

다중 감쇠비 응답스펙트럼 추정을 위한 감쇠보정계수 제안

차민혁*, 김성렬**

Damping Correction Factor for Multi-Damping Response Spectra Estimation

Minhyuck Cha*, Sungryul Kim**

요 약

원자력발전소의 안전에 중요한 구조물 및 기기의 내진설계에는 감쇠 특성에 적합한 응답스펙트럼이 사용되므로, 다양한 감쇠비에 대한 지진응답 산정이 필수적이다. 최근 감쇠보정계수 연구에서는 지속시간과 지진규모 등의 영향을 고려하고 있으나, 지진의 상세 정보 없이 실무에 적용하기 어렵다는 한계가 있다. 본 연구에서는 계측 지진기록 기반 응답스펙트럼의 감쇠비 및 진동수 의존성을 정량화하고, 지속시간 등의 정보 없이 5% 감쇠 응답스펙트럼으로부터 다중 감쇠비 응답스펙트럼을 추정하는 감쇠보정계수를 제안한다. 제안식은 감쇠비별 평균 감쇠보정계수 데이터에 대해 높은 적합도와 반복 홀드아웃 검증에서 안정적인 성능을 보였으며, 국내외 설계기준에서 충분히 고려하지 못한 진동수 의존성과 고진동수 수렴 특성을 반영하였다. 도출된 특성과 제안식은 향후 머신러닝 기반 원자력발전소 층응답스펙트럼 예측모델의 물리 기반 사전정보로 활용될 수 있다.

Abstract

Response spectra at various damping ratios are required for the seismic design of safety-related structures and equipment in nuclear power plants. Recent studies on damping correction factors have considered ground motion duration and earthquake magnitude, but the practical use is limited when such detail information is unavailable. This study quantifies the damping- and frequency-dependent characteristics of response spectra using recorded ground motions and proposes a damping correction factor for estimating multi-damping response spectra from a 5%-damped spectrum without detail information. The proposed equation shows high goodness-of-fit to mean damping correction factor data and stable performance in repeated holdout validation, while reflecting frequency dependence and high-frequency convergence not adequately considered in domestic and international design standards. The results can be used as physics-based prior information for future machine-learning-based prediction of floor response spectra.

Keywords

recorded ground motion, response spectrum, damping correction factor, nonlinear regression, holdout validation

* 국립금오공과대학교 디지털융합공학과 박사과정,
한국전력기술(주) 차장

- ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4862-9908>

** 국립금오공과대학교 컴퓨터공학부 부교수(교신저자)

- ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5218-1477>

· Received: Aug. 14, 2026, Revised: Sep. 09, 2026, Accepted: Sep. 12, 2026

· Corresponding Author: Sungryul Kim

Dept. of Computer Software Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Korea

Tel.: +82-54-478-7549, Email: sungryul@kumoh.ac.kr

1. 서 론

원자력발전소의 내진설계에는 지진 발생 시 안전 관련(Safety-related) 구조물, 계통 및 기기의 기능과 건전성이 유지되는지를 평가하기 위해 응답스펙트럼(Response spectrum)이 활용된다. 응답스펙트럼은 동일한 지반 가속도 시간이력(Time history)을 서로 다른 고유진동수를 갖는 일련의 단자유도계에 입력하고, 각 진동계에서 발생하는 최대 변위, 속도 또는 가속도 응답을 진동수에 따라 나타낸 것이다[1]. 이 중 가속도 응답스펙트럼은 구조물과 기기에 작용하는 관성력과 직접적으로 관련되므로 내진해석과 설계에서 가장 대표적으로 사용되는 지표이다[2]-[4]. 원전 설계에서는 구조물 내진해석을 통해 구조물 각 층에서의 최대 가속도 응답인 층응답스펙트럼(Floor response spectrum)을 산출하고, 이를 구조물 자체의 구조설계뿐만 아니라 해당 위치에 설치되는 기계, 배관, 전기 및 계측설비의 지진하중 산정과 내진검중에 사용한다.

응답스펙트럼의 크기와 형상을 결정하는 주요 변수 중 하나는 감쇠비(Damping ratio)이다. 감쇠는 구조물 또는 기기의 진동에너지가 재료 내부 마찰, 기하학적 마찰, 저항 등의 다양한 원인으로 감소하는 현상을 말하며, 일반적으로 감쇠비가 클수록 에너지 소산이 증가하여 응답은 감소한다.

원전을 구성하는 구조물과 각종 기기는 재료, 구조형식 및 접합조건 등의 감쇠 특성이 다르므로 구조물과 기기의 종류에 따라 설계에 적용하는 감쇠비 또한 달라진다. 따라서, 하나의 기준 감쇠비에 대한 응답스펙트럼만으로는 원전 내 다양한 구조물과 기기의 지진응답을 평가하기 어려우며, 실제 설계 대상의 감쇠 특성에 대응하는 다중 감쇠비 응답스펙트럼이 필요하다.

내진해석을 통해 산출된 가속도 시간이력 자료가 주어진 경우, 감쇠비별 응답스펙트럼은 각 목표 감쇠비에 대한 단자유도계의 운동방정식을 해석함으로써 직접 산정할 수 있다. 그러나 실제 설계 및 평가 업무를 수행하는 과정에서는 가속도 시간이력 자료 없이 특정 감쇠비에 대한 응답스펙트럼만 제공되는 경우가 빈번하다. 특히 해석모델이 없는 경

우에는 모델 구축과 검증, 해석에 상당한 시간과 노력이 요구되며, 원래의 입력 지반운동이 확보되지 않으면 동일한 지진동에 대한 다른 감쇠비의 응답스펙트럼을 직접 산정하기는 어렵다.

이러한 상황에서 적용할 수 있는 대안은 기존에 확보된 기준 응답스펙트럼에 감쇠보정계수(Damping correction factor)를 적용하여 목표 감쇠비의 응답스펙트럼을 추정하는 것이다[5]. 이 방법은 입력 운동과 상세 해석모델을 이용한 내진해석의 재수행 없이도 다양한 감쇠비에 대한 응답스펙트럼을 효율적으로 산정할 수 있다는 장점이 있다. 다만, 추정 결과가 구조물 및 기기의 지진하중과 안전성 평가에 직접적인 영향을 미칠 수 있으므로, 신뢰도 높은 감쇠보정계수의 적용이 요구된다.

기존의 국내외 설계기준에서 제시하는 감쇠보정계수는 주로 감쇠비만의 함수로 구성되거나, 넓은 진동수영역에서 동일한 값으로 정의되는 경우가 많았으나, 최근의 연구에서는 지진동의 지속시간 및 규모, 진동수 등의 특성을 추가적으로 고려한 다양한 모델이 제안되어 왔다[6]-[10]. 하지만, 해당 연구들은 지진의 시나리오에 초점을 둔 모델로서 개별 지진의 상세 정보가 필요하여 실제 업무에 적용하기에는 다소 복잡하다는 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 진동수에 따른 감쇠보정계수의 변화 특성을 정밀하게 반영하는 동시에, 구조물 및 기기 등의 내진설계 실무에 적용하기 용이한 감쇠보정계수 제안식을 개발하고자 한다. 특히, 향후 원전 구조물 층응답스펙트럼 예측모델 개발 연구로의 확장을 고려하며, 지진의 상세 정보가 제한적인 경우에도 적용이 가능한 형태로 구성하였다.

연구 방법으로는 다양한 감쇠비와 넓은 진동수 범위에 일관되게 적용할 수 있는 신뢰도 높은 감쇠보정 관계를 도출하기 위해 대규모 계측 지진 자료를 이용하여 통계적 분석을 수행하였다. PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center)의 NGA-West2 데이터베이스에서 선정한 총 2,695개의 계측 지진 데이터셋을 바탕으로 가속도응답스펙트럼의 감쇠비 및 진동수 의존성을 정량화하고, 지진 규모, 최단 단층거리 및 지반조건에 따른 변화 특성을 검토하였다. 또한 산정된 평균 감쇠보정계수를

기존의 설계기준과 비교하여 오차를 평가하였다. 마지막으로 물리 조건이 반영된 감쇠보정계수 제안식을 도출하였다.

본 연구를 통해 개발된 감쇠보정계수 제안식은 감쇠비와 진동수의 영향에 따른 지진응답의 변화를 합리적으로 추정하면서도, 기존 연구들에 비해 실무적으로 적용이 용이하다는 측면에서 의의가 있다. 또한, 향후 원전 구조물의 동적 특성이 반영된 물리 정보 머신러닝 기반 다중 감쇠비 응답스펙트럼 예측모델 연구를 위한 기초자료를 제공한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 연구에서 활용된 데이터와 응답스펙트럼 기반의 감쇠보정계수 산정 방법에 대해 설명한다. 3장에서는 지진기록 기반 감쇠보정계수의 특성을 분석하고 기존 설계기준과의 비교 결과를 기술한다. 4장에서는 도출된 감쇠보정계수 제안식을 소개하고, 5장에서는 본 연구의 결론과 향후 과제를 제시한다.

II. 감쇠보정계수 산정

2.1 계측 지진기록

본 연구에서는 지진기록의 감쇠비 의존 응답특성을 분석하기 위해 PEER에서 제공하는 NGA-West2 지진동 데이터를 활용하였다. NGA-West2 데이터베이스는 강진동 기록을 바탕으로 구축되었으며, 지진 규모, 단층거리, 관측지점의 지반조건을 비롯하여 지진원, 전파경로 등의 정보를 함께 제공한다. 또한 일관된 방법으로 정리된 가속도 시간이력과 응답스펙트럼 관련 메타데이터를 제공하므로, 다양한 지진동 특성에 따른 응답스펙트럼의 통계적 분석에 적합하다[11].

자료의 특성을 검토하기 위한 주요 분류 변수로는 지진규모(M), 최단 단층거리(R) 및 지반조건(V_{S30})를 적용하였다. 지진규모는 지진의 에너지 방출량을 나타내는 단위로서 절대적 크기를 의미한다. 최단 단층거리는 관측지점에서 지진이 발생한 단층면까지의 최단 거리로서 지진원과 관측지점 사이의 전파거리를 의미하며, 지표면 하부 30 m 지반의 평균 전단파속도인 V_{S30} 은 관측지점의 지반조건을

대표하는 지표이다. 분석 자료는 상기 분류 변수별로 각각 세 개의 구간으로 분류하여 구성하였으며, 단순히 전체 표본 수를 최대화하기보다는 특정 변수 구간에 자료가 과도하게 집중되어 전체의 분석 결과가 해당 구간의 특성에 편향되는 것을 방지하고자 하였다. 이에 따라 본 연구에서는 자료의 가용성과 구간별 분포의 균형을 고려하여 총 2,695개의 가속도 시간이력 파일을 분석에 활용하였다. 각 변수별 구간 및 자료의 분포는 표 1에 제시하였으며, 이와 같은 자료 구성을 통해 다양한 지진원 및 지반조건에서 산정된 감쇠보정계수의 전반적인 경향을 비롯하여, 지진규모, 거리 및 지반조건별 각각의 감쇠보정계수 변화 특성을 검토하였다.

수집된 자료에는 개별 관측기록의 방향성분이 포함되어 있다. 다만 본 연구의 목적은 지진동의 방향성에 따른 응답 차이를 평가하는 것이 아니라, 감쇠비 변화에 따라 나타나는 응답스펙트럼의 상대적 변화 특성을 정량적으로 분석하는 데 있기 때문에, 서로 다른 방향성분을 합성하거나 특정 방향성분을 선택하지 않고, 각 방향성분의 가속도 시간이력을 동일한 분석의 단위로 적용하였다. 따라서 각각의 가속도 시간이력 자료를 감쇠비별 응답스펙트럼 산정 및 특성 평가에 개별적으로 활용하였다.

표 1. 계측 지진 데이터 분류 및 개수

Table 1. Classification and count of recorded ground motions

Category	Range	Number of data	Ratio (%)
Earthquake magnitude (M)	$5.0 \leq M < 6.0$	927	34.4
	$6.0 \leq M < 7.0$	970	36.0
	$7.0 \leq M$	798	29.6
Distance to rupture (R , km)	$R < 50$	762	28.3
	$50 \leq R < 100$	866	32.1
	$100 \leq R$	1,067	39.6
Site condition (V_{S30} , m/s)	$V_{S30} < 360$	1,072	39.8
	$360 \leq V_{S30} < 760$	1,085	40.2
	$760 \leq V_{S30}$	538	20.0

2.2 응답스펙트럼 기반 감쇠보정계수

지반운동에 대한 구조물의 동적 응답은 질량, 강성 및 감쇠 특성에 따라 달라지며, 응답스펙트럼은 서로 다른 고유진동수와 감쇠비를 갖는 선형 단자

유도계의 최대 응답을 진동수의 함수로 나타낸 것이다. 본 연구에서는 수집된 2,695개의 가속도 시간이력 데이터를 입력 지반운동으로 사용하여 점성 감쇠를 갖는 단자유도 시스템의 선형 운동방정식으로부터 감쇠비별 절대가속도 응답스펙트럼을 산정하였다.

지반가속도 $\ddot{u}_g(t)$ 가 작용하는 선형 단자유도계의 운동방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

여기서 m , c 및 k 는 각각 단자유도계의 질량, 감쇠계수 및 강성을 나타내며, $u(t)$, $\dot{u}(t)$ 및 $\ddot{u}(t)$ 는 각각 지반에 대한 상대변위, 상대속도 및 상대가속도이다.

각 가속도 시간이력에 대한 단자유도계 응답은 Nigam-Jennings 방법을 이용하여 계산하였다. 이 방법은 입력 지반가속도를 각 시간 간격에서 선형 함수로 나타내고, 해당 구간에서 산출된 선형 운동방정식의 정확해(Exact solution)를 다음 시간 단계의 초기조건으로 사용함으로써 전체 시간이력에 대한 응답을 재귀적으로 계산하는 방법이다[12]. 이러한 접근법은 선형 단자유도계의 응답스펙트럼 계산에 널리 활용되고 있다.

응답스펙트럼은 0.1~100 Hz 범위에서 총 300개의 진동수에 대해 계산하였다. 감쇠비는 원전 구조물 및 기기 설계에서 적용될 수 있는 다양한 감쇠조건을 고려하여 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 7% 및 10%로 설정하였으며, 이에 따라 각 가속도 시간이력에 대해 총 7개의 감쇠비별 절대가속도 응답스펙트럼을 산정하였다. 다만, 0.5 Hz 미만의 극저진동수 구간은 강성이 큰 원전 구조물의 주요 관심 진동수 범위를 고려하여 후속 분석 및 결과 제시 범위에서 제외하였다. 따라서 본 연구에서는 0.5~100 Hz 범위의 응답스펙트럼을 바탕으로 감쇠보정계수의 특성을 분석하였다.

감쇠보정계수는 동일한 입력 지반운동으로부터 산정된 목표 감쇠비의 가속도 응답스펙트럼과 기준 감쇠비의 가속도 응답스펙트럼 간 비로 정의되는데, 일반적으로 대부분의 설계기준 및 지반운동 예측식

이 5% 감쇠비 응답스펙트럼을 기준으로 제시하고 있으므로, 기존 연구들과 마찬가지로 본 연구에서도 5% 감쇠비를 기준 감쇠비로 설정하였다[13]. 개별 가속도 시간이력에 대한 감쇠보정계수 $DCF(f, \xi)$ 는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$DCF(f, \xi) = \frac{S_a(f, \xi)}{S_a(f, 5\%)} \quad (2)$$

여기서 $S_a(f, \xi)$ 는 가속도 시간이력으로부터 산정한 진동수 f 및 감쇠비 ξ 에서의 가속도 응답스펙트럼이며, $S_a(f, 5\%)$ 는 동일한 진동수에서 산정한 5% 감쇠 가속도 응답스펙트럼이다.

일반적으로 목표 감쇠비가 5%보다 작은 경우에는 구조계의 에너지 소산이 감소하여 최대 응답이 증가하므로 감쇠보정계수는 1보다 크게 나타나고, 목표 감쇠비가 5%보다 큰 경우에는 감쇠 증가에 따라 최대 응답이 감소하여 감쇠보정계수는 1보다 작은 값을 갖는다.

수집된 전체 지진기록에 대한 평균 감쇠보정계수는 개별 가속도 시간이력에 대한 감쇠보정계수를 먼저 산정한 후, 동일한 진동수와 감쇠비 조건에서 산술 평균하여 계산하였다. 이와 같은 기록별 정규화 과정을 통해 지진동별 응답의 크기 차이가 평균 감쇠보정계수 산정에 미치는 영향을 줄이고, 감쇠비 변화에 따른 응답스펙트럼의 상대적인 변화 특성에 중점을 두어 분석하였다.

III. 감쇠보정계수 분석

3.1 감쇠비별 평균 감쇠보정계수

그림 1은 전체 2,695개의 가속도 시간이력으로부터 산정한 목표 감쇠비별 평균 감쇠보정계수를 나타낸다. 5% 감쇠비를 기준으로 목표 감쇠비가 5% 미만인 경우에는 평균 감쇠보정계수가 1보다 크게 나타난 반면, 5%를 초과하는 경우에는 1보다 작게 나타났다. 이를 통해 저감쇠 구조계에서는 응답이 증가하고, 고감쇠 구조계에서는 응답이 감소하는 기본적인 경향을 확인하였다.

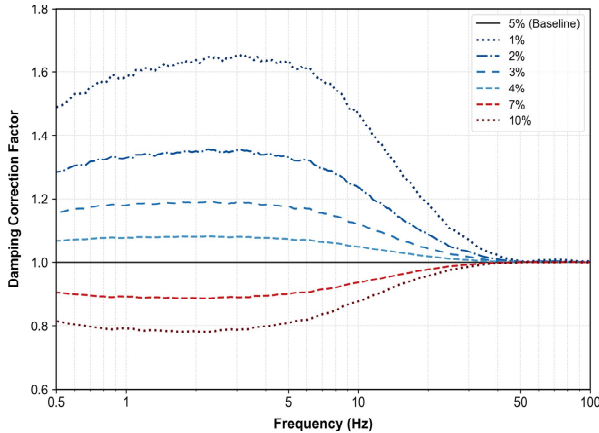


그림 1. 목표 감쇠비별 평균 감쇠보정계수

Fig. 1. Mean damping correction factors for target damping ratios

1% 감쇠비의 평균 감쇠보정계수는 0.5 Hz에서 약 1.5로 나타났으며, 1~5 Hz 구간에서 약 1.65까지 증가한 후 진동수가 증가함에 따라 감소하였다. 2%, 3% 및 4% 감쇠비에서도 이와 유사한 진동수 의존성이 관찰되었으나, 감쇠비가 5%에 가까워질수록 평균 감쇠보정계수의 차이는 점차 감소하였다.

반면 7% 감쇠비에서는 평균 감쇠보정계수가 대부분의 진동수 구간에서 약 0.9 수준의 값을 보였으며, 10% 감쇠비에서는 약 0.8 수준으로 나타났다. 이처럼 저감쇠 영역에서는 고감쇠 영역에 비해 인접한 감쇠비 곡선 간 차이가 상대적으로 크게 나타났으며, 이는 낮은 감쇠비를 갖는 구조체일수록 감쇠비에 따른 응답 민감도가 크다는 것을 의미한다.

진동수에 따른 평균 감쇠보정계수의 변화를 살펴보면, 중·저진동수 구간에서는 감쇠비별 차이가 뚜렷하게 나타났으나, 약 10 Hz 이후에는 모든 감쇠비에서 점차 1에 수렴하였다. 특히 약 50 Hz 이상의 고진동수 구간에서는 감쇠비에 따른 차이가 거의 나타나지 않았다. 고유진동수가 매우 높은 단자유도계에서는 가속도 응답이 입력 지반가속도에 가까워지고 감쇠비가 응답에 미치는 영향이 감소함에 따라 이와 같은 결과가 나타나는 것으로 판단된다.

표 2는 주요 진동수에서 산정한 감쇠보정계수의 전체 기록 간 표준편차를 나타낸다. 기준 감쇠비인 5%에서는 감쇠보정계수가 항상 1이므로 표준편차가 발생하지 않으며, 감쇠비별 변동성을 대표하여 1%, 2%, 7% 및 10% 감쇠비에 대한 결과를 제시하였다.

표 2. 감쇠보정계수 표준편차

Table 2. Standard deviations of damping correction factors

Frequency (Hz)	Damping ratio			
	1%	2%	7%	10%
0.5	0.280	0.157	0.049	0.093
1.0	0.297	0.160	0.046	0.081
2.5	0.310	0.164	0.045	0.078
5.0	0.313	0.168	0.048	0.086
10.0	0.343	0.180	0.052	0.097
20.0	0.267	0.135	0.038	0.070
33.0	0.119	0.060	0.016	0.030
50.0	0.018	0.008	0.002	0.004

1% 감쇠비의 표준편차는 0.5~10 Hz에서 0.280~0.343으로 나타났고, 2% 감쇠비의 표준편차는 같은 구간에서 0.157~0.180으로 나타났다. 반면 7% 및 10% 감쇠비의 표준편차는 0.5~10 Hz에서 각각 0.045~0.052 및 0.078~0.097로 나타났다. 이와 같이 저감쇠 영역의 표준편차가 고감쇠 영역에 비해 상대적으로 크게 나타났으며, 이는 저감쇠 구조체에서의 응답 증가 현상이 개별 지진동의 특성에 더욱 민감하다는 것을 의미한다.

모든 감쇠비에서 표준편차는 20 Hz 이후 급격히 감소하여, 50 Hz에서의 표준편차는 1%, 2%, 7% 및 10% 감쇠비에 대해 각각 0.018, 0.008, 0.002 및 0.004로 나타났다. 이러한 결과는 그림 1의 평균 감쇠보정계수가 50 Hz 이상의 구간에서 1에 수렴하는 경향과 연계하여 평균값뿐만 아니라 개별 기록 간 차이도 함께 감소함을 보여준다.

3.2 지진원 및 지반조건에 따른 감쇠보정계수

지진규모(M), 최단 단층거리(R) 및 지반조건(V_{S30})이 감쇠보정계수에 미치는 영향을 검토하기 위하여 각 변수를 세 구간별로 분류하고, 각 구간에 포함된 지진 데이터의 감쇠보정계수를 진동수별로 평균화하였다. 비교 결과는 기준 감쇠비인 5%보다 작은 저감쇠 영역과 큰 고감쇠 영역의 특성을 대표할 수 있도록 각각 2%와 7% 감쇠비에 대해 제시하였다.

그림 2는 지진규모를 $5.0 \leq M < 6.0$, $6.0 \leq M < 7.0$ 및 $7.0 \leq M$ 의 구간으로 구분하여 산정한 평균 감쇠보정계수를 나타낸다. 2% 감쇠비에서의 감쇠보정계

수는 중·저진동수 구간에서 약 1.3~1.4 수준을 유지하다가 진동수가 증가함에 따라 점차 감소하였다. 반면 7% 감쇠비에서는 약 0.9 수준에서 시작하여 고진동수 구간에서는 1에 수렴하는 경향을 보였다.

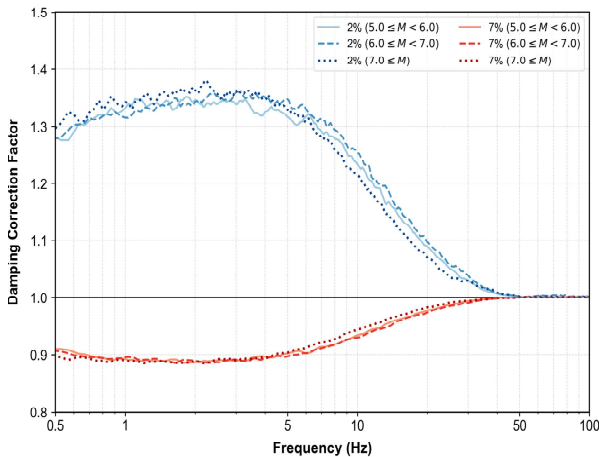


그림 2. 지진규모별 감쇠보정계수 비교
Fig. 2. Comparison of damping correction factors by earthquake magnitude

지진규모별 비교 곡선의 경우, 전반적으로 유사한 형상을 보였으며, 일부 진동수 구간에서 규모에 따른 미소한 차이가 나타났다. 그러나 규모가 증가함에 따라 감쇠보정계수가 일관되게 증가 또는 감소하는 경향은 확인되지 않았으며, 곡선 간 상대적인 크기 순서도 진동수에 따라 달라졌다. 또한 고진동수 영역으로 갈수록 규모 구간 간 차이가 감소하였다.

그림 3은 관측지점에서 지진이 발생한 단층면까지의 최단 거리(R)를 기준으로 50 km 미만, 50 km 이상 100 km 미만 및 100 km 이상으로 구분하여 비교한 결과이다. 2%와 7% 감쇠비 모두 낮은 진동수에서는 구간별 곡선이 대체로 유사하게 나타났으며, 약 5~30 Hz 구간에서는 100 km 이상의 원거리 기록의 감쇠보정계수가 상대적으로 크게 관찰되었다. 그러나 거리 증가에 따른 감쇠보정계수의 변화 방향은 전체 진동수 구간에서 일정하지 않았고, 진동수 구간에 따라 곡선의 상대적 순서가 바뀌는 것으로 나타났다. 반면 50 Hz 부근에서는 지진규모별 감쇠보정계수 그림과 동일하게 모든 구간의 감쇠보정계수가 1에 근접하였다.

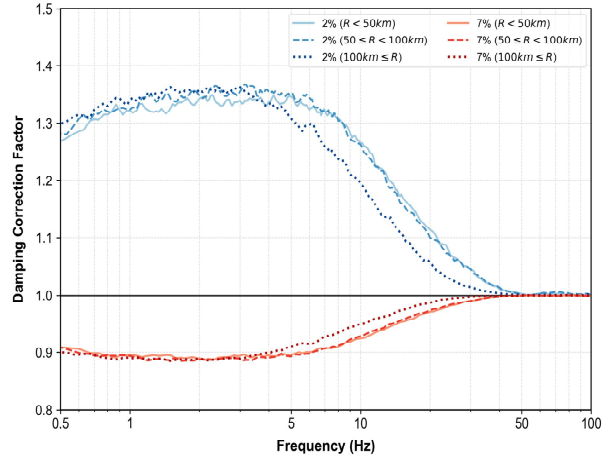


그림 3. 최단 단층거리별 감쇠보정계수 비교
Fig. 3. Comparison of damping correction factors by closest distance to rupture

그림 4는 지표면 하부 30 m 지반의 평균 전단파 속도(V_{S30})를 360 m/s 미만, 360 m/s 이상 760 m/s 미만 및 760 m/s 이상으로 구분하여 산정한 결과이다. 지반조건별 비교 곡선도 앞서 나타난 지진규모별, 최단 단층거리별 비교 곡선들과 전체적으로 비슷한 경향을 보였다. 특정 진동수 구간에서는 지반조건에 따라 감쇠보정계수에 일부 차이가 나타났으나, 일관된 경향이라기보다는 감쇠비 및 진동수와 결합하여 나타나는 것으로 판단된다.

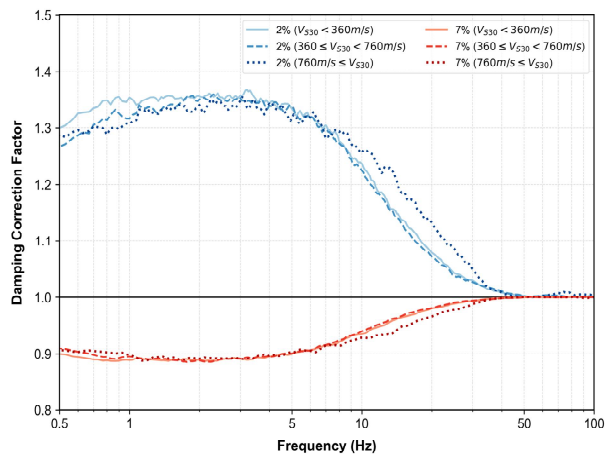


그림 4. 지반조건별 감쇠보정계수 비교
Fig. 4. Comparison of damping correction factors by site condition

그림 2~4를 종합하면 지진규모, 최단 단층거리 및 지반조건에 따라 감쇠보정계수에 일부 차이가

발생하지만, 그 영향은 진동수에 따라 달라지며 전체 진동수 구간에서 일관된 경향을 나타내지는 않았다. 반면 감쇠비와 진동수에 따른 변화는 모든 분류 조건에서 공통적이고 명확하게 나타났다.

이에 따라 본 연구에서는 지진원 및 지반조건 관련 변수를 모두 독립변수로 포함하여 감쇠보정계수식을 복잡하게 구성하기보다, 감쇠보정계수의 지배적인 변화 특성을 나타내는 감쇠비와 진동수를 주요 변수로 설정하였다. 다만 이러한 변수 설정이 지진규모, 최단 단층거리 및 지반조건의 영향을 완전히 배제한다는 것을 의미하지는 않는다. 본 연구에서 제안하고 있는 감쇠보정계수 식은 다양한 지진규모, 최단 단층거리 및 지반조건을 포함하는 전체 지진기록을 바탕으로 도출되었으므로, 이들 변수에 따른 평균적인 영향과 기록 간 변동성이 통계적으로 반영되어 있다고 볼 수 있다.

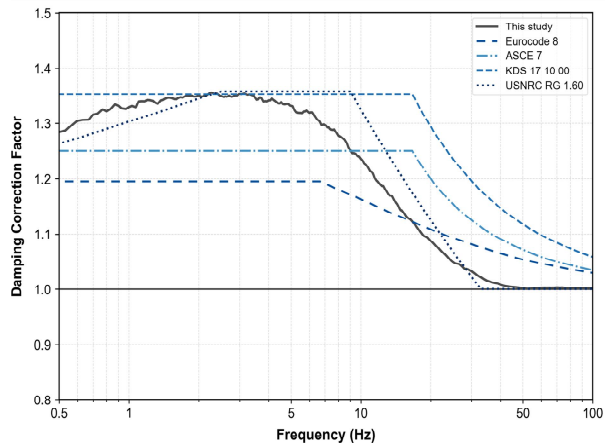
결정적으로 실무에서는 지진원 및 지반조건에 관한 상세 정보를 확보하기 어려운 경우가 많으므로, 지진기록과 관련한 추가 입력자료에 대한 의존성을 낮추는 것이 적용의 용이성 측면에서 유리하다. 이는 다양한 지진 및 부지조건을 고려한 대표적인 감쇠보정계수 식을 제시하여 실무적 범용성과 활용성을 높이려 하는 본 연구의 목적과도 부합한다.

3.3 기존 설계기준과의 비교

본 연구에서 산정한 평균 감쇠보정계수의 특성을 평가하기 위하여 국내외 설계기준인 Eurocode 8, ASCE 7, KDS 17 10 00 및 USNRC RG 1.60과 비교하였다. Eurocode 8, ASCE 7 및 KDS 17 10 00은 각각 유럽, 미국 및 국내에서 각종 건축물 및 시설물의 내진설계에 적용되는 설계기준이며[14]-[16], USNRC RG 1.60은 미국 원자력규제위원회(USNRC)에서 제시한 원전 내진설계용 규제지침이다[17].

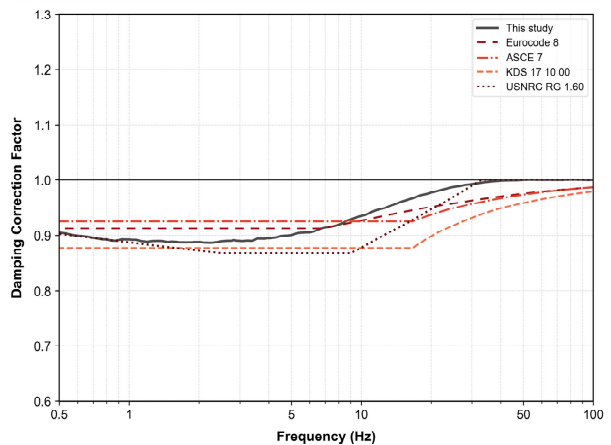
상기의 기준들은 실제 내진설계 실무에서 널리 활용되고 있으며, 감쇠보정계수의 적용 과정에서 상세한 지진 시나리오 정보가 별도의 입력변수로 요구되지 않는다는 공통점이 있다. 반면, 최근의 연구로 제안된 다양한 예측모델들은 개별 지진에 대한 세부자료가 필요하거나 모델별로 입력변수와 적용조건이 상이하기 때문에 본 연구의 지진기록 기반

평균값과 동일한 조건에서 직접적인 비교를 하기에는 어려움이 있다. 이에 본 연구에서는 기존 설계기준과의 비교에 중점을 두었으며, 저감쇠 및 고감쇠 영역을 대표하도록 각각 2%와 7% 감쇠비에 대해 비교 결과를 제시하였다. 그림 5는 본 연구의 평균 감쇠보정계수와 기존 설계기준에 따른 감쇠보정계수의 비교 결과를 보여준다.



(a) 감쇠비 : 2%

(a) Damping ratio : 2%



(b) 감쇠비 : 7%

(b) Damping ratio : 7%

그림 5. 평균 감쇠보정계수와 기존 설계기준의 비교
Fig. 5. Comparison of mean damping correction factors with existing design standards

비교 결과, 모든 기준의 2% 감쇠비에서 감쇠보정계수가 1보다 크고, 7% 감쇠비에서 1보다 작게 나타나 감쇠비 변화에 따른 기본적인 응답의 증가 및 감소 경향은 본 연구의 결과와 일치하였다. 그러나 감쇠보정계수의 크기와 고진동수에서 1로 수렴하는 과정에서 기준별 차이가 나타났다.

2% 감쇠비의 경우 Eurocode 8과 ASCE 7은 낮은 진동수에서 본 연구의 평균값보다 다소 작게 나타났으나, 진동수가 증가하면서 상대적인 크기가 역전되었다. KDS 17 10 00은 저진동수에서 본 연구 결과와 비교적 유사하였지만, 약 10 Hz 이후에는 평균값보다 크게 나타났다. USNRC RG 1.60은 일부 진동수 구간에서 차이가 관찰되었으나, 전반적인 곡선 형상은 비교 기준 중 본 연구 결과와 상대적으로 유사하였다. 7% 감쇠비에서는 2% 감쇠비에 비해 기준 간 차이가 전반적으로 작게 나타났지만, 2% 감쇠비의 비교 결과와 대체로 유사한 경향을 나타냈다.

그림 5에서 나타난 기준별 차이를 정량적으로 비교하기 위하여 주요 진동수에서의 상대오차를 표 3에 제시하였다. 2% 감쇠비에서 Eurocode 8, ASCE 7, KDS 17 10 00 및 USNRC RG 1.60의 절대 상대오차의 최댓값은 각각 11.4%, 10.4%, 19.1% 및 7.2%로 나타났다. 특히 KDS 17 10 00의 경우, 평균 감쇠보정계수가 감소하는 10~33 Hz 구간에서 상대적으로 큰 차이를 보였다. 반면 7% 감쇠비에서는 각 기준의 절대 상대오차 최댓값이 각각 2.8%, 3.7%, 7.3% 및 4.6%로 나타나, 2% 감쇠비에 비해 전반적으로 작은 수준을 보였다.

표 3. 평균 감쇠보정계수와 기존 설계기준의 상대오차
Table 3. Relative errors of existing design standards compared to mean damping correction factors

Damping ratio (%)	Freq. (Hz)	Relative errors (%)			
		Eurocode 8	ASCE 7	KDS 17	RG 1.60
2	0.5	-7.0	-2.7	5.3	-1.7
	1.0	-10.1	-6.0	1.8	-2.0
	2.5	-11.4	-7.4	0.3	0.7
	5.0	-10.2	-6.1	1.6	2.0
	10.0	-5.9	1.1	9.5	7.2
	20.0	2.0	10.4	19.1	3.5
	33.0	5.3	8.9	15.4	-2.1
	50.0	5.3	7.0	11.6	-0.1
7	0.5	0.6	1.7	-2.1	-0.2
	1.0	1.5	2.5	-1.1	-0.4
	2.5	1.7	2.7	-0.9	-1.6
	5.0	0.9	1.9	-1.7	-2.4
	10.0	-0.6	-0.8	-4.6	-4.6
	20.0	-2.4	-3.7	-7.3	-2.8
	33.0	-2.8	-3.3	-5.5	0.5
	50.0	-2.4	-2.6	-4.0	0.0

본 비교 결과는 기존 설계기준이 감쇠비에 따른 응답의 기본적인 증감 특성은 적절히 나타내지만, 보정계수의 크기와 진동수에 따른 감쇠보정계수의 변화 양상에서는 지진기록 기반의 평균값과 일부 차이가 있음을 보여준다. 특히 감쇠보정계수를 감쇠비만의 함수로 단순화하기보다 진동수 의존성을 함께 고려할 필요가 있다는 것을 확인하였다. 다만 본 비교는 기존 설계기준의 안전성이나 적용성을 평가하기 위한 것이 아니라, 각 기준에서 제시하는 감쇠보정계수와 지진기록 기반 평균값의 차이를 파악하기 위함이다. 이러한 비교 결과를 바탕으로 다음 절에서 감쇠비와 진동수를 주요 변수로 하는 연속적인 감쇠보정계수 식을 제안하였다.

IV. 감쇠보정계수 제안식

4.1 제안식의 기본 조건 및 함수 형태

계측 지진 데이터의 분석 결과, 감쇠보정계수는 감쇠비와 진동수에 따라 일정한 변화 특성을 나타냈다. 본 연구에서는 이러한 특성을 하나의 함수로 표현하고, 향후 머신러닝 기반 다중 감쇠비 응답스펙트럼 예측모델의 기초 특성으로 활용하기 위한 감쇠보정계수 제안식을 도출하였다.

제안식은 지진기록으로부터 확인된 감쇠비 및 진동수의 의존성을 재현하는 동시에, 물리적 특성을 반영하도록 구성하였다. 기존 감쇠비인 5%에서는 목표 응답스펙트럼과 기존 응답스펙트럼이 동일하므로 감쇠보정계수는 모든 진동수에서 1이 되어야 한다. 또한 진동수가 증가함에 따라 감쇠비에 따른 응답의 차이가 감소하므로, 고진동수 영역에서는 감쇠보정계수가 1에 수렴하여야 한다. 목표 감쇠비가 5%보다 작은 경우에는 응답이 증가하므로 감쇠보정계수가 1보다 크고, 5%보다 큰 경우에는 1보다 작아야 한다. 마지막으로 진동수 변화에 따라 불연속적이거나 급격하게 변하지 않고, 전체 진동수 구간에서 연속적으로 변화해야 한다.

이상의 조건을 반영하여 감쇠비 의존 항과 진동수 의존 항을 곱 형태로 나타낸 감쇠보정계수 식을 다음의 식 (3)과 같이 제안한다. 감쇠비 의존 항은

Eurocode8 과 KDS 17 10 00 등 기존의 설계기준에서 제시하고 있는 감쇠비 보정 함수형을 일반화한 형태이며, 진동수 의존 항은 고진동수 영역에서의 점진적 수렴성을 나타내기 위해 Hill-type decay 함수형의 전이함수 형태를 적용하였다.

$$DCF_{\xi}(f)=1+\left[\left(\frac{\alpha+5}{\alpha+\xi}\right)^{\beta}-1\right]\frac{1}{1+\left(\frac{f}{f_c}\right)^p} \quad (3)$$

여기서 $DCF_{\xi}(f)$ 는 진동수 f 에서의 목표 감쇠비 ξ 에 대한 감쇠보정계수이며, f 의 단위는 Hz, 감쇠비는 백분을 단위로 입력한다. 예를 들어 5%의 감쇠비는 $\xi=5$ 로 적용한다. α , β , f_c 및 p 는 지진기록 기반 평균 감쇠보정계수에 대한 회귀분석을 통해 결정되는 계수이다.

제안식에서 식 (4)와 같은 감쇠비 의존 항은 감쇠비에 따른 감쇠보정계수의 크기를 결정한다.

$$\left(\frac{\alpha+5}{\alpha+\xi}\right)^{\beta} \quad (4)$$

목표 감쇠비가 5%인 경우 이 항은 1이 되므로, 진동수와 관계없이 감쇠보정계수는 1이 된다. 또한, α 와 β 를 양수로 제한함으로써 5% 미만의 감쇠비에서는 감쇠보정계수가 1보다 크고, 5%를 초과하는 경우에는 1보다 작아지는 조건을 만족하도록 하였다.

제안식에서 식 (5)와 같은 진동수 의존 항은 감쇠비에 따른 응답 차이가 고진동수에서 감소하는 특성을 반영한다.

$$\frac{1}{1+\left(\frac{f}{f_c}\right)^p} \quad (5)$$

진동수가 증가하면 이 항은 0으로 수렴하므로 목표 감쇠비와 관계없이 감쇠보정계수는 점차 1에 가까워진다. 여기서 f_c 는 감쇠비 영향이 감소하는 천이 진동수로서 고진동수 수렴 과정의 중심을 나타내는 특성값이며, p 는 곡선의 기울기와 수렴 속도를 결정한다.

4.2 회귀계수 산정 및 적합도 평가

본 연구에서 제안한 감쇠보정계수 식의 회귀계수는 비선형 최소제곱 회귀분석 방법을 적용하여 지진 데이터로부터 산정한 감쇠비별 평균 감쇠보정계수와 제안식의 계산값 사이의 제곱오차합이 최소화 되도록 결정하였다. 또한 제안식의 수학적 안정성을 유지하기 위해 회귀계수의 양수 제약조건을 부여하였으며, 목적함수는 감쇠비 및 진동수 전 구간에 대한 절대잔차의 제곱합으로 정의하였다.

회귀분석은 1%, 2%, 3%, 4%, 7% 및 10% 감쇠비의 전체 진동수 자료를 대상으로 수행하였고, 기준 감쇠비인 5%에서는 감쇠보정계수가 모든 진동수에서 1이 되므로 회귀분석 및 오차평가 대상에서 제외하였다. 산정된 회귀계수는 표 4와 같다.

표 4. 제안식의 회귀계수

Table 4. Regression coefficients of proposed equation

Parameter	α	β	f_c (Hz)	p
Regression coefficient	0.27	0.35	13.85	3.02

표 4의 회귀계수를 적용한 최종 제안식은 식 (6)과 같다.

$$DCF_{\xi}(f)=1+\left[\left(\frac{0.27+5}{0.27+\xi}\right)^{0.35}-1\right]\frac{1}{1+\left(\frac{f}{13.85}\right)^{3.02}} \quad (6)$$

그림 6은 계측 지진 데이터에서 산정한 감쇠비별 평균 감쇠보정계수와 제안식의 계산 결과를 비교하여 나타낸다. 비교 결과로부터 제안식이 감쇠비와 진동수에 따른 감쇠보정계수의 변화 경향을 적절히 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

특히 3%, 4% 및 7% 감쇠비에서는 평균값과 제안식이 대부분의 진동수 구간에서 거의 일치하였다. 2%와 10% 감쇠비에서도 전체적인 곡선 형상은 잘 재현되었으나, 2% 감쇠비의 경우 저진동수 영역에서, 10% 감쇠비의 경우 중간진동수 영역에서 일부 차이가 발생했다.

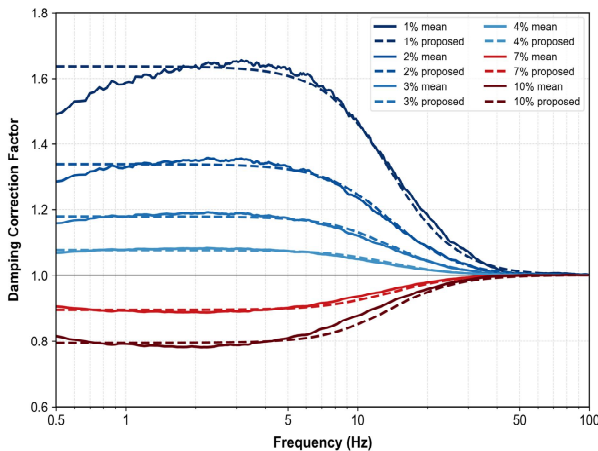


그림 6. 감쇠비별 평균 감쇠보정계수와 제안식의 비교
Fig. 6. Comparison of mean damping correction factors with proposed equation by damping ratios

다만, 1% 감쇠비에서는 약 0.5~2 Hz의 저진동수 영역에서 평균값과 제안식 사이의 차이가 다른 감쇠비에 비해 크게 나타났다. 이는 하나의 연속적인 함수로 전체 감쇠비와 진동수 범위를 모두 표현하는 과정에서 저감쇠 영역의 높은 응답 민감도를 충분히 재현하지 못한 결과로 판단된다.

제안식의 전체적인 적합도는 결정계수(R^2)와 평균제곱근오차(RMSE, Root Mean Square Error)를 이용하여 평가하였고, 구체적인 감쇠비별 성능은 감쇠비별 평균제곱근오차, 평균편향(Mean bias) 및 최대 상대오차를 산정하여 확인하였다. 결정계수는 제안식이 실제 데이터의 변동성을 얼마나 잘 설명하는지 나타내는 지표이고, 평균제곱근오차는 추정값과 실제값 간의 평균적인 오차의 크기를 나타낸다. 또한 평균편향을 통해 추정값들이 전반적으로 실제값보다 높거나 낮게 치우쳐 있는지에 대한 경향 파악이 가능하다.

표 5에 나타난 바와 같이 전체 자료에 대한 결정계수는 0.9964로, 제안식이 평균 감쇠보정계수의 변동성을 높은 수준으로 설명하는 것으로 나타났으며, 평균제곱근오차는 0.0129로 산정되어 제안식과 평균 감쇠보정계수 사이의 차이가 전반적으로 작은 것으로 평가되었다.

감쇠비별 평균제곱근오차는 4%에서 0.0032로 가장 작았으며, 2%, 3%, 7% 및 10% 감쇠비에서 모두 전체 자료의 평균제곱근오차와 유사하거나 그보다 작은 수준으로 낮게 나타났다. 반면 1% 감쇠비에서

는 0.0252로 가장 크게 나타났으며, 최대 상대오차도 9.8%로 산정되었다. 이는 그림 6에서도 확인되는 저진동수 영역에서의 평균값과 제안식 사이의 차이에 기인한다.

평균편향은 모든 감쇠비에서 0.0003~0.0044의 범위로 매우 작게 나타나며, 일부 진동수에서 차이가 발생하더라도 전체 진동수 범위에서 지진기록의 감쇠보정 특성을 전반적으로 편향 없이 재현하는 것으로 확인되었다.

표 5. 제안식의 오차 평가 결과

Table 5. Error indices of proposed equation

Error index (Overall)			
R^2		RMSE	
0.9964		0.0129	
Error index (by damping ratio)			
Damping ratio (%)	RMSE	Mean bias	Max. relative error (%)
1	0.0252	-0.0013	9.8
2	0.0107	-0.0006	4.2
3	0.0066	0.0001	1.9
4	0.0032	0.0003	0.8
7	0.0058	-0.0014	-1.3
10	0.0129	-0.0044	-3.2

이상의 결과로부터 제안식은 저감쇠 영역의 일부 저진동수 구간에서 국부적인 오차를 보였지만, 제한된 수의 회귀계수와 하나의 통합된 함수식으로 1~10% 감쇠비 범위에서 평균 감쇠보정계수의 전반적인 변화와 고진동수 수렴 특성을 적절하게 재현하는 것으로 평가되었다. 또한 고진동수 수렴 특성 등의 물리적 조건을 만족하면서도 전체적인 오차와 평균편향이 작게 나타나며, 특정 감쇠비나 진동수 구간에 치우치지 않고 지진 데이터의 평균적인 감쇠비 의존 특성을 효과적으로 표현하였다.

다만 이러한 결과는 전체 지진 데이터를 이용하여 산정된 평균 감쇠보정계수에 대한 회귀 적합도를 나타낸 것으로서, 제안식이 회귀계수 산정에 사용되지 않은 지진기록에 대해서도 유사한 재현성을 나타내는지 추가로 확인할 필요가 있다. 이에 다음 절에서는 지진기록 및 지진 이벤트 단위의 학습자료와 시험자료 분할을 반복적으로 수행하여 제안식의 안정성을 검증하였다.

4.3 제안식의 안정성 검증

본 연구에서는 표본 변화에 따른 제안식 함수 형태 및 회귀절차의 안정성을 검토하기 위해 몬테카를로 교차검증(Monte Carlo cross-validation)의 일종인 반복 홀드아웃 검증(Repeated holdout validation)을 수행하였다. 먼저 전체 2,695개 지진 데이터를 각 반복에서 학습 데이터 70%와 시험 데이터 30%로 무작위 분할하는 지진기록 단위(Record-level) 반복 홀드아웃 검증을 수행하였다.

또한 동일 지진 이벤트의 여러 관측소 기록이 학습자료와 시험자료에 동시에 포함될 경우 검증 결과가 과대평가될 수 있으므로, 지진명, 발생연도 및 규모를 기준으로 동일 지진 이벤트를 그룹화한 지진 이벤트 단위(Event-level) 반복 홀드아웃 검증을 추가로 수행하였다. 지진 이벤트 단위 검증에서도 각 반복마다 지진 이벤트를 70:30으로 무작위 분할하였으며, 동일 이벤트에 속한 모든 기록은 학습자료 또는 시험자료 중 하나에만 포함되도록 하였다.

각 반복 분할에서는 학습 데이터에 포함된 기록만을 이용하여 제안식의 회귀계수를 새롭게 산정하였다. 이후 산정된 회귀계수를 시험 데이터에 적용하여 감쇠보정계수를 예측하고, 예측값과 시험 데이터 기반의 평균 감쇠보정계수를 비교하였다. 이러한 과정을 총 50회 반복하였으며, 검증의 결과는 결정계수, 평균제곱근오차 및 평균편향을 이용하여 평가하였다. 50회 반복 결과의 평균과 표준편차는 표 6과 같다.

표 6. 제안식의 안정성 검증 결과

Table 6. Stability validation results of the proposed equation

Validation case		R^2	RMSE	Mean bias
Record-level	Train	0.9964 ± 0.0001	0.0130 ± 0.0002	-0.0012 ± 0.0000
	Test	0.9959 ± 0.0004	0.0138 ± 0.0006	-0.0013 ± 0.0010
Event-level	Train	0.9961 ± 0.0003	0.0144 ± 0.0005	-0.0015 ± 0.0001
	Test	0.9926 ± 0.0034	0.0196 ± 0.0044	-0.0023 ± 0.0045

지진기록 단위 검증 결과, 시험 데이터의 평균 결정계수 및 평균제곱근오차는 각각 0.9959 및 0.0138로 나타나며, 학습 데이터의 평균 결정계수 0.9964 및 평균제곱근오차 0.0130과 유사한 수준을 보였다. 평균편향 역시 학습 데이터와 시험 데이터에서 각각 -0.0012와 -0.0013으로 작게 나타나며 제안식이 학습 데이터에만 과도하게 적합되지 않음을 확인하였다. 지진 이벤트 단위 검증에서는 시험 데이터의 평균제곱근오차가 0.0196으로 증가하였으나, 평균 결정계수는 0.9926으로 높은 수준을 유지하였고 평균편향도 -0.0023으로 작게 나타났다. 따라서 이벤트 단위 독립성을 고려할 경우 오차가 다소 증가하지만, 제안식이 전체 지진기록의 평균 감쇠보정계수 특성을 안정적으로 재현하는 것으로 판단된다.

제안식의 전체 평균 오차지표만으로는 감쇠비 및 진동수 구간에 따른 오차 특성을 확인하기 어렵기 때문에, 보다 엄격한 검증 조건인 지진 이벤트 단위 반복 홀드아웃 검증의 시험 데이터를 기준으로 감쇠비 및 진동수 구간별 평균제곱근오차를 추가로 산정하였다. 진동수 구간은 본 연구의 분석 범위와 고진동수 수렴 특성을 고려하여 0.5~2.5 Hz, 2.5~10 Hz, 10~33 Hz 및 33~50 Hz로 구분하였으며, 그 결과를 표 7에 제시하였다.

표 7. 지진 이벤트 단위 검증의 감쇠비 및 진동수 구간별 평균제곱근오차

Table 7. RMSE by damping ratio and frequency range in event-level validation

Damping ratio (%)	Frequency range (Hz)			
	0.5-2.5	2.5-10.0	10.0-33.0	33.0-50.0
1	0.0535 ± 0.0102	0.0303 ± 0.0154	0.0338 ± 0.0238	0.0098 ± 0.0031
2	0.0199 ± 0.0033	0.0169 ± 0.0065	0.0164 ± 0.0104	0.0056 ± 0.0018
3	0.0102 ± 0.0023	0.0097 ± 0.0029	0.0096 ± 0.0055	0.0032 ± 0.0011
4	0.0045 ± 0.0010	0.0044 ± 0.0011	0.0045 ± 0.0024	0.0014 ± 0.0005
7	0.0065 ± 0.0014	0.0068 ± 0.0021	0.0077 ± 0.0039	0.0021 ± 0.0007
10	0.0124 ± 0.0025	0.0144 ± 0.0054	0.0170 ± 0.0084	0.0043 ± 0.0014

표 7의 결과, 저감쇠비인 1% 감쇠비에서 상대적으로 큰 평균제공근오차가 나타났으며, 이는 저감쇠비 영역에서 기록 간 변동성이 크게 나타나는 특성과 관련된 것으로 판단된다. 반면 33~50 Hz의 고진동수 영역에서는 제안식의 고진동수 수렴 조건이 적절히 반영된 것으로 확인되었다. 따라서 제안식은 저감쇠비 및 일부 진동수 구간에서 상대적으로 큰 오차를 보일 수 있으나, 전체적으로는 본 연구에서 확인된 감쇠비 및 진동수 의존 특성을 합리적으로 표현하는 것으로 평가된다.

다만 본 검증은 동일 데이터셋 내 단위 분할에 기반한 내부 검증에 해당한다. 따라서 본 연구의 데이터셋과 지진원 및 지반조건의 분포가 현저히 다른 별도의 지진 자료에 대한 외부 적용성까지 직접적으로 검증한 것은 아니다. 이러한 데이터셋 외부의 적용성은 향후 독립적인 지진기록의 확보 및 적용 목적에 따라 추가로 검토될 수 있다.

이상의 반복 홀드아웃 검증 결과, 제안식은 학습에 사용되지 않은 지진기록 및 이벤트에 대해서도 높은 결정계수와 낮은 예측오차를 유지하였으며, 반복적인 자료 분할에 따른 성능 변동도 작은 것으로 나타났다. 이는 제안식이 특정 기록에 의존하지 않으며, 표본 구성의 변화에도 안정적임을 의미한다. 따라서 본 제안식은 5% 감쇠 응답스펙트럼으로부터 1~10% 범위의 다중 감쇠비 응답스펙트럼을 추정하기 위한 실용적인 감쇠보정식으로 활용될 수 있다. 또한 지진기록에서 관찰된 감쇠비 및 진동수 의존 특성을 정량적으로 표현하므로, 향후 물리정보 머신러닝 모델의 기준 예측식 또는 물리제약 조건을 구성하기 위한 기반을 제공한다.

V. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 5% 감쇠 응답스펙트럼으로부터 다중 감쇠비 응답스펙트럼을 추정하기 위한 지진기록 기반 감쇠보정계수를 제안하였다. 이를 위해 2,695개의 가속도 시간이력 데이터로부터 감쇠비별 응답스펙트럼을 산정하고, 감쇠비와 진동수에 따른 감쇠보정계수의 변화 양상을 분석하였다. 아울러 지진규모, 최단 단층거리 및 지반조건의 영향을 검토

하고, 국내외 설계기준과 비교하였다.

분석 결과, 감쇠보정계수는 지진원 및 지반조건에 따라 일부 차이가 나타났으나, 전체 진동수 범위에서 공통적으로 적용할 수 있는 일정한 증감 관계는 확인되지 않았다. 반면 감쇠비와 진동수에 따른 변화는 자료의 분류 조건과 관계없이 일관되게 나타났다. 이에 따라, 상세 지진정보에 대한 의존성을 낮추고 실무 적용성을 높이기 위해 감쇠비와 진동수를 제안식의 주요 변수로 선정하였다.

제안식은 감쇠비에 따른 응답의 증감, 고진동수 수렴 및 진동수에 대한 연속성 등 응답스펙트럼의 물리적 거동을 반영하였다. 회귀계수는 지진기록 기반 평균 감쇠보정계수와 제안식 산정값의 차이가 최소가 되도록 비선형 최소제곱 회귀분석을 통해 산정하였으며, 적합도 및 오차 평가를 통해 전체 자료에서 나타난 변화 특성을 높은 수준으로 재현함을 확인하였다. 또한 반복 홀드아웃 검증 수행 결과, 학습에 사용되지 않은 시험 데이터에서도 높은 결정계수와 낮은 예측오차를 유지하였으며, 평균편향도 작게 나타나며 표본 구성 변화에도 안정적인 회귀 특성을 보였다.

본 연구는 대규모 계측 지진 자료를 바탕으로 응답스펙트럼의 감쇠비 및 진동수 의존성을 정량화하고, 이를 물리적 조건이 반영된 감쇠보정 식으로 제시하였다는 데 의의가 있다. 특히 감쇠비 중심의 기존 보정방식과는 달리 진동수별 변화와 고진동수 수렴 특성을 포함하면서도, 지진의 정보나 상세 내진해석 자료 없이 적용이 가능하도록 구성하였다. 따라서, 본 제안식은 5% 감쇠 응답스펙트럼으로부터 다양한 감쇠비의 응답스펙트럼을 보다 간편하고 합리적으로 산정할 수 있는 실용적인 감쇠보정계수 식으로 활용될 수 있다.

향후에는 본 연구에서 도출한 응답스펙트럼의 감쇠비 및 진동수 의존 특성을 원전 구조물의 층응답스펙트럼으로 확장하고자 한다. 본 연구 결과를 구조물의 동적 특성과 응답 특성을 반영한 물리정보 머신러닝 기반 다중 감쇠비 층응답스펙트럼 예측모델의 사전식 또는 물리제약의 기초자료로 활용하여 모델의 예측 안정성과 물리적 일관성을 향상시킬 예정이다.

References

- [1] A. K. Chopra, "Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering", 5th ed., Protec Media, pp. 226-235, Apr. 2018.
- [2] M. A. Biot, "Theory of Elastic Systems Vibrating under Transient Impulse with an Application to Earthquake-Proof Buildings", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 19, No. 2, pp. 262-268, Feb. 1933. <https://doi.org/10.1073/pnas.19.2.262>.
- [3] G. W. Housner, "Calculating the Response of an Oscillator to Arbitrary Ground Motion", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 31, No. 2, pp. 143-149, Apr. 1941. <https://doi.org/10.1785/BSSA0310020143>.
- [4] M. A. Biot, "A Mechanical Analyzer for the Prediction of Earthquake Stresses", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 31, No. 2, pp. 151-171, Apr. 1941. <https://doi.org/10.1785/BSSA0310020151>.
- [5] N. M. Newmark and W. J. Hall, "Earthquake Spectra and Design", *Earthquake Engineering Research Institute*, pp. 29-48, Mar. 1982.
- [6] J. J. Bommer and R. Mendis, "Scaling of Spectral Displacement Ordinates with Damping Ratios", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 34, No. 2, pp. 145-165, Feb. 2005. <https://doi.org/10.1002/eqe.414>.
- [7] P. J. Stafford, R. Mendis, and J. J. Bommer, "Dependence of Damping Correction Factors for Response Spectra on Duration and Numbers of Cycles", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 134, No. 8, pp. 1364-1373, Aug. 2008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:8\(1364\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:8(1364)).
- [8] S. Rezaeian, Y. Bozorgnia, I. M. Idriss, N. Abrahamson, K. Campbell, and W. J. Silva, "Damping Scaling Factors for Elastic Response Spectra for Shallow Crustal Earthquakes in Active Tectonic Regions: "Average" Horizontal Component", *Earthquake Spectra*, Vol. 30, No. 2, pp. 939-963, May 2014. <https://doi.org/10.1193/100512EQS298M>.
- [9] J. X. Zhao, Q. Yang, K. Su, J. Liang, J. Zhou, H. Zhang, and X. Yang, "Effects of Earthquake Source, Path, and Site Conditions on Damping Modification Factor for the Response Spectrum of the Horizontal Component from Subduction Earthquakes", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 109, No. 6, pp. 2594-2613, Dec. 2019. <https://doi.org/10.1785/0120190105>.
- [10] S. Rezaeian, L. A. Atik, N. M. Kuehn, N. Abrahamson, Y. Bozorgnia, S. Mazzoni, K. Withers, and K. Campbell, "Spectral Damping Scaling Factors for Horizontal Components of Ground Motions from Subduction Earthquakes using NGA-Subduction data", *Earthquake Spectra*, Vol. 37, No. 4, pp. 2453-2492, Nov. 2021. <https://doi.org/10.1177/87552930211027903>.
- [11] T. D. Ancheta, R. B. Darragh, J. P. Stewart, E. Seyhan, W. J. Silva, B. S.-J. Chiou, K. E. Wooddell, R. W. Graves, A. R. Kottke, D. M. Boore, T. Kishida, and J. L. Donahue, "NGA-West2 Database", *Earthquake Spectra*, Vol. 30, No. 3, pp. 989-1005, Aug. 2014. <https://doi.org/10.1193/070913EQS197M>.
- [12] N. C. Nigam and P. C. Jennings, "Calculation of Response Spectra from Strong-Motion Earthquake Records", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 59, No. 2, pp. 909-922, Apr. 1969. <https://doi.org/10.1785/BSSA0590020909>.
- [13] S. Akkar, M. A. Sandikkaya, and B. Ö. Ay, "Compatible ground-motion prediction equations for damping scaling factors and vertical-to- horizontal spectral amplitude ratios for the broader Europe region", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 12, pp. 517-547, Jan. 2014. <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9537-1>.
- [14] European Committee for Standardization (CEN),

"Eurocode 8: Design of Structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings", BS EN 1998-1:2004, pp. 36-40, Apr. 2005.

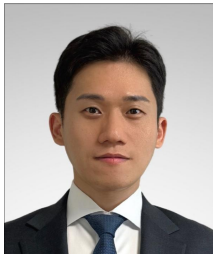
[15] American Society of Civil Engineers (ASCE), "Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures", ASCE/SEI 7-22, pp. 211-217, Dec. 2021. <https://doi.org/10.1061/9780784415788>.

[16] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "General Seismic Design", KDS 17 10 00, pp. 10-13, May 2024.

[17] U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants", Regulatory Guide 1.60, pp. 5-7, Jul. 2014.

저자소개

차 민 혁 (Minhyuck Cha)



2008년 2월 : 고려대학교
사회환경시스템공학과(학사)
2025년 3월 ~ 현재 :
국립금오공과대학교
디지털융합공학과 박사과정
2013년 7월 ~ 현재 :
한국전력기술(주) 차장

관심분야 : 원전 내진설계, 머신러닝

김 성 렬 (Sungryul Kim)



2010년 2월 : 부산대학교
컴퓨터공학과(학사)
2017년 8월 : 부산대학교 대학원
컴퓨터공학과(공학박사)
2019년 3월 ~ 현재 :
국립금오공과대학교
컴퓨터소프트웨어공학과 부교수

관심분야 : 빅데이터, 머신러닝