따라 급격히 감소율이 둔화되어 $r_f = 0.3$ 정도가 적절하고 그 이상의 값은 제진 효과 향상에 큰 역할을 하지 못함을 알 수 있다. 강성비 r_k를 증가시킴으로써 다른 손상도의 확률은 상당히 저감되나 손상도 '완파'의 확률은 저감되지 않는 것으로 나타났으며, 심각한 손상도일수록 해당 손상확률의 저감량은 낮아진다.

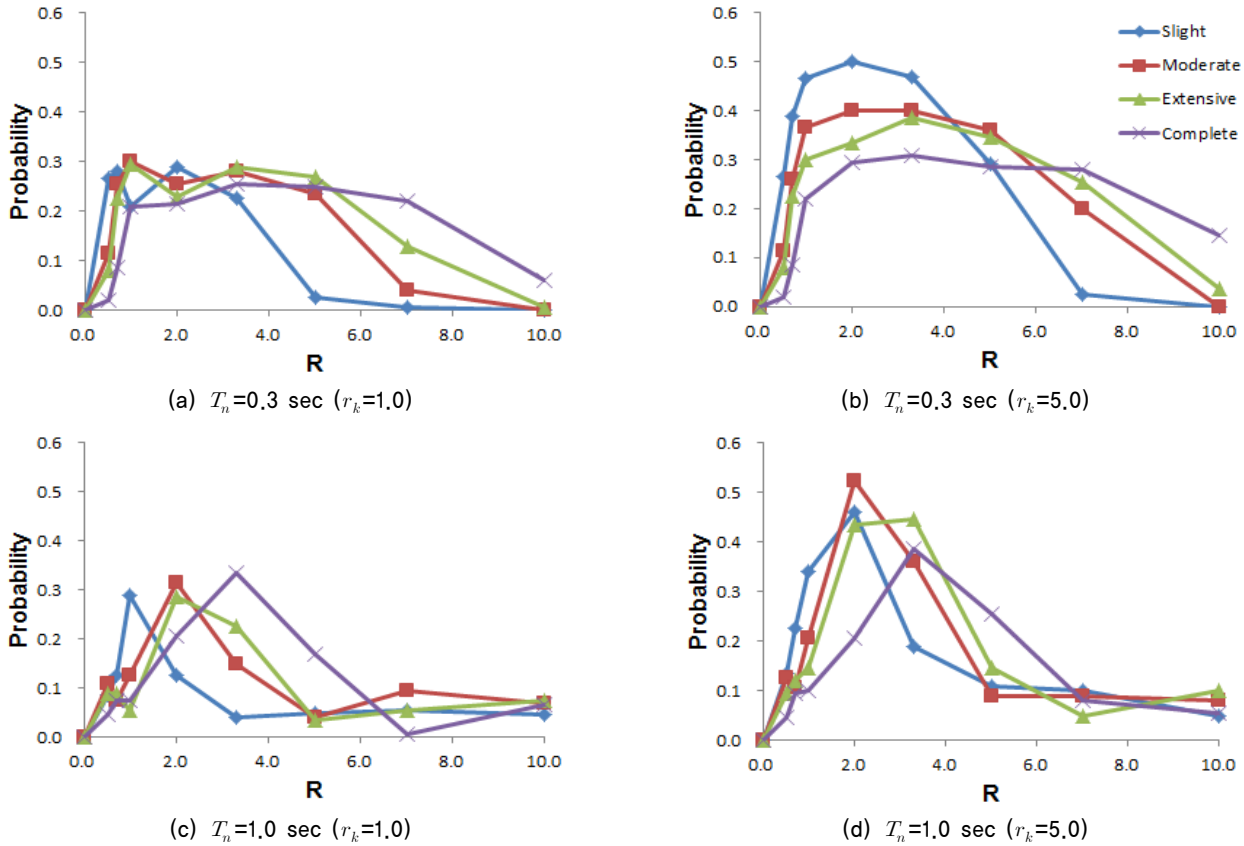
다음으로는 원구조물의 항복 후 강성비 α_f가 미치는 영향을 알아보기 위해 α_f값 0.0과 0.2에 대하여 '경미'와 '완파'에 해당되는 손상 발생 확률을 표 2에 정리하였다. 여기서 강성비 r_k는 5.0이다. 이로부터 고유주기 1.0 sec 내외의 구조물에서도 단주기 구조물과 마찬가지로 α_f가 감쇠기 설치 시 손상 확률 저감에 거의 영향을 미치지 않는다고 판단된다.

5. 지진의 세기에 따른 손상확률 변화

앞서 감쇠기 설치에 따른 손상확률 저감효과는 항복강도 감소계수 R에 따라 달라지는 것으로 나타났다. 여기서는 항복강도감소계수에 따라 달라지는 손상확률의 저감량 변화를 조사하고 제진장치의 적용이 효과적인 하중의 크기를 검토한다. 손상확률의 저감량은 감쇠기 항복강도비 r_f가 1.0인 경우의 손상확률에서 0.5인 경우의 손상확률을 뺀 값으로 산정하였다.

그림 13에 $T_n = 0.3\,\mathrm{sec}$에 해당되는 구조물의 손상확률 감소량과 R의 관계를 나타내었다. 그림 13 (a)는 감쇠기 강성비가 1인 경우로서 손상확률의 최대 저감량은 손상도에 관계없이 약 0.3이 최대이며, 0.2 이상의 손상확률 감소를 얻을 수 있는 R의 범위는 손상도가 심각해질수록 넓어지는 경향을 나타낸다. 그림 13 (b)는 감쇠기 강성비가 5인 경우로서 손상도 '경미'는 손상확률의 최대 감소량이 0.5이며, 이와 유사한 손상확률의 감소를 얻을 수 있는 R의 구간은 0.5와 3.3 사이로 나타났다. 같은 그림에서 손상도 '완파'는 손상확률의 최대 감소량이 0.3이며, 이와 유사한 수준의 손상확률 감소를 얻을 수 있는 R의 구간은 2.0과 7.0 사이로 나타났다. 즉 손상도이 심각해질수록 손상확률의 저감량은 감소하나 감쇠기가 효과적인 하중의 범위는 증가한다.

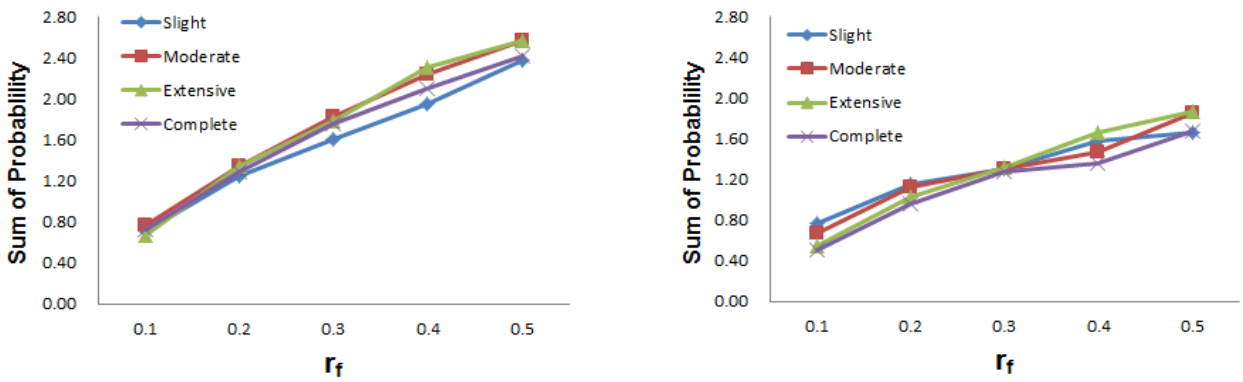
그림 13 (c), (d)에 $T_n = 1.0\,\mathrm{sec}$에 해당되는 구조물의 손상확률 저감량과 R의 관계를 나타내었다. 그림 8에 나타낸 단주기 구조물과 비교해보면 손상확률의 최대 저감량은 유사하나 곡선의 형태 측면에서 뾰족한 삼각형 형태를 나타내고 있기 때문에 감쇠기가 효과적 역할을 하는 하중의 범위



(a) T_n=0.3 sec (r_k=1.0) (b) T_n=0.3 sec (r_k=5.0)

(c) T_n=1.0 sec (r_k=1.0) (d) T_n=1.0 sec (r_k=5.0)

〈그림 13〉 강도저감계수 R별 구조물 손상확률 저감량(r_f=0.5, α_f=0.0)



(a) T_n=0.3 sec (b) T_n=1.0 sec

〈그림 14〉 감쇠기 설치로 인한 구조물 손상확률 저감량(α_f=0.0, r_k=5.0)

가 매우 제한되어 있음을 알 수 있다. 이는 앞서 4.2절에서 설명한 바와 같이 주기가 긴 구조물에서 하중 증가에 따른 비탄성 변형의 증가는 감쇠가 유효한 영향을 미칠 수 있는 범위 이상으로 유효주기를 증가시키기 때문인 것으로 판단된다. 삼각형 분포의 폭은 $T_n = 0.3\,\mathrm{sec}$와 마찬가지로 손상도가 심각해질수록 넓어지는 것을 볼 수 있다.

그림 14는 감소된 손상확률의 총량으로서 그림 9에 나타낸 R과 손상확률 간 관계를 나타내는 선도의 면적을 계산하는 방식으로 얻어진 결과이다. 단, 그림 14에는 항복강도비 r_f= 0.1부터 0.5까지의 결과를 모두 나타내었다. 손상확률 총저감량은 감쇠기 항복강도비가 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하는 추세를 나타내고 있으며, 그림 14 (a)와 (b)를 비교하면 r_f= 0.1일 때는 유사한 수준이지만 r_f가 증가함에 따라 단주기 구조물에서의 손상확률 저감효과가 뚜렷하다. 이는 T_n = 1.0 sec에 대해서는 특정 하중 수준에 대해서만 두드러지게 효과가 나타나는 경향에 의한 것으로

볼 수 있다. 그림 14에서 손상확률 총저감량은 손상도에 따라 큰 차이를 보이지는 않는 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서 적용한 변위의존형 감쇠기를 통한 제진효과는 손상확률의 저감이라는 측면에서 볼 때 주기 0.3 sec 내외의 비교적 단주기 구조물에서 효과적이며, 하중의 크기에 덜 민감한 특성을 갖는다. 반면에 주기 1.0 sec 내외의 비교적 긴 주기의 구조물에서는 변위의존형 감쇠기의 손상확률의 저감효과는 특정하중 수준에서 두드러지고 전반적인 감소효과는 상대적으로 적다. 또한 변위의존형 감쇠기는 제어대상 손상이 심각한 수준일수록 보다 더 넓은 범위의 하중에 대해서 효과를 발휘하는 것으로 나타났다. 따라서 다른 보강 방법과 비교 평가하여 이와 같은 제진보강이 상대적으로 유리하게 적용될 수 있는 범위를 결정하는 것이 필요하다.

6. 결 론

본 연구에서는 비선형 단자유도시스템으로 이상화된 철근콘크리트 구조물을 대상으로 제한된 강도를 갖는 변위의존형 감쇠기 설치 시의 지진취약도함수를 도출하였다. 원구조물의 강성과 강도의 불확실성을 고려하였으며, 비선형 시간이력해석 결과의 통계분석을 통해 로그정규분포 형태의 지진취약도 함수를 도출하고 감쇠기의 손상확률 저감효과를 분석하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 손상도 수준이 경미해질수록 기준변위가 감소하며, 감쇠기의 항복변위를 이보다 충분히 작게 설계하는 것이 필요하다. 특히 감쇠기의 강성이 일정할 때에 강도의 증가는 항복변위의 증가를 동반하므로 강도만을 증가시켜 줄 것이 아니라 강성을 함께 증가시킴으로써 감쇠기 항복변위가 제어 목표가 되는 손상도의 기준변위보다 충분히 작아질 수 있도록 설계하는 것이 필요하다.
2. 고유주기 0.3 sec 내외의 단주기 구조물에서는 충분한 감쇠기 강성 확보 시 강도증가가 지속적으로 추가적인 손상확률 저감효과를 얻을 수 있다. 반면에 고유주기 1.0 sec 내외의 중간주기 구조물에서는 같은 정도의 강성비를 확보하여도 강도증가의 효과가 조기에 한계에 도달하며, 이를 참고하여 적정한 감쇠기 강도를 결정할 수 있다.
3. 제한된 강도를 갖는 변위저감형 감쇠기의 손상확률 저감작용은 주기가 짧은 구조물에서는 비교적 넓은 범위의 하중의 세기에 대해서 유효하고, 주기가 긴 구조물에서는 비교적 좁은 범위의 하중의 세기에 대해서만 유효하다. 또한 심각한 손상도일수록 손상확률의 저감량은 낮으나 더 넓은 범위의 하중의 세기에 대해서 효과가 나타난다.
4. 상기 연구 결과는 철근콘크리트 중간모멘트골조의 연성능력에 기초한 것으로서 매우 상이한 연성능력을 갖는 구조물에 대해서는 추후 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 인천대학교 2009년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었으며, 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. FEMA, *HAZUS-HM MR3 Technical Manual*, FEMA, Washington, D.C., 2003.
2. Hwang, H.H.M., Jaw, J.W., “Probabilistic Damage Analysis of Structures,” *Journal of Structurul Engineering*, Vol. 116, No. 7, 1992-2007, 1990.
3. Kircher, C.A., Nassar, A.A., Kustu, O., and Holmes, W. T., “Development of Building Damage Functions for Earthquake Loss Estimation,” *Earthquake Spectra*, Vol. 13, No. 4, 663-682, 1997.
4. Akkar, S., Sucuoglu, and H., Yakut, A., “Displacement-Based Fragility Functions for Low- and Mid-rise Ordinary Concrete Buildings,” *Earthquake Spectra*, Vol. 21, No. 4, 901-927, 2005.
5. Dimova, S.L., Negro, P., “Assesment of Seismic Fragility of Structures with Consideration of the Quality of Construction,” *Earthquake Spectra*, Vol. 22, No. 4, 909-936, 2006.
6. Potter, K., Kennedy R., and Bachman R., “Creating Fragility Functions for Performance-Based Earthquake Engineering,” Vol. 23, No. 2, 471-489, 2007.
7. FEMA, *Estimated Annualized Earthquake Losses for the United States*, FEMA-366, FEMA, Washington, D.C., 2001.
8. 윤의택, 류혁, 강태섭, 김재관, 박창업, “서울시 모델 구역 지진피해 추정연구,” 한국지진공학회논문집, 제9권, 제6호, 41-52, 2005.
9. 박주남, 최은수, “취약도 해석을 통한 빌딩구조물의 내진성능 비교 및 평가,” 한국지진공학회논문집, 제11권 제3호, 11-21, 2007.
10. 장동휘, 송종걸, 강성립, 박창호, “다양한 비선형지진해석방법에 따른 철근콘크리트 전단벽 구조물의 취약도곡선 평가,” 한국지진공학회 논문집, 제15권, 제4호, 1-12, 2011.
11. Guneyisi, E. M., Altay, G., “Seismic fagility assessment of effectiveness of viscous dampers in R/C buildings under scenario earthquakes,” *Structural Safety*, Issue 30, 461-480, 2007.

12. Barnawi, W., Dyke, S.M., “fragility Based Analysis of a 20-story Benchmark Building with Smart Device Implementation,” *Proceedings of the 11th international conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments 2008*, ASCE, 1-8, 2008.
13. Miyamoto, H.K., Gilani, A.S.J., Ariyaratana, C., and Wada, A., “Probabilistic Evaluation of Seismic Performance of Steel Moment Framed Buildings Incorporating Damper Limit States,” *Proceedings of the 2010 Structures Congress*, ASCE, 1428-1439, 2010.
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, No. 4, 512-530, 2007.
15. Carr, A.J., *Ruaumoko manual Volume 5: Appendices*, University of Canterbury, 2007.
16. ATC, *Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures. FEMA-440*, FEMA, Washington D.C., 2005
17. Barbat, A.H., Pujades, L.G., and Lantanda, N., “Seismic damage evaluation in urban areas using the capacity spectrum method : Application to Barcelona,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Issue 28, 851-865, 2008.
18. 이동근, 조소훈, 고현, 김태진, “약진지역에서의 초과강도 및 반응수정계수,” 한국지진공학회 논문집, 제10권, 제4호, 57-64, 2006.
19. 국토해양부, 건축구조기준, 2009.