

# 부지응답해석을 이용한 지역별 대표 진도 산출 연구

## Typical Seismic Intensity Calculation for Each Region Using Site Response Analysis

안재광<sup>1)</sup> · 손수원<sup>†</sup>  
Jae-Kwang Ahn · Su-Won Son

Received: November 11<sup>th</sup>, 2019; Revised: December 2<sup>nd</sup>, 2019; Accepted: December 11<sup>th</sup>, 2019

**ABSTRACT** : Vibration propagated from seismic sources has damping according to distance and amplification and reduction characteristic in different regions according to topography and geological structure. The vibration propagated from the seismic source to the bedrock is largely affected by the damping according to the separation distance, which can be simply estimated through the damping equation. However, it is important to grasp geological information by location because vibration estimation transmitted to the surface are affected by the natural period of the soil located above the bedrock. Geotechnical investigation data are needed to estimate the seismic intensity based on geological information. If there is no Vs profile, the standard penetration tests are mainly used to determine the soil parameters. The Integrated DB Center of National Geotechnical Information manages the geotechnical survey data performed on the domestic ground, and there is the standard penetration test information of 400,000 holes. In this study, the possibility of quantitation the amplification coefficient for each region was examined to calculate the physical interactive seismic intensity based on geotechnical information. At this time, the shear wave column diagram was generated from the SPT-N value and ground response analysis was performed in the target area. The site coefficients for each zone and the seismic intensity distribution for the seismic motion present a significant difference according to the analysis method and the regional setting.

**Keywords** : Site response analysis, Amplification coefficient, Site effect, Seismic intensity

**요지** : 지진원으로부터 전파되는 진동은 거리에 따른 감쇠와 지형 혹은 지질구조에 따라 지역마다 다른 증·감폭 특성을 가진다. 지진원에서 기반암까지의 전파되는 진동은 이격거리에 따른 감쇠의 영향이 크며, 이는 감쇠식을 통해 쉽게 추정할 수 있다. 하지만 지표면에 전달되는 진동 추정은 기반암 상부에 위치한 토층 고유주기의 영향을 받기에 위치별 지질정보 파악이 중요하다. 지질정보 기반 진도 추정을 위해 지반조사 자료가 필요하며, Vs 주상도가 없을 경우 표준관입시험을 통해 대상지반의 강도 및 특성 파악에 주로 사용된다. 국토지반정보 포털시스템에서는 국내 지반에서 수행된 지반조사자료를 통합하여 관리하고 있으며, 표준관입시험 정보가 약 40만공을 구축되어 있다. 본 연구에서는 지반정보를 기반으로 체감형 진도정보 산출을 위해 권역별로 증폭계수 정량화 가능성을 검토하였다. 이때 SPT-N치를 자료를 통해 전단파 주상도를 생성하고, 대상지역에 지반응답해석을 수행하였다. 권역별 증폭계수와 지진파의 주기별 진도 분포는 해석방법 및 권역설정에 따라 큰 차이를 보였다.

**주요어** : 지반응답해석, 증폭계수, 부지효과, 진도 산출

## 1. 서론

한반도에서 최근 발생한 규모 4.0 이상의 지진으로 인해 울산, 경주, 포항 등 동남권 지역에서는 지진재난에 대한 대비·대응을 강화하고 있다. 기상청은 국민 체감형 지진정보 서비스를 강화하여 지진재난 정보를 송출하기 위하여 노력하고 있으며, 진도 서비스에는 미국지질조사국(USGS)에서 개발한 Shakemap(Wald et al., 2006)을 통해 산출되는 MMI(modified Mercalli intensity) 정보가 포함되어 있다(KMA, 2018a). Shakemap을 통해 산출되는 진도는 지반운동예측모

델(GMPE)를 기반으로 계산되는 격자별 가속도 값이고, 부지증폭은 Vs30을 통해 고려된다. 이때 Vs30은 지형의 경사를 이용한 방법을 사용하며, Wald & Allen(2007)의 모델이 탑재되어 있지만 지질 및 지형을 고려하지 않는 단순 보간법을 사용하였다는 점에 유의해야 한다. 최근 경사도와 지질도 요인을 고려한 Vs30 모델도 개발되고 있지만(Stewart et al., 2014; Kwok et al., 2018) 국내의 경우 기반암 심도가 깊지 않아 Vs30의 사용에 대하여 회의론이 제기되고 있는 실정이다.

Lee(2019)은 세종특별자치시의 생활권역별 지반응답해석

1) Research Officer, Earthquake and Volcano Research Div. Korea Meteorological Administration

† Associate Researcher, Seismic Simulation Test Center, Pusan National University (Corresponding Author : firesome@pusan.ac.kr)

을 수행하여 최대지반가속도(PGA)와 지반 고유주기에 따른 부지역역화 지도를 개발하였다. 이때 다운홀테스트로 얻어진 전단파속도 주상도를 사용하였으며, 등가선형해석을 수행하였다. 개발된 지도는 대상구간의 응답특성을 적절하게 반영할 수 있는 좋은 자료이지만 다양한 기반암 가속도 시나리오를 고려하지 못하기 때문에 사용이 제한적이다. 또한, 국내의 대부분 도시는 세종특별자치시처럼 내진설계를 위한 지반조사가 충분히 수행되지 않았다.

국내의 경우 「지반조사결과전산화 및 활용에 관한 지침」(국토교통부 예규 116호)에 따라 건설현장에서 발생하는 지반조사의 성과는 통합 관리하도록 제정되어 있다(MOLIT, 2017). 이는 국토지반정보 통합DB센터(Integrated DB Center of National Geotechnical Information, 2010)를 통해 관리되며, 표준관입시험, S-PS검층, 탄성파탐사 등의 자료를 제공한다. 센터에서 관리되는 자료 중 전단파 속도가 조사된 자료수는 적지만 표준관입시험은 약 40만 공을 보유하고 있다. 표준관입시험 자료는 얻어지는 SPT-N치의 자료는 N-Vs상관식을 통해 전단파속도(Vs)로 환산이 가능하다(Sun et al., 2015).

행정안전부(MIS, 2017)는 내진설계기준의 일관성을 확보하기 위해 지진·화산재해대책법 제10조의 2(내진설계기준 공통적용사항)를 개정하였다. 이와 같은 사항을 반영한 내진설계의 세부 기준이 개정되고 있다. 행정안전부에서 개정된 지반분류법에 따른 증폭계수 산정은 Cho et al.(2016)의 연구결과를 통해 확인할 수 있다. Cho et al.(2016)는 국토지반정보 통합DB센터 SPT-N치 자료를 활용하여 지반분류별 증폭계수를 제시하였다. 이 연구에서는 Site B등급의 설계응답스펙트럼을 기준으로 한 규모 7.0 이상의 강진기록을 입력지진파로 적용하였으며, 등가선형해석을 수행하여 증폭계수를 도출하였다. 이때 사용된 강진기록은 꼬리진동(Codawave)이 길기에 국내에서 발생하는 지진특성과 차이를 보일 수 있으며, 기반암 운동에 대하여 하부 지질구조가 반영되지 않았다는 한계점이 있다.

따라서 본 연구에서는 국토지반정보 통합DB센터에 가장 많이 확보된 표준관입시험 자료를 활용하여 권역분류에 따른 부지 응답특성을 분석하였다. 이때 입력지진파는 설계응답스펙트럼을 기준으로 하지 않고 다양한 지진기록을 사용하여 등가선형해석과 비선형해석을 수행하였다.

## 2. 부지응답해석과 증폭계수

### 2.1 부지응답해석

지진으로 유발된 지표면의 진동은 지질구조, 기하학적 지

형, 상부지층의 토사특성에 따라 크게 달라지는데 이를 부지효과(Site effect)라고 한다. 계기 진도는 지표면에 전달되는 진동의 특성을 기반으로 산출되며 신뢰성 있는 진도평가를 위해서 부지효과에 대한 고려는 필수적이다. 다양한 지역의 부지효과를 체계적으로 적용하기 위해서는 시추공 관측소의 심도별 계측기록 또는 부지 응답해석을 기반으로 증폭계수를 산정해야한다.

지반응답해석은 기반암 위 지층을 모델링하여 지진 시 지표면 자유장 운동을 예측하는 방법으로 실제 현상을 잘 모사하는 것으로 알려져 있다(Idriss & Seed, 1968). 이와 같은 해석을 통한 지진동 모사의 기술은 이미 높은 수준까지 올라와 있으며 상용화된 프로그램이 세계적으로 널리 사용되고 있다. 1차원 지반응답해석은 해석영역에 따라 주파수영역과 시간영역해석으로 구분된다. 국내에서 사용빈도가 높은 대표 프로그램은 SHAKE91(Idriss & Sun, 1993)을 개선한 PROSHAKE(PSU, 1996), SHAKE2000(Ordóñez, 2012) 등이 있으며 이는 주파수영역 해석으로 사용된다. DEEPSOIL(Hashash et al., 2015)의 경우 주파수와 시간영역해석이 모두 가능하며 등가선형, 비선형 및 유효응력해석에 사용된다. 따라서 전단파 주상도가 확보된다면 지반응답해석을 수행하여 대상구간의 증폭계수를 산정할 수 있다.

### 2.2 증폭계수 산정방법

본 연구의 지반응답해석 결과로 도출될 가속도응답스펙트럼의 정량적 차이 파악은 단주기 및 장주기 증폭계수를 이용할 수 있다. 지반응답해석 결과를 이용한 부지 증폭계수 산정방법은 입력 지진파의 기반암 응답스펙트럼과 자유장 응답스펙트럼의 비(Ratio of Response Spectra, RRS)를 결정하고, Eq. (1)과 Eq. (2)를 통해 단주기 증폭계수(short-period site coefficient, Fa)와 장주기 증폭계수(long-period site coefficient, Fv)를 산정한다.

$$F_a(RRS) = \frac{R_{soil}}{R_{rock}} \frac{1}{0.4} \int_{0.1}^{0.5} \frac{RS_{soil}(T)}{RS_{rock}(T)} dT \quad (1)$$

$$F_v(RRS) = \frac{R_{soil}}{R_{rock}} \frac{1}{1.6} \int_{0.4}^{2.0} \frac{RS_{soil}(T)}{RS_{rock}(T)} dT \quad (2)$$

여기서, RS=스펙트럼 가속도(g)이고, R=진원에서 부터의 거리(m), T=주기(sec)이다. 본 연구에서는  $R_{soil}/R_{rock}$ 은 진원과의 거리가 충분히 멀다고 가정하여 1.0으로 계산하였다.

### 2.3 증폭계수 기준

행정안전부에서 공표한 내진설계기준 공통적용사항(MOIS,

Table 1. Soil classification system (MOIS, 2017)

Site class	Soil description	Parameters for classification	
		Depth to bedrock*, H (m)	V <sub>s,Soil</sub> (m/s)
1	Rock	< 1	-
2	Shallow deposits of dense soils	1 ~ 20	≥ 260
3	Shallow deposits of soft soils		< 260
4	Deep deposits of dense soils	> 20	≥ 180
5	Deep deposits of soft soils		< 180
6	Special soil requiring site-specific evaluation or response spectrum analysis		

\* Soil sites with V<sub>s</sub> ≥ 760m/s

Table 2. Site coefficient (MOIS, 2017)

Site class	Short-period site coefficient, F <sub>a</sub>			Long-period site coefficient, F <sub>v</sub>		
	S* ≤ 0.1	S = 0.2	S = 0.3	S ≤ 0.1	S = 0.2	S = 0.3
2	1.4	1.4	1.3	1.5	1.4	1.3
3	1.7	1.5	1.3	1.7	1.6	1.5
4	1.6	1.4	1.2	2.2	2.0	1.8
5	1.8	1.3	1.3	3.0	2.7	2.4

S\*: effective peak accleration : Horizontal ground motion level based on national earthquake risk maps and administrative districts

2017)에 있는 지반분류 및 증폭계수는 Table 1과 2에 정리하였다.

### 3. 부지 응답해석 수행

#### 3.1 대상구간의 지반정보 수집

국토지반정보 통합DB센터에서 서비스하는 시추조사 자료는 웹을 통해서 확인 가능하며 Fig. 1과 같다. 도심지의 경우 다수의 시추조사 결과가 조밀하게 형성되어 추가적인 지반조사 없이 지반정보 획득이 가능하다. 그러나 도심지 외의 경우 도로, 철도 등 인프라 시설물이 위치한 곳의 정보

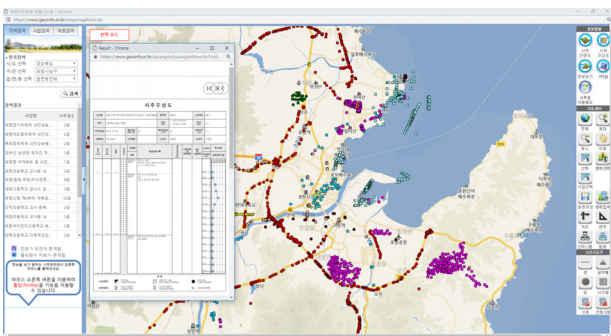


Fig. 1. Geotechnical information center Web (www.geoinfo.or.kr)

Table 3. Used section by region

Section		Count	Section		Count
A	B〇〇	10	G	N〇〇-1	11
B	Y〇〇	12	H	N〇〇-2	10
C	H〇〇	19	I	G〇〇	5
D	N〇〇	8	J	O〇〇	5
E	H〇〇	8	K	P〇〇	5
F	C〇〇	11	L	Y〇〇	2

만 획득이 가능하기 때문에 전 국토에서 활용하는 것은 어려움이 있다. 본 연구에서는 국토지반정보 통합DB센터 자료의 활용가능성을 검토하고자 신뢰도가 높은 지반조사 자료만을 추출한 후 권역별 무작위로 대표 주상도를 선별하였다. Table 3은 선별을 통해 사용된 자료 수를 정리하였다. 선별 시 택지개발에 사용된 자료는 주로 시추조사가 10m 이내에서 완료된 경우가 대부분이며, L권역 같이 외곽지역의 경우 사용할 수 있는 공수가 한정적이다.

#### 3.2 전단파 주상도 작성

전단파 주상도를 작성하기 위해 전단파 속도를 계산하였다. 시추자료의 N치에 대하여 해머 효율을 보정한 N<sub>60</sub>을 산출하였으며, N<sub>60</sub>기반으로 제안된 경험식 중에서 Sun et al. (2015)과 Bernard et al.(2012)이 제안한 식을 사용하였다 (Table 4). 제안한 식을 이용하여 계산한 전단파 속도는 계산 결과 중에서 최대값을 사용하였다.

Table 4. Recommended SPT–stress–Vs correlation equations (Bernard et al., 2012)

Soil type	Shear wave velocity for quaternary soils (m/s)	Age scaling factors	
		Holocene	Pleistocene
All soils	$30 N_{60}^{0.215} \sigma_v'^{0.275}$	0.87	1.13
Clays & silts	$26 N_{60}^{0.17} \sigma_v'^{0.32}$	0.88	1.12
Sands	$30 N_{60}^{0.23} \sigma_v'^{0.23}$	0.90	1.17
Gravels - holocene	$53 N_{60}^{0.19} \sigma_v'^{0.18}$	-	-
Gravels - pleistocene	$115 N_{60}^{0.17} \sigma_v'^{0.12}$	-	-

where, N<sub>60</sub> is N value obtained by correcting to the reference energy ratio of 60%, and σ'<sub>v</sub> is effective vertical stress.

#### 3.3 입력지진파 선정

대상구간의 기반암 운동은 인근 기반암 하부 지질구조를 고려하여 사용(Ahn et al., 2018)해야 하지만 한반도의 경우 과거 큰 규모의 지진사례가 적어 지질구조별 중규모 이상의 기반암 기록을 확보하기 어렵다. 이에 다양한 주기의 지진

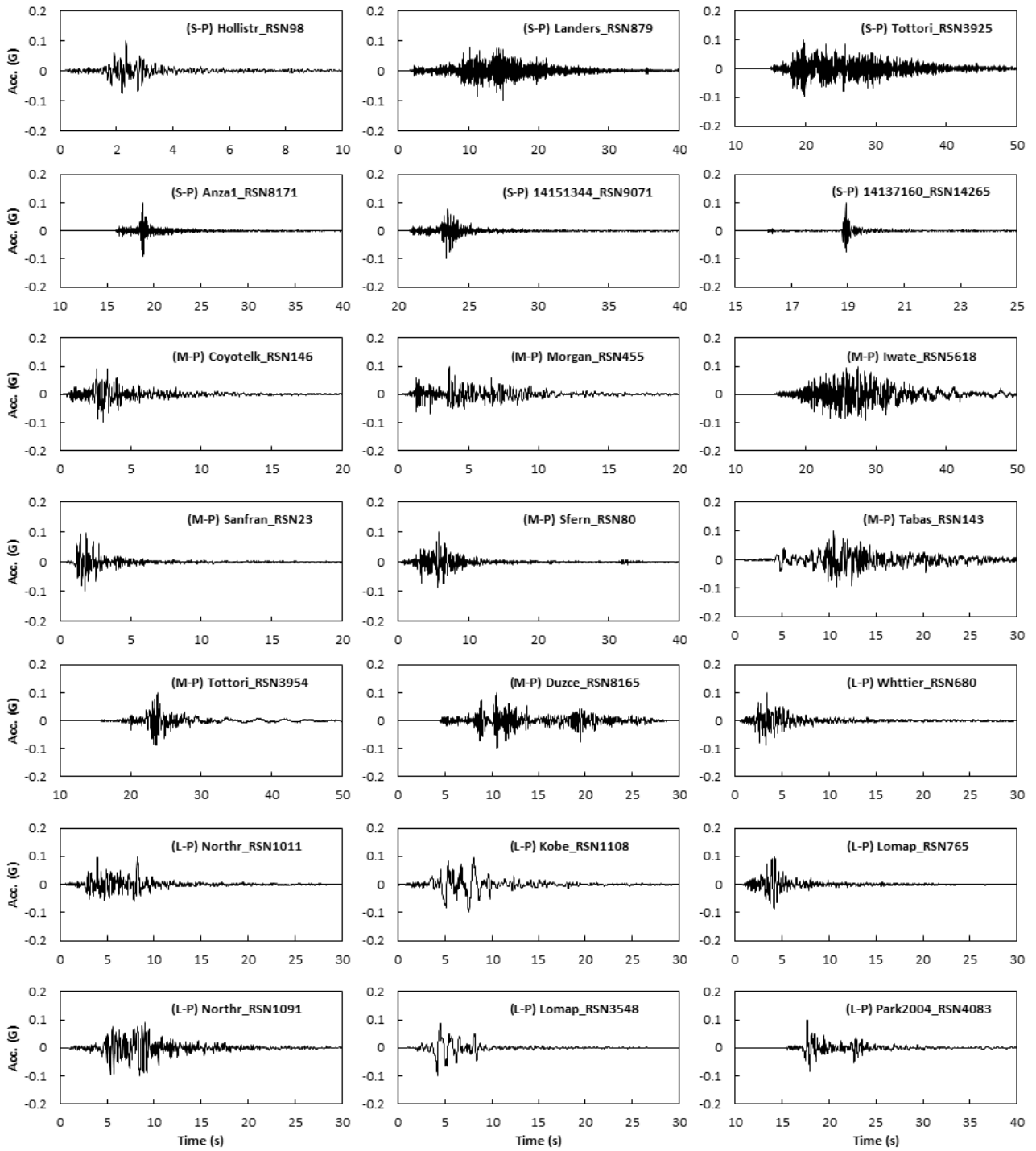


Fig. 2. Collected seismic time histories

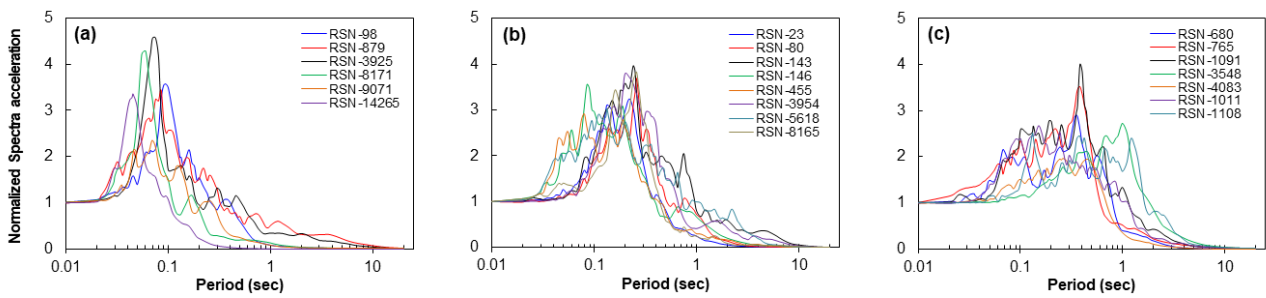


Fig. 3. Response spectrum on period types: (a) Short, (b) Medium, (c) Long

특성을 고려하기 위하여 PEER(Pacific Earthquake Engineering Research Center, <https://peer.berkeley.edu/>)의 강진기록 21 개를 수집하였다. 강진기록은  $M_w \geq 5.0$ , 이격거리  $0 \leq R \leq 20\text{km}$ ,  $V_s30 \geq 760\text{m/s}$ 를 기준으로 선별하였으며, 선별된 지진파는 단주기 6개, 중주기 8개, 장주기 7개로 Fig. 2에 도시하였다. 사용된 지진기록의 주기별 정규화된 응답스펙트럼은 Fig. 3에 나타났다. 부지응답해석 시 다양한 크기의 지진 시나리오를 고려하기 위해 기반암 최대가속도( $\text{PGA}_{\text{rock}}$ )를 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5g로 스케일링하여 적용하였다. 이때 대상구간에 전달된 기반암 운동은 이격거리에 따른 감쇠를 고려하지 않고 전 구간에 동일한 크기가 도달한다고 가정하였다.

### 3.4 부지응답해석 수행

대상구간의 지표면의 응답을 계산하기 위해 1차원 부지응답해석을 수행하였으며, 사용된 프로그램은 Deepsoil.v6 (Hashash et al., 2015)이다. 부지응답해석은 국내에서 주로 사용되는 지반구성모델에 따라 등가선형해석(E.L)과 비선형해석(N.L)으로 분류하며 해석법에 따른 결과를 비교하였다. 등가선형은 지반의 동적 물성치의 목표 변형률 값을 사용하므로 적용된 변형률 값보다 매우 작거나 매우 클 경우 과대 혹은 과소 예측할 수 있다(Kim et al., 2016). 비선형해석의 응답에 따른 지반의 변형률은 각 시간단계에서 고려할 수 있다(Park & Hashash, 2004). 본 연구에서는 Darendeli (2001)의 동적곡선과 MKZ모델(Matasic, 1993)을 사용하였다. 총 수행된 응답해석은 22,260회이다.

## 4. 응답해석 결과

본 장에서는 행정안전부에서 제시한 지반분류를 수행하지 않고 대상구간에서 발생할 수 있는 진도와 증폭계수를 산정하였다. 이를 통해 공통기준으로 예상되는 진동과 권역별로 응답특성의 차이를 비교하였다.

### 4.1 지진 주기별 진도 분포

총 106개의 사이트에 대하여 부지응답해석을 수행한 후 최대지반가속도(PGA)와 최대지반속도(PGV)에 대하여 수정 메리칼리 진도(modified Mercalli intensity, MMI) 등급에 따라 진도를 분류하였다. 이때 MMI는 기상청에 제시된 크기를 기준으로 하였다(KMA, 2018b). Fig. 4는 기반암 최대가속도를 0.1g와 0.3g를 적용한 비선형 해석 결과를 진도분포율로 도시하였다.

기반암 가속도에 Table 2~3의 단주기 증폭계수를 곱하면 지표면의 PGA를 계산할 수 있다. 기반암 최대가속도( $\text{PGA}_{\text{rock}}$ ) 시나리오가 0.1g 일때, 지표면 최대지반가속도(PGA)는 0.14~0.18g로 진도 VI 수준이다. 동일한 방법으로  $\text{PGA}_{\text{rock}}=0.3\text{g}$  일 경우 예상되는 진도는 VII이다.

해석결과,  $\text{PGA}_{\text{rock}}=0.1\text{g}$ 에서 진도는 IV~VI가 많이 분포하는 것으로 나타났다. 이 중 가장 많이 나타난 진도 V등급은 대부분의 사람이 느끼고 창문 등이 깨질 수 있는 수준으로 단주기 증폭계수로 산정된 진도보다 1등급 낮다.  $\text{PGA}_{\text{rock}}=0.3\text{g}$ 일 때 계산된 진도는 VI가 나타났으며, 단주기 증폭계수로 산정된 진도보다 1등급 낮다. 이는 등가해석으로 수행

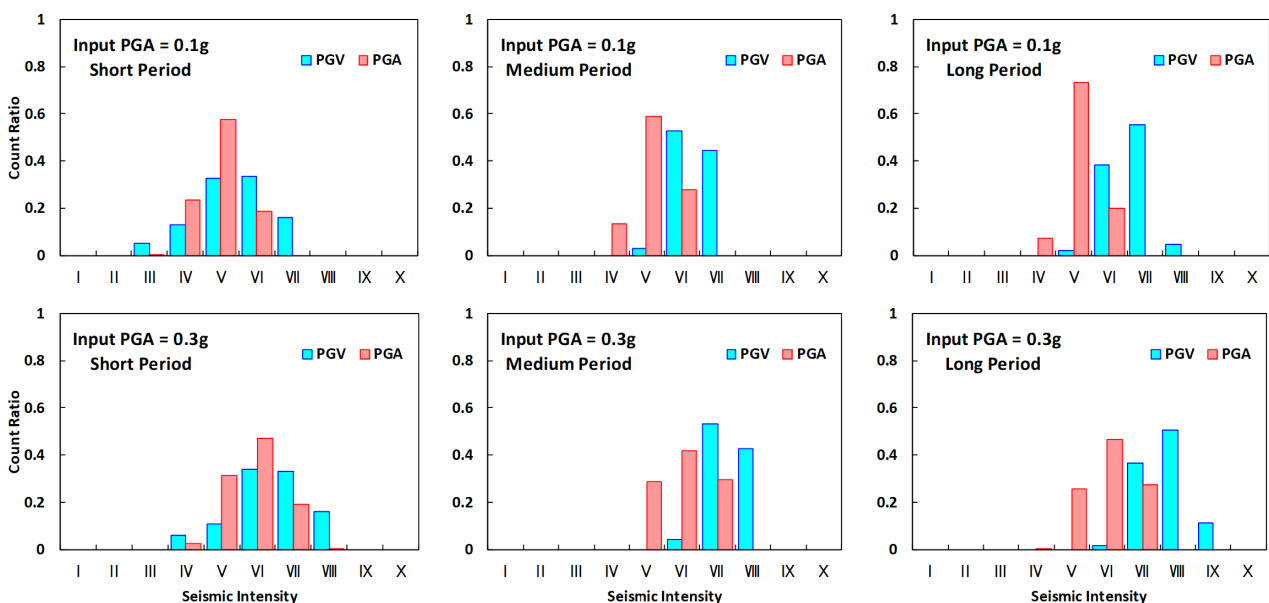


Fig. 4. Computation of seismic intensity by nonlinear analysis

된 단주기 지반증폭 계수가 실제 응답보다 크게 예측할 수 있음을 보여주는 결과이다.

Fig. 4를 통해 지진의 우세 주기에 따른 응답 차이를 확인할 수 있다. 단주기 지진에서 PGA와 PGV로 계산된 진도 분포가 유사하게 나타난 반면 중주기 이상 지진에서는 PGV 진도 결과가 PGA진도 보다 높게 나오는 것으로 확인된다. 속도는 가속도와 주기가 모두 고려된 물리량으로 실제 다른 주기에 동일한 최대가속도라도 장주기 성분이 많을수록 실제 발생하는 변위보다 커진다. 가속도는 일시적으로 작용하는 힘(=관성력)으로 구조물의 내구성에 영향을 주며, 속도는 육안으로 감지되는 움직임이다. 즉, 지진이 발생 시 구조물의 안정성 평가는 PGA를 기준으로 할 수 있지만, 사람이 보고 느껴서 신고하는 유감진도는 PGV와 유사할 것으로 파악된다.

#### 4.2 해석법에 따른 증폭계수 차이

Table 5와 Fig. 5는 해석법에 따른 대상구간 전체에 대한 증폭계수를 나타냈다. 해석법에 따른 결과를 비교해보면,  $PGA_{rock}=0.1g$ 에서의 장주기 증폭계수를 제외한 모든 구간에서 등가선형해석의 증폭계수가 비선형해석보다 큰 것으로 나타났다. 경험적 보정을 통해 결정되는 등가 전단탄성계수를 사용하는 등가선형해석은 전단응력의 크기에 따라 입력된 동적곡선에 상응하는 전단탄성계수와 감쇠비가 적용되는 비선형해석과는 해석 방법에 차이가 크다. 지반이 탄성영역 안에서 거동할 때 등가선형해석은 실제보다 작은 응답을 보일 수 있는 반면 큰 지반변형이 발생할 때는 실제

Table 5. Site coefficient of analysis methods

		S=0.1	S=0.2	S=0.3	S=0.4	S=0.5
E.L.	F <sub>a</sub>	1.751	1.545	1.426	1.314	1.192
	F <sub>v</sub>	1.283	1.319	1.333	1.324	1.307
N.L.	F <sub>a</sub>	1.661	1.403	1.261	1.135	1.014
	F <sub>v</sub>	1.285	1.289	1.277	1.236	1.203

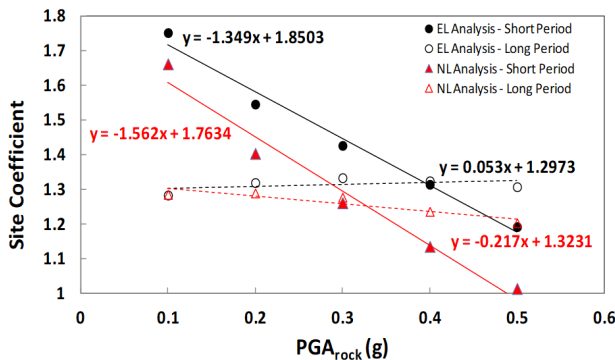


Fig. 5. Comparison analysis methods of site coefficient

보다 과대한 PGA를 산출할 수 있다. 따라서,  $PGA_{rock}$ 이 커질수록 등가선형해석을 통한 증폭계수 산정이 보수적인 결과를 나타낼 수 있다.

단주기 증폭계수( $F_a$ )의 경우, 기반암 가속도가 커질수록 작아지는 것으로 나타났으며, 전체적으로 등가선형해석의 결과가 비선형해석보다 5~17% 큰 값을 보였다. 반면, 장주기 증폭계수( $F_v$ )는 시나리오에 따른 차이가 크지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 6은  $PGA_{rock}$ 에 따른 증폭계수비를 주기별로 분류하여 나타낸 그래프이다. 결과에 따르면,  $PGA_{rock}$ 가 증가할수록 증폭계수비도 커지는 것을 알 수 있다. 또한, 장주기보다 단주기의 기울기 값이 더 크며, 이는 단주기가  $PGA_{rock}$ 에 더 민감하다는 것을 보여준다. 이러한 결과로 미루어 볼 때, 등가선형해석법은 지반의 지진 응력에 따른 전단변형 특성을 제대로 모사하지 못하여 부지응답을 크게 계산하는 특성을 보이는 것으로 판단된다. 해석방법에 따른 증폭계수 값 차이는 있으나 전체적으로 대상구간의 단주기 증폭계수는 1.0-1.75, 장주기 증폭계수는 1.2-1.33의 범위 내에 있다는 것을 알 수 있다.

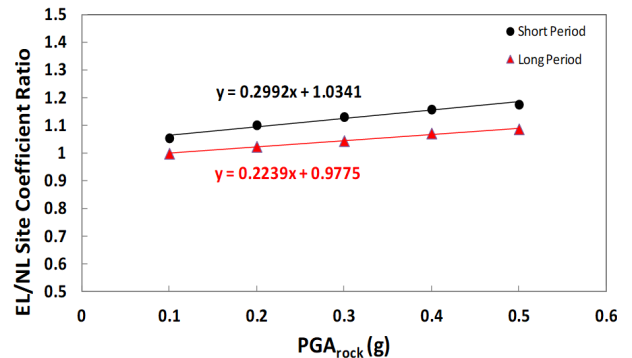


Fig. 6. Comparison analysis methods of site coefficient ratio for periods

#### 4.3 권역별 분류에 따른 증폭계수 차이

연구수행지역은 크게 도심지와 외곽지로 분류할 수 있는데 도심지는 퇴적토층이 두텁고 외곽은 주로 산지로 구성되어 있다. 이에 도심지와 외곽지로 분류하여 증폭계수를 구분하여 해석결과를 정리하였다. 상대적으로 인구밀도가 높은 지역을 도심지로 구분하고 그 외 지역을 외곽지로 구분하였다.

Table 6과 Fig. 7은 권역별 분류에 따른 증폭계수를 나타낸 것이다. 해석결과를 보면, 0.3g 미만의 장주기 증폭계수를 제외한 모든 구간에서 외곽지의 증폭계수가 도심지의 그것보다 큰 결과를 보였다. 단주기 증폭계수  $F_a$ 의 경우, 외곽지가 도심지보다 33~88% 큰 값을 보였으며, 장주기 증폭계



Table 6. Site coefficient according to region classification

		S=0.1	S=0.2	S=0.3	S=0.4	S=0.5
Outskirt	F <sub>a</sub>	1.856	1.675	1.532	1.408	1.289
	F <sub>v</sub>	1.243	1.274	1.285	1.28	1.275
Downtown	F <sub>a</sub>	1.387	1.019	0.879	0.749	0.69
	F <sub>v</sub>	1.346	1.311	1.265	1.172	1.104

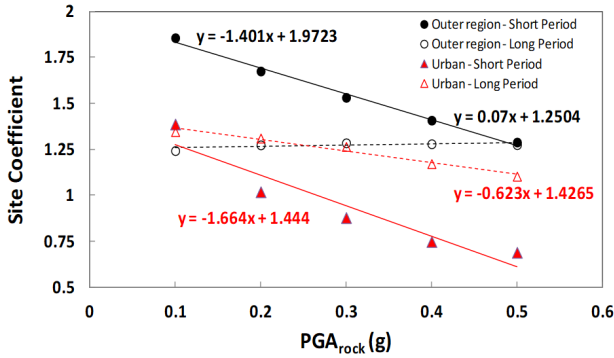


Fig. 7. Site coefficient according to region classification

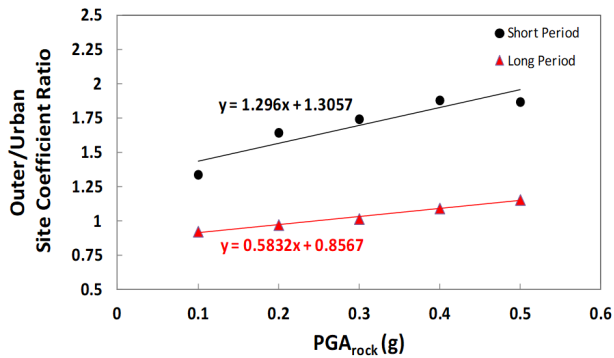


Fig. 8. Site coefficient ratio for periods according to region classification

수 F<sub>v</sub>의 경우, PGA<sub>rock</sub>가 0.3g 이하일 때는 3~8% 작은 값을 보이다가 PGA<sub>rock</sub>가 0.3g 이상이 되면서부터 1~15% 큰 값을 보였다. 외곽지에서의 장주기 증폭계수는 PGA<sub>rock</sub>에 따른 변화가 크지 않지만, 단주기 증폭계수는 외곽지와 도심지 모두 PGA<sub>rock</sub>에 따른 변화가 큰 것을 알 수 있다. Fig. 8은 PGA<sub>rock</sub>에 따른 증폭계수비를 주기별로 분류하여 나타낸 그래프이다. 결과에 따르면, PGA<sub>rock</sub>가 증가할수록 증폭계수비도 커지는 것을 알 수 있다. 또한, 장주기보다 단주기 증폭계수 기울기 값이 더 크며, 이는 단주기 증폭계수가 PGA<sub>rock</sub>에 더 민감하다는 것을 보여준다. 도심지는 제 4기 충적층의 두터운 퇴적토층으로 이루어진 반면 외곽지는 화산암류로 얇은 토층을 가지고 있다(Park et al., 2015). 산지가 퇴적토층에 비해 좀 더 단단한 지질로 이루어져 있으며, 이러한 지질구조의 차이로 인해 외곽지에서의 증폭계수 민감도가 더 크고, 권역별 분류에 따른 증폭계수 차이를 야기 한 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 대상구간을 선정하여 그 구간의 지반정보를 활용한 부지 응답해석을 수행하여 진도와 증폭계수를 산정하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 비선형 해석으로 도출된 진도가 증폭계수로 산정되는 진도보다 더 낮게 산출되었다. 이는 등가해석을 기반으로 한 지반증폭 계수가 과대할 수 있음을 보여주는 결과이다.
- (2) 지진의 우세 주기에 따른 응답 차이도 나타났는데 단주기 지진에서는 PGA와 PGV로 계산된 진도분포가 유사하게 나타났지만, 장주기 이상 지진에서는 PGV진도 분포가 PGA진도 분포보다 낮게 나타났다. 이 결과는 동일한 가속도라도 지진과 주기에 따라 최대 속도가 달라질 수 있음을 보여준다. 따라서, 구조물의 피해 여부가 파악되지 않는 조건에서는 속도를 기준으로 유감진도와 매칭하는 것이 적절하다고 사료된다.
- (3) 지반응답해석결과, 특정 구간을 제외한 모든 구간에서의 증폭계수는 등가선형해석이 비선형해석보다 크다. 등가선형해석법은 지반에 전달되는 전단응력에 따른 전단변형 특성을 제대로 모사하지 못하여 부지응답을 크게 계산하는 특성을 보이는 것으로 판단된다. 또한, 외곽지가 도심지에서보다 큰 증폭계수가 도출되었는데 이는 도심지보다 단단한 지질을 가진 외곽지의 지질구조가 영향을 준 것으로 판단된다.
- (4) PGA<sub>rock</sub>가 증가할수록 증폭계수비도 커졌는데 장주기보다 단주기가 PGA<sub>rock</sub>에 더 민감하였다. 해석방법에 따른 증폭계수값 차이는 있으나 전체적으로 대상구간의 단주기 증폭계수는 1.0-1.75, 장주기 증폭계수는 1.2-1.33의 범위 내에 있었다.
- (5) 한 지점의 지반조사 결과는 권역을 대표하는 값으로 보기는 어렵고, 지반분류를 통한 증폭계수가 목표 구간의 근사 해법이 되기 힘들다. 지진에 대한 관심은 지자체별로 차이가 있고, 이에 따라 지역별 지진재해대응책 마련되고 있다. 본 연구에서는 내진설계 공동기준으로 사용되는 증폭계수와 특정 대상구간에 대한 증폭계수 차이를 확인하였다. 행정구역 단위의 지진피해 추정을 위해서는 권역에 따른 분류가 필요하다고 판단된다.
- (6) 향후 전 국토 단위보다 권역을 중심으로 한 증폭계수 혹은 피해추정을 위한 연구방안이 필요하다. 이때 대상구간의 지반정보를 적절하게 활용한다면 관측소 지진 기록을 기반으로 행정구역별 확률론적 계기진도 산출이 가능할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 「지진·지진해일·화산감시 및 예측기술 개발」  
과제(과제번호: 135002988)의 일환으로 수행되었습니다.

## References

1. Ahn, J. K., Cho, S., Jeon, Y. S. and Lee, D. K. (2018), Response characteristics of site-specific using aftershock event, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 34, No. 8, pp. 51~64 (In Korea).
2. Bernard, R. W., Jason, T. D. and Thomas, S. (2012), Guidelines for estimation of shear wave velocity profiles, PEER 2012/09, December 2012.
3. Cho, H. I., Manandhar, S. and Kim, D. S. (2016), Site classification and design response spectra for seismic code provisions - (I) Database and site response analyses, *Journal of the Earthquake Engineering Society*, Vol. 20, No. 4, pp. 235~243 (In Korea).
4. Hashash, Y. M. A., Musgrove, M. I., Harmon, J. A., Groholski, D. R., Phillips, C. A. and Park, D. (2015), DEEPSOIL 6.0. User Manual, 116.
5. Idriss, I. M. and Seed, H. B. (1968), Seismic response of horizontal soil layers, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, Vol. 94, No. 4, pp. 1003~1031.
6. Idriss, I. M. and Sun, J. I. (1993), User's manual for SHAKE91: a computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits, Dept. of Civil and Environmental Eng. Univ. of California, Davis, California.
7. Integrated DB Center of National Geotechnical Information (2010), Website: [www.geoinfo.or.kr](http://www.geoinfo.or.kr)
8. Kim, B., Hashash, Y. M., Stewart, J. P., Rathje, E. M., Harmon, J. A., Musgrove, M. I., Campbell, K. W. and Silva, W. J. (2016), Relative differences between nonlinear and equivalent-linear 1-D site response analyses. *Earthquake Spectra*, Vol. 32, No. 3, pp. 1845~1865.
9. Korea Meteorological Administration (KMA) (2018a), Research on application and support for the earthquake and volcanic service(I): Requirement of stabilization of earthquake early warning system and provision of accurate intensity information. Report No. 11-1360000-001525-10, pp. 14~23 (In Korea).
10. Korea Meteorological Administration (KMA) (2018b), Seismic intensity class of status based on MMI, Available at: [http://www.weather.go.kr/weather/earthquake\\_volcano/intensity\\_info.jsp](http://www.weather.go.kr/weather/earthquake_volcano/intensity_info.jsp), Accessed: Nov., 2019 (In Korean).
11. Kwok, O. L. A., Stewart, J. P., Kwak, D. Y. and Sun, P. L. (2018), Taiwan-specific model for Vs30 prediction considering between-proxy correlations, *Earthquake Spectra*, Vol. 34, No. 4, pp. 1973~1993.
12. Lee, J. S. (2019), A Study on microzonation of Sejong city area by site amplification characteristics, Master dissertation, Chungnam National University, Korea (In Korea).
13. Matasovic, N. (1993), Seismic response of composite horizontally-layered soil deposits, Ph.D. Thesis, University of California, Los Angeles.
14. Ministry of the Interior and Safety (2017), Common application of seismic design standards, Enforcement ordinance of the earthquake and volcano disaster countermeasure act article 10-2, 2017.12.19. (In Korea), (<http://www.law.go.kr/법령/지진재해대책법시행령>)
15. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2017), Guidelines for computerization and use of geo survey results, 2017.4.18. (In Korea) (<http://law.go.kr/LSW/admRulLsInfoP.do?admRulSeq=2100000085549>)
16. Ordonez, G. A. (2012), SHAKE2000: A computer program for the 1-D analysis of geotechnical earthquake engineering problems, GeoMotions, LLC:Lacey, Washington, USA.
17. Park, D. and Hashash, Y. M. (2004), Soil damping formulation in nonlinear time domain site response analysis, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp. 249~274.
18. Park, J. Y., Kim, J. M. and Yoon, S. H. (2015), "Three-dimensional geologic modeling of the Pohang basin in Korea for geologic storage of carbon dioxide", *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol. 51, No. 3, pp. 289~302.
19. ProShake User Manual: PROSHAKE: Ground response analysis program, Version 1.1, EduPro Civil Systems, Inc., Redmond, Washington (1996).
20. Stewart, J. P., Klimis, N., Savvaidis, A., Theodoulidis, N., Zargli, E., Athanasopoulos, G. and Margaris, B. (2014), Compilation of a local Vs profile database and its application for inference of Vs30 from geologic-and terrain-based proxies, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 104, No. 6, pp. 2827~2841.
21. Sun, C., Kim B., Park, K. and Chung, C. (2015), Geotechnical comparison of weathering degree and shear wave velocity in the decomposed granite layer in Hongseong, South Korea, *Environmental Earth Science*, Vol. 74, No. 9, pp. 6901~6917.
22. Wald, D. J. and Allen, T. I. (2007), Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 97, No. 5, pp. 1379~1395.
23. Wald, D. J., Worden, B. C., Quitoriano, V. and Pankow, K. L. (2006), ShakeMap® manual. Technical Manual, users guide and software guide Version.