

## 2-매개변수 지반분류 방법 및 지반 증폭계수의 검증 (II) - 국내 실지진 기록을 통한 검증

### Verification of 2-Parameters Site Classification System and Site Coefficients (II) - Earthquake Records in Korea

이 세 현<sup>1</sup> Lee, Sei-Hyun

박 동 희<sup>2</sup> Park, Dong-Hee

하 정 곤<sup>3</sup> Ha, Jeong-Gon

김 동 수<sup>4</sup> Kim, Dong-Soo

#### Abstract

Following the companion paper (I. Comparisons with Well-known Seismic Code and Site Response Characteristics), several acceleration data recorded during recent earthquake events in Korea were analyzed to verify the suitability of the proposed two-parameters site classification system and the corresponding site coefficients. For all of rock-soil site pairs less than 30 km distant, response spectrums and corresponding site coefficients,  $F_a$  and  $F_v$ , were determined. Unfortunately, some of data have an eccentric error, where the spectral acceleration of rock site is more amplified than that of soil site. The  $F_a$  and  $F_v$  for all of pairs except the pairs of error were compared with those in the current code and the proposed system. The  $F_a$  and  $F_v$  from the recorded motions show definitely different trend from that of the current code. In addition, the site coefficients from recorded motions at four 765 kV substation sites, which are several hundred meters distant, have a remarkably similar trend and absolute values to those in proposed two-parameters site classification system. Based on earthquake motions recorded in domestic areas including data from the four 765 kV substation sites, the two-parameters site classification and site coefficients are superior to the results obtained from the current Korean seismic code.

#### 요 지

동반논문(I. 국외 내진설계기준 및 부지응답특성과의 비교)에 이어서 2-매개변수 지반분류 방법의 지반 증폭계수가 국내 지반조건 및 지반증폭특성에 적합함을 검증하기 위하여, 2003년 이후 국내에서 발생 또는 영향을 미친 주요 지진에 대한 계측 기록을 분석하였다. 거리가 30km 이내인 암반 계측 관측소와 토사지반 계측 관측소의 계측 자료들을 추출하여 시간영역 가속도 신호로부터 암반 및 토사지반에서의 응답스펙트럼을 각각 결정하였고, 이로부터 단주기 및 장주기 증폭계수를 결정하였다. 일부 오류가 발생한 데이터들도 존재하였지만, 대부분 국내 지반 특성에 적합하도록 단주기 영역에서의 증폭이 장주기 영역보다 크게 나타났다. 또한 2-매개변수 지반분류 방법에서 제안하는 지반 증폭계수는 실지진 계측 기록으로부터 획득한 결과와 매우 유사한 경향을 보임으로써 타당성을 확인하였다. 또한, 한국전력연구원에서 운영중인 4개의 765kV 변전소 지진 계측 기록을 추가적으로 분석하였다. 암반 계측과 토사지반 계측 사이의 거리가 수백 m로 가깝게 설치되었으므로 오류 없이 일관된 결과를 도출하였고, 2-매개변수 지반분류 방법의 지반 증폭계수는 경향성 및 절대값에서 실지진 계측 자료 분석 결과와 유사성을 보이면서 국내 지반 조건에

1 정희원, 한국원자력안전기술원 구조부지평가실 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Dept. of Structural System and Site Evaluation, Korea Institute of Nuclear Safety)

2 비희원, 한국수력원자력(주) 중앙연구원 부지재해평가팀 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Site Hazard Assessment Team, KHNP-CRI)

3 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST)

4 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST, dskim@kaist.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

대한 적합성을 검증하였다.

**Keywords :** 765 kV Substation sites, Recorded acceleration records, Rock-soil sites pair, Site coefficients, Two-parameters site classification system

## 1. 서론

미국과 같은 강진 지역에서는 Loma Pieta 지진(1989), Northridge 지진(1994) 등의 계측 자료를 바탕으로 지반 증폭계수의 정량적인 평가 및 개선을 수행하였다(Joyner 등, 1994; Dobry 등, 1999; 2000). 국내에서는 2002년부터 지진 관측이 활발히 수행되기 시작했고, 그 동안 공학적인 활용이 미흡했던 국내 실지진 계측 자료의 활용이 지진관련 연구자들로부터 점차적으로 이루어지고 있다(김준경, 2009; 박동희 등, 2003; 연관희와 서정희, 2007; Lee 등, 2011). 본 논문에서는 최근 국내에서 계측된 실지진 기록을 이용하여, 동반논문에서 설명한 2-매개변수 지반분류 방법(김동수 등, 2008)이 현행 국내 내진설계기준에 비하여 국내 지반조건 및 지반 증폭 특성에 적합함을 검증하였다.

그림 1은 2003년 이후 국내에서 발생 또는 영향을 미친 주요 발생 지진에 대한 정보를 나타낸다. 본 연구에서는 2004년 울진 해역 지진, 2005년 후쿠오카 지진, 2007년 오대산 지진, 2008년 제주도 해역 지진, 2008년 공주 지진에 대해 계측 자료를 획득하고 분석을 수행하였다. 이 중 공주 지진은 국내에서 가장 최근에 발생한 주요 지진으로 규모가 3.4로 계측되었지만, 진앙지가 국내 내륙 지역이어서 감지된 진동의 크기가 충분히 클 것으로 예상되어 분석에 포함하였다. 또한 최근 신설된 한국전력공사 765kV 변전소 부지의 지진 계측 시스템

에서 계측된 지진 기록을 함께 분석함으로써 검증의 타당성을 뒷받침하였다.

## 2. 국내 지진 관측망 현황

국내에서 지진관측망을 운영하는 주요기관으로는 기상청(KMA), 한국지질자원연구원(KIGAM), 한전전력연구원(KEPRI), 한국원자력안전기술원(KINS) 등이 있다. 이 기관들은 1999년 지진관측망운영기관 협의회를 구성하여 지진관측시스템 표준화, 지진관측소 신설, 실시간지진관측망 통합 및 자료 공동이용에 대하여 협력하여 왔다. 2002년부터 한국지질자원연구원에서 개발한 실시간 통합지진관측망(KISS : Korea Integrated Seismic System)을 통해 상기 4개 기관은 타 기관의 지진관측 자료를 실시간 공유할 수 있게 됨으로써 지진통보를 담당하는 기상청뿐 아니라 다른 기관에서도 각자의 관측 목적에 맞게 자료를 활용할 수 있게 되었다. 또한, 2008년 제정된 “지진재해대책법 제5조, 제6조 규정” 및 2010년 제정된 “지진가속도계측기 설치 및 운영기준”에 따라 다양한 시설물에 지진 가속도 계측기의 설치가 의무화되고 있으므로, 향후, 내진대책 및 지진재해 저감, 계측자료를 이용한 내진 연구에 활용도가 클 것으로 판단된다.

일반적으로 매우 작은 규모의 지진에 대해서도 민감한 반응을 보이는 속도 센서를 지진관측 및 연구에 주로 이용하지만, 천부에서 발생한 중규모 지진 또는 대규모 지진의 경우 속도센서의 측정 범위를 초과할 수 있으므로 가속도 센서를 병행하여 운용하기도 한다. 또한 가속도 센서는 속도 센서에 비하여 가격이 저렴한 편이므로 지진 방재를 위한 계기진도 평가를 위해서 많이 설치되는 것이 보편적이다. 국내에 설치된 가속도 센서의 용도는 속도계와 함께 위치하여 암반에서의 가속도 응답을 관측하는 암반 가속도 계측과 토사지반의 가속도 응답을 관측하기 위한 자유장 가속도 계측, 그리고 구조물의 지진 가속도 응답을 관측하기 위한 구조물 가속도 계측으로 나눌 수 있다. 2010년 6월을 기준으로 KMA 112개

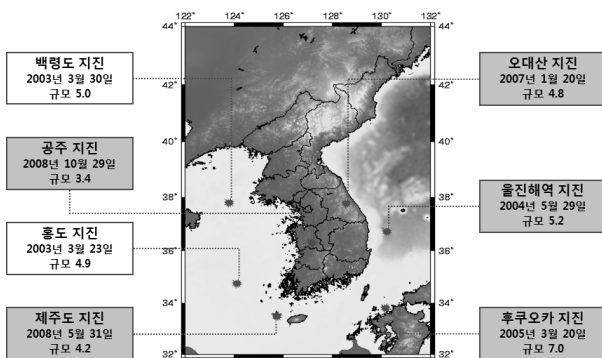


그림 1. 2003년 이후, 국내에서 계측된 주요 지진

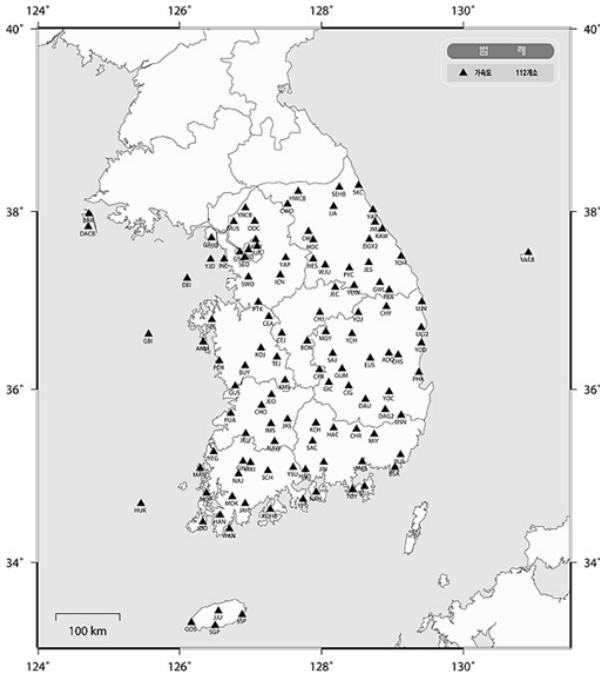


그림 2. 기상청에서 운영중인 국내 가속도 관측소 분포

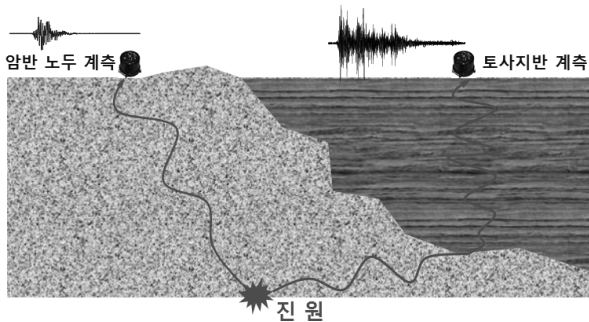


그림 3. 암반 및 토사지반 계측 자료를 이용한 지반증폭특성 평가

소, KIGAM 25개소, KEPRI 21개소, KINS 4개소에서 암반 또는 토사지반에서의 지진응답 관측을 위한 가속도 관측소를 운영하고 있다(국토해양부, 2010). 그림 2에는 KMA에서 운영중인 국내 가속도 관측소의 분포를 나타내고 있다(기상청, 2009).

### 3. 국내 가속도 계측 기록을 이용한 지반증폭특성 평가

그림 3에서 보듯이, 암반에서 계측된 가속도 기록은 토사지반에 의한 증폭 효과가 배제되기 때문에 일반적으로 토사 지역에서 계측된 기록보다 작은 PGA(Peak Ground Acceleration) 값을 갖는다. 따라서 암반 및 토사지반에서 기록된 가속도 계측 자료를 분석함으로써 지반 조건에 의한 지반증폭특성을 평가할 수 있다. 강진

지역인 미국 California 지역의 경우, 암반, 연약지반, 보통 지반 등 다양한 지반 조건의 지역에 관측소가 설치되어 계측이 이루어지고 있고, 그 중 지표면 자유장 관측소인 Treasure Island에서의 계측 기록과 인근 암반 노두 관측소인 Yerba Buena Island에서의 계측 기록을 비교하여 지진파에 의한 지반증폭특성을 신뢰성 있게 평가하고 있다(Idriss, 1991).

국내의 경우, 기상청을 제외한 나머지 3개의 기관에서 운영하는 대부분의 가속도 센서는 정확한 지진원 평가, 광역적인 지진파 전파 특성 평가를 목적으로 부지효과가 반영되지 않는 암반 노두에 설치되어 있다. 그러나 기상청의 경우, 최근에 설치된 가속도 계측기는 대부분 암반 노두에 위치하고, 과거 경제적인 이유로 토사지반에 설치되었던 가속도계들도 암반 노두로 이전하는 작업이 진행되고 있지만(한국과학기술한림원, 2008), 많은 경우, 암반에 설치되어 있는지 토사지반에 설치되어 있는지 확인이 어려운 실정이다. 가장 신뢰할 수 있는 방법은 관측소 부지에서 직접 현장 탄성과 시험을 실시하여 전단파속도 주상도를 획득하고 이를 통해 지반분류를 수행하는 것이지만, 관측소의 여건상 쉽지 않은 경우가 대부분이다.

본 연구에서는 다음과 같은 가설을 바탕으로 암반 및 토사지반 관측소를 구분하였다. 일반적으로 속도 센서는 정확한 지진원의 규모 및 위치를 평가하기 위해 암반 노두에 설치하는 것을 통념화 하고 있다. 따라서 속도 및 가속도 계측을 병행하여 운영하고 있는 관측소의 경우, 가속도 센서가 속도 센서와 함께 암반 노두에 설치되어 있을 가능성 크고, 가속도 센서만 단독을 운영되고 있는 관측소는 지상 기상대 부근 토사지반에 설치되어 있을 가능성이 큰 것으로 추정된다. 이는 기상청을 비롯한 몇몇 기관의 지진 감시 업무를 수행하고 있는 담당자에게 확인한 사항이다. 본 연구에서는 이 점을 고려하여 암반 관측소와 토사지반 관측소를 구분하여 분석을 수행하였다.

2004년 울진 해역 지진, 2005년 후쿠오카 지진, 2007년 오대산 지진의 계측 기록에 대해 앞서 언급한 관측소 구분 기준에 따라 암반 계측 기록과 토사지반 계측 기록으로 구분하였다. 관측소의 위·경도 정보를 바탕으로 관측소 사이의 거리를 계산하였고, 이 중에서 암반 계측과 토사지반 계측 관측소 사이의 거리가 30km 이내인 계측 자료들을 추출하였다. 울진 해역 지진은 23개의 암반 및 토사지반 계측 자료 세트를 획득하였고, 후쿠오카

지진은 24개, 오대산 지진은 30개를 획득하였다. 오대산 지진에서 획득한 30개 가속도 기록의 암반 및 토사지반 관측소에 관한 정보를 표 1에 나타내었다.

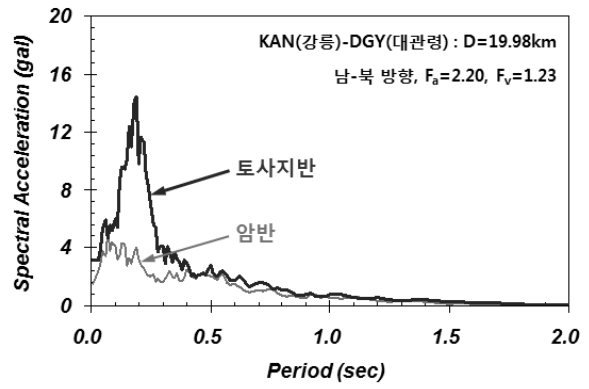
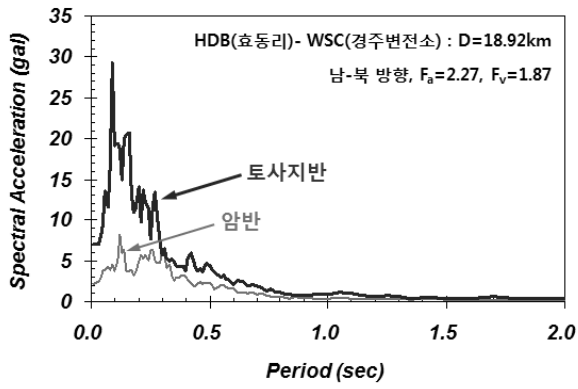
각 지진에 대해 계측된 시간영역 가속도 신호로부터 암반 및 토사지반에서의 응답스펙트럼을 각각 결정하였고, 동반논문(I. 국외 내진설계기준 및 부지응답특성과의 비교)에서 제시된 방법에 따라 단주기 및 장주기 증폭계수를 산정하였다. 분석이 수행된 지진에 대한 대표적인 결과를 그림 4에 나타내었다. 각 관측소의 지반 조건, 두 관측소 사이의 거리, 진앙과 각 관측소 사이의 거리에 따라 응답스펙트럼 및 산정된 지반 증폭계수가 다양하게 나타나고 있다. 중약진 지역인 국내의 지진학적 특성상 스펙트럴 가속도의 절대적인 크기는 작은 편

이지만, 단주기적 특성을 지닌 국내 지반조건을 반영하듯, 단주기 영역에서 토사지반 계측 기록의 증폭이 크게 나타나고 있다. 반면, 후쿠오카 지진은 규모 7.0의 비교적 큰 규모의 영향으로 암반 및 토사지반 응답스펙트럼에서 장주기 영역의 스펙트럴 가속도 값이 비교적 크게 계측되었음을 확인할 수 있다.

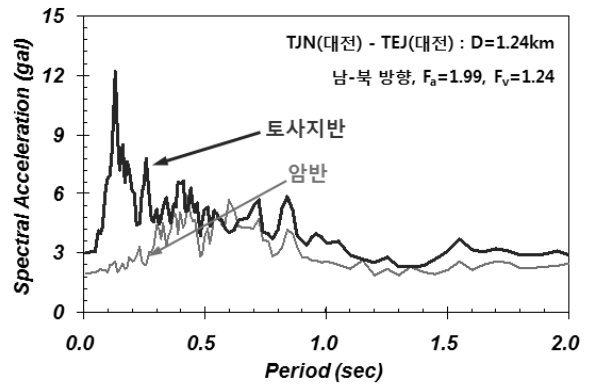
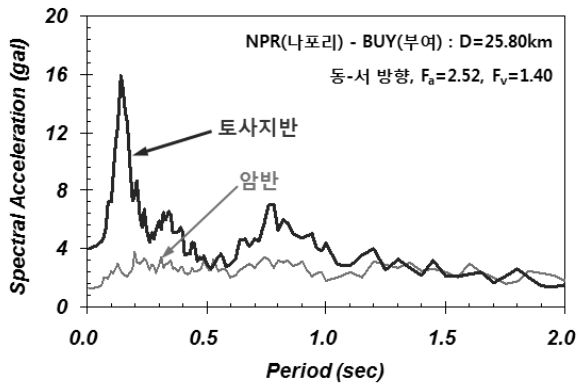
그러나, 위와 같은 분석이 이루어진 가속도 계측 자료들 중에는 암반 및 토사지반 관측소 사이의 거리가 최대 30km로 비교적 멀고, 기상청 관측소 부지의 경우, 암반 계측인지, 토사지반 계측인지 명확히 구분되지 않지 때문에 상식에 어긋난 결과를 도출한 자료도 일부 존재하였다. 예를 들어, 그림 5와 같이 암반에서의 계측 기록이 단주기 영역 또는 장주기 영역에서 토사지반 계측 기록

표 1. 거리 30km 이내의 암반 및 토사지반 관측소 정보(오대산 지진, 2007)

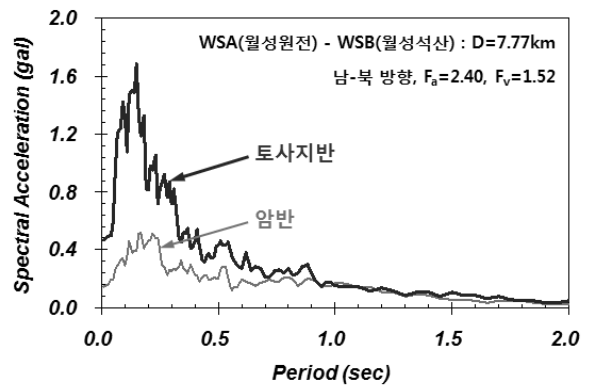
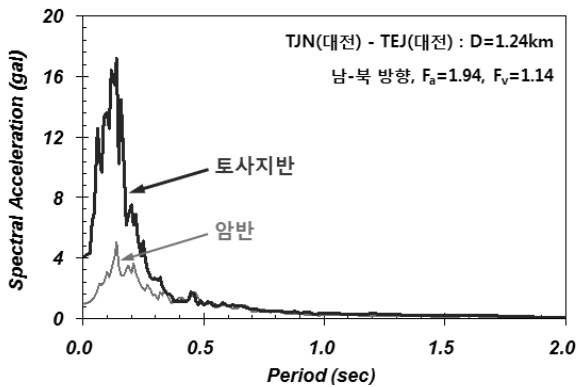
#	암반 계측 관측소(Rock)				토사지반 계측 관측소(Soil)				거리 (km)
	CODE	관측소명	위도	경도	CODE	관측소명	위도	경도	
1	TJN	대전	36.377	127.364	TEJ	대전	36.368	127.371	1.24
2	HDB	효동리	35.731	129.401	WSA	월성원전	35.713	129.477	7.23
3	HKU	교원대	36.610	127.360	CEJ	청주	36.635	127.439	7.62
4	WSB	월성석산	35.672	129.408	WSA	월성원전	35.713	129.477	7.77
5	CHC	춘천	37.778	127.815	HOC	홍천	37.684	127.880	11.96
6	WSD	진전리	35.883	129.402	WSC	경주변전소	35.844	129.246	14.91
7	TOY	통영	34.845	128.436	KUJ	거제	34.884	128.604	15.97
8	HDB	효동리	35.731	129.401	WSC	경주변전소	35.844	129.246	18.92
9	ULJ	울진기상대	36.702	129.408	YOD	영덕	36.525	129.407	19.66
10	DGY	대관령	37.690	128.674	KAN	강릉	37.743	128.889	19.98
11	WSD	진전리	35.883	129.402	WSA	월성원전	35.713	129.477	20.14
12	ICN	이천기상대	37.291	127.417	YAP	양평	37.485	127.491	22.54
13	ULS	울산기상대	35.554	129.320	WSA	월성원전	35.713	129.477	22.68
14	DAG	대구	35.769	128.897	YOC	영천	35.971	128.952	23.06
15	WAN	완도	34.389	126.702	HAN	해남	34.573	126.569	23.72
16	KRC	서산리	35.586	129.268	WSA	월성원전	35.713	129.477	23.75
17	WSB	월성석산	35.672	129.408	WSC	경주변전소	35.844	129.246	24.10
18	AND	안동기상청	36.569	128.706	EUS	의성	36.352	128.687	24.11
19	NPR	나포리	36.040	126.869	BUY	부여	36.268	126.920	25.80
20	SEO	서울기상청	37.488	126.919	INC	인천	37.471	126.623	26.41
21	KHD	강화도	37.701	126.379	YJD	영종도	37.467	126.434	26.43
22	CHO	전주	35.818	127.154	IMS	임실	35.606	127.286	26.44
23	CEA	천안(단)	36.823	127.258	CEJ	청주	36.635	127.439	26.51
24	MUS	문산	37.888	126.759	DDC	동두천	37.893	127.058	26.53
25	HSB	홍성	36.553	126.638	POR	보령	36.321	126.556	26.71
26	HKU	교원대	36.610	127.360	TEJ	대전	36.368	127.371	26.88
27	HSB	홍성	36.553	126.638	ANM	안면	36.539	126.330	27.78
28	KRC	서산리	35.586	129.268	WSC	경주변전소	35.844	129.246	28.64
29	TJN	대전	36.377	127.364	CEJ	청주	36.635	127.439	29.38
30	SES	서산	36.789	126.453	ANM	안면	36.539	126.330	29.95



(a) 울진해역 지진(2004)



(b) 후쿠오카 지진(2005)



(c) 오대산 지진(2007)

그림 4. 암반 및 토사지반 계측 자료로부터 획득한 대표적 응답스펙트럼 예

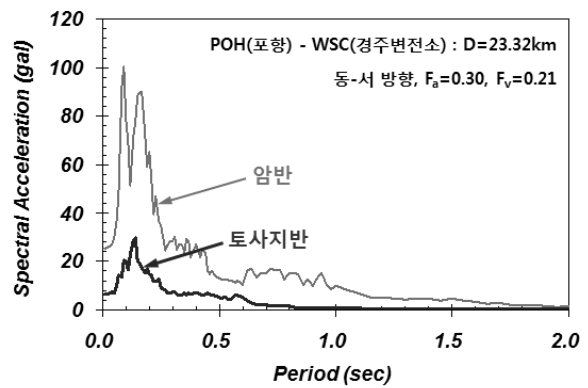
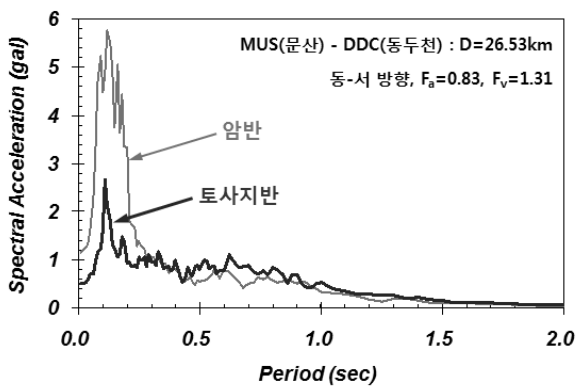


그림 5. 암반 및 토사지반 계측 자료의 잘못된 예

보다 크게 증폭되어 단주기 및 장주기 증폭계수가 1보다 작아지는 경우로써, 울진 해역 지진이 23개 중 9개, 후쿠오카 지진은 24개 중 8개, 오대산 지진은 30개 중 6개의 자료에서 오류가 발생하였다. 이는 대부분 암반 계측 관측소와 토사지반 계측 관측소 사이의 거리가 20km 이상으로 먼 자료들에서 발생하였다.

암반 계측과 토사지반 계측 관측소 사이의 거리가 30km 이내인 가속도 자료들 중 그림 5와 같이 잘못된 자료들을 제외한 나머지 자료들에서 획득한 지반 증폭계수들을 내진설계기준연구II(동반논문의 표 1) 및 2-매개변수 지반분류 방법에서 제안하는 지반 증폭계수(동반논문의 표 2)와 함께 그림 6에 나타내었다. 각 지반분류 방법 및 관측소 계측 자료로부터 획득한 단주기 증폭계수( $F_a$ )를 그래프의 X축에 나타내고, 장주기 증폭계수( $F_v$ )를 Y축에 나타내어 경향성을 비교하였다. 즉, 그래프의 각 점 데이터는 각 계측 데이터 세트 및 지반 종류에 해당하는 지반 증폭계수를 의미하게 된다.

일반적인 국내 지반특성상 가속도 센서가 설치되는 토사지반은 전단파속도가 높은 단주기적 특성을 지닌 지반으로 예상된다. 따라서 그림 6에서 보듯이, 실지진 계측 기록으로부터 획득한 대부분의  $F_a$ 는  $F_v$ 보다 크게 나타남으로써 단주기 영역에서의 증폭이 크게 발생하고 있다. 내진설계기준연구II에서 제시하는 지반 증폭계수는 미국 서부해안 지역의 기반암이 깊고, 장주기적 특성을 지닌 지반에 적합하므로 국내 실지진 계측 기록과 현저한 차이를 보이고 있다. 반면, 2-매개변수 지반분류 방법에서 제안하는 지반 증폭계수는 125개의 국내 지반에 대한 부지응답해석 결과로부터 결정되었으므로 국내 실지진 계측 기록과 유사한 경향을 보이고 있다.

단, 2-매개변수 지반분류 방법에서 H<sub>3</sub>-1 지반은  $F_a$ 가  $F_v$ 보다 작게 나타남으로써 국내 실지진 계측 기록과 다른 경향을 보이고 있지만, 이는 기반암 깊이가 20m 이상, 토층 평균 전단파속도가 200m/s 이하의 연약한 지반이기 때문에 일반적으로 기상대 및 가속도 센서를 설치하지 않았을 것으로 예상된다. 또한, 국내 실지진 계측 기록으로부터 획득한 지반 증폭계수의 경향성은 2-매개변수 지반분류 방법의 것과 유사하지만, 절대값은 많은 데이터에서 크게 나타나는 것으로 확인된다. 이는 지진에 의해 기록된 가속도 값이 아주 작고, 암반 및 토사지반 계측 관측소 사이의 거리가 최대 30km로 비교적 멀기 때문이다. 또한, 기상청 관측소의 경우, 관측소 하부 지반에 대한 정보가 전무하여 암반 또는 토사지반 계측

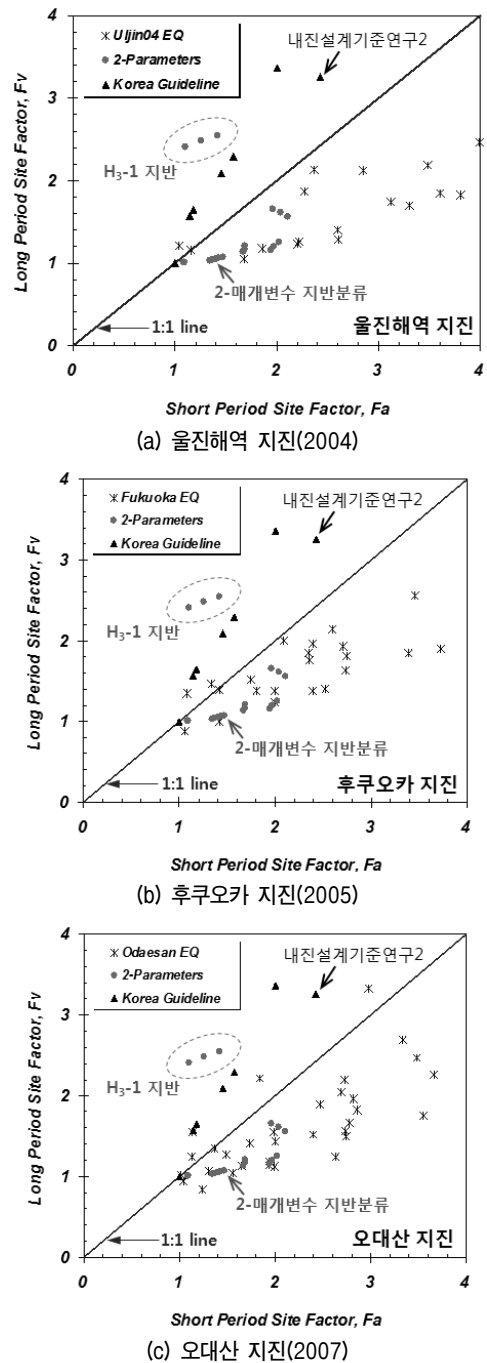


그림 6. 내진설계기준연구II와 2-매개변수 지반분류 방법에서 제안하는 지반 증폭계수와의 비교(KISS)

의 명확한 구분이 이루어지지 않은 점도 하나의 이유가 될 것이다. 따라서 추후, 부지효과에 의한 지반증폭특성을 신뢰성 있게 평가하고, 실제 지진에 의해 지표면에서 발생하는 피해를 정확히 예측하기 위해, 기반암 및 암반 노두에서의 계측 뿐 아니라 인근 토사층 및 지표면에도 가속도 센서를 매설하여 계측을 수행할 필요가 있다. 그리고 토사지반 관측소 부지에 대한 전단파속도 주상도 및 비선형 동적 변형특성을 평가하고, 이로부터 수행된

부지응답해석 결과와 실지진 계측 기록의 비교를 통하여 지반 증폭계수의 합리성을 명확히 검증할 필요가 있다.

#### 4. 765kV 변전소 부지 가속도 계측기록을 통한 지반증폭특성 평가

한국전력연구원(KEPRI)은 4개의 765kV 변전소(신안성, 신가평, 신서산, 신태백)에 지진계측시스템을 설치하여 2006년 11월부터 시범 운영중에 있다(지식경제부, 2008). 765kV 변전소의 지진계측시스템은 지진발생시 신속한 피해 평가와 안전조치 그리고 765kV 변전소의 내진 안전성 평가 및 내진설계에 필요한 입력지진동의 확보를 목적으로 구축되었다. 765kV 변전소의 경우 고도가 높은 산의 중턱 일부를 절개한 후 보다 넓은 부지를 확보하기 위해 성토를 실시하고 성토 지반 상부에 변전소를 설치하였다. 이와 같은 변전소의 일반적인 지반 조건을 고려하여, 성토 지역에 위치한 변전소 기초에 가속도 센서를 하나 배치하고, 인근 수백 m 떨어진 지역에서 절개된 부분의 노출된 단단한 기반암을 발견하여 그 위에 또 하나의 가속도 센서를 설치하였다. 그림 7은 신안성 변전소의 지진계측시스템을 보여주고 있다. 구조물 하부 기초에서 계측된 가속도 기록을 이용하여 성토 지반에 의한 지반 증폭특성을 평가하고자 한다. 나머지 신가평, 신서산, 신태백 변전소의 지진계측시스템은 신안성 변전소와 유사할 것으로 판단된다.

765kV 변전소 지진계측시스템은 2006년 11월부터 운영되었기 때문에 그림 1에 나타난 최근 국내 주요 지진 중, 2007년 오대산 지진, 2008년 제주 지진, 2008년 공주 지진의 계측 기록들을 분석하였다. 765kV 변전소



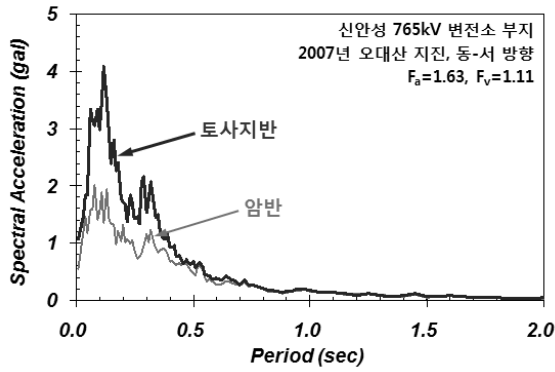
그림 7. 신안성 765kV 변전소 지진계측시스템

지진계측시스템은 현재 시범 운영중이므로 국가통합지진관측망에(KISS)에 연계되어 있지 않다. 따라서 한국전력연구원으로부터 직접 상기 지진 계측 기록들을 획득하였다.

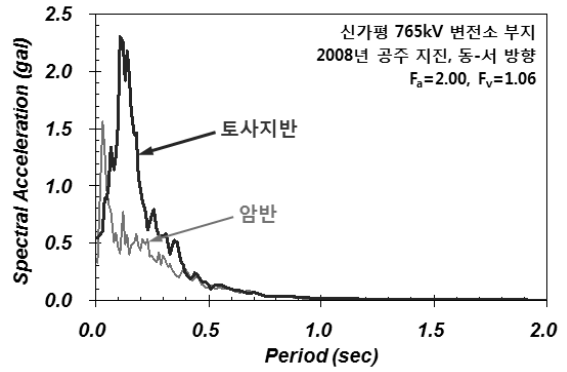
본 지진 계측 자료를 이용하여 2-매개변수 지반분류 방법의 합리성을 검증하는 방법은 위의 KISS에서 획득한 3개의 지진 기록에 대해 수행한 분석 방법과 동일하다. 즉, 암반 및 토사지반 계측 시간영역 가속도 기록에 대해 응답스펙트럼을 획득하고, 이로부터 지반 증폭계수간의 경향성을 검토하였다. 앞선 연구 결과와 달리, 암반 계측과 토사지반 계측 사이의 거리가 수백 m로 아주 가깝기 때문에 신뢰성 있는 결과가 기대된다.

각 765kV 변전소 부지의 암반 및 토사지반 계측 결과로부터 획득한 대표적인 응답스펙트럼을 결과를 그림 8에 나타내었다. 그림 8(d)의 신태백 변전소를 제외하고는 토사지반에서 계측된 단주기 영역 스펙트럴 가속도가 암반 계측 결과와 비교하여 크게 증폭되는 것을 확인할 수 있다. 또한 모든 변전소 결과에서 장주기 영역, 특히 주기 1초 이후의 스펙트럴 가속도가 거의 0으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 이는 단주기적 특성을 지닌 국내의 일반적인 지반 조건을 잘 반영하는 것으로 판단된다. 반면, 신태백 변전소의 경우는 암반 계측과 토사지반 계측 응답스펙트럼이 거의 유사한 것으로 나타나고 있다. 이는 두 지반 조건이 유사함을 의미한다. 연관희와 서정희(2007)는 4개의 765kV 변전소에서 계측된 자료를 바탕으로 주파수 특성을 분석하여 관측소의 등급을 평가하였다. 신안성, 신가평, 신서산 변전소는 암반 계측 지역이 A등급, 성토지반 계측 지역은 B등급으로 지반조건이 다르게 평가된 반면, 신태백 변전소는 암반 및 성토지반 계측 지역이 모두 C등급으로 평가되어 유사한 지반조건임을 설명하였다. 그림 8(b)의 신가평 변전소 암반 계측 기록을 보면 0.1초 이내 낮은 주기에서 크게 증폭이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 신가평 변전소에서 기록된 모든 계측 기록에서 동일하게 나타나고 있지만, 단주기 증폭계수를 계산하는 적분구간(0.1초~0.5초)을 벗어나기 때문에 크게 고려하지 않았다.

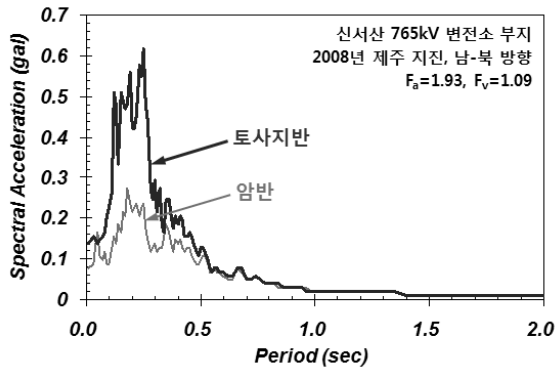
4개의 765kV 변전소에서 계측된 모든 지진 기록의 응답스펙트럼으로부터 획득한 지반 증폭계수를 내진설계기준연구II(동반논문의 표 1) 및 2-매개변수 지반분류 방법(동반논문의 표 2)에서 제안하는 지반 증폭계수와 함께 그림 9(a)에 도시하였다. 일부 신태백 변전소 계측



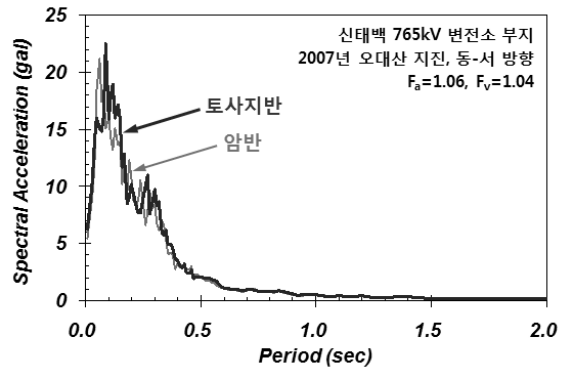
(a) 신안성(오대산 지진)



(b) 신가평(경주 지진)

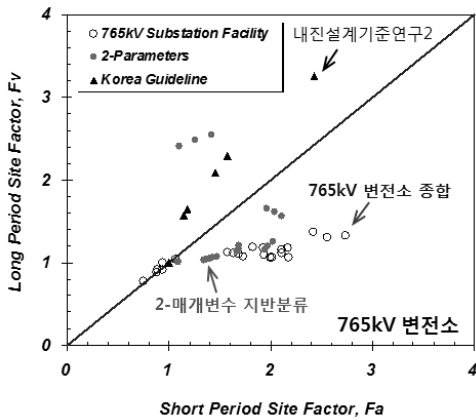


(c) 신서산(제주 지진)

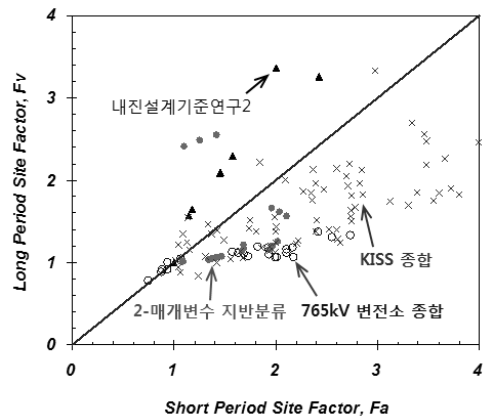


(d) 신태백(오대산 지진)

그림 8. 각 765kV 변전소에서 획득한 대표적인 응답스펙트럼 결과



(a) 765kV 변전소



(b) 종합적인 비교

그림 9. 내진설계기준연구2와 2-매개변수 지반분류 방법에서 제안하는 지반 증폭계수와의 비교(KISS + 765kV 변전소)

자료를 제외한 나머지 계측자료에서는 그림 5와 같은 오류가 발생하지 않아 모든 계측 기록을 도시하였다. 신태백 변전소 결과의 영향으로 1:1선 근처에 일부 데이터가 존재하지만 전체적으로 2-매개변수 지반분류 방법에서 제안하는 지반 증폭계수와 거의 동일한 경향을 나타내고 있고, 증폭계수의 절대값에서도 큰 차이 없이 유사함을 알 수 있다. 또한 앞서 그림 6에 나타난 울진해역 지진, 후쿠오카 지진, 오대산 지진에 대해 국내 전역에

분포된 가속도 센서 계측 결과로부터 획득한 지반 증폭계수를 그림 9(b)에 종합하여 도시하였다. 그동안 국내에서 계측된 실지진 기록이 공학적으로 활용 정도가 미미하였지만, 본 연구에서는 최근 신설된 765kV 변전소 지진계측시스템 계측 기록을 함께 활용하여 2-매개변수 지반분류 방법의 국내 지반 조건에 대한 적합성을 확인하였다. 그리고 추후 만들어질 지진관측소는 765kV 변전소 부지와 같이 암반 노두 인근 토사층 및 지표면에도



가속도 센서를 함께 매설하여 계측을 수행하고, 이로부터 부지효과 평가 및 지반 증폭계수 검증이 지속적으로 이루어져야 한다고 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 2-매개변수 지반분류 방법 및 지반 증폭계수의 국내 지반조건에 대한 적합성을 검증하기 위하여, 최근 국내에서 계측된 실지진 기록을 분석하였다.

- (1) 암반 계측과 토사지반 계측 관측소를 구분하여 두 관측소 사이의 거리가 30km 이내인 계측 자료들을 추출하였다. 계측된 시간영역 가속도 신호로부터 암반 및 토사지반에서의 응답스펙트럼을 각각 결정하였고, 이로부터 단주기 및 장주기 증폭계수를 결정하였다. 일부 오류가 발생한 데이터들도 존재하였지만, 대부분은 국내 지반 특성에 적합하도록 단주기 영역에서의 증폭이 장주기 영역보다 크게 나타났다. 또한 2-매개변수 지반분류 방법에서 제안하는 지반 증폭계수는 실지진 계측 기록으로부터 획득한 결과와 매우 유사한 경향을 보임으로써 타당성을 확인하였다.
- (2) 한국전력연구원에서 운영중인 4개의 765kV 변전소 지진 계측 기록을 이용하여 (1)의 결과를 뒷받침하였다. 암반 계측과 토사지반 계측 사이의 거리가 수백 m로 가깝게 설치되었으므로 오류 없이 일관된 결과를 도출하였고, 2-매개변수 지반분류 방법의 지반 증폭계수는 경향성 및 절대값에서 실지진 계측 자료 분석 결과와 유사성을 보이면서 국내 지반 조건에 대한 적합성을 검증하였다. 또한, 추후 만들어질 지진관측소는 765kV 변전소 부지와 같이 암반 노두 인근의 토사층 및 지표면에도 가속도 센서를 함께 매설하여 계측을 수행하고, 이로부터 부지효과 평가 및 지반 증폭계수의 검증이 지속적으로 이루어져야 한다고 판단하였다.

## 감사의 글

본 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로

로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이며(No. 2011-0000314 : 원심모형실험을 이용한 지반구조물의 방재성능평가), 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고 문헌

1. 국토해양부, 기상청 (2010), “지진 및 지진해일 관측망 종합계획 : 2010-2014”, 551.22087-11-1, 기상청 지진관리관실.
2. 기상청 (2009), “<http://www.kma.go.kr/>”.
3. 김동수, 이세현, 윤종구 (2008), “기반암 깊이와 토층 평균 전단 파속도를 이용한 국내 지반분류 방법 및 지반 증폭계수 개선”, 대한토목학회 논문집, 제28권 제1C호, pp.63-74.
4. 김준경 (2009), “오대산지진 자료를 이용한 국내 지진관측소 부지의 지반증폭특성 연구”, 한국지진공학회 논문집, 제13권 제1호, pp.27-34.
5. 박동희, 연관희, 장천중 (2003), “지진관측 자료를 이용한 국내 관측소의 지반특성 분류”, 한국지진공학회 2003년도 춘계학술대회 논문집, pp.61-68.
6. 연관희, 서정희 (2007), “지진동모델 파라미터 동지역산을 이용한 지진관측소 분류”, 물리탐사학회 논문집, 제10권 제3호, pp.183-190.
7. 지식경제부 (2008), “지진발생 시 765kV 변전설비의 내진성능평가 및 안전조치기술 개발”, R-2005-0-039, 한국전력연구원.
8. 한국과학기술한림원 (2008), “우리나라 지진재해 저감 및 관리대책의 현황과 개선 방안”, 한림원연구보고서 51.
9. Dobry, R., Borcherdt, R. D., Crouse, C. B., Idriss, I. M., Joyner, W. B., Martin, G. R., Power, M. S., Rinne, E. E. and Seed, R. B. (2000), “New site coefficients and site classification system used in recent building seismic code provisions”, Earthquake Spectra, Vol.16, No.1, pp.41-67.
10. Dobry, R., Ramos, R., and Power, M. S. (1999), “Site factors and site categories in seismic codes”, Technical Report MCEER-99-0010, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.
11. Idriss, I. M. (1991), “Earthquake ground motions at soft soil sites”, Proceedings of the Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Rolla, Missouri, Vol.3, pp.2265-2273.
12. Joyner, W. B., Fumal, T. E., and Glassmoyer, G. (1994), “Empirical spectral response ratios for strong motion data from the 1989 Loma Prieta, California, earthquake”, Proceedings of the 1992 NCEER/SEAOC/BSSC Workshop on Site Response During Earthquakes and Seismic Code Provisions, G. R. Martin, ed., University of Southern California, LA, November 18-20, 1992, National Center for Earthquake Engineering Research Special Publication NCEER-94-SP01, Buffalo, NY.
13. Lee, Sei-Hyun, Sun, Chang-Guk, Yoon, Jong-Ku, Kim, Dong-Soo (2011), “Development and verification of a new site classification system and site coefficients for regions of shallow bedrock in Korea”, Journal of Earthquake Engineering. (Accepted)

(접수일자 2012. 1. 6, 심사완료일 2012. 3. 20)