

국내 중규모 지진에 대한 계측진도 추정식 연구

Study on the Relations to Estimate Instrumental Seismic Intensities for the Moderate Earthquakes in South Korea

연관희^{1)*} · 이강렬¹⁾

Yun, Kwan-Hee^{1)*} · Lee, Kang-Ryel¹⁾

¹⁾한전전력연구원 구조내진그룹 책임·선임연구원

¹⁾Structural & Seismic Tech. Group, KEPCO (Korea Electric Power Corporation) Research Institute

/ A B S T R A C T /

Recent two moderate earthquakes (2016 $M_w=5.4$ Gyeongju and 2017 $M_w=5.5$ Pohang) in Korea provided the unique chance of developing a set of relations to estimate instrumental seismic intensity in Korea by augmenting the time-history data from MMI seismic intensity regions above V to the insufficient data previously accumulated from the MMI regions limited up to IV. The MMI intensity regions of V and VI was identified by delineating the epicentral distance from the reference intensity statistics in distance derived by using the integrated MMI data obtained by combining the intensity survey results of KMA (Korea Meteorological Administration) and 'DYFI (Did You Feel It)' MMIs of USGS. The time-histories of the seismic stations from the MMI intensity regions above V were then preprocessed by applying the previously developed site-correction filters to be converted to a site-equivalent condition in a manner consistent with the previous study. The average values of the ground-motion parameters for the three ground motion parameters of PGA, PGV and BSPGA (Bracketed Summation of PGA per second for 30 seconds) were calculated for the MMI=V and VI and used to generate the dataset of the average values of the ground-motion parameters for the individual MMIs from I to VI. Based on this dataset, the linear regression analysis resulted in the following relations with proposed valid ranges of MMI.

$$\begin{aligned} \text{MMI} &= 2.36 \times \log_{10}(\text{PGA}(\text{gal})) + 1.44 & (I \leq \text{MMI} < \text{VII}) \\ \text{MMI} &= 2.44 \times \log_{10}(\text{PGV}(\text{kine})) + 4.86 & (I \leq \text{MMI} < \text{X}) \\ \text{MMI} &= 2.59 \times \log_{10}(\text{BSPGA}(\text{gal-sec})) - 1.02 & (I \leq \text{MMI} < \text{VII} \sim \text{VIII}) \end{aligned}$$

Comparison with other empirical relations developed for the various seismological environments such as western, central, and eastern U.S. leads to the conclusion that the PGV-MMI relation above can be reasonably extrapolated to the MMI up to X beyond the observed MMI limit of VI, while the PGA-MMI is only valid up to VII. An explanatory interpretation was also tried for the obvious difference of the MMI attenuation pattern in distance between the two moderate earthquakes by introducing the crustal structure with Conrad discontinuity, depth-varying Q-values and the relevant wave phases.

Key words: Moderate earthquake, Instrumental seismic intensity, PGA, PGV, BSPGA

1. 서론

일반적으로 지진진도는 인간의 지진 감지정도 및 일반 구조물의 지진피해 현장 조사결과로부터 전문가가 주관적으로 결정한다. 역으로 특정 지역

의 지진진도를 알 경우, 해당 지역의 지진피해 현황을 추정할 수 있다. 지진진도를 신속하게 평가하기 위한 방법으로는 해당 지역에서 계측된 지진 자료를 이용하여, 지진파형으로부터 특정한 지진동 파라미터를 도출하고 이를 이용하여 진도를 추정할 수 있다. 한편 지진파형의 파라미터를 이용하여 진도를 추정하기 위해서는, 동일한 진도를 갖는 등진도구역 설정 및 진도구역별로 수집된 지진파형에 대한 파라미터 도출 및 진도와와의 상관성 분석이 필요하다. 관련된 선행 연구[1, 2]에서는 기상청 지진연보를 기반으로 1999~2010년 기간 중 관측된 자료(65개 지진, 645개 기록)를 이용하여 계

*Corresponding author: Yun, Kwan-Hee

E-mail: geoyun1@kepco.co.kr

(Received June 14, 2018; Revised July 11, 2018; Accepted July 12, 2018)

측진도 추정에 활용될 수 있는 여러 종류의 지진동 파라미터로부터 계속진도를 추정하고, 이를 기상청 지진연보에서 보고된 지진진도와 비교한 바 있다. 해당 연구에서는 관측된 자료를 동일한 부지특성을 갖는 자료로 변환하기 위해, Class D 관측소[3]의 부지증폭특성을 갖도록 스펙트럼 크기를 보정하였으며, 관측자료의 파형위상정보는 동일하게 사용하였다. 이때 계속진도 추정을 위해 검토한 지진동 파라미터로는 Arias Intensity (gal-sec), PGA(gal), JMA(Japanese Meteorological Agency)의 A0(gal), Housner SI(Spectral Intensity, cm), FASMMI(Fourier Amplitude Spectra MMI), PGV(kine), BSPGA(Bracketed Summation of PGA per second, gal-sec), CAV(Cumulative Absolute Velocity, gal-sec)의 8종류가 사용되었다. 이 연구의 주요 연구결과로부터 전세계 지역에서 일반적으로 활용되는 PGA와 PGV의 지진동 파라미터는 상대적으로 높은 진도추정오차와 추정식의 낮은 선형성을 갖는 것으로 나타났으며, 국내 유감지진자료의 진도별 푸리에스펙트럼 통계모형을 이용하는 FASMMI와, 일본에서 개발된 JMA A0 계속진도는 상대적으로 높은 진도추정 신뢰도를 나타내었다. 또한 디지털 입력자료 전체를 이용하고 푸리에 변환 과정을 필요로 하는 FASMMI와 JMA A0와는 다르게, 초당 지진가속도 최대값만을 이용하여 30초간 합산하는 지진동 파라미터인 BSPGA가 FASMMI와 JMA A0와 유사한 정도의 신뢰도로 진도를 추정하는 것으로 확인되었다.

또한 관련된 후속 연구[4]에서는 선행 연구 이후의 2011~2015년 기간 중 발간된 기상청 지진연보[5] 및 지진관측자료를 기반으로 대부분 MMI IV(4)이하인 등진도구역별 지진관측자료를 추가로 수집(15개 지진, 569개 기록)하고 기존 연구와 동일한 분석을 수행하였다. 이 연구에서는 기존 진도자료와 신규 진도자료를 통합한 후 기존과 동일하게 8가지의 지진동 파라미터에 대한 진도추정의 오차 분석 및 관련된 선형식을 제시하였다. 이 후속연구에 따르면, 선행 연구에서 진도 추정시 최적의 지진동 파라미터로 평가된 BSPGA는 지진자료를 새로이 추가하더라도 가장 낮은 RMS(Root Mean Square) 진도추정 오차(RMS=0.71) 및 가장 높은 선형 추세식의 선형식 상관계수($\rho=0.94$) 값을 나타내는 지진동 파라미터임을 확인할 수 있었다. 반면 PGA/PGV를 이용한 진도추정의 오차와 선형식 상관계수는 각각 RMS=0.81/0.99, $\rho=0.86/0.88$ 로서, 이전 연구에서와 동일하게 높은 진도추정 오차와 낮은 선형성을 나타내었다.

한편 이상의 선행 연구에서 사용한 자료는 MMI IV 이하의 진도구역에 대한 자료가 대부분이었으며, MMI V 이상에 해당되는 진도구역에서 관측된 지진파형자료는 거의 없었다. 따라서 이전에 제시된 지진동 파라미터별 진도추정식을 외삽하여 MMI V 이상의 진도추정에 적합한 지에 대해서는 검증이 필요한 상황이었으며, 특별히 MMI VIII 이상까지의 피해진도 추정에는 많은 무리가 있었다.

그러나 2015년 이후 2016년 경주지진($M_w=5.4$, USGS) 및 2017년 포항지진($M_w=5.5$, USGS) 등의 중규모 지진($5.0 \leq M_w \leq 5.9$) 발생으로 인해 최대 진도가 VIII인 MMI V 이상의 진도가 넓은 지역(50~100 km)에 대해 보고되었으며, 지진관측망의 조밀한 관측소 밀도로 인해 MMI V 이상의 진도구역에서의 지진관측자료를 다수 확보할 수 있는 상황이 되었다.

본 연구에서는 MMI IV 이하의 기존 자료와 경주 및 포항지진으로 확보된 MMI V 이상의 지진자료를 통합적으로 이용하여, 향후 국내에서 발생할 수 있는 중규모 이상의 지진 발생시에 계속진도 추정에 활용할 수 있는 진도 추정식을 개발하고자 하였다. 이러한 연구수행시 유념할 사항은 MMI

V 이상의 진도구역을 상세하고도 신뢰성 있게 평가해야 한다는 것이다. 왜냐하면 해당 진도에 속한 지진관측자료가 존재하기는 하나, MMI IV 이하의 진도구역에 속한 지진파형 자료에 비해서는 자료의 개수가 상대적으로 많지 않고, 따라서 가능하면 정확하고 세부적인 진도구역도를 먼저 작성하고 이를 기반으로 진도구역별 지진관측자료에 대한 지진동 파라미터를 추출한 후 계속진도 추정식을 도출해야지 만이, 추정된 식을 신뢰성 있게 외삽하여 MMI VIII 이상의 진도 추정에 활용할 수 있기 때문이다.

2. 본 론

본 연구에서는 경주 및 포항지진에 대한 진앙거리별 진도를 평가한 후 MMI V 와 MMI VI 이상에 해당되는 진앙거리를 도출한 후, 이를 기준으로 해당 진도의 거리범위를 갖는 관측자료를 수집하였다. 해당 관측자료는 이전 연구와 동일하게 부지특성이 보정되었으며[4], 보정된 관측 파형으로부터 지진동 파라미터를 도출하고, 이전 연구로부터 축적된 지진동 파라미터-진도 자료를 함께 이용하여 특정 지진동 파라미터에 대한 진도 추정식을 재평가하였다. 아울러 재평가된 추정식을 이용하여 경주 및 포항지진에 대한 계속진도의 특징을 검토 및 해석해 보았으며, 해당 식이 강진에 따른 피해 진도평가시에도 활용될 수 있는 지도 살펴보았다.

2.1 경주 및 포항지진에 대한 거리별 진도평가

경주 및 포항지진 등의 피해지진 발생 이전에는 도출할 수 없었던, MMI V ~VIII 범위의 진도를 계속진도로 추정하기 위해서는 포항지진 및 경주지진에 대해 지역별로 신뢰성 있는 진도평가 결과가 선행되어야 한다.

해당 지진에 대한 진도평가는 국내에서는 기상청(이하 KMA(Korea Meteorological Administration))이 수행한 바 있으며[6, 7], 미국 USGS는 인터넷 설문지 조사 방식으로 DYFI(Did You Feel It?) 진도를 평가한 바 있다[8, 9]. 이 밖에 기상청은 지진연보[5]를 통해 진도분포도를 제시한 바 있으나, 해당 결과는 몇몇 대도시(포항지진의 경우 11개 도시, 경주지진의 경우 10개 도시)에 위치하고 있는 기상청 기상대로부터 보고된 진도를 기반으로 작성된 한반도 전체의 개략적인 광역 진도도로서, MMI V 이상의 진앙지 인근지역에 대한 상세하고도 국부적인 진도평가의 입력자료로 활용하기에는 부적절하다고 판단하여 본 연구에서는 분석에 이용하지 않고 비교 자료로만 활용하였다.

2017 포항지진 및 2016 경주지진에 대한 지진진도 자료로는 Table 1과 같이 기상청[6, 7], USGS의 진도자료[8, 9]를 활용하였다. 기상청은 현장 조사를 통해 2016년 경주지진 인근 지역에 대해 5,157개, 2017년 포항지

Table 1. Number of Intensity data surveyed or reported with observed records for Gyeongju and Pohang earthquakes

Event	# of Seismic Intensity data			
	KMA survey result		USGS DYFI (②)	①+②
	Original	1 km ² Grid Max. (①)		
2016 Gyeongju	5,157	343	140	483
2017 Pohang	20,074	86	129	215

진에 대해서는 20,074개의 인근 지점에 대한 진도자료를 확보하였다. 한편 [7] 문헌에 따르면 2017년 포항지진에 대한 기상청 상세 진도추정 결과는 진앙거리 15 km 이내, 2016년 경주지진에 대해서는 진앙거리 30 km 이내에 주로 분포한다. 기상청의 상세 진도평가 결과는 인접 지역에 여러개의 값이 중첩되어 보고되는 경우가 있는데, 이 경우에는 1 km² 격자내에서 최대값을 취하여 해당 격자 중심 위치에 최종 진도값으로 부여하였다(Table 1의 1 km² Grid Max.). 또한 USGS의 진도에 대해서는 거리별 진도 표준편차를 저감하기 위해 최저 진도값(경주 및 포항지진에 대해 각각 MMI II, I)은 제외시켰다. Table 1에서 포항지진의 경우 기상청이 조사한 진도 조사자료는 다수이나 조사된 피해가 집중된 면적이 좁기 때문에 1 km² 격자별 진도개수는 경주지진에 비해 상대적으로 작은 것으로 나타났다.

2017년 포항지진 및 2016년 경주지진에 대해 신뢰성 있는 거리별 진도 분포를 계산하기 위해, 기상청의 상세 진도평가 결과와 USGS의 광역 진도평가 결과를 통합한 후 로그 거리별로 진도의 평균을 계산하였다(이하 거리별 ‘비교기준 진도(Reference MMI)’). 이상에서와 같이 기상청의 상세 진도평가 결과와 USGS의 광역 진도평가를 동시에 활용하고자 한 이유는, 기상청의 조사결과는 지진의 피해 조사 관점에서 MMI V 이상의 비교적 큰 진도를 갖는 근거리 지역에 상세한 진도 자료가 집중된 반면, USGS의 DYFI는 MMI V 이하의 낮은 진도를 갖는 전국적인 광범위한 지역에 대한 진도 자료까지도 포함되어 있기 때문이다. MMI V 를 갖는 지역의 범위를 결정하기 위해서는 MMI IV와 V의 경계(MMI=4.5)를 구분해야 하기 때문에 MMI V 이하의 광역적인 진도자료의 성격을 갖는 USGS의 자료는 보완적으로 활용될 수 있다. 특히 경주 및 포항지진과 같은 중규모 지진에 대한 피해는 근거리 집중되기 때문에 근거리 지역에 대해 상세히 조사한 기상청의 진도 조사결과도 함께 사용하는 것은 중요하다고 할 수 있다.

Fig. 1은 포항지진 및 경주지진에 대한 기상청의 상세 진도평가(×, Table 1의 1 km² Grid Max.) 및 USGS의 DYFI 진도 평가 결과(*)와,

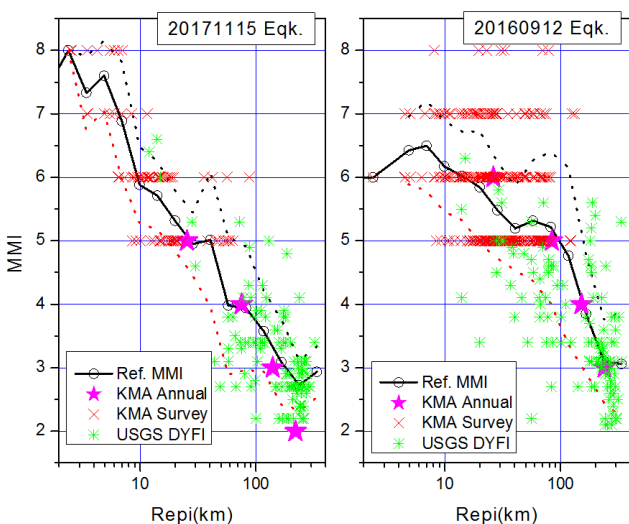


Fig. 1. MMI data distribution in distance for Pohang (20171115) and Gyeongju (20160912) earthquakes from KMA survey results and USGS DYFI (Did You Fell It?). The Reference MMIs are determined by the mean MMIs in distance bins to delineate the distance of MMI=V and VI. ‘KMA Annual’ is the MMI from earthquake annual reports of KMA ([5])

이러한 진도자료를 통합하여 도출한 거리별 진도평균(○) 및 표준편차 범위(점선)를 나타내고 있다. Fig. 1에는 기상청 지진연보의 진도도를 기반으로 도출한 경주 및 포항지진에 대한 거리별 진도(★, KMA Annual)를 함께 표시하였다. 기상청의 지진연보 진도(KMA Annual)로는 계측진도 값을 제공한 지진관측소의 위치에 해당하는 진도구역의 진도값을 이용하였으며, 동일한 진도 값을 갖는 여러 지진관측소의 진앙거리에 대한 중앙값(median) 거리와 해당 진도값을 그래프 상에 표시하였다. 비교 결과 경주지진의 경우에는 전반적으로 본 연구의 거리별 ‘비교기준 진도’와 기상청 지진연보의 진도분포는 전반적으로 잘 일치하나(Fig. 1 우측 그림), 포항지진의 경우에는 100 km 이상의 진앙거리범위에서 MMI 0.5~1의 범위로 기상청 지진연보 진도(KMA Annual)가 낮은 것으로 평가되었다(Fig. 1 좌측 그림).

서로 유사한 지진규모($M_w \sim 5.5$)를 갖는 포항지진과 경주지진의 거리별 비교기준 진도 평가결과의 상호 비교(Fig. 2 참조)에서는 10 km 이내의 근거리에서는 포항지진이 MMI 1~2 정도 큰 값을 나타내며, 진앙거리 범위 40 km 까지는 상호 유사하나 이 이상에서는 포항지진의 진도가 200 km 까지는 작게 나타나며, 200 km 이상에서는 상호 유사한 크기를 나타내고 있다. 포항지진 및 경주지진의 진원 깊이는 각각 5 km, 15 km [5]로서 큰 차이를 나타내며, 이상에서 설명한 진원 깊이별 진도감쇠의 특성은 미국 중동부에서의 최근 연구결과[10]와도 유사한 경향이다.

본 연구에서는 Fig. 1에서 도출된 거리별 진도감쇠형태를 기반으로 MMI V에 대해서는 MMI=4.5~5.5의 범위에 대한 거리 경계기준을 설정하고, MMI VI에 대해서는 MMI=5.5 이상인 거리를 경계기준으로 설정한 후 해당 거리범위에 속하는 지진관측자료를 이용하여 파형의 지진동 파라미터를 도출하고 기준에 평가된 MMI IV 이하의 진도별 지진동 파라미터 자료[4]를 동시에 이용하여 지진동 파라미터별 진도추정식을 개발하였다. 지진동 파라미터는 원자료(지반가속도파형)에 대해 부지보정필터를 적용한 후 얻어진 파형자료를 이용하여 계산하였다. 부지보정필터는 다양한 관측환경에서 계측된 지진자료를 동일한 가상의 기반암([3]의 Class D)으로

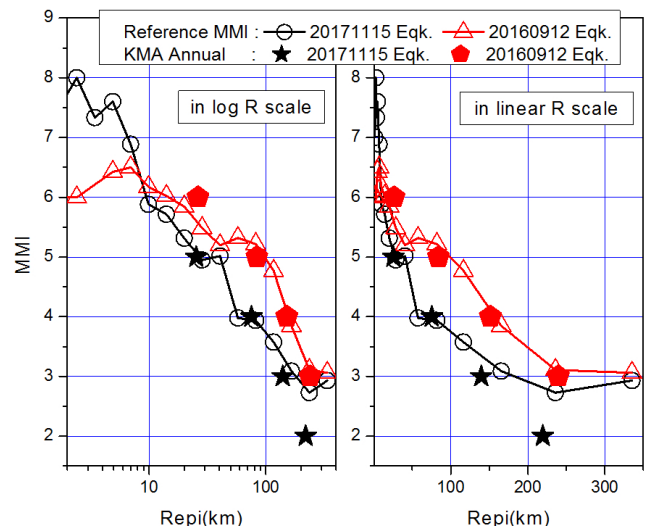


Fig. 2. Comparison of the Reference MMIs and KMA Annual (Fig. 1) in different distance scales for the Gyeongju and Pohang earthquakes

변환하기 위해 사용되었다.

MMI IV와 V의 경계거리 및 MMI V와 VI의 경계거리는 포항지진의 경우는 각각 48.6 km, 16.6 km이었으며, 경주지진의 경우에는 각각 129.4 km, 27.6 km로 계산되었다. 한편 진앙지 근접지점에서는 MMI ~VIII까지도 보고되고 있으므로, MMI VI의 최소 거리범위로는 10 km를 일괄적으로 적용하였다. 본 연구에서는 MMI VII 이상의 진도구역에 대한 지진파형 자료를 사용하지 않았는데, 이 이유는 MMI VII 이상의 지역은 진앙거리 10 km 이내의 범위로서 해당 진도구역에 속한 지진관측자료의 개수가 너무 적어 통계적으로 유의미하지 않기 때문이며 또한 MMI VII과 VIII의 경계를 명확히 구분할 수 있는 조사 자료도 존재하지 않았기 때문이었다.

관련 연구에서[11]는 국내와 유사한 전세계 SCR(Stable Continental Region) 지역에 대해 MMI IV, V, VI에 대한 감진면적식을 제시한 바 있으며, 감진면적이 동심원임을 가정하면 감진면적식으로부터 진도별 감진 반경을 도출할 수 있다. 한편 MMI V에 대한 SCR 지역의 감진면적은 168 km로 계산되며, 국내에서 MMI III에 대한 감진면적식[12]으로부터 도출된 규모 5.5에 대한 MMI V의 감진반경은 150 km로 제시되었다[13]. 이러한 추정값들은 본 연구에서 도출된 경주지진에 대한 MMI V의 진도 경계 거리(MMI=4.5)인 130 km와 유사한 거리범위로 판단된다. 반면 포항지진의 경우, MMI V에 대한 감진반경은 50 km로서, SCR 지역의 일반적인 값과 크게 어긋나는데, 이러한 결과는 포항지진은 SCR 지역의 대표적인 지진이 아닌 특이한 지진으로 분류되어 활용되어야 함을 시사한다.

2.2 경주 및 포항지진 관측자료 기반 계속진도 추정식 재평가

본 연구에서는 ‘2.1’에서 논의된 경주 및 포항지진에 대한 거리별 진도 평가 결과로부터 도출된 MMI V와 MMI VI의 진도구역에 속한 지진관측 자료와, 기존 연구에서 활용하였던 MMI IV 이하의 진도구역에 대한 지진

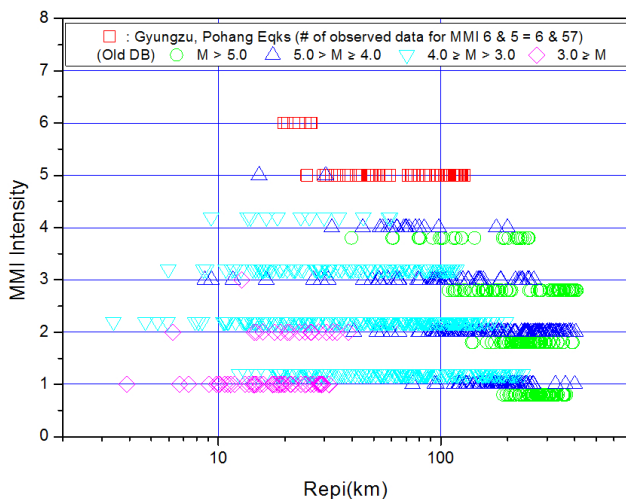


Fig. 3. Magnitude (M)-Distance (R) distribution of the integrated MMI data (record number=1,277 for 82 events) from the previous study (Old DB from [4]) and the recent moderate earthquakes (Pohang and Gyeongju). MMI data are intentionally displayed shifted a little from the original values to differentiate the data distribution according to M-R ranges

관측자료를 통합적으로 활용하여(Fig. 3 참조) 이전 연구[1, 2, 4]에서 검토 하였던 다양한 지진동 파라미터를 이용한 진도추정식을 재평가하였다. Table 2에는 기존 자료 및 이번 연구에서 추가된 진도구역별 지진자료의 개수를 정리하였다. 연구에 사용된 자료는 82개 지진에 대한 1,277개가 활용되었으며, 기존 자료에 추가된 MMI V와 MMI VI의 진도구역별 지진관측자료의 개수는 각각 57개, 6개이었다.

경주 및 포항지진에 대한 지진관측자료를 진도평가에 활용하기 위해서는 선행 연구와 동일하게 관측자료의 부지특성을 사전에 보정해 주어야 한다. 이를 위해 관련 연구[4]에서 개발된 관측소별 부지보정필터를 관측된 파형에 적용하여 동일한 부지특성에 대한 관측 파형으로 변환시켰다. Fig. 4는 경주 및 포항지진에 대한 국내 지진관측소의 파형자료를 부지 보정하기 전과 후의 PGA 값을 특정 거리감쇠식과 비교한 그림이다. Fig. 4에서 부지보정을 적용하기 전의 경주 및 포항지진에 대한 거리별 PGA 감쇠 패턴은 예상되는 거리감쇠식([14]의 WSA식, KEPRIWSA in Fig. 4)과 비교할 수 없을 정도로 PGA의 산포도가 높았으나, 부지보정을 한 경우에는 상호 비교가 잘 되며, 포항지진과 경주지진의 거리별 PGA 감쇠 패턴이 확연하게 다르게 나타남을 알 수 있다. 즉 포항지진은 경주지진에 비해, 100 km 이내의 진앙거리에서 보다 급격하게 감쇠가 일어나나, 200 km 이상에서는 상호 유사한 감쇠크기를 나타냄을 알 수 있다. 이러한 경향은 Fig. 2의 포항지진 및 경주지진의 ‘비교기준 진도’ 감쇠특성과도 유사하다. Fig. 4의 우측에는 포항지진의 부지보정된 PGA 값에 대한 3차 다항 적합식도 같이 표시되어 있는데, 이 적합식은 깊이까지도 보정한 예상 감쇠패턴(KEPRIWSA (h=6 km))과도 크게 다름을 알 수 있으며, 향후 강지진동에 대한 거리-감쇠식 개발시 포항지진을 고려하기 위해서는 상호 차이에 대한 정량적인 해석이 필요하다고 판단된다. 이 밖에도 부지보정한 후의 포항지진에 대한 PGA 산포도는 100 km 이내에서 경주지진보다 상대적으로 크게 나타나는 특징이 있다.

본 연구에서는 선행연구[4]에서 검토 하였던 다양한 지진동 파라미터 중 PGA, PGV 등의 PGM(Peak Ground Motion) 및 BSPGA에 대해서만 중 규모 지진파형자료를 이용한 계속진도 추정식을 재평가하였다. BSPGA는 관련 연구[4]에서 진도추정과 관련된 오차 및 선행 상관성이 가장 높은 지진동 파라미터로 평가되었으며, PGM은 미국 USGS의 Shakemap[15] 및 세계적으로 여러국가에서 계속진도 평가에 가장 많이 사용되는 지진동 파라미터이다. 또한 일반적으로 강지진동 분야에서는 PGM에 대한 거리-감쇠식에 대한 경험적인 연구 및 지진취약도 연구결과가 다수 있어 활용도가 높은 지진동 파라미터이다. 기상청은 최근에 PGA를 이용한 진도발표를 시

Table 2. Number of seismograms used for this study according to seismic intensities

MMI		6	5	4	3	2	1	sum
# of data	total	6	59	64	256	495	397	1,277 (# of event=82)
	Ref. [1, 2]	-	2	49	185	284	125	645 (# of event=65)
	Ref. [4]	-	-	15	71	211	272	569 (# of event=15)
	This Study	6	57	-	-	-	-	63 (# of event=2)

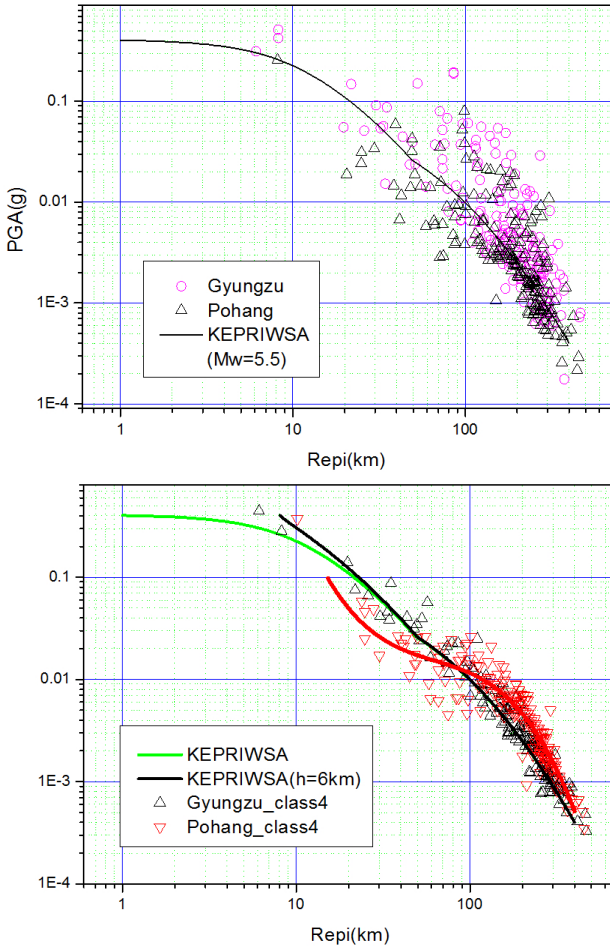


Fig. 4. PGAs of seismic stations in Korea for Gyeongju and Pohang earthquakes before (upper) and after (lower) the correction of site amplification by time-domain filtering [4]. KEPRIWSA is the PGA distance-attenuation relation for the WSA site from [14]. KEPRIWSA (h=6 km) is the relation corrected for depth=6 km from KEPRIWSA developed for depth=11 km. A cubic polynomial fitting line for the site-corrected PGAs for the Pohang earthquake is also shown in the right figure

범적으로 시행하고 있다[16].

Fig. 5는 Table 3의 PGA, PGV 및 BSPGA의 진도별 로그평균에 대한 선형 진도추정식 결과(식(1, 2, 3) 참조)를 관련 자료와 함께 표시한 그림이다. Fig. 5에서 알 수 있는 바와 같이, 이전 연구[4]에서와 같이 BSPGA를 이용한 진도추정식의 기울기에 대한 표준편차(STD)가 상대적으로 낮게 평가되어 신뢰성 있는 진도 추정 파라미터임을 알 수 있다.

$$MMI = 2.36 \times \log_{10}(PGA(gal)) + 1.44 \quad (1)$$

$$MMI = 2.44 \times \log_{10}(PGV(kine)) + 4.86 \quad (2)$$

$$MMI = 2.59 \times \log_{10}(BSPGA(gal\cdot sec)) - 1.02 \quad (3)$$

Fig. 5에서 MMI VI에 대한 진도 추정식 결과와 지진동 파라미터 관측 값 평균을 비교해 보면, PGV와 PGA에 대해서는 지진동 평균값이 다소 높

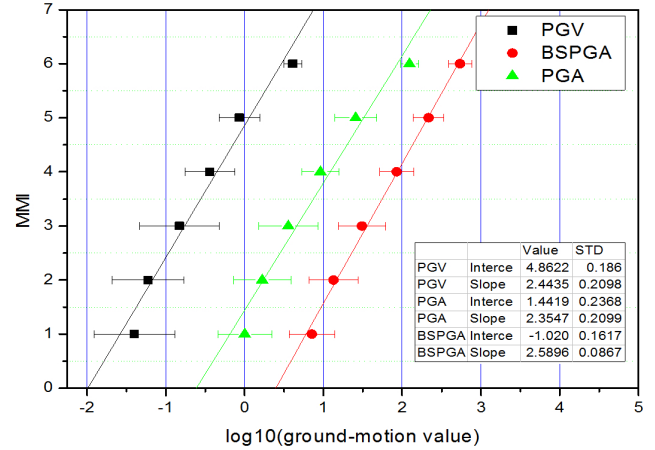


Fig. 5. Instrumental MMI relations (equations (1,2,3)) for the ground-motion parameters of PGA, PGV, and BSPGA and the statistics of MMI data in Table 3. STD means standard deviation for the fitting parameters of Slope and Intercept of the linear equations

Table 3. Statistics of three ground-motion parameters (PGV, PGA, and BSPGA) for MMI = I to VI used for deriving the instrumental MMI relations

MMI	$\log_{10}(PGV)_{avg}$ (PGV in kine)	STD	$\log_{10}(PGA)_{avg}$ (PGA in gal)	STD	$\log_{10}(BSPGA)_{avg}$ (BSPGA in gal.sec)	STD
VI	0.611	0.113	2.091	0.113	2.734	0.149
V	-0.065	0.259	1.408	0.266	2.336	0.194
IV	-0.440	0.317	0.964	0.235	1.929	0.215
III	-0.828	0.506	0.555	0.378	1.490	0.300
II	-1.225	0.457	0.224	0.365	1.129	0.309
I	-1.398	0.515	0.002	0.340	0.855	0.287

은 반면, BSPGA에 대해서는 서로 유사하였다. 이상에서와 같이 PGV와 PGA의 지진동 평균값이 다소 높게 편향되어 나타나는 이유는, MMI VI 지역에 대한 소수의 관측자료(6개 지진관측소) 대부분이 근거리 범위에 집중되었기 때문으로 판단된다. Table 3에서 MMI V 이하의 진도 영역에 대한 BSPGA 계측진도 추정 표준편차(STD)는 PGM 보다 작은 수준이나, MMI VI에 대해서는 BSPGA의 계측진도 추정 표준편차가 반대로 약간 높은 수준을 나타내는 특징이 있는데, 이러한 결과 역시 MMI VI에 대한 지진 자료의 개수가 많지 않기 때문으로 추정된다.

Fig. 5에서 지진동 파라미터별 계측진도 추정식 도출시에 MMI I의 값을 제외시킬 경우 선형성 증가를 예상할 수 있는데, 이 경우의 계측진도 추정 결과는 식(4, 5, 6)과 같다.

$$MMI = 2.14(\pm 0.18) \times \log_{10}(PGA(gal)) + 1.76(\pm 0.22) \quad (4)$$

$$MMI = 2.22(\pm 0.16) \times \log_{10}(PGV(kine)) + 4.86(\pm 0.12) \quad (5)$$

$$MMI = 2.46(\pm 0.04) \times \log_{10}(BSPGA(gal\cdot sec)) - 0.74(\pm 0.08) \quad (6)$$

참고로 기존 연구[4]에서 제시된 상기 관계식은 $1.96 \times \log_{10}(\text{PGA}) + 1.65, 2.07 \times \log_{10}(\text{PGV}) + 4.64, 2.42 \times \log_{10}(\text{BSPGA}) - 0.57$ 이었다.

2.3 경주 및 포항지진에 대한 계측진도 평가

Fig. 6은 관측소별로 부지보정된 경주 및 포항지진의 지진파형으로부터 도출된 3가지 지진동 파라미터(PGV, PGA, BSPGA)에 대해 식 (1, 2, 3)에서 제시된 계측진도 추정식을 이용하여 계산된 거리별 계측진도 결과이다.

Fig. 7은 Fig. 6의 3가지 지진동 파라미터에 대한 계측진도 값의 거리별 평균값과 표준편차를 Fig. 1의 거리별 비교기준 진도값(Ref. MMI)과 기상청의 지진연보 진도(KMA Annual) 결과와 함께 표기한 그림이다.

KMA Annual 진도와 3가지 지진동 파라미터에 대한 계측진도를 비교해 보면, 경주지진의 경우에는 전 거리범위에서 서로 잘 일치하는 경향을 나타내나, 포항지진의 경우에는 100 km 이상에서 지진동 파라미터의 종류에 관계 없이 KMA Annual 진도가 계측진도보다 -1.0 MMI 정도 낮게 평가되는 것으로 나타났으나, 경주지진의 계측진도 값과는 유사하였다.

3가지 종류의 계측진도 추정 결과 간의 비교에서 있어서는 전 거리구간에서 상호 유사한 감쇠경향을 나타내었으며, BSPGA를 이용할 경우, 유사 범위의 진앙거리에 대해 계측진도의 편차가 제일 낮았으며(0.29 ± 0.10 MMI), PGA와 PGV를 이용한 계측진도의 거리별 편차(0.37 ± 0.12 MMI for PGA, 0.39 ± 0.10 MMI for PGV)는 다소 높았다(Fig. 7의 계측진도에 대한 거리별 error bar 참조). 지진동 파라미터별 계측진도의 거리별 편차는 관련 연구[4]에서 언급한 지진동 파라미터별 진도추정 오차의 수준과 관련 있을 것으로 판단된다.

계측진도 평가 결과 간의 보다 세부적인 비교를 위해 Fig. 8처럼 Fig. 7의 BSPGA, PGA, PGV에 대한 계측진도와 Fig. 1의 비교기준 진도값의 평균값(Ref. MMI) 차이를 거리별로 도시하였다.

Fig. 8에서 계측진도는 거리별 비교기준 진도값과 거리별 감쇠경향을

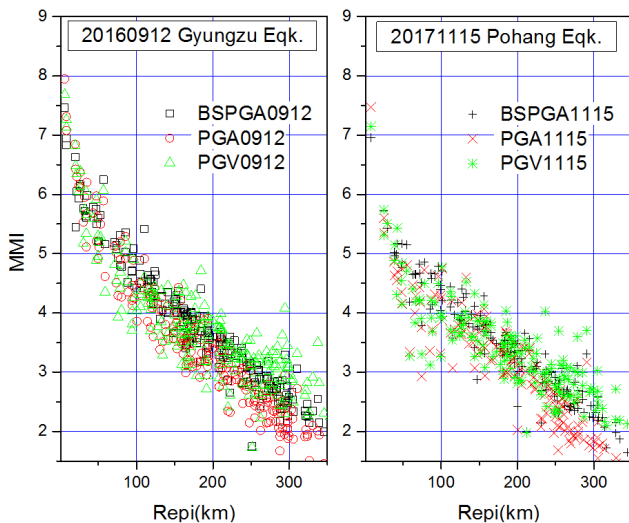


Fig. 6. Instrumental MMI distributions in distance for PGA, PGV, and BSPGA calculated by applying the equations (1, 2, 3) to the seismic records of Gyeongju (left) and Pohang (right) earthquakes after individual site correction

전 거리범위에서 대체적으로 적절히 표현하고 있으나(± 0.8 MMI 이하), 70 km~150 km의 진앙거리에서 포항지진(20171115 Eq.)의 경우에는 계측진도가 다소 높게, 경주지진(20160912 Eq.)의 경우에는 다소 낮은 값을 나타내고 있다. 200 km 이상의 원거리의 경우에는 PGA 진도가 대체로 낮은 진도값(-1.0 MMI)을 나타내었으나, PGV 진도는 원거리 범위에서도 양호한 계측진도 추정결과를 나타내었다. 또한 원거리 지역에서는 경주 및 포항지진 모두 BSPGA 계측진도와 PGV 계측진도는 상호 유사한 진도값을 나타내었다.

Fig. 8에서 특징적인 사항은 중거리 구간의 진앙거리 범위(50~200 km)에서 BSPGA 진도가 PGM(PGA/V) 진도보다 다소 높은 값을 나타낸다는 점이다. BSPGA 진도가 PGM 진도보다 높게 나타나는 거리 구간은 포항지진의 경우 50~70 km이었으며, 경주지진의 경우에는 이보다 원거리인 80~150 km로 나타났다. 특히 포항지진의 경우 50~70 km 구간에서 BSPGA 진도가 PGM 진도보다 약 0.5 MMI 큰 값을 나타내었다. BSPGA 진도와 PGM 진도가 차이를 나타내는 구간에 대해 비교기준 진도값(Ref.

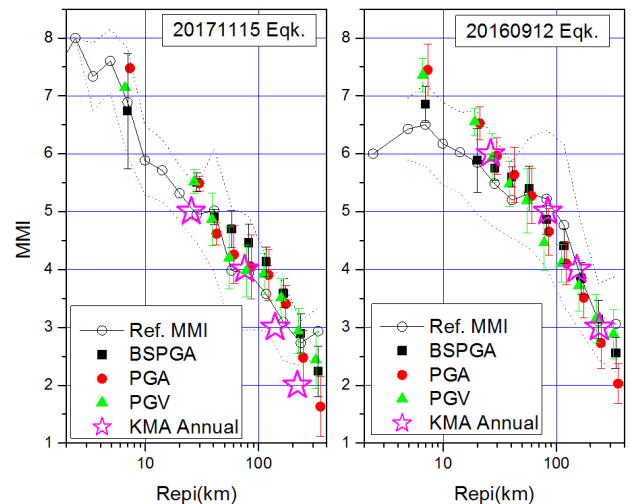


Fig. 7. Instrumental MMI statistics in distance for PGA, PGV, and BSPGA in comparison with Reference MMI in Fig. 1

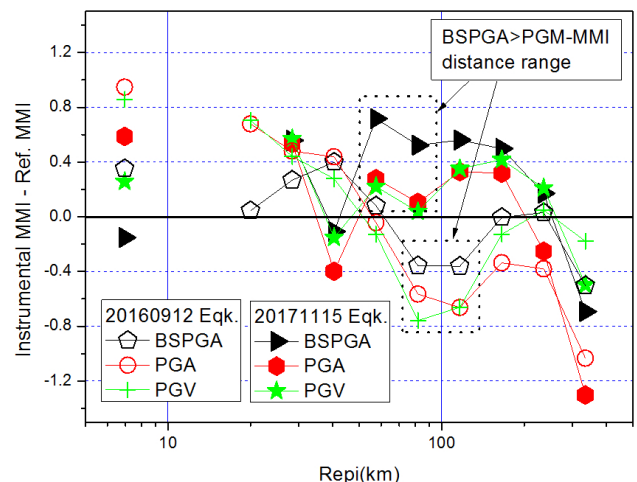


Fig. 8. MMI difference average in distance between the Reference MMI (in Fig. 1) and the instrumental Seismic Intensities for BSPGA, PGA, and PGV

MMI)과 비교검토한 결과, 경주지진의 경우에는 비교기준 진도값이 BSPGA 진도와 상호 유사하였으나, 포항지진에 대해서는 오히려 PGM 진도가 Ref. MMI와 유사하였다.

이상에서 언급된 국내 중규모 지진의 진도감쇠 특성을 정리하면, 1) 포항지진의 경우 근거리 영역에서 경주지진 보다 급격한 감쇠를 나타내었고, 2) ‘BSPGA 진도 > PGM(PGA/V) 진도’인 진앙거리 구간은 포항지진과 경주지진의 경우 차이가 있었으며, 해당 진앙거리 구간은 포항지진 보다 경주지진의 경우에는 보다 먼 거리에 위치하였다.

이러한 계속진도 상호간에 거리별로 차이를 나타내는 현상을 설명하기 위해 Fig. 9와 같이 개념적인 지진파 전달 경로 모델을 가정하였으며, 제시된 모델의 주요 특징은 1) 모호면 상부 지각에 또 다른 강한 반사면인 Conrad 면[17]의 존재 및 2) 깊이가 증가에 따른 Q (Quality factor) 값의 증가모델[18]을 가정하는 것이다. Fig. 9의 지각내부 탄성경계면의 깊이(5 km, 17 km, 32 km)는 [19]의 결과를 인용하였으며, 지진별 진원깊이는 [5] 문헌을 인용하였다.

포항지진의 경우 미교결층(~3 km)보다 깊은 지각 기반암 천부(5 km)에서 발생하였는데, Conrad 경계면이 있을 경우, 해당 경계면은 포항지진의 하향(downgoing)지진파에 대한 강한 반사면이 될 수 있으며, 이로 인해, 직접 S파와 중첩된 Conrad 반사파(Fig. 9의 Sg1 및 SdS)가 지진파형의 유사 시간구간(진앙거리 약 50~70 km)에 존재할 수 있다. 이 경우 지진파형의 30초 구간 합산(summation)을 통해 계산되는 BSPGA를 이용한 계속진도값이 구간 최대값만을 사용한 PGM 계속진도값보다 큰 값을 나타낼 수 있다. 한편 Conrad 면 상부 지각(upper crust)은 하부 지각(lower crust)보다 감쇠가 심한 낮은 Q 매질구간으로 추정할 수 있고, 상부 지각내에서도 직접 S파(Fig. 9의 Sg1)가 경유하는 낮은 깊이(5 km 이하)에서는 Q 값이 더욱 낮아(감쇠율이 높아짐)질 수 있다[18]. 이로 인해 천부에서 발생한 지진에 대한 직접 S파의 거리 감쇠가 상대적으로 심해, 급격한 지진파의 거리감쇠 특성을 나타낼 수 있다. 또한 강한 Conrad 반사면은 상부지각으로부터 하부 지각으로의 지진파 투과에너지를 약화시킬 수 있으며, 이 경우 모호면으로 부터의 반사에너지는 크기 않을 것으로 추정된다.

반면 하부 지각과의 탄성임피던스 차이가 크지 않을 것으로 예상되는 Conrad 반사면 인근인 심부 지각(h=15 km)에서 발생한 경주지진의 경우

에는 하부 지각으로의 투과 에너지가 상대적으로 클 수 있으며, 이로 인해 모호면에 의한 반사파(Fig. 9의 SmS) 및 하부지각에 의한 모호면 반사다중파(SmSM)에 대한 지표면에서의 감지를 예상할 수 있다[20]. 한편 하향하는 지진파와 관련된 반사파를 예상할 수 있는 지표면에서의 진앙거리 범위는 경주지진이 포항지진 보다 먼 거리인 80~150 km(Fig. 9 참조)로 예상된다.

이상을 요약하면 포항지진과 경주지진에 대해, 하향 지진파에 대한 반사파와 직접파의 중첩으로 인한 BSPGA 계속진도와 PGM 계속진도의 차이($MMI_{BSPGA} > MMI_{PGM}$)가 관찰되었으며, 계속진도의 차이가 발생하는 진앙거리 범위가 두 개의 지진에 대해 서로 다르게 나타났다. 포항지진의 경우, 경주지진 보다 근거리에서 계속진도의 차이를 나타내는 이유를 설명할 수 있는 개념적인 지진파 전달 경로 모델을 가정하여 보았다. 이 가정에 따르면 낮은 심도에서 발생한 포항지진의 경우 지각 천부(17 km)에 존재하는 Conrad 면이 주요 반사면으로 작용한 반면, 깊은 심도에서 발생한 경주지진의 경우는 보다 심부의 모호면(32 km)이 주요 반사면으로 작용하였기 때문으로 추정된다. 또한 포항지진의 경우 근거리에서 보다 급격한 감쇠경향을 나타내는 이유로는, 천부(5 km)에서 발생한 지진파가 낮은 Q 값을 갖는 천부지각(5 km 이내)을 경유(Fig. 9의 Sg1)했기 때문으로 추정된다.

이상의 토의는 포항지진과 경주지진의 거리별 감쇠정도의 차이 및 계속진도 간의 차이를 가설에 근거하여 설명한 내용으로, 향후 정량적인 수치모델링 및 정밀한 지진파 분석을 통해 검증되어야 할 것이다. 그러나 이상의 토의에서 중요한 점은 지진의 발생 깊이는 국외의 사례처럼[10]진도감쇠 경향에 영향을 줄 수 있다는 관측 현상이다. 따라서 향후 국내에 적합한 진도예측식 개발시에는 지진의 깊이에 따른 진도감쇠 경향의 변화를 고려할 필요가 있다고 판단된다.

2.4 강진에 대한 계속진도 추정식 적용성 검토

본 연구에서 제시한 중규모 지진에 대한 계속진도 추정식이 대규모 지진 발생시에도 적용이 가능한 지에 대한 검토를 위해 국외에서 제시된 PGM(PGA 혹은 PGV) 관계식과의 비교검토를 수행하였다(Fig. 10 참조). 비교 대상 PGM 관계식으로는 다양한 지진활동성 특성을 갖는 미국 서부, 중부, 동부 관계식 등이 활용되었다. Fig. 10의 2006 Wald[15], 2007 AnK[21], 2004 KnA[22]식은 각각 다양한 지진활동성 환경을 대표할 수 있는 미국 서부, 중부, 동부지역에 대해 개발된 계속진도 추정식이다. Fig. 10에서 2007 AnK 식과 미국 USGS의 Shakemap[15]에 사용되고 있는 2006 Wald 식은 MMI V 를 경계로 하여 서로 다른 기울기를 갖는 이중 기울기(bilinear) 계속진도 추정식을 특징으로 한다. Fig. 10에는 지진학 분야의 초창기에 제시되었고, 현재도 자주 인용되고 있는 Gutenberg와 Richter[23]의 PGA와 진도 관계식도 나타내었는데, 해당 식은 MMI X 에서 2006 Wald식과 유사한 값을 나타냄을 알 수 있다(Fig. 10(b)). BSPGA를 이용한 진도추정식은 국외의 사례가 없어 비교할 수 없었다.

미국 서부, 중부 및 동부지역에 대한 계속진도추정 관계식 간의 특징은 낮은 진도에서는 지역별로 차이가 발생하나, 진도가 높아질수록 그 차이가 줄어들어는 점이다. 지역별 차이의 개략적인 경향은 미국 동부 지역의 관계식이 서부지역의 관계식 보다 동일한 지반운동크기에 대해 상대적으로 큰

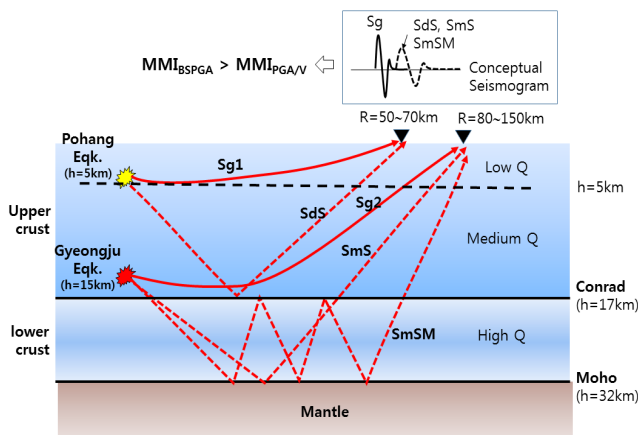


Fig. 9. Schematic figure to explain the difference of MMI distance-attenuation patterns for shallow Pohang and deep Gyeongju earthquakes

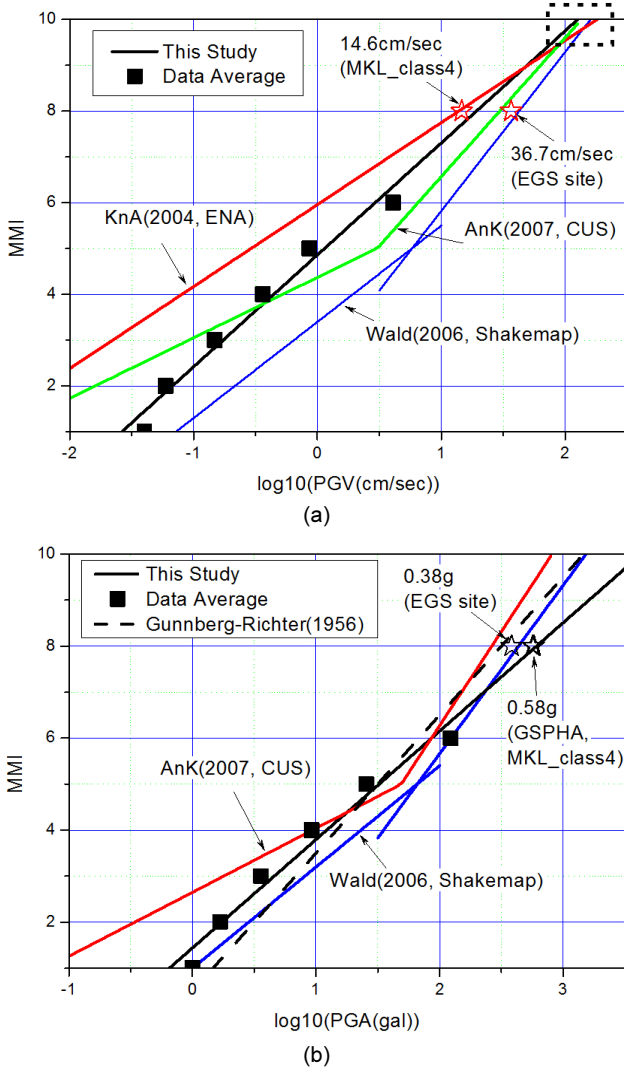


Fig. 10. Comparison of the derived instrumental MMI relations for PGV (a) and PGA (b) with those of North America region

진도 값을 제공한다. 특히 PGV의 경우, MMI X 정도에서 지역별 진도추정식 간의 차이가 미미한 것을 알 수 있다. MMI X 정도의 최대 진도 수준에서 지역별로 제시된 진도추정식을 이용한 진도추정 결과의 차이가 줄어드는 이유로서, MMI X에 대한 지진의 규모 및 거리 범위가, 낮은 진도에 비해 상대적으로 좁기 때문으로 해석된다. 일반적으로 계측진도식의 추정오차는 지진의 규모와 거리를 고려할 경우 상당히 저감하는 것으로 알려져 있다. 한편 MMI X은 대규모 지진에 대해 근거리의 제한된 규모-거리 범위에서 나타날 수 있는 진도로서, 계측진도 추정의 오차가 상대적으로 낮아질 수 있다. 또한 계측진도 추정의 오차에 영향을 줄 수 있는 부지증폭특성을 고려하더라도 대규모 지진에 대한 지진파의 저주파 성분 에너지가 주로 갖는 PGV는 PGA에 비해 상대적으로 부지증폭특성에 의해 크게 영향을 받지 않기 때문에(저주파에 대한 지진파 파장이 길기 때문에), PGA 보다는 PGV를 이용한 대규모 지진에 대한 지역별 진도 추정오차 범위는 상대적으로 낮아지게 된다.

한편 본 연구에서 추정된 PGV 관계식(식 (2))을 이용하여 관측자료의 최대 범위인 MMI VI을 초과하여 MMI X까지 외삽(extrapolation)해 보

면 다양한 지진환경을 갖는 미국 전역(서부, 중부, 동부)의 MMI X에 대한 지진동 파라미터 범위를 크게 벗어나지 않음을 알 수 있다(Fig. 10(a))의 영역. 따라서 본 연구에서 국내 중규모 지진에 대해 추정된 PGV-MMI 추정 관계식을 대규모 지진에 대한 계측진도 추정으로 외삽하여 사용하더라도 진도추정의 오차가 크지 않을 것으로 예상된다.

Fig.10의 (a)에서 알 수 있는 바와 같이, 본 연구에서 개발된 PGV-MMI 추정식은 미국의 동부(2004 KnA) 및 서부(2006 Wald)식의 중간 정도의 영역에 분포하며, 보다 세부적으로는 미국 동부(2004 KnA) 및 중부 지역 관계식(2007 AnK)의 중간 영역에 대략적으로 분포함을 알 수 있다. 이러한 비교결과는 우리나라의 지진환경이 미국 중동부의 안정적인 지진 활동성 지역(Stable Continental Region)과 유사하다는 일반적인 주장과도 일치하는 결과이다.

반면 PGA-MMI 추정식은 MMI VII 이상의 피해진도 범위에서 미국의 서부와 중부 지역에 관계식의 경계범위를 벗어나고 있는데(Fig. 10(b)) 우리나라의 지진환경이 미국의 다양한 지진환경에 대한 진도추정식의 영역 내에 존재한다는 제약조건을 부여한다면, 본 연구에서 추정된 PGA 관계식을 이용한 대규모 지진에 대한 MMI VIII 이상의 진도추정은 낮은 신뢰도를 가질 것으로 판단된다. 이상의 결과로부터 피해 진도범위에서의 PGA-MMI 추정식은 국외에서의 진도추정식과 유사하게 MMI VII을 경계로 한 이중 기울기(bilinear) 식으로 표현될 것으로 예상된다.

Fig. 10에는 경주 및 포항지진 발생시 MMI=VIII 정도로 추정되는 인근 지역에서 관측된 지진자료의 관측값을 함께 표시하고 있다. ‘EGS site’는 포항지진 발생시 인접한 포항지열발전소 예정부지의 지표면에서 관측된 자료[24]이며, GSPHA는 인접한 한국가스공사의 흥해관리소에서 보도자료[25]를 통해 알려진 값이다. MKL_class4는 경주지진 발생시 인접한 지질자원연구원 관측소의 자료를 Class D 부지특성[3] 자료로 변환한 파형 자료에 대한 지진동 파라미터 값이다. 이러한 관측값들은 PGV-MMI 추정식은 단일식, PGA-MMI 추정식은 이중 기울기 식이 보다 적합함을 정성적으로 뒷받침할 수 있는 근거 자료를 제시한다.

BSPGA 진도추정식은 물리적인 단위가 가속도의 누적값인 속도 단위로서, 최대 진도 MMI VIII 이상의 대규모 지진에 대한 진도추정 PGV와 유사한 BSPGA-MMI 단일 추정식으로 활용이 가능하다고는 추정되나, BSPGA 계산시 PGA 관측자료를 사용함으로써 PGA-MMI의 이중 기울기식의 경향을 완전히 배제할 수 없으며, BSPGA 추정식의 최대 제한값은 MMI VII~VIII로 판단된다.

2.5 계측진도 추정식의 활용 방안

일반적으로 시간이력파형의 최대값인 PGM(PGA 혹은 PGV)을 활용한 계측진도 추정은 BSPGA 등의 구간누적값을 이용한 계측진도 추정보다 수초 정도 빠르게 진도 추정이 가능하므로, 실시간 혹은 신속한 지진피해 추정에 적합한 방법이라고 할 수 있다. 그러나 관련 연구[4]의 진도 추정오차의 비교에서 알 수 있는 바와 같이 PGM을 이용한 계측진도 추정의 오차는 BSPGA 진도 추정결과보다 큰 오차가 수반된다. 따라서 추정 오차가 낮은 BSPGA 계측진도는, 진도 기준에 따라 예산 및 인력을 투입해야 하는 엄격한 후속조치를 수반하는 광역 진도추정에 보다 적합하다고 할 수 있다. 관

런 연구[26]에서 BSPGA는 CAV(Cumulative Absolute Velocity)와 밀접한 상관식(식 (7))이 존재함을 알 수 있는데, MMI=VI, VII, VIII에 대한 BSPGA를 식(3)을 이용하여 계산한 후, 식(7)을 이용하여 CAV로 환산하면, 각각 161.9, 365.1, 867.3 gal·sec로 계산된다. 참고로 161.9 gal·sec (=0.165 g·sec)는 NRC가 제시한 일반 구조물 및 기기의 피해유무 판단기준인 값이다[27].

$$CAV(\text{gal}\cdot\text{sec}) = 10^{-0.45129 + 0.97325 \times \log_{10}(\text{BSPGA}(\text{gal}\cdot\text{sec}))} \quad (7)$$

또한 본 연구에서 제시된 BSPGA 및 PGA 계측진도 추정식은 MMI VIII 이하의 경우에만 활용이 가능하다고 판단되며, 중규모 이상의 지진에 의해 근거리에서 예상되는 MMI VIII 이상의 진도 추정에는 PGV를 활용함이 타당할 것으로 판단된다. 특별히 BSPGA를 활용한 진도와 PGM을 활용한 진도는 중거리 범위(50~150 km)에서 서로 다른 계측진도를 제시할 수 있는데, 이는 BSPGA 진도는 지진파형의 지속시간 및 증첩되는 파의 에너지도 고려할 수 있는 장점이 있으나, PGM 진도는 지진파형의 최대값만으로 결정되기 때문이다. 또한 200 km 이상의 원거리 범위에서는 Fig. 8의 계측진도와 비교기준 진도(Reference MMI)의 차이에서 알 수 있는 바와 같이, PGV 혹은 BSPGA를 활용할 경우 PGA 보다 저감된 진도 추정 오차를 가질 것으로 예상된다. 이 경우 BSPGA 보다는 주변 상시 진동 잡음에 민감하지 않은 PGV를 사용하여 진도를 추정하는 방법이 현실적으로 장점이 있다고 판단된다.

한편 본 연구에서 제시된 계측진도 추정 식들은(식 (1, 2, 3)) 관련 연구에서[4] 제시된 부지보정방법을 이용하여 기반암 정도로 추정되는 부지조건으로 변환된 지진파형 자료에 대해 적용할 경우, 관측지점 인근의 광역적인 진도를 추정하는 데 활용될 수 있으며, 부지특성이 보정되지 않은 관측자료에 그대로 적용할 경우에는 해당 부지조건에 대한 국부적인 진도추정에 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 참고로 경주지진에 대해 부지증폭특성이 없는 시추공 지진관측소를 제외시킬 경우, 파형자료의 부지보정전후의 PGA 차이는 최대 10배, 평균 2.5배, ‘평균+1×표준편차’는 3.5배 정도 된다. 이 경우 식 (1)에 따른 계측진도 결과는 각각 +2.0 MMI, +1.0 MMI, +1.3 MMI 정도 크게 산정될 수 있다.

또한 다양한 지반특성(층적층, 암반, 매립층, 급경사지 등)을 갖는 특정 부지의 S파 푸리에스펙트럼에 대한 주파수별 증폭율을 경험적으로 혹은 수치적인 지반해석을 통해 사전에 알고 있는 경우에는, 지진의 규모-거리에 대한 지진파의 푸리에스펙트럼으로부터 Parseval의 정리를 이용하여 가상의 기반암[3]의 Class D)에 대한 상대적인 PGM의 증폭율을 계산할 수 있다. 따라서 부지에서 관측된 PGM을 지진의 규모-거리에 대해 보정하여 인근 지역의 광역적인 진도를 추정하는 데 활용할 수 있다. 이러한 방법은 관련 연구[4]에서 행정안전부의 시설물 지진계측자료를 활용한 광역진도 추정방법과 동일하며, 상세한 사항은 해당 문헌[4]에 수록되어 있다.

3. 결론

본 연구에서는 경주지진 및 포항지진 등의 중규모 지진에 적용할 수 있는 계측진도 추정식을 3가지 종류의 지진동 파라미터(PGA, PGV, BSPGA

(Bracketed Summation of PGA per second for 30 seconds))에 대해 제시하였다. 이를 위해 먼저 해당 지진에 대한 MMI V 구역과 MMI VI 구역에 해당되는 경계 진앙거리를 도출하기 위해, 기상청의 진앙지 인근 상세 진도추정 결과와 USGS의 DYFI(Did You Feel It?) 진도를 동시에 이용하여 진앙거리별 진도 평균값을 얻었다. 도출된 거리-진도 감쇠 경향은 경주지진과 포항지진이 매우 상이하였다. MMI V 및 VI 구역에 위치한 지진관측자료를 이용하여 3개의 지진동 파라미터를 도출하였으며, 이 결과와 기존 연구[4]의 MMI I~IV 범위의 지진동 파라미터 평균값을 동시에 이용하여 선형 적합식을 제시하였다. 제시된 선형식을 이용하여 경주 및 포항지진에 대한 진도를 재평가한 결과, 경주지진의 경우 진도 감쇠 형상을 잘 나타내었으나, 포항지진의 경우에는 100 km 이상에서 기상청의 보고된 거리-진도값(Fig. 2의 KMA Annual)보다 높게 나타났다. 경주지진의 경우에는 MMI V의 감쇠 범위가 SCR(Stable Continental Region) 지역에서의 값과 유사한 것으로 확인되어, SCR 지역의 대표적 진동으로 구분되었으나, 포항지진의 경우에는 일반적인 SCR 지역의 MMI V 범위보다 매우 좁은 특이한 지진으로 분류되는 것으로 평가되었다.

아울러 향후 강지진동 예측시 고려해야 할 포항지진 및 경주지진에 대한 거리별 지진파 감쇠 패턴의 차이에 대한 설명을 시도하기 위해, 관련 문헌들을 근거로 개념적인 지진파 전달 경로 모델(Fig. 9)을 설정하였으나, 향후 상세한 수치모델링 및 세부적인 지진파 분석을 통해 확인될 필요가 있다고 판단된다.

또한 본 연구에서 제시된 식을 다양한 지진환경을 갖는 미국 서부, 중부, 동부 지역에 대해 개발된 식과 비교한 결과, 본 연구에서의 PGV 진도 예측 추정식은 미국 중부와 동부 지역의 진도 추정식 영역사이에 분포하였으며, MMI X 정도까지도 동일 식으로 의미 있게 외삽할 수 있을 것으로 판단하였다. 반면 PGA 진도 예측식의 최대 가능 추정 진도는 MMI VII 정도로서, MMI VI 이상에서 진도 추정식의 기울기가 다른 예측식의 개발이 필요하다고 사료된다.

특히 계측진도 추정시 오차가 상대적으로 낮은 지진동 파라미터인 BSPGA는 현재 관련 법[28]에 따라 행정안전부로 취합되는 약 600개소의 시설물 지진가속도 계측자료를 이용할 수 있기 때문에, 향후 MMI VIII 이상의 진도에 대한 계측진도 추정의 신뢰도가 추가로 확인된다면 지진발생시 신속하고 정확한 광역 진도추정에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

/ 감사의 글 /

본 논문은 ‘지진동의 영향정보 신속 제공을 위한 기반기술 연구(기상산업진흥원 지진기술개발사업 KMIPA2016-3020)’의 일부 지원에 의해 수행되었습니다. 또한 경주지진 및 포항지진에 대한 상세한 진도조사 자료를 제공해 주신 기상청 관계자 분들께도 감사드립니다.

/ REFERENCES /

1. Yun KH, Park DH, Park SM. The Statistical Model of Fourier Acceleration Spectra according to Seismic Intensities for Earthquakes

- in Korea (in Korean). *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 2009 Dec;13(6):11–25.
2. Yun KH, Park DH, Park SM. Instrumental Seismic Intensity based on Fourier Acceleration Spectra of the earthquake ground-motion (in Korean). *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 2009 Dec;13(6):27–37.
 3. Yun KH, Suh JH. Classification of Seismic Stations Based on the Simultaneous Inversion Result of the Ground-motion Model Parameters (in Korean). *Geophys. and Geophys. Explor.*, 2007;10(3): 183–190.
 4. Yun KH, Lee KR, Lee IT. Development of Key-technologies for Rapidly Disseminating Earthquake Ground-motion Effects. Final Report of Korea Meteorological Institute Project (KMIPA2016–3020) in the Earthquake and Volcano Research (in Korean). Korea Electric Power Cooperation Research Institute, c2018 (to be published), 334 p.
 5. Earthquake Annual Reports for the years 2011/2012/2013/2014/2015/2016/2017. Korea Meteorological Administration, Available from: <http://www.kma.go.kr/communication/webzine/earthquakeyearly.jsp>.
 6. Seminar on the analytical survey of 9.12 Earthquake. Gyeongju Hanwa Resort, Korea Meteorological Administration/National Institute of Meteorological Sciences, 2016 Nov 16; 58 p.
 7. Choi MK, Park SC, Sohn DH, You SH, Sun JS, Cho SH. Intensity Analysis of the 15 November 2017 Pohang Earthquake (in Korean). *Proceedings of EESK Conference*, c2018.
 8. M 5.5 – 7km WSW of Heung-hai, South Korea, Did You Feel It?. Available from: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000bnrs#dyfi>, last accessed on 01/06/2018.
 9. M 5.4 – 6km S of Gyeongju, South Korea, Did You Feel It?. Available from: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us10006plf#dyfi>, last accessed on 01/06/2018.
 10. Atkinson GM, David Wald, C. Bruce Worden, Vince Quitoriano. The Intensity Signature of Induced Seismicity. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2018 Jun;108(3A):1080–1086.
 11. Johnston AC. The stable continental region data base in the Earthquakes of Stable Continental Regions: Assessment of Large Earthquake Potential. EPRI TR-102261, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, c1993.
 12. Yun KH, Jeon JS. An Earthquake Felt Area and Magnitude Relation in Korea (in Korean). *Proceedings of EESK Conference*, c2010.
 13. Yun KH, Jung EJ. Criterion of Ground-Motion levels for Post-Earthquake Procedures based on the Seismic Intensities of Korean Earthquakes (in Korean). *Proceedings of EESK Conference*, c2016.
 14. Yun KH, Park DH. Development of Site-Specific Ground-Motion Attenuation Relations in Korea – Examples for the Nuclear Power Plant sites. The 5th International Workshop on the Fundamental Research for Mitigating Earthquake Hazards. Jeju KAL Hotel, Meteorological Research Institue, c2005 Dec.
 15. David J. Wald, C. Bruce Worden, Vincent Quitoriano, Kris LP. ShakeMap Manual, Version 1.0. U.S. Geological Survey, c2006.
 16. Park SC, Choi MG. Review on instrumental intensity scale using recent Korean earthquake (in Korean). *Proceedings of EESK Conference*, c2018.
 17. Xiaobo He, Hong TG. Evidence for Strong Ground Motion by Waves Refracted from the Conrad Discontinuity. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2010 Jun;100(3):1370–1374.
 18. Rhee HM, Kim SK. Crustal 1-D Q-structure in the southern Korean Peninsula (in Korean). *Journal of the Geological Society of Korea*, 2008;44(5):329–643.
 19. Chang SJ, Baag CE. Crustal Structure in Southern Korea from Joint Analysis of Regional Broadband Waveforms and Travel Times. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2006 Jun;96(3): 856–870.
 20. Sugan M, Vuan A. Evaluating the Relevance of Moho Reflection in Accelerometric Data: Application to an Inland Japanese Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2012 Apr;102(2): 842–847.
 21. Atkinson GM, Kaka SI. Relationships between Felt Intensity and Instrumental Ground Motion in the Central United States and California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2007 Apr;97(2):497–510.
 22. Kaka SI, Atkinson GM. Relationships between Instrumental Ground-Motion Parameters and Modified Mercalli Intensity in Eastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2004 Oct;94(5):1728–1736.
 23. Gutenberg B, Richter CF. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration: (Second paper). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1956;46(2): 105–145.
 24. Grigoli F, Cesca S, Rinaldi AP, Manconi A, López-Comino JA, Clinton J F, Westaway R, Cauzzi C, Dahm T, Wiemer S. The November 2017 Mw 5.5 Pohang earthquake: A possible case of induced seismicity in South Korea. *Science*, c2018 Apr. (DOI: 10.1126/science.aat2010).
 25. Pohang earthquake, big concern on activation of Yangsan fault zone, needs of cutting Nuclear Power Plants – Needs plan to cut the Nuclear Power Plants in the south-eastern part of the Korean Peninsula (in Korean). *BreakNews*, c2017 Nov. Available from http://www.breaknews.com/sub_read.html?uid=542298§ion=sc1.
 26. Yun KH. Study on the Use of Bracketed Summations of the Peak Ground-motion Acceleration Per Second for Rapid Earthquake Alert Notifications (in Korean). *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 2012;16(1):37–45.
 27. U.S. Nuclear Regulatory Commission. Pre-earthquake planning and immediate nuclear power plant operator postearthquake actions (Regulatory Guide 1.166), c1997 Mar.
 28. National Emergency Management Agency (NEMA). Guideline for installation and operation of strong ground-motion seismic instrumentation [Government Legislation of NEMA No. 2010–30] (in Korean), c2010.