

단자유도계 구조물의 로그정규분포 지진응답 특성

정연인¹, 김군찬², 최민호^{3*}

¹계명대학교 토목공학과 교수, ²계명대학교 수학과 교수, ³계명대학교 토목공학과 교수

A Property of Seismic Response with Log-normal Distribution at SDOF Structure

Youn-In Chung¹, Koon-Chan Kim², Min-Ho Chey^{3*}

¹Professor, Dept. of Civil Engineering, Keimyung University

²Professor, Dept. of Mathematics, Keimyung University

³Professor, Dept. of Civil Engineering, Keimyung University

요 약 본 연구에서는 지진하중에 대한 구조물의 동적해석 과정에서 실제적이고 신뢰성 있는 확률·통계적 지진응답 결과를 얻기 위해 로그정규분포 기반 지진응답 도출 방안을 제안하였다. 이를 위해 미국지질조사국(USGS)에서 제시한 로스앤젤레스 지역 지진재해도에 따라 50년 동안의 발생 초과확률이 2%, 5%, 10%인 30개 지진데이터들을 활용하였다. 해석 대상으로서는 기본적인 동적거동 파악을 위해 단자유도계를 선정, 이의 고유진동주기 별 응답을 나타내는 응답 스펙트럼을 도식하여 응답 추이를 분석하였다. 최종적으로 도출된 로그정규분포 기반 응답의 경우 기존의 정규분포 기반 응답에 비해 모든 고유주기 영역에서 상대적으로 낮은 응답을 보였다. 제안된 로그정규분포 기반의 지진응답 평가는 성능기반내진설계를 위한 경제적 평가 방식으로서의 대안이 될 수 있을 것으로 기대된다.

주제어 : 지진, 구조물, 응답스펙트럼, 단자유도, 로그정규분포

Abstract This study suggests a method for deriving earthquake response based on log-normal distribution in order to obtain realistic and reliable probability and statistical seismic response of structures. The development of three earthquake suites were presented, with a brief description of 2%, 10%, and 50% in 50 years probability of exceedance according the USGS Los Angeles probabilistic seismic hazard maps. In order to analyze the basic dynamic behavior, a Single-Degree-of-Freedom (SDOF) structure was selected and the seismic response spectrum representing the response of each natural period was plotted. Overall, the mean response values presented through the log-normal distribution is lower than the standard normal distribution. Thus, it is considered that the former method can be provided as the effective cost on performance-based seismic design more than the latter one.

Key Words : Earthquake, Structure, Response Spectrum, SDOF, Log-normal Distribution

*This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. 2019R1F1A1062711).

*Corresponding Author : Min-Ho Chey(mchey@kmu.ac.kr)

Received October 11, 2019

Accepted November 20, 2019

Revised November 6, 2019

Published November 28, 2019

1. 서론

우리 주변의 생활환경 가운데 접하게 되는 진동현상은 대부분 기계진동 또는 교통진동으로서 이러한 진동원에는 일반적으로 규칙적인 진동수가 포함되어 있다[1,2]. 반면 자연으로부터 발생하는 지진진동은 지구 내부의 움직임에 의해 지각이 급격하게 요동하는 진동현상으로 예측이 어렵고 짧은 시간에 큰 에너지를 발산하는 특징이 있다[3,4]. 이러한 지진하중의 불확정성과 시간에 따른 급격한 동적 변화로 인해 구조물 내진성능평가 수행 시에는 가능한 다양한 복수의 지진파를 이용하여 구조물 응답 결과에 대한 신뢰성을 높이는 것이 중요하다고 알려져 있다[5-7].

상기와 같은 해석상의 필요성에도 불구하고 실제 구조 해석 과정에서는 편의성에 의해 단수 또는 소수의 지진파 데이터(정현파 또는 대표적인 계측지진 등)를 적용하고 이로부터 도출된 결과를 통해 구조물의 내진성능을 쉽게 일반화 하는 오류를 범하곤 한다. 다행히 최근에는 이러한 해석상의 한계를 극복하기 위해 다양한 진동 특성을 포함하는 복수의 지진파를 적용하여 구조물의 내진 및 제진성능을 평가하고 개선하려는 이론적 시도[8,9]와 이의 검증하기 위한 실험연구[10,11]도 이어지고 있다.

한편, 다수의 지진파를 사용하더라도 예측이 어려운 지진응답에 대한 신뢰성 있는 평가는 여전히 요원하여 최종적인 응답 결과에 대한 추가적인 확률·통계적 처리도 중요한 과정으로 알려져 있다. 그런데 이러한 다양한 특성을 갖는 많은 수의 지진파들에 대한 구조물의 지진파 별 응답 결과를 일반화 하는 과정에서 기존의 표준정규분포에 기반을 둔 응답으로 최종 평가를 하는 것은 지진파의 독특한 특성을 제대로 반영하지 못하는 것으로 알려져 있다[12].

본 연구의 목적은 경제적이고 신뢰성 있는 성능기반내진설계를 위한 구조물의 지진응답 확률·통계 방안을 제 공하는데 있다. 이를 위한 연구절차 및 방법으로서 다양한 특성을 갖는 30개의 역사지진기록에 대한 재현주기 별 조합을 구성하였다. 나아가 각 조합 내에서 확률 및 로그정규분포 기반의 일반화된 변위 및 가속도응답을 도출할 것이다.

2. 연구방법

2.1 데이터 조합

본 연구에서는 우리나라의 지반 특성과 비슷한 것으로

알려진 미국 로스앤젤레스 지역을 중심으로 작성된 지진위험도를 기반으로 한 FEMA/SAC Steel Project의 지진데이터를 사용하였다[13]. FEMA/SAC Steel Project에서는 50년 동안의 지진 발생 초과확률을 다음의 세 단계로 구분하고 각 단계에서 해당 지역에서 발생하였다고 가정된 30개의 지진기록을 재현주기에 따라 다음과 같이 조합하였다.

- Low suite: 50% / 50년 (재현주기 72.6년)
- Medium suite: 10% / 50년 (재현주기 775년)
- High suite: 2% / 50년 (재현주기 2,475년)

Low 조합과 Medium 조합의 경우, 모두 역사지진기록으로 구성되어 있는 반면, High 조합은 5개의 역사지진기록과 5개의 인공지진기록으로 구성되어 있다. 또한, Low 조합 기록들은 다양한 거리의 지진(5~100 km)으로 구성되어 있으며, Medium 및 High 조합의 경우는 1992년 Landers 지진(40 km)을 제외하면 대부분 근거리 지진으로 구성되어 있다.

Table 1. The earthquake records used (FEMA/SAC steel project)

Probability of Exceedance (Suite)	Record	Mag.
50% in 50 yrs. (Low)	Coyote Lake, 1979	5.7
	Imperial Valley, 1979	6.5
	Kern, 1952	7.7
	Landers, 1992	7.3
	Morgan Hill, 1984	6.2
	Parkfield, 1966, Cholame 5W	6.1
	Parkfield, 1966, Cholame 8W	6.1
	North Palm Springs, 1986	6.0
	San Fernando, 1971	6.5
	Whittier, 1987	6.0
10% in 50 yrs. (Medium)	Imperial Valley, 1940, El Centro	6.9
	Imperial Valley, 1979, Array #05	6.5
	Imperial Valley, 1979, Array #06	6.5
	Landers, 1992, Barstow	7.3
	Landers, 1992, Yermo	7.3
	Loma Prieta, 1989, Gilroy	7.0
	Northridge, 1994, Newhall	6.7
	Northridge, 1994, Rinaldi RS	6.7
	Northridge, 1994, Sylmar	6.7
	North Palm Springs, 1986	6.0
2% in 50 yrs. (High)	Kobe, 1995	6.9
	Loma Prieta, 1989	7.0
	Northridge, 1994	6.7
	Northridge, 1994	6.7
	Tabas, 1974	7.4
	Elysian Park (simulated)	7.1
	Elysian Park (simulated)	7.1
	Elysian Park (simulated)	7.1
	Palos Verdes (simulated)	7.1
	Palos Verdes (simulated)	7.1

Table 1에서는 해석에 사용되는 재현주기별로 조합된 30개 지진기록에 대한 상세 내용을 기술하고 있으며, Fig. 1에서는 각 조합 내에서의 대표적 지진에 대한 가속도기록을 도식하였다. 로스앤젤레스 지역의 정확한 지진위험도를 묘사하기 위해 각 지진기록들에 대해 필요에 따라 데이터 크기 조절(Scaling)이 수행되었고, 구현되는 재현주기별 응답스펙트럼이 해당 지역의 지반 특성이 반영된 미국 지질조사국(USGS; U.S. Geological Survey)의 지진위험도(주기 0.3~4.0초)의 내용과 비교되어 신뢰성이 검증되도록 하였다.

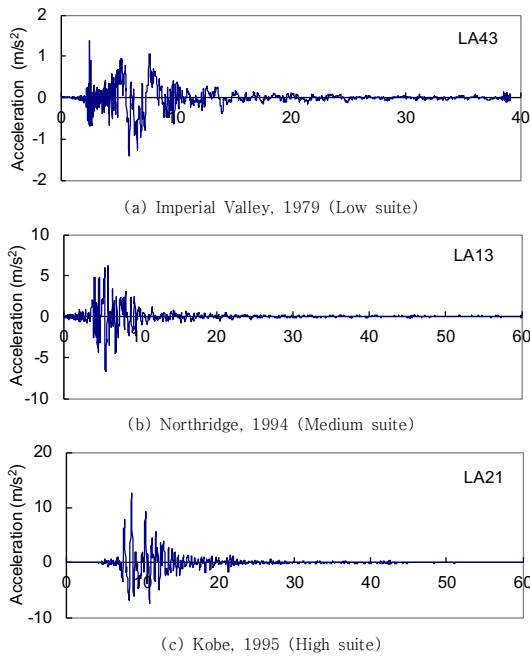


Fig. 1. Sample earthquake records per each suite

2.2 응답스펙트럼

‘응답스펙트럼(response spectrum)’은 특정한 지진에서 유발되는 해당 지반가속도에 대한 단자유도계 구조물의 다양한 고유주기와 이에 따른 최대응답(가속도, 속도, 변위)의 관계를 그래프로 표현한 것이다. 구조물의 응답을 예측하기 위한 방법인 응답스펙트럼은 구조물의 최대응답을 기준으로 필요한 구조물 강도를 결정하는 내진설계의 일반적 개념에 기반을 두고 있다. 이러한 개념의 응답스펙트럼해석 방법은 시간 변화에 따른 지반운동의 상세한 데이터를 활용하는 시간이력해석 상의 어려움을 대체할 수 있는 간편한 해석법으로서 지진해석과 내진설계에 지금까지 폭 넓게 활용되고 있다[14].

Fig. 2는 FEMA/SAC Steel Project에서 사용된 Kern County (1952, Low Suite) 지진의 가속도응답스펙트럼 작성 과정을 나타낸 것이다. 해당 지반가속도(Fig. 2(a))에 대해 다양한 고유주기(0.0~4.0 초)에 해당하는 단자유도계의 최대변위 응답값과 최대가속도 응답값들을 연속으로 이어 도식하면 각각 Fig. 2(b)와 Fig. 2(c)와 같이 표현할 수 있다.

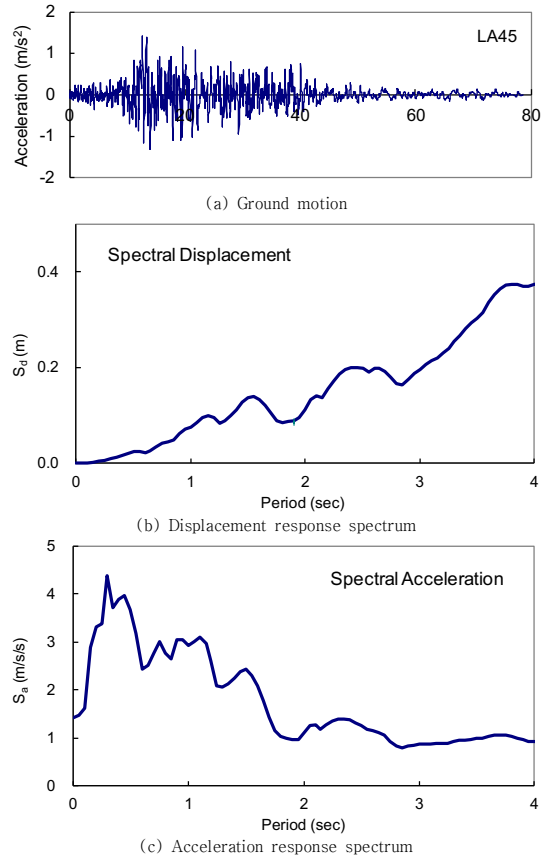


Fig. 2. Response spectrum of Kern County earthquake in 1952 (Low suite)

2.3 확률·통계처리

지진하중이 포함하는 독특한 불확정성은 지진의 규모, 진앙거리 및 깊이, 발생 시간, 지반조건 등의 다양한 지진환경요소로 인한 것이다. 따라서 이러한 불확정성을 최소화시키면서 발생 가능한 지진시나리오를 설정하여 해당 지역에 대한 신뢰성 있는 지진피해 평가와 예측을 시도하는 것은 지진재난복원력 평가를 위한 핵심적 사안이라 할 수 있다. 이러한 관점에서 가능한 다양한 특성을 갖는 많은 지진기록을 활용하여 구조해석과 내진성능평가에

활용하여 확률론적 결과를 도출하는 방식이 주목을 받고 있다[4,8,9].

한편, 통계학에서 사용되는 대표적인 확률분포 이론인 로그정규분포의 경우, 특별한 값을 갖는 독립데이터의 영향을 최소화할 수 있는 특징이 있으며, 이러한 특징은 재료의 특성 분석이나 극심한 불확정성을 포함하는 지진하중에 대한 평균값을 도출하는데 있어 표준정규분포의 방법에 비해 보다 합리적인 방법으로 알려져 있다[12,15-18]. Fig. 3는 표준정규분포와 다양한 표준편차 값을 갖는 로그정규분포의 차이를 보여준다.

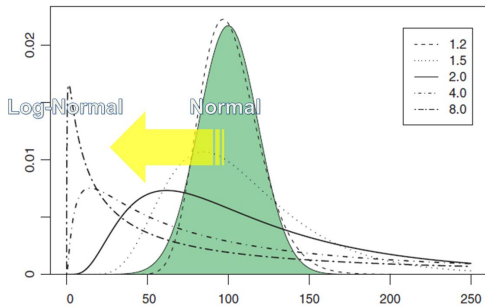


Fig. 3. Normal VS. log-normal distribution [14]

위의 같은 로그정규분포를 기반으로 복수의 지진데이터에 대한 평균값을 구하기 위한 식은 다음과 같다.

$$\hat{x} = \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i\right) \quad (1)$$

$$\hat{\sigma} = \exp\left(\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln x_i - \ln \hat{x})^2}\right) \quad (2)$$

위 식에서 n은 사용된 지진기록의 숫자를 나타내며 본 연구의 경우 조합별로 n = 10의 값이 사용된다. x_i 는 각 시간에 대한 변위 및 가속도 데이터 값을 나타내며, 본 해석에서는 주어진 지진 발생 시간에 대해 0.05초 간격으로 데이터를 생성하였다. 이러한 과정을 거쳐, 최종적으로 각 조합에 포함된 지진데이터들에 대한 주기별 평균응답 값을 식 (1)과 같이 구할 수 있으며, 이에 대한 표준편차는 식 (2)를 통해 구할 수 있다.

3. 결과 및 분석

각 조합별 지진응답을 분석하기 위해 비교 대상인 기존의 로그정규분포 기반의 변위 및 가속도응답 스펙트럼

과 함께 로그정규분포 응답스펙트럼을 함께 도식하였다. 이를 위해, Fig. 4-6과 같이 각 조합에 대한 기본적인 정량적 지진응답 확인을 위한 단자유도계(SDOF) 시스템의 변위 및 가속도 응답을 주요 주기의 변화에 따라 스펙트럼화 하였다. 스펙트럼 생성 시 단자유도계의 고유감쇠비는 동일하게 5%로 설정하여 구조물에 일반적으로 적용되는 감쇠(2~5%)의 영향을 반영하였다.

각 재현주기별 10개의 응답스펙트럼 값은 정규 및 로그정규분포에 따른 변위 및 가속도에 대한 평균값으로 각각 산출하였으며, 분석 결과 다음과 같은 몇 가지 특징이 도출되었다.

- 변위 및 가속도 응답 모두 조합별로 뚜렷한 응답 차이를 보였으며, 이는 재현주기별 조합의 과정이 합리적이었던 것을 증명한다.
- 변위 응답의 경우, 장주기로 변화될수록 표준 및 로그정규분포 평균값의 차이가 커지지만, 가속도 응답의 경우는 반대의 경향을 보인다. 하지만 가속도 응답의 경우 전체 주기에 걸쳐 두 분포에 대한 차이는 상대적으로 작은 것으로 나타났다.
- 모든 고유주기에 대해 로그정규분포를 기반으로 한 평균값이 표준정규분포 기반의 경우보다 전반적으로 낮은 응답을 보였다.
- 로그정규분포 기반의 평가 방법이 지진응답에 대한 더욱 신뢰성 있는 확률론적 방법으로서 보다 경제적인 성능기반내진설계를 위한 대안으로 판단된다.

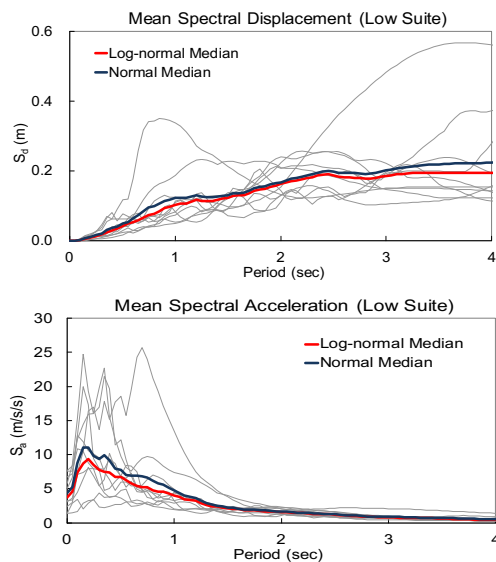


Fig. 4. Response spectrum of low suite (5% critical damping)

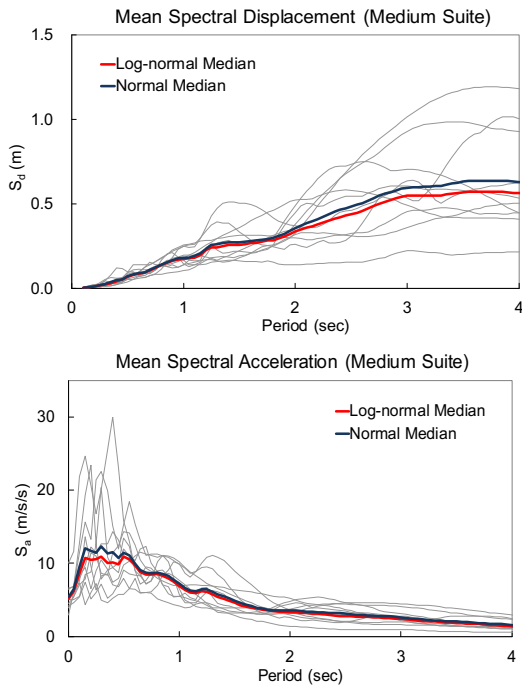


Fig. 5. Response spectrum of medium suite (5% critical damping)

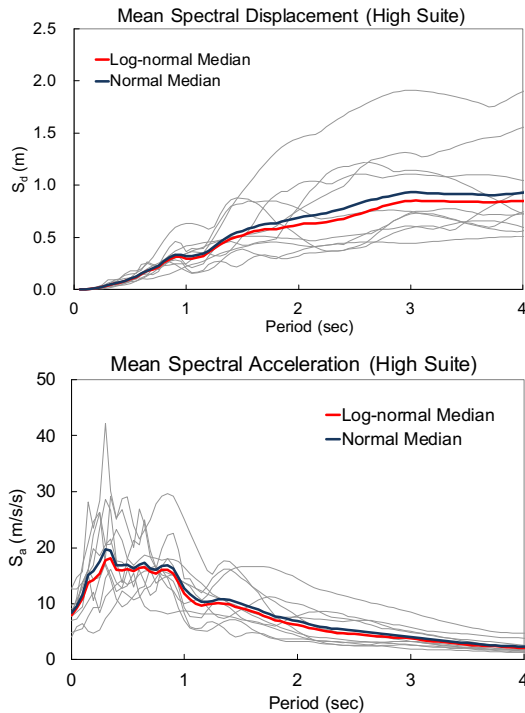


Fig. 6. Response spectrum of high suite (5% critical damping)

4. 결론

본 연구에서는 지진하중의 효과적이고 신뢰성 있는 확률분포를 바탕으로 구조물의 평균응답을 도출하는 방법을 모색하였다. 보다 신뢰성 있는 내진설계를 위해서는 가능한 다양한 동적 특성을 가진 다수의 지진기록을 활용해야 할 뿐만 아니라, 이들에 대한 합리적인 확률 및 통계적 처리 과정을 거쳐야 한다.

본 연구의 지진해석 수행을 위해 대표적 역사지진기록 30개에 대한 수치적 조정 과정을 거쳤다. 또한, 형성된 재현주기별 지진 조합들을 기준으로 로그정규분포 기반의 응답스펙트럼 해석을 통해 조합별 평균응답을 도출하였다. 최종적으로 로그정규분포를 통해 제시되어진 평균응답은 표준정규분포의 결과에 비해 보다 경제적인 성능기반내진설계가 가능한 응답을 나타내었다.

본 연구 결과를 통해 미래에 발생할 수 있는 다양한 동적특성을 갖는 지진하중을 합리적으로 예상하고, 또한 가능한 다수의 지진데이터를 포함하는 통계적 접근법을 효과적으로 응용한다면 보다 신뢰성 있는 내진설계로의 접근이 가능할 것이다. 나아가, 이러한 실질적 데이터 적용을 통해 보다 신뢰성 있는 성능기반내진설계를 수행함으로써 보다 경제적인 설계환경 구축도 가능하게 될 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] S. S. Rao. (2011). *Mechanical Vibration, 5th Ed.* Upper Saddle River, NJ : Prentice-Hall.
- [2] D. H. Kwon, S. H. Jang, H. J. Mun & M. H. Chey. (2019). The Running Vibration Assessment of Daegu Metropolitan Transit using Smartphone Acceleration Sensor. *Journal of the Korea Convergence Society, 10(6)*, 179-184. DOI : 10.15207/JKCS.2019.10.6.179
- [3] Y. Bozorgnia & V. V. Bertero. (2004). *Earthquake Engineering - From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering.* Boca Raton, London : CRC Press.
- [4] S. H. Jang, D. H. Kwon, C. G. Hwang, S. Y. Choi & M. H. Chey. (2019). Earthquake Damage Assessment of Buildings in Urban Area using Disaster Management Platform. *Journal of the Korea Convergence Society, 10(6)*, 25-31. DOI : 10.15207/JKCS.2019.10.6.025
- [5] N. M. Newmark & W. J. Hall. (1982). *Earthquake Spectra and Design, Engineering Monographs on Earthquake Criteria, Structural Design and Strong*

- Motion Records*, 3. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.
- [6] A. K. Chopra. (2011). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, 4th Ed. Upper Saddle River, NJ, Prentice-Hall.
- [7] M. Paz. (1991). *Structural Dynamics - Theory and Computation*, 3rd Ed. New York : VNR.
- [8] L. R. Barroso, J. G. Chase & S. Hunt. (2003). Resettable smart dampers for multi-level seismic hazard mitigation of steel moment frames. *Journal of Structural Control*, 10(1), 41-58.
DOI : 10.1002/stc.16
- [9] J. G. Chase, L. R. Barroso & S. Hunt. (2003). Quadratic jerk regulation and the seismic control of civil structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 32(13), 2047-2062.
DOI : 10.1002/eqe.314
- [10] K. Mulligan, J. G. Chase, J. B. Mander, M. Fougere, B. L. Deam, G. Danton & R. B. Elliott. (2006). Hybrid experimental analysis of semi-active rocking wall systems. *Proc New Zealand Society of Earthquake Engineering Conference (NZSEE)*, Napier, New Zealand.
- [11] G. W. Rodgers, J. B. Mander, J. G. Chase, K. J. Mulligan, B. L. Deam & A. J. Carr. (2007). Re-shaping hysteretic behaviour - Spectral analysis and design equations for semi-active structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(1), 77-100.
DOI : 10.1002/eqe.624
- [12] E. Limpert, W. A. Stahel & M. Abbt. (2001). Log-normal distributions across the sciences: Keys and clues, *Bioscience*, 51(5), 341-352.
- [13] P. Sommerville, N. Smith, S. Punyamurthula & J. Sun. (1997). *Development of ground motion time histories for Phase II of the FEMA/SAC steel project*.
- [14] B. Moharz. (1976). A Study of Earthquake Response Spectra for Different Geological Conditions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 66(3), 915-935.
- [15] S. J. Hunt. (2002). *Semi-active smart-dampers and resettable actuators for multi-level seismic hazard mitigation of steel moment resisting frames*. ME Thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- [16] J. G. Chase, G. W. Wodgers, K. J. Mulligan, J. B. Mander & R. P. Dhakal. (2007). Probabilistic Analysis and Non-Linear Semi-Active Base Isolation Spectra for Aseismic Design, 8th Pacific Conference on Earthquake Engineering, Dec, 5-7, Singapore.
- [17] M. H. Chey. (2007). *Passive and Semi-Active Tuned Mass Damper Building Systems*. Ph.D. Thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- [18] R. P. Kennedy, C. A. Cornell, R. D. Campbell, S. Kaplan, & H. F. Perla. (1980). Probabilistic Seismic Safety Study of an Existing Nuclear-Power Plant. *Nuclear Engineering and Design*, 59(2), 315-338.
DOI : 10.1016/0029-5493(80)90203-4
- [19] J. L. Cui, M. H. Chey & S. I. Kim. (2016). Seismic Performance of Urban Structures with Various Horizontal Irregularities using Equivalent Static Analysis. *Journal of Convergence for Information Technology*, 6(1), 25-32.
DOI : 10.22156/CS4SMB.2016.6.1.025

정 연 인 (Youn-In Chung)

[상위권]



- 1984년 2월 : 국민대학교 토목공학과(공학사)
- 1987년 12월 : SDSM&T 토목공학과(공학석사)
- 1993년 12월 SDSM&T 토목공학과(공학박사)
- 1995년 9월 ~ 현재 : 계명대학교 토

목공학과 교수

- 관심분야 : 토목시공학, 사면의 안정
- E-Mail : cyi@kmu.ac.kr

김 군 찬 (Koon-Chan Kim)

[상위권]



- 1984년 6월 : 오레곤주립대 화학공학(학사)
- 1988년 6월 : 아이다호대 수학과(이학석사)
- 1991년 12월 : 와싱턴주립대(이학박사)
- 1992년 9월 ~ 현재 : 계명대학교 수

학과 교수

- 관심분야 : 수치해석, 응용수학
- E-Mail : kmkim@kmu.ac.kr

최 민 호 (Min-Ho Chey)

[상위권]



- 1992년 2월 : 동아대학교 건축공학과(공학사)
- 2001년 4월 : 캔터베리대 토목공학과(공학석사)
- 2008년 5월 : 캔터베리대 토목공학과(공학박사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 계명대학교 토

목공학과 조교수

- 관심분야 : 면제진구조설계, 자연모사설계, 도시방재
- E-Mail : mchey@kmu.ac.kr