현장계측 PGA를 활용한 기존 거리감쇄식의 적용성에 관한 연구

Application of Existing Distance Attenuation Relationships Using PGAs Recorded during Earthquakes

박재봉* · 안진희** · 최형석*** · 김규선**** · 강기천*****

Park, Jae-Bong*, Ahn, Jin-Hee**, Choi, Hyoungsuk***, Kim, Gyu-Seon****, and Kang, Gi-Chun*****

Abstract

This study examined distance attenuation equations in which the damping characteristics of the earthquake motion are determined by the distance effect based on the transmission of seismic waves. The study examined three distance attenuation equations proposed in Korea and 15 earthquakes of magnitude M2.0 or higher, including the 2016 Gyeongju earthquake (M5.8) and the 2017 Pohang earthquake (M5.4). To evaluate the reliability of the distance attenuation equations, the root mean square error and coefficient of correlation obtained from the peak ground accelerations (PGAs) recorded during the targeted earthquakes were compared. From the PGA comparisons, the equation by Yun et al. (2008) was shown to match well with the observed PGA distance relationship for earthquake magnitudes exceeding M4.0, especially those over M5.0.

Key words : Distance Attenuation Relation, PGA (Peak Ground Acceleration), Root Mean Square Error, Coefficient of Correlation

요 지

본 연구에서는 지진과 전달에 따른 지진동의 거리별 감쇄 특성을 표현하는 지진동감쇄식(Ground-motion attenuation relation) 또는 거리감쇄식(Distance attenuation relation)의 적용성에 대한 검토를 수행하였다. 국내에서 제안된 대표적인 세 가지 지진동 감쇄식을 검토하였고, 대상 지진은 2016년 경주지진(M5.8)과 2017년 포항지진(M5.4)을 포함하여 M2.0이상의 지진 15개를 대상으로 하였다. 신뢰성 분석을 위해 지진시 계측된 지표최대가속도(PGA, Peak Ground Acceleration)에 대해 평균제곱근오차(RMSE, Root Mean Square Error)와 상관계수(R, Coefficient of Correlation)를 이용하여 분석하였다. 연구 결과 국내 지진규모 M4.0이상의 지진, 특히 M5.0이상의 경우는 Yun et al. (2008)에 의한 거리감쇄식의 신뢰성이 높은 것으로 나타났다.

핵심용어 : 거리감쇄식, 지표최대가속도(PGA), 평균제곱근오차, 상관계수

1. 서 론

최근 국내에서는 경주(2016년 09월 12일)와 포항(2017년 11월 15일)에서 역대 최대 지진이 연속적으로 발생하여

사회기반시설물 등의 지진 안전성의 관심이 커지고 있다. 특히 포항지진은 피해의 정도와 규모에 있어서 경주지진과 비교하여 상대적으로 심각하였다. 이렇게 최근의 한반도 동남권에 연이어 발생한 지진과 다발적인 여진에 의해 우리

*정회원, 한국시설안전공단 시설성능연구소 책임연구원(E-mail: jbpark@kistec.or.kr)

Member, Senior Researcher, Research Institute for Infrastructure Performance, KISTEC

**정회원, 경남과학기술대학교 토목공학과 부교수

Member, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Gyeongnam National Univ. of S&T

***국토교통연구원프라운영원 지진방재연구센터 책임연구원

Senior Researcher, Seismic Simulation Test Center, KOCED

****정회원, 한국시설안전공단 시설성능연구소 소장

Member, Research Director, Research Institute for Infrastructure Performance, KISTEC

*****교신저자, 정회원, 경상대학교 토목공학과 공학연구원 조교수(Tel: +82-55-772-1792, Fax: +82-55-772-1799, E-mail: gkang@gnu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, ERI, Gyeongsang National University

나라에서 지진에 대한 대비는 선택사항이 아니라 반드시 대비해야 하는 위협적이고 강제적인 사안이 되었음을 인지하여 국내의 지층특성, 지반액상화, 내진설계 기준 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

한반도의 지진 관측은 1905년 인천에서 일본에 의해 지진 관측소를 구축하여 시작하게 되었고, 1977년 이후 서울과 광주에 관측소가 추가 설치되었다. 본격적으로 한반도의 지진 관측은 주거지에서 실제 피해 기록이 있었던 1978년 10월의 홍성 지진(규모 5.0)이 발생한 이후이며, 1990년 중후반부터 전국에 지리적인 위치를 고려하여 지진 관측소를 설치하여, 계기 지진 자료를 확보하고 있다(KIGAM, 2006).

기상청 계기관측 이래 발생한 지진 중 2016년 9월 12일 경상북도 경주시 남남서쪽 8.7km 지역에서의 규모 5.8 지진(이하 9.12지진)이 가장 큰 규모의 지진으로 기록되었다. 이 지진으로 경주와 대구에서 건물이 심하게 흔들리고 일부 유리파와 지붕, 기와가 파손되는 등 최대진도 VI을 기록하였다. 그리고 수도권을 비롯한 전국 대부분 지역에서 지진동이 감지되었다. 또한 부상자 23명 및 9,368건의 재산피해를 발생시켰다. 그리고 경주지진의 영향으로 2016년 규모 2.0이상의 여진이 167회 발생하였으며, 전진인 규모 5.1의 지진을 비롯하여 7월 5일 발생한 울산 해역지진까지 한 해 동안 규모 5.0이상의 지진이 3회나 발생하는 이례적인 해가 되었다. 2016년에 발생한 규모 2.0 이상의 국내지진은 총 252회로 경주지진 및 여진으로 인하여 1978년 계기관측을 시작한 이래 가장 많은 발생 횟수를 기록하였다. 디지털 관측을 시작한 1999년부터 2015년까지(이하 예년) 지진발생 연평균 횟수인 47.5회보다 발생빈도가 5배 이상 많았으며, 유감지진의 횟수도 55회로 예년 연평균 8.7회보다 크게 증가하였다(KMA, 2016). 2016년 발생한 9.12지진의 여파인지 그 원인은 명확하게 규명된 것은 아니지만, 이후 한반도 전역에서 지진발생 횟수가 크게 증가하였다. 특히, 2017년 11월 15일 포항에서 발생한 규모 5.4의 지진은 부상 92명, 이재민 1,797명 및 27,317개소의 시설피해와 약 551억원의 피해를 발생시킨 지진 재난이었다. 포항지진은 9.12지진에 비해 규모가 0.4 정도 작지만, 지진이 발생한 지역의 지반 특성으로 인하여 더 큰 피해를 준 지진이다. 특히, 대규모 지진 발생시 수반되는 액상화 현상이 관측되어 지진재해에 대한 경각심을 일깨우게 되었다. 2017년에 발생한 규모 2.0 이상의 국내지진은 총 223회로 9.12지진 발생 이후로 꾸준히 증가했던 지진들과 포항지진의 여진 76회가 포함되어 있다. 특히, 유감지진의 횟수가 98회로 가장 많은 횟수를 기록하였다(Fig. 1). 9.12지진 이후, 지진 재해에 대한 국가차원의 방재 필요성에 집중하던 움직임이 시작되었다면, 포항지진 이후에는 지진이 발생하는 메커니즘을 이해하기 위한 활성단층 조사를 포함하여,

지질학적 조사에 대한 필요성이 더해지면서 다양한 연구 및 조사가 시작될 수 있게 되었다(KMA, 2017).

Fig. 1. Earthquakes during 1978~2017 in Korea (KMA, 2017)

일반적으로 지표로부터 수십 km 이상에 분포하는 기반암에서의 단층 활동으로 발생한 지진파는 지표면 부근으로 전달되면서 거리 및 지층의 특성에 따라 감쇄가 발생하게 된다(Dobry et al., 2000). 전달된 지진파가 상대적으로 얇은 심도에 분포하는 공학적 기반암부터 그 상부의 토사를 통과하는 과정 중에는 주파수 성분과 진동 크기인 진폭에 있어서 큰 변화가 발생하게 된다. 일반적으로 지표면의 지반운동은 기반암에 비해 상대적으로 강성이 작은 상부 토사층에서 그 부지별 고유 진동 특성에 상응하는 주파수 성분에서의 증폭 현상이 발생하여 지표면에서 표출된다(Tsai and Huang, 2000; Sun et al., 2005). 지진이 발생하면 국부적인 지질 및 지층구조에 따라 부지에서의 지진 지반운동의 증폭에 지대한 영향을 미치며, 이러한 부지고유 지진응답 정도를 부지효과(Site Effects)라고 한다(Sugito et al., 2000). 이와 같은 부지효과로 인한 지진파 성분의 변화 및 증폭은 지표면 부근의 사람들이나 주거시설 뿐만 아니라 여러 종류의 시설물들에 직접적인 피해를 발생시킨다. 부지효과로 인한 지진 피해 발생 및 그로 인한 지역 내 서로 다른 부지에서의 차별적 피해 집중 현상은 지난 세기 후반과 금세기 초반의 해외 발생 주요 지진들로부터 확인되었다(Seed et al., 1987; Chang et al., 1996; Tokimatsu et al., 1998; Tsai and Huang, 2000; Lin and Chai, 2008).

Fig. 2는 2017년 11월 15일에 발생한 규모 5.4의 포항지진에 의한 피해사례를 나타내고 있다. Fig. 2(a)는 진앙지에서 5km 이내에 있는 흥해읍의 대성아파트이며 지진에 의해 시민이 거주할 수 없을 정도의 피해를 입어 철거가 불가피한 상황이며, Fig. 2(b)는 진앙지로부터 7.5 km 떨어진 송림공원에서 발견된 액상화 현상이다. 이와 같이 지진에 의한 여러 가지 피해가 있었으며, 진앙지와 가까운 위치에서는 그 피해가 비교적 크게 나타났다.

(a) Daeseong Apartment (Kim, 2017)

(b) Sand boiling in Songlim Park (The Asia Business Daily, 2017)

Fig. 2. Damages during Pohang Earthquake

Fig. 3은 2016년 9월 12일 지진 발생시 한국지질자원연구원에서 분석한 지표최대가속도 분포도이다(Sun et al., 2016). 그림과 같이 진앙지부터 거리가 멀어질수록 지진피해를 나타내는 지진가속도는 작아지는 경향이 있으며, 이는 지진 감쇄의 특성 때문이다. 즉 지진동은 지층을 따라 전파하면서 증폭 또는 감쇄하는 특성이 있으나, 거리에 대해서는 일반적으로 감쇄하는 경향을 가지고 있다. 참고로 그림에서 나타내듯이 경주지진의 경우 전국에서 지진이 감지될 정도로 국내에 발생한 지진중 상대적으로 큰 규모의 지진이다.

Fig. 3. Distribution of Peak Ground Acceleration during Gyeongju Earthquake (Sun et al., 2016)

국내에서는 사회기반시설 등 사회적으로 중요한 시설에 대해서 지진계를 설치하여 지진시 계측결과를 통해 피해원인 규명 등을 수행하고 있으나, 소규모 시설의 경우 이러한 지진계의 설치 의무가 없기 때문에 지진 발생시 피해여부에 대한 예측이 곤란한 실정이다. 이 경우 국내에서 사용되는 거리감쇄식을 통해 주변에서 계측된 지진가속도계의 계측기록에 기반하여 해당 위치의 가속도 등을 추정하여 피해 여부를 예측할 수 있다. 또한, 국내에서 드문 최근의 강진은 기존 국내 지진등을 대상으로 제안된 수많은 연구에 대해 검증 또는 적용성을 검토할 수 있는 좋은 사례가 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 국내에 사용되는 지진동 감쇄식(거리 감쇄식)에 대해 2016년 9월 12일 발생한 규모 5.8의 경주 지진과 2017년 11월 15일에 발생한 규모 5.4의 포항지진과 여진들을 포함한 지진 정보를 이용하여 기존 국내에 적용되는 지진동의 거리 감쇄식에 대한 적용성을 검토하고자 한다.

2. 국내 거리감쇄식

일반적으로 특정지역의 지진 흔들림(진도, 가속도 등)을 추정하기 위해서는 그 지역의 토질주상도를 활용하여 지층 구조를 파악하고 지반의 동적물성치를 실내 또는 현장시험을 통해 산정한 후 지반응답해석을 통해 추정할 수 있다. 하지만 상대적으로 소규모 시설의 경우 대표 토질주상도 등 자료가 미흡함에 따라 이에 대한 대책이 필요한 실정이다. 이와 관련하여 지역에 따른 불확실성이 강한 지진의 강도를 예측하기 위한 지진동 감쇄식, 즉 거리감쇄식은 과거 몇몇의 연구자에 의해 제안되었다(Yun, 2007; Yun et al., 2008; Oh and Shin, 2013). 대부분 외국의 지진사례를 통해 수행되었으며 이를 국내에 직접 도입하기는 힘들 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 국내의 자료를 활용하여 제안된 국내의 거리감쇄식에 대해서 그 적용성을 검토하고자 한다.

국내에서는 2014년 까지 시설물 안전성평가의 신뢰도 확보를 위한 계측자료의 유효성과 지진 피해 추정 알고리즘의 국산화를 위해서 진동특성기반 시설물 재난 피해추정 및 평가 기술개발을 위해 “진동자료 기반 시설물 위험관리방안 및 진동특성 분석” 연구를 수행하였다(NDMI, 2014). 이 연구에서 제시된 감쇄식은 국내 계측자료 등을 활용하여 제안된 방법으로 국내 지층특성을 간접적으로 반영하고 있는 것으로 판단할 수 있다.

첫 번째는 국토교통부(Ministry of Construction & Transportation, MOCT)에 의한 방법으로 내진설계기준제정을 위해 1997년 수십 명의 연구자들이 참여하여 “내진설계기준 연구”를 수행하였고, 거리감쇄에 대해서는 8명의 연구진이 참여하여 기존의 공식을 검토하고 지진 재해도 작성을 위해 Eq. (1)을 제안하였다(MOCT, 1997).

$$\ln \alpha = 5.0244 + 0.5442M - 1.002 \ln R \quad (1)$$

여기서, α : 지표최대가속도(PGA, Gal)
 M : 지진규모(Magnitude of earthquake)
 R : 진앙으로부터 거리(Distance from seismic source, km)

이후 Yun et al. (2008)은 지진관측소에 대한 부지증폭특성 (부지증폭함수+고주파감쇄상수) 결과를 이용하여 지표최대가속도(Peak Ground Acceleration, PGA) 관측자료를 보정하였다(Yun, 2007). 제안된 식은 국내 임의의 관측소에 대해 대상 지진에 대한 추계학적 지진원 및 전달특성 파라미터(규모, 거리, 지속시간, 응력강하 등)와 부지증폭특성을 이용하여 RVT(Random Vibration Theory) 방법으로 PGA값을 추정하여 거리감쇄식을 Eq. (2)와 같이 도출하였다(Boore, 2003).

$$\ln Y = c_1 + c_2 \cdot M + (c_3 + c_4 \cdot M) \cdot (\ln(R + c_5 \exp(c_5))) + c_6 \cdot (M - 6)^2 + c_7 \ln(\min(R, R_0)) + c_8 \ln(\max(R, R_0)) \quad (2)$$

여기서, $R = \sqrt{(R^2 + 9.8^2)}$, if $M \leq 6.5$
 $R = \sqrt{(R^2 + 9.8^2 \exp(2(-1.25 + 0.22M)))}$, if $M > 6.5$
 Y : 지표최대가속도(PGA, g)
 M : 지진규모(Magnitude of earthquake)
 R : 진앙으로부터 거리(Distance from seismic source, km)
 c_1 - c_8 : 주파수에 따른 상관계수

마지막으로 Oh and Shin (2013)은 지진동의 거리감쇄식을 도출하기 위해 미국과 이탈리아 지진을 대상으로 53개의 지진을 분석 및 검토하였다. 일반적으로 지진동감쇄는 지진파의 대표적 특성(지반특성, 진원특성, 전파특성)과 상관관계가 있다고 알려져 있으나(Molas and Yamazaki, 1995), 이 연구에서는 감쇄식에 반영할 변수를 위해 위의 53개 지진에 대해서 경향성을 분석한 결과 지진규모와 지반종류만을 지진동감쇄식에 반영하여 Eq. (3)과 같이 제안하였다.

$$\log(A) = bM - \log(X + c) - kX \quad (3)$$

여기서, b : $0.00M + 0.55$
 k : $-10^{-5}M^2 + 0.0015M - 0.0032$
 c : $0.0065 \times 10^{0.54M}$
 A : 지표최대가속도(PGA, Gal)
 M : 지진규모(Magnitude of earthquake)
 X : 진앙으로부터 거리(Distance from seismic source, km)

본 연구에서는 상기의 세 가지 식에 대해서 실제 현장에서 취득된 지진계측자료를 바탕으로 적용성을 검토하고자 한다.

3. 연구대상 지진

상대적으로 규모가 작은 경우 지진동의 크기가 작기 때문에 국내에 적용 가능한 거리감쇄식의 검토를 위해서는 어느 정도의 규모가 큰 지진 사례를 검토하는 것이 좋다. 따라서 본 연구에서는 최근에 발생한 2014년 9월 12일(경주지진)부터 2018년 2월 11일까지 15개의 국내에서 발생한 지진을 대상으로 분석 검토하였다. Table 1에 나타난 바와 같이 2016년 9월 12일 경주지진(M5.8)이후 몇 차례의 여진이 포함되어 있으며, 2017년 11월 15일 포항지진(M5.4)이후 상대적으로 강진인 M4.6의 포항지진까지 연구대상 지진으로 선정하였다.

Table 1. Earthquakes for the Study

No.	Date	M	Distance (km)	Epicenter		
				Lat.	Long.	Location
1	2016-09-12	5.8	8.7	35.76	129.19	Gyeongju
2	2014-09-12	3.5	18	35.78	129.19	Gyeongju
3	2016-09-19	4.5	11	35.74	129.18	Gyeongju
4	2016-09-21	3.5	10	35.75	129.18	Gyeongju
5	2016-10-24	2.2	4	37.25	127.02	Suwon
6	2016-11-02	2.3	33	33.53	126.88	Jeju
7	2017-01-16	2.1	2	36.33	126.59	Boryeong
8	2017-02-16	2.3	11	35.64	128.09	Hapcheon
9	2017-05-05	3.0	13	35.32	127.43	Gurye
10	2017-11-15	5.4	9	36.12	129.36	Pohang
11	2017-11-15	4.3	9	36.12	129.36	Pohang
12	2017-11-20	3.6	11	36.14	129.36	Pohang
13	2017-12-25	3.5	8	36.11	129.36	Pohang
14	2018-02-04	2.8	8	36.37	127.62	Okcheon
15	2018-02-11	4.6	5	36.08	129.33	Pohang

Fig 4는 본 연구에 사용된 지진계측데이터 수집 관측소를 나타낸다. 본 연구에서는 기상청에서 운영하는 지진관측소의 데이터를 수집하여 검토하였으며, 총147개소의 관측소 중 지진관측자료가 제공되는 자료와 측정장비의 정보를 확인할 수 있는 관측소 지진결과를 활용하였다. 또한 각 지진관측소의 자유장 100 SPS(100회/초) 관측자료를 사용하였다. Fig. 5는 경주지진 및 포항지진 발생시 가장 가까운 관측소에서 계측된 지진가속도를 나타내고 있다. Fig. 5(a)는 경주에서 발생한 규모 5.8의 지진에 대한 기상청 USN관측소에서 측정한 지진관측결과를 나타내며 약 $4m/s^2$ 의 지표최대

Fig. 5. Seismic Data at Sample Station

전술한바와 같이 일반적으로 지진에 의한 피해는 진앙(또는 진원)으로부터 멀어질수록 지진에 의한 흔들림, 즉 지표최대가속도(PGA)가 작아지는 경향이 있다. 본 연구에서는 기존 지진동 감쇄식의 적용성을 검토하기 위해 자료의 신뢰도 및 경향성을 분석하는데 널리 사용되는 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)와 상관계수(Coefficient of Correlation, R)를 도출하였다. RMSE는 관측값에 대한 오차의 제곱합을 산술평균한 값의 제곱근으로 표준편차를 일반화시킨 척도로서 실제값과 추정값과의 차이가 얼마인가를 알려주는데 많이 사용된다. 즉, RMSE와 표준편차는 개별 관측값이 중심으로부터 얼마나 멀리 떨어져 있는 정도를 나타내기 때문에 RMSE=0에 가까울수록 실제값과 추정값은 일치하는 것으로 판단할 수 있다. 상관계수 R은 실제 관측값과 추정치의 경향이 어느 정도 맞는지를 알려주는 척도로 사용된다. 즉 R=1에 가까울수록 거리에 따른 PGA의 변화하는 경향이 유사하다고 할 수 있다. 즉, RMSE=0, R=1에 근접할수록 관측값과 추정치가 유사하다고 할 수 있다.

기존 거리감쇄식의 비교를 위해 기록 지진에 대해서 4구간으로 나누어 검토하였다. 지진의 크기에 따라 기존 거리감쇄식인 MOCT (1997), Yun et al. (2008), Oh and Shin (2013)을 세부적으로 분석 하기 위해 ① M3.0이하, ② M3.1~M4.0, ③ M4.1~M5.0, ④ M5.0이상으로 나누었다. Fig. 6은 M3.0 이하의 지진에 대해 실제 계측 PGA와 기존 거리감쇄식을 비교한 그림이다. Table 2는 RMSE와 R을 비교한 것이다. MOCT 방법은 Fig. 6의 모든 지진에 대한 비교에서 상대적으로 거리에 따라 PGA를 과대평가 하는 경향이 있다. 즉 MOCT방법에 의하면 보수적인 결과를 초래하는 것으로 판단된다. 이는 지진에 대한 보수적인 설계에는 적당할수도 있으나, 경제적인 설계에는 부적합할 것으로 판단된다. 그리고 R의 경우는 수원지진의 경우 0.94정도로 적합성이 높은 것으로 나타났다. 그리고 Yun et al. (2008)방법과 Oh and Shin (2013)의 방법은 서로 유사한 경향을 보이고 있고, Oh and Shin (2013) 방법이 거리가 멀어짐에 따라 PGA를 다소의 차이는 있으나 약간 과대평가하는 경향이 발견되었다. RMSE와 R값도 유사하게 나타났지만 보령지진을 제외 하고는 RMSE는 Yun et al. (2008)의 방법이 작게 나타나 신뢰도가 높은 것으로 나타났다. 즉, 전체적인 경향을 관찰하였을때는 Yun et al. (2008) 방법이 실제측 자료를 상대적으로 신뢰도 있게 예측하는 것으로 판단된다.

현장계측 PGA를 활용한 기존 거리감쇄식의 적용성에 관한 연구 153

Fig. 6. Relationship Between PGA and Distance from Epicenter for Smaller than M3.0 Earthquakes

Table 2. RMSE and R for Smaller than M3.0 Earthquakes

Equations	Suwon (M2.2)				Jeju (M2.3)				Boryeong (M2.1)			
	East-West		North-South		East-West		North-South		East-West		North-South	
	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R
MOCT (1997)	0.0095	0.9372	0.0096	0.9357	0.0042	0.0802	0.0042	0.0379	0.0149	0.2769	0.0148	0.2538
Oh and Shin (2013)	0.0009	0.9348	0.0009	0.9334	0.0002	0.0801	0.0002	0.0379	0.0004	0.2799	0.0005	0.2564
Yun et al. (2008)	0.0004	0.9780	0.0004	0.9747	0.0002	0.0801	0.0002	0.0267	0.0014	0.2191	0.0014	0.2040

Equations	Hapcheon (M2.2)				Gurye (M3.0)				Okcheon (M2.8)			
	East-West		North-South		East-West		North-South		East-West		North-South	
	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R
MOCT (1997)	0.0066	0.5837	0.0066	0.6294	0.0097	0.3057	0.0094	0.4693	0.0070	0.8726	0.0067	0.8670
Oh and Shin (2013)	0.0007	0.5837	0.0006	0.6290	0.0040	0.3063	0.0019	0.4697	0.0017	0.8735	0.0023	0.8680
Yun et al. (2008)	0.0006	0.5733	0.0005	0.6418	0.0040	0.2294	0.0019	0.3914	0.0015	0.9454	0.0021	0.9536

(a) Gyeongju earthquake (M3.5)
Lat (35.78), Long (129.19)

(b) Gyeongju earthquake (M3.5)
Lat (35.75), Long (129.18)

(c) Pohang earthquake (M3.6)
Lat (36.14), Long (129.36)

(d) Pohang earthquake (M3.5)
Lat (36.11), Long (129.36)

Fig. 7. Relationship Between PGA and Distance from Epicenter for M3.1 to M4.0 Earthquakes

Table 3. RMSE and R for M3.1 to M4.0 Earthquakes

Equations	Gyeongju (M3.5)*Fig. 7(a)				Gyeongju (M3.5)**Fig. 7(b)			
	East-West		North-South		East-West		North-South	
	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R
MOCT (1997)	0.009	0.4145	0.0089	0.414	0.0121	0.9229	0.0113	0.902
Oh and Shin (2013)	0.0013	0.4119	0.0016	0.4137	0.0018	0.9224	0.0028	0.9016
Yun et al. (2008)	0.0014	0.3552	0.0017	0.3633	0.001	0.937	0.0018	0.9193

Equations	Pohang (M3.6)				Pohang (M3.5)			
	East-West		North-South		East-West		North-South	
	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R
MOCT (1997)	0.0147	0.7889	0.0151	0.6032	0.0126	0.7817	0.0129	0.6051
Oh and Shin (2013)	0.0009	0.7911	0.0012	0.6042	0.0008	0.7848	0.001	0.6066
Yun et al. (2008)	0.0023	0.7992	0.0027	0.5873	0.0016	0.8002	0.002	0.5924

Yun et al. (2008)방법과 Oh and Shin (2013) 방법에 따른 PGA를 비교하여 나타낸 것이고, Figs. 7(c)와 (d)는 규모 3.5와 규모 3.6의 포항지진에 대한 기존 거리감쇄식을 비교한 것이다. 두 거리감쇄식 모두 M3.1~M4.0의 지진에 대해서는 거리에 따른 PGA를 어느 정도 신뢰성 있게 예측하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 그림에서 나타내듯이 M3.0이하일 때 보다 거리에 따른 PGA 크기의 차가 좁아진 경향이 있다. 하지만 Yun et al. (2008) 방법과 Oh and Shin (2013)의 거리감쇄 경향은 거의 유사하게 나타났다. RMSE의 경우 대부분의 경우 Oh and Shin (2013) 방법이 가장 낮게 나타났으며, 상관계수를 나타내는 R의 경우 세 방법에서 유사하게 나타났다.

Fig. 8은 M4.1~M5.0의 지진시 실제 계측 PGA와 기존 거리감쇄식을 비교한 그림이고, Table 4는 RMSE와 R을 비교한 것이다. M4.0이상의 지진에 대해서는 M4.0미만과 비교하여 Yun et al. (2008)과 Oh and Shin (2013) 거리에 대해 추정되는 PGA가 역전되는 경향이 발생하였다. 즉, 거리가 멀어짐에 따라 Oh and Shin (2013) 방법보다 Yun et al. (2008) 방법이 PGA를 약간 과대평가하는 경향이 발견되었다. 이는 M4.0미만에서 보인 경향과는 정반대의 경향을 나타낸다. Table 4의 RMSE의 경우는 Oh and Shin (2013)방법이 Yun et al. (2008)방법 보다 작거나 유사한

값을 나타냈으며, R의 경우 0.6~0.9내외로 산정되었다. 즉, M3.1~M4.0에서와 마찬가지로 M4.1~M5.0에서는 Yun et al. (2008)과 Oh and Shin (2013)방법이 유사한 경향과 PGA 추정치를 나타내는 것으로 나타났으며, RMSE와 R에 의하면 Oh and Shin (2013)방법이 조금 더 신뢰성이 높은 것으로 판단된다.

Fig. 9는 M5.1이상으로 국내 지진관측 이래 가장 큰 규모 1, 2위인 경주 및 포항지진을 나타내고 있고, Table 5는 해당 RMSE와 R을 비교한 것이다. 그림에서 나타내듯이 경주지진 및 포항지진과 같이 국내에서는 상대적으로 큰 지진(M5.1이상)의 경우는 Yun et al. (2008)의 방법이 다른 방법에 비해 상대적으로 신뢰성 있는 예측치를 나타내는 것으로 판단된다. 즉 RMSE는 경주지진의 경우 Oh and Shin (2013)는 약 0.03인데 반해 Yun et al. (2008)는 0.03보다 작은 값을 보였고 포항지진의 경우도 각각 0.017과 0.011~0.012 정도로 나타났다. 상관계수 R의 경우도 모든 식에 대해 0.8이상의 값을 보였다. 따라서, M4.0이하일 경우는 Yun et al. (2008)과 Oh and Shin (2013)의 식으로 어느정도 추정 가능할 것으로 판단되며 상대적으로 큰 규모인 M5.0이상의 경우는 Yun et al. (2008)의 방법이 거리감쇄에 따른 PGA의 추정이 타월할 것으로 판단된다.

Fig. 8. Relationship Between PGA and Distance from Epicenter for M4.1 to M5.0 Earthquakes

Table 4. RMSE and R for M4.1 to M5.0 Earthquakes

Equations	Gyeongju (M4.5)				Pohang (M4.3)				Pohang (M4.6)			
	East-West		North-South		East-West		North-South		East-West		North-South	
	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R
MOCT (1997)	0.0205	0.8541	0.02	0.8896	0.0105	0.7897	0.0106	0.7976	0.0183	0.452	0.0179	0.6076
Oh and Shin (2013)	0.0046	0.8528	0.0046	0.8848	0.0031	0.7869	0.0029	0.7907	0.0045	0.4314	0.0035	0.5889
Yun et al. (2008)	0.006	0.8006	0.0052	0.8566	0.0032	0.7844	0.0029	0.7854	0.0055	0.3985	0.0046	0.5602

Fig. 9. Relationship Between PGA and Distance from Epicenter for Larger than M5.1 Earthquakes

Table 5. RMSE and R for Larger than M5.1 Earthquakes

Equations	Gyeongju (M5.8)				Pohang (M5.4)			
	East-West		North-South		East-West		North-South	
	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R
MOCT (1997)	0.0351	0.8767	0.0389	0.8367	0.0209	0.9023	0.0179	0.9431
Oh and Shin (2013)	0.0308	0.869	0.0302	0.8425	0.0165	0.8901	0.0174	0.9352
Yun et al. (2008)	0.0262	0.861	0.0296	0.8129	0.012	0.9037	0.0114	0.9417

5. 결 론

본 연구에서는 최근 국내에 이례적으로 발생한 경주지진 (M5.8), 포항지진(M5.4)을 포함한 지진계측자료(PGA)를 활용하여 기존 국내에 제안된 거리감쇄식에 대한 적용가능 여부에 대한 연구를 수행하였다. 즉, 2016년 9월 12일에 발생한 경주지진 이후 2017년 11월 15일 포항지진 및 여진을 포함하여 M2.0이상의 지진 15개에 대해서 PGA-거리 감쇄에 대한 상관관계를 검토하였다. 기존 지진동감쇄식 또는 거리 감쇄식에 대해 국내에서 제안된 대표적인 방법인 MOCT (1997), Yun et al. (2008), Oh and Shin (2013)방법을 분석 및 비교하여 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 경주지진 및 포항지진에 대해 각 관측소에서 수집된 데이터를 이용하여 PGA-거리 관계를 도시한 결과, 모든 데이터가 거리가 멀어질수록 PGA가 감소하는 경향을 나타내었다. 다만, 지층구조 및 특성에 따른 감쇄특성이 고려되지 않았기 때문에 같은 거리라고 하더라도 PGA의 크기는 다소 차이가 발생하였다.

- (2) 국내의 가장 오래된 연구결과인 MOCT (1997) 방법은 모든 지진에 대해 PGA를 과대평가하는 결과를 도출하였으며, 이를 예측에 적용한다면 보수적인 결과를 초래할 것으로 판단된다.
- (3) 국내 지진규모 M2.1~M3.0의 경우는 Yun et al. (2008) 방법과 Oh and Shin (2013)의 방법이 유사한 경향을 보이고 있고 Oh and Shin (2013) 방법이 거리에 따라 PGA를 약간 과대평가하는 경향을 나타내었다. 하지만 전체적인 경향은 Yun et al. (2008) 방법이 합리적인 것으로 판단된다.
- (4) 국내 지진규모 M3.1~M5.0의 경우는 Yun et al. (2008) 과 Oh and Shin (2013) 방법에 따른 예측이 유사하게 나타남에 따라 두 개의 공식이 적용가능할 것으로 판단된다.
- (5) 국내 지진규모 M4.0이상, 특히 M5.0이상의 경우는 Yun et al. (2008)에 의한 거리감쇄식이 거리에 따른 PGA 추정이 탁월하며 향후 지진가속도 계측기 등 설치되지 않은 소규모시설에서의 지진시 지진동 추정 에 효과적일 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 국토 교통기술촉진연구사업의 연구비지원(18CTAP-C130227-02)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- The Asia Business Daily. (2017). [Pohang Earthquake] Bore hole at eight sites suspected of liquefaction... and when is the result? Retrieved from <http://www.asiae.co.kr/news/view.htm?idxno=2017112115594653445>
- Boore, D.M. (2003). Simulation of ground motion using the stochastic method. *Pure Appl. Geophys.*, Vol. 160, No. 3-4, pp. 635-676.
- Chang, S.W., Bray, J.D., and Seed, R.B. (1996). Engineering implications of ground motions from the Northridge earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 86, No. 1B, pp. S270-S288.
- Dobry, R., Borcherdt, R.D., Crouse, C.B., Idriss, I.M., Joyner, W.B., Martin, G.R., et al. (2000). New site coefficients and site classification system used in recent building seismic code provisions. *Earthquake Spectra*, Vol. 16, No. 1, pp. 41-67.
- KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources). (2006). *Research on operating & maintenance of integrated seismic stations and development of early warning system (Pusan- Gyeongnam area)*. Ministry of Science and Technology.
- Kim, D.S. (2017). Ground amplification and liquefaction during Pohang earthquake. *Proceedings of Symposium on characteristics and earthquake disaster prevention of SOC facilities during Pohang earthquake*, Korean Society of Civil Engineers & Earthquake Engineering Society of Korea.
- KMA (Korea Meteorological Administration). (2016). *2016 Earthquake annual report*.
- KMA. (2017). *2017 Earthquake annual report*.
- Lin, C.C.J., and Chai, J.F. (2008). Reconnaissance report on the China Wenchuan earthquake May 12 2008. *NCREE Newsletter*, Vol. 3, No. 3, pp. 11-15.
- MOCT (Ministry of Construction & Transportation). (1997). *Study on seismic design criteria (II): Seismic design performance criteria and economic evaluation*. pp. 259-267.
- Molas, G.L., and Yamazaki, F. (1995). Attenuation of earthquake ground motion in Japan including deep focus events. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 85, No. 3, pp. 1343-1358.
- NDMI (National Disaster Management Research Institute). (2014). *Countermeasures for improvement of facility risk management and analysis of dynamic properties based on Vibration Measurement Data*. pp. 120-141.
- Oh, S.H., and Shin, S.H. (2013). Analytical study on the distance-attenuation equation of volcanic earthquakes. *Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea*, Vol. 15, No. 6, pp. 227-235.
- Seed, H.B., Romo, M.P., Sun, J., Jaime, A., and Lysmer, J. (1987). *Relationships between soil conditions and earthquake ground motions in Mexico City in the earthquake of September 19, 1985*. Report No. UCB/EERC-87/15, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Sugito, M., Oka, F., Yashima, A., Furumoto, Y., and Yamada, K. (2000). Time-dependent ground motion amplification characteristics at reclaimed land after the 1995 Hyogoken Nambu earthquake. *Engineering Geology*, Vol. 56, No. 1-2, pp. 137-150.
- Sun, C.G., Kim, D.S., and Chung, C.K. (2005). Geologic site conditions and site coefficients for estimating earthquake ground motions in the inland areas of Korea. *Engineering Geology*, Vol. 81, No. 4, pp. 446-469.
- Sun, C., Oh, T., Park, J., and Chi, H. (2016). *Seismic characteristics of the Gyeongju earthquake of September 12*. Special Session on Analysis and Evaluation of Gyeongju Earthquake(M5.8), Earthquake Engineering Society of Korea.
- Tokimatsu, K., Arai, H., and Asaka, Y. (1998). Two-dimensional shear wave structure and ground motion characteristics in Kobe based on microtremor measurements. In P. Dakoulas, M. Yegian, and R.D. Holtz (Eds.), *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III* (pp. 703-713), Geotechnical Special Publication No. 75, ASCE.
- Tsai, Y.B., and Huang, M.W. (2000). Strong ground motion characteristics of the Chi-Chi, Taiwan earthquake of September 21, 1999. *Earthquake Engineering and Engineering Seismology*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-21.
- Yun, K.-H. (2007). Two-dimensional *Q* tomography inversion for the southern part of the Korean Peninsula. Ph.D. dissertation, Seoul National University.
- Yun, K.-H., Park, D.-H., Chang, C.-J., and Sim, T.-M. (2008). Estimation of aleatory uncertainty of the Ground-

Motion attenuation relation based on the observed data.
Proceedings of EESK Conference 2008, Earthquake
Engineering Society of Korea, pp. 116-123.

<i>Received</i>	■	August 21, 2018
<i>Revised</i>	■	August 23, 2018
<i>Accepted</i>	■	August 27, 2018