

국내 지진의 진도별 가속도 푸리에스펙트럼 통계모델

The Statistical Model of Fourier Acceleration Spectra according to Seismic Intensities for Earthquakes in Korea

연관희¹⁾ · 박동희²⁾ · 박세문³⁾

Yun, Kwan-Hee · Park, Dong-Hee · Park, Se-Moon

국문 요약 >> 본 연구에서는 지진파의 푸리에 가속도스펙트럼(Fourier Acceleration Spectrum)에 기반한 계측진도 평가방법(Sokolov and Wald, 2002)을 국내에 적용하기 위해 국내 지진 MMI ≤ IV 범위에 대한 진도별 FAS 통계특성(평균과 표준편차) 모델을 기상청 발표 진도자료로부터 도출된 65개 지진에 대한 등진도구역도(Isoseismal Maps)와 등진도구역도 상의 일관된 부지특성을 갖는 580개 수평성분 FAS 자료를 기반으로 경험적으로 도출하였다. 일관된 부지특성을 갖는 FAS는 특정 지진관측소에서 관측된 FAS를 국내 지반 물성을 대표할 수 있는 D 등급관측소(연관희와 서정희, 2007)의 부지증폭특성을 갖도록 변환하여 도출하였다. 국내 지진의 MMI ≤ IV 의 FAS 평균값은 로그영역에서 진도에 비례하는 선형성을 나타내었으며, 진도 IV에 대한 FAS 평균은 전 세계 모델과 유사한 특징을 보였다. 또한 진도 MMI ≤ IV의 FAS 표준편차는 진도 V 이상의 전 세계적인 모델의 표준편차 보다는 크게 평가되었으나, 진도 IV에 대한 전 세계적인 모델의 표준편차보다는 현저히 낮은 값을 나타내었다.

주요어 푸리에 가속도 스펙트럼, 지진진도, 등진도구역도, 지반분류

ABSTRACT >> A method of instrumentally estimating the seismic intensity (MMI) based on Fourier Acceleration Spectrum, which is the so-called 'FAS MMI method' of Sokolov and Wald (2002), was considered for its applicability to Korea. In order to implement the FAS MMI method, the empirical models of mean (m) and standard deviation (σ) for Korea were derived for MMI ≤ IV according to individual seismic intensity by using the site-consistent horizontal FAS of 580 records from 65 isoseismal maps prepared based on the reported MMI of Korea Meteorological Administration. The site-consistent FAS at a site were obtained by correcting the observed FAS for the difference of the site amplification function relative to that of the target site of Class D station (Yun and Suh, 2007) which was evaluated to be a representative site for the generic soil profile of Korea. The FAS m model for MMI ≤ IV follows the overall linear relation in log space according to seismic intensities, featuring the FAS mean model for MMI = IV similar to that of the global model of Sokolov and Wald (2002). The σ -values of the FAS model are found to be greater than those of the global model for MMI ≥ V, while significantly lower than those of the global model for MMI = IV.

Key words Fourier acceleration spectrum, Seismic intensity, Isoseismal map, Site classification

1. 서론

지진이 발생한 후 조사되는 지역별 지진피해현황은 지진 피해복구를 신속하고 효율적으로 수행하기 위해 필요한 기초 자료이다. 이는 지진피해 현황 파악이 선행될 때 지진피

해 복구에 필요한 비상대응 절차를 효율적으로 수행할 수 있는 가용 자원의 최적 배분이 가능하기 때문이다. 지진피해 현황 파악은 현장 조사 및 접수된 피해상황 자료 등을 바탕으로 진도(Intensity)로서 정량적으로 평가되는데 이 방법은 물리적인 시간이 많이 소요되므로 신속한 지진피해 복구를 어렵게 한다. 최근에는 신속한 지진피해평가를 위해 지진 관측자료를 이용하여 계측진도(Instrumental Seismic Intensity)를 평가하고 이 결과를 신속지진피해복구에 활용하고 있다.

지진진도 평가는 넓은 지역(수백 km²)의 개략적인 진도 평가를 위한 광역 진도평가(Macroseismic Intensity)와 피해지역을 보다 세분화하기 위해 주로 현장조사를 통한 좁은

¹⁾ 정희원·한전 전력연구원, 책임연구원
(교신저자 : kyun@kepri.re.kr)

²⁾ 정희원·한전 전력연구원, 선임연구원

³⁾ 한국수력원자력(주) 발전기술원, 책임연구원

본 논문에 대한 토의를 2010년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2009. 7. 31 / 수정일 : 2009. 10. 29 / 게재확정일 : 2009. 10. 29)

지역(수십 km²)에 대한 정밀진도평가(Detailed Seismic Intensity)로 구분할 수 있다.

계측진도 평가 방법 및 등급분류 기준은 지역별 지진특성 및 대상지역의 내진설계수준에 따라 다양하다. 지진파형의 시간영역에서의 크기를 나타내는 PGA(Peak Ground Acceleration, 최대 지반가속도) 또는 PGV(Peak Ground Velocity, 최대지반속도)를 이용하여 계측진도를 계산하는 방법은 실시간 평가가 가능하다는 장점이 있지만 대상 지역에서 선행 지진 경험자료가 있어야만 피해와의 상관관계를 이용하여 시간영역에서의 지진동 크기-계측진도 관계식을 도출할 수 있다. 반면 광대역 스펙트럼(수분의 1 Hz~수십 Hz) 영역에서 지진파 스펙트럼 크기(푸리에 스펙트럼 혹은 응답스펙트럼)를 이용하여 계측진도를 평가하는 방법이 있다. 이 방법은 Boore⁽¹⁾의 추계학적인 지진동 평가방법과 연계하여 시나리오 지진에 대한 지진피해(진도)추정이 가능하며, 또한 주파수영역에서의 증폭특성으로 나타나는 부지고유 특성을 진도 추정에 쉽게 반영할 수 있다.

최근 전세계적인 지진관측망 확대 구축 및 인터넷망의 대중 보급에 힘입어 지진 관측자료로부터 지진발생시 신속한 지진피해예측 정보를 무선통신 혹은 인터넷으로 제공하는 'ShakeMap'⁽²⁾ 관련 기술 개발로 계측진도 평가의 기초자료 및 신뢰성을 개선하기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다⁽³⁻⁶⁾. 국내의 경우에는 김우한 등⁽⁷⁾에 의해 국내 및 일부 중국, 일본 강진에 대해 알려진 진도와 규모관계식을 도출하였으며 또한 기 발표된 국내 지진동감쇠식으로부터의 진앙에서의 PGA와 규모를 조합해 PGA와 진도와의 관계식 ($\ln(\text{PGA}(\text{gal}))=0.58 \times \text{MMI}+1.0$)을 간접적으로 유추한 바 있으나 실제 지진관측자료를 이용하여 도출되지 않았기 때문에 아직 검증이 필요한 단계이다.

국내의 경우 지난 10여 년간 현대식 지진관측망의 급격한 확대 구축에 따라 관측자료가 급격히 증가하여 제한적인 진도범위 내에서 국내 계측진도를 평가할 수 있는 기초자료가 확보된 상태이다. 특히, 원자력 발전소 부지에 대한 강지진동 모사 연구⁽⁸⁾ 및 후속 연구 등에서 추계학적인 지진동 모델 연구를 위해 확보된 지난 10년간의 지진파 스펙트럼 자료는 스펙트럼에 기반한 진도평가 기법을 효율적으로 개발할 수 있는 기초자료로 활용될 수 있다.

본 연구에서는 푸리에 스펙트럼을 이용하여 계측진도를 평가할 수 있는 'FAS(Fourier Acceleration Spectrum) 진도평가 방법'(Chernov and Sokolov⁽⁹⁾; Sokolov and Wald⁽⁴⁾)의 국내 적용을 위해 국내 지진의 진도별 통계특성(평균 및 표준편차)을 진도가 알려진 지역 내의 지진 관측자료를 이용하여 평가하였다.

2. 국내 지진의 진도별 FAS 통계특성 추정

FAS 진도평가 방법의 입력자료로는 진도별 FAS의 평균과 표준편차가 이용된다. 이러한 자료는 조사된 지역별 진도 자료와 등진도 구역내에서 관측된 지진자료를 통계적으로 분석하여 계산된다.

본 연구에서는 진도가 알려진 지진에 대해 등진도구역도(Isoseismal Map)를 작성하고 동일 진도구역 내에서 획득된 관측자료의 스펙트럼을 이용하여 진도별 통계적 특성을 추정하였다. 한편 관측자료로 부터 계측진도를 평가하기 위해서는 관측자료가 인근 부지특성을 대표할 수 있어야 하는데 본 연구에서는 관측된 자료를 국내의 평균적인 지반조건에 상응하는 값을 갖도록 변환하기 위한 관측소 부지 지반 특성 평가 및 보정 방법 등을 사전에 평가하였다.

2.1 지진관측소 부지 지반특성 평가를 통한 대표 지반의 증폭특성 선정

진도 구역별 지진계측 자료를 이용할 경우의 문제점은 지진관측소마다 균일하지 않은 부지 특성으로 인해 통계적으로 의미 있는 지진파의 FAS (Fourier Acceleration Spectra) 평균과 표준편차를 계산할 수 없다는 점이다. 이는 지반의 부지증폭특성에 따라 지진파의 FAS가 매우 큰 편차를 나타내기 때문이다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 관측된 자료를 동일한 부지특성을 갖는 자료로 변환한 후 진도별 FAS 로그값의 통계특성을 계산하였다. 관측 FAS를 동일한 부지 조건으로 변환하는 과정상 주요 고려사항으로는 ① 어떤 부지특성 조건에 대해 FAS 관측값을 변환할 것인가 ② 현재 설치된 지진관측소의 부지특성 조건은 어떤 값을 나타내는 가이다.

FAS 관측값을 변환하기 위한 대표적인 부지조건을 도출하기 위해 본 연구에서는 국내의 부지에 대해 알려진 평균 부지지반의 전단파 속도 선행 연구결과를 검토하였다. 국내의 다양한 지역에 대한 지반전단파 속도에 대한 연구는 Sun *et al.*⁽¹⁰⁾이 수행한 바 있으며, 이 연구를 수행한 저자와의 의견 교환을 통해 국내 지반의 평균적인 전단파 속도 프로파일을 제공 받고 이러한 프로파일로 부터 $V_{S30} = 560\text{m/sec}$ 을 도출할 수 있었다.

또 한 가지 해결되어야 할 난제인 현재 설치된 지진관측소의 부지특성에 대한 선행 연구는 전무하다. 단지 현재 지진관측소 관측환경의 양호도에 대해서는 설치환경에 익숙한 소수 전문가들의 주관적인 판단에 의존하고 있는 상황이며, 관측자료 분석을 통해 도출된 지진파의 10Hz 이하 스펙

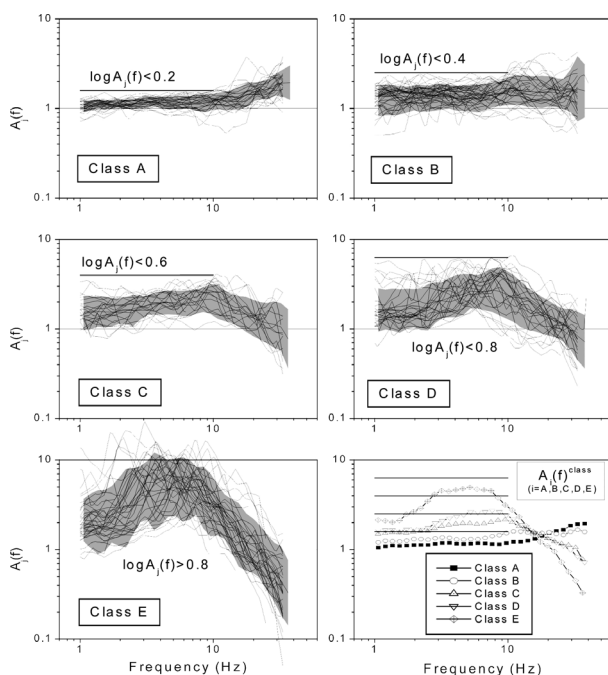
트럼 증폭률을 기준으로 임의적인 분류만이 되 있을 뿐이다.⁽¹¹⁾ 그림 1은 연관희와 서정희⁽¹¹⁾의 연구에서 지진관측소의 FAS 스펙트럼 증폭율인 부지증폭함수를 A~E 등급에 대해 나타낸 그림이다. 이 연구에서 관측소 분류 기준으로 10Hz 이하 구간에서의 스펙트럼 증폭률을 사용한 이유는 10 Hz 이하의 저주파에서는 비탄성감쇠 영향이 미약하여 스펙트럼 증폭률이 지반의 탄성증폭 특성 만을 보다 잘 대표할 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 그림 1에 분류된 지진관측소의 각 등급에 대하여 V_{S30} 을 추정하였다. V_{S30} 을 추정하기 위해 일본의 강진자료를 주로 이용하여 경험적으로 제시된 V_{S30} 과 최대지반속도(PGV) 증폭률의 관계식⁽¹²⁾을 이용하였다. Kanno *et al.*⁽¹²⁾의 연구결과에는 PGA 증폭률과 V_{S30} 의 경험적 관계식도 제시하고 있는데 이 관계식 대신 PGV 증폭률과 V_{S30} 의 관계식이 사용한 이유는 그림 1의 지진관측소 분류에 10Hz 이하의 스펙트럼 증폭율을 사용하였는데 이 주파수 대역에서는 PGV가 PGA 보다 스펙트럼에 민감하기 때문이다. Kanno *et al.*⁽¹²⁾은 V_{S30} 에 따른 최대지반속도의 경험적인 증폭률(A_v)과 규모(M), 거리(R_{rup})에 따른 PGV의 관계식을 식 (1)과 같이 제시하였다.

$$\log_{10}PGV(\text{cm/sec}) = f(M, R_{rup}) + A_v \quad (1)$$

$$f(M, R_{rup}) = 0.7 \times M - \log_{10}(R_{rup} + 0.0022 \times 10^{0.32M}) - 0.0009 \times R_{rup} - 1.93$$

$$A_v = -0.71 \times \log_{10}(V_{S30}) + 1.77$$



〈그림 1〉 1~10Hz 사이의 스펙트럼 증폭률의 크기($\log A(f)$)에 따른 관측소 등급분류(연관희와 서정희⁽¹¹⁾)

식 (1)에서 R_{rup} 는 단층면까지의 최단거리를 의미한다. 만약 동일한 규모, 거리를 갖는 관측 지점에서 PGV의 차이가 발생한다면 이는 전적으로 관측소 지반의 V_{S30} 차이 때문이며, V_{S30} 은 규모와 거리에 무관하다는 점이다. 이러한 특징을 이용하면 서로 다른 지반물성을 갖는 2개의 관측소 등급에 대한 PGV 지진동감쇠식을 이용하여 계산된 동일한 규모, 거리값에 대한 관측소 등급간의 PGV 차이로부터 역으로 관측소 등급간의 상대적인 V_{S30} 비율도 알아 낼 수 있다. 다양한 규모-거리의 조합인 동일한 (M_i, R_j)에 대해 A등급을 대표하는 지반전단파속도 V_{S30}^A 에 대한 식 (1)의 PGV 예측값인 PGV_{ij}^A 와 임의의 iclass를 대표하는 지반전단파속도 V_{S30}^{iclass} 에 대한 식 (1)의 PGV 예측값인 PGV_{ij}^{iclass} 의 평균적인 차이를 취하면 PGV의 상대적인 증폭률인 식 (2)의 PGV_{ratio}^{iclass} 가 유도된다. 식 (2)를 이용하면 PGV의 상대적인 증폭률로부터 관측소 등급을 대표하는 V_{S30} 의 상대적인 비율을 계산할 수 있고, 또한 특정 등급관측소(식 (2)에서는 A 등급)에 대한 절대적인 V_{S30} 을 합리적으로 추정할 수 있다면, 모든 지진관측소의 V_{S30} 을 스펙트럼간의 상대적인 비율로부터 추정할 수 있게 된다.

$$\log_{10}(PGV_{ratio}^{iclass}) = -0.71 \times \log_{10}(V_{S30}^{iclass}/V_{S30}^A) \quad (2)$$

$$PGV_{ratio}^{iclass} = 1/N_i N_j \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} PGV_{ij}^{iclass}/PGV_{ij}^A$$

$$(N_i = \text{No. of } M_i, N_j = \text{No. of } R_j)$$

본 연구에서는 식 (1)과 같은 PGV 거리감쇠식을 그림 1에서 제시된 A부터 E까지의 지진관측소 등급별 평균 부지증폭함수를 반영하여 그림 2와 같이 이론적으로 개발하였다. 이론적인 지진관측소 등급별 지진동감쇠식은 기존 연구에서 사용된 추계학적 지진동 모델파라미터⁽⁸⁾ 중 지진원(규모별 응력강하량), 감쇠특성(Q , 기하학적 감쇠)은 동일하게 이용하고 그림 1의 관측소 등급별 평균 스펙트럼 증폭률만을 달리하여 RVT 방법⁽¹⁾으로 생성된 PGV를 규모, 거리의 함수에 적합하여 도출되었다. 그림 1의 A 등급 관측소에 대한 국내 지진의 규모, 거리별 PGV 이론적인 예측식은 연관희 등⁽¹³⁾이 이미 제시한 다음 식과 동일하다.

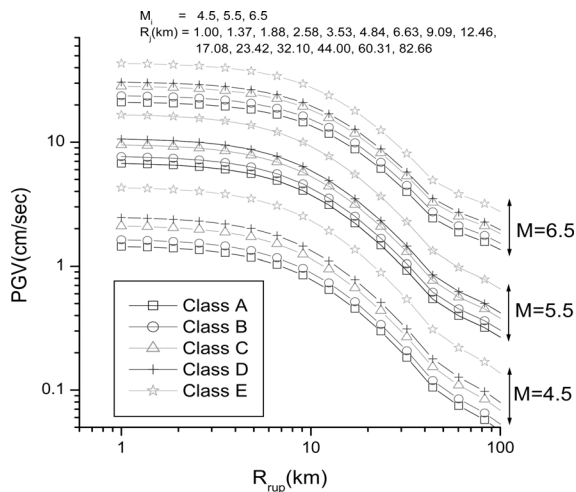
$$\ln PGV(\text{cm/sec}) = 30.731 - 1.449M - 0.062(M-6)^2 + (-6.337 + 0.533M)(\ln(R_{epi} + \exp(5.38))) - 1.248 \ln(\min(R, 50)) + 0.145 \ln(\max(R, 50)) \quad (3)$$

$$R_{epi} = \text{진앙거리}, R = \sqrt{(R_{epi}^2 + 9.8^2)}$$

그림 2에 대한 여러 규모 및 거리범위(M_i, R_j)에 대한 관측소 등급별 PGV 예측값을 이용하면, 식 (2)의 A 등급 관측소에 대한 iclass 등급 관측소별로 PGV 평균증폭율(PGV_{ratio}^{iclass})을 계산할 수 있고, 관측소 등급별로 A 등급 관측소의 V_{S30} 에 대한 상대적인 V_{S30} 의 비율($V_{S30}^{iclass}/V_{S30}^A$)을 표 1과 같이 계산할 수 있다.

관측소 등급별로 계산된 V_{S30} 의 비율($V_{S30}^{iclass}/V_{S30}^A$)로부터 V_{S30} 의 절대값을 추정하기 위해서는 A 등급 관측소에 대한 V_{S30} 추정이 필요하다. A 등급 지진관측소에 대한 V_{S30} 의 절대값은 A 등급 지진관측소에 대한 국내의 이론적인 PGV 거리감쇠식(식 (3))과 Kanno *et al.*⁽¹²⁾의 V_{S30} 에 따른 PGV 거리감쇠경험식(식 (1))의 비교를 통해 추정되었다.

비교결과 $V_{S30}=1,100\text{m/sec}$ 에 대한 Kanno *et al.*⁽¹²⁾의 PGV 거리감쇠경험식과 국내 A 등급 관측소의 이론적인



〈그림 2〉 그림 1의 지진관측소 등급(A에서 E)별로 개발된 PGV 지진동 감쇠식. 관측소 등급별 PGV 지진동감쇠식은 기존 연구⁽⁸⁾의 국내 지진원 및 전달특성과 관련된 추계학적 지진동파라미터는 동일하게 이용하고 그림 1의 관측소 등급별 평균 부지증폭률수만을 달리하여 여러 지진의 거리-규모 조합(M_i, R_j)에 대해 RVT 방법⁽¹⁾으로 추정된 이론적인 PGV 값을 지진의 규모, 거리에 대한 식 (3)의 함수형태로 적합하여 도출되었음

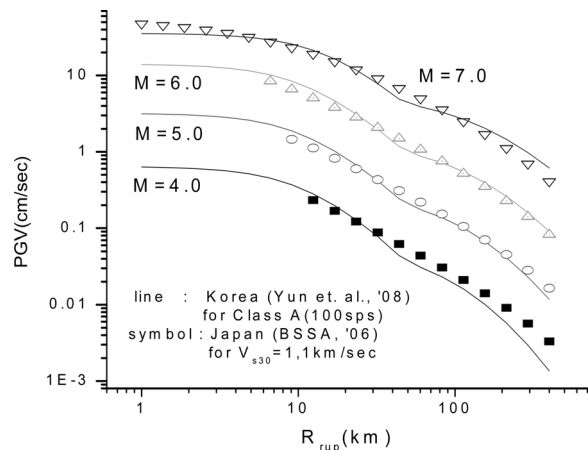
〈표 1〉 국내 지진의 규모-거리(M_i, R_j) 조건에 대한 관측소 등급별 이론적인 PGV 예측값(그림 2)과 A등급 관측소에 대한 PGV 예측값의 상대적인 평균비율(PGV_{ratio}^{iclass}) 및 이를 이용한 관측소 등급별 V_{S30} 의 상대증폭율($V_{S30}^{iclass}/V_{S30}^A$). A등급 관측소의 $V_{S30}^A=1,100\text{m/sec}$ 에 대해 관측소 등급별 V_{S30}^{iclass} 이 최종적으로 계산됨

등급	PGV_{ratio}^{iclass} (σ_{log10} =로그 표준편차)	$V_{S30}^{iclass}/V_{S30}^A$	V_{S30}^{iclass} ($V_{S30}^A=1,100\text{m/sec}$)
B	1.13 ($\sigma_{log10}=0.002$)	0.84	924 m/sec
C	1.41 ($\sigma_{log10}=0.02$)	0.62	682 m/sec
D	1.57 ($\sigma_{log10}=0.03$)	0.53	583 m/sec
E	2.46 ($\sigma_{log10}=0.07$)	0.28	308 m/sec

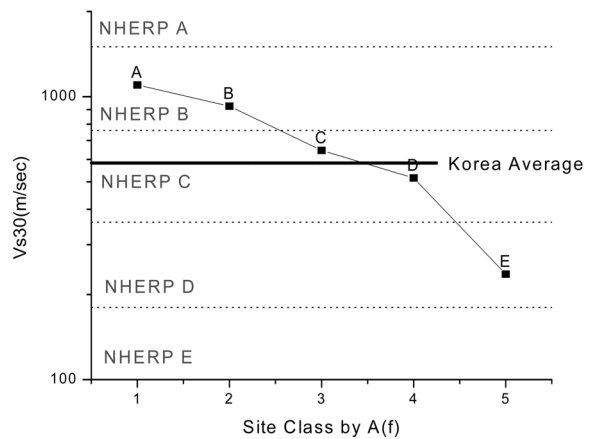
거리감쇠식(식 (3))이 $M = 4.5 \sim 6.5, R < 100 \text{ km}$ 범위에서 서로 유사함을 확인할 수 있었다(그림 3). 이로부터 A 등급 관측소의 V_{S30} 을 1,100m/sec 정도로 추정할 수 있다. A 등급으로 분류된 지진관측소는 대부분의 시추공 지진관측소를 포함하고 있으며, 시설물 건설을 위한 기반암 부지정리면, 암반 노두 등과 같이 매우 견고한 지반에 설치되어 있음으로 이러한 추정결과는 합리적인 것으로 판단된다.

추정된 A 등급 관측소의 $V_{S30}=1,100\text{m/sec}$ 과 식 (2) 및 PGV의 관측소 등급간 상대증폭율을 이용하면 표 1 및 그림 4와 같이 모든 관측소 등급에 대한 절대적인 V_{S30} 값 추정이 가능해진다. 그림 4에는 미국 NHERP(Building Seismic Safety Council)⁽¹⁴⁾의 내진설계 지반분류에서 사용되는 V_{S30} 의 기준을 함께 도시하였는데, 그림 1의 A, B 등급 지진관측소는 NHERP의 B 등급(암반) 이상으로 분류됨을 알 수 있다.

또한 국내 지반의 평균 전단파 속도로 제시된 $V_{S30}=560\text{m/sec}$



〈그림 3〉 $V_{S30}=1,100\text{m/sec}$ 에 대한 Kanno *et al.*⁽¹²⁾의 PGV거리감쇠식과 A 등급 관측소에 대한 이론적인 국내 지진동 거리감쇠식(식 (3))



〈그림 4〉 연관회와 서정희⁽¹¹⁾에 의한 A에서 E까지의 관측소 등급에 따른 천부지반(<30m) 전단파 속도(V_{S30}) 분포와 미국의 V_{S30} 에 따른 NHERP 분류 기준⁽¹⁴⁾ 비교. 국내 평균(Korea Average)은 583m/sec로 계산되었음(표 1)

는 거의 연관회와 서정희⁽¹¹⁾의 D 등급관측소에 대한 $V_{S30}=583\text{m/sec}$ 과 유사함을 알 수 있다. 본 연구에서는 이러한 연구결과를 기반으로 D 등급 관측소의 평균 부지증폭함수를 국내 진도 평가를 위한 대표 지반의 진폭증폭특성으로 사용하였다.

2.2 진도별 FAS의 통계특성 평가

2.2.1 등진도구역도 평가 및 사용된 지진관측자료

국내 지진에 대한 진도별 FAS 통계특성을 평가하기 위해서는 지진에 대한 등진도구역도(Isoseismal Map)를 평가하고 진도구역 내에 속한 지진관측소의 계측자료를 취득해야 한다. 일반적으로 유감 지진이 발생하면 보고된 피해 상황, 문답조사 결과, 필요시 현장 조사 결과 등을 종합하여 진앙지를 중심으로 한 넓은 지역의 여러 위치에 대해 진도가 결정된다. 등진도구역도는 수집된 여러 위치의 진도를 기반으로 동일한 진도를 가질 것으로 예상되는 여러 지점을 자동 혹은 수동으로 연결하여 작성된다. 현재 국내에서 발생하는 지진의 경우 유감지진일 경우 기상청에서 특정 지역에 대한 진도를 발표하고 있으나(기상청 지진연보⁽¹⁵⁾) 등진도구역도는 제공하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 부록 표 1에 수록된 65개 지진원에 대해 등진도구역도를 작성하였다. 부록 표 1의 지진규모는 2.6~4.0 사이에 분포하며, 평균은 3.4이다. 한편 본 논문에서 사용한 기상청 지진연보의 진도 발표 결과에는 진도 평가자 및 평가방법의 주관에 따른 진도평가 자료의 불확실성이 있을 수 있으나 본 논문에서는 별도로 고려하지 않았다.

본 연구에서는 기상청이 지역별로 발표한 진도가 단일 지역에 대해 부여된 경우와, 두개 이상의 지역에 대해 부여된 경우를 분리하여 등진도구역도를 작성하였다. 진도가 발표된 지점이 하나인 경우에는 진도가 부여된 위치를 중심으로 $25 \times 25\text{km}^2$ 면적의 사각형 모양으로 동일한 진도를 가지도록 하나의 등진도구역으로 가정하였다. 다수의 지역에 대해

진도가 알려진 경우에는 그림 5의 예제에서와 같이 시각적으로 서로 다른 진도 사이의 중간 위치를 진도 경계지점으로 간주하고 직관적으로 연결하여 등진도구역도를 작성하였다. 이때 등진도구역도는 진도가 알려진 지역만을 연결하는 최소의 면적이 되도록 추정되었으며, 이는 진도 미평가 구역의 지진관측 사용을 배제하여 진도별 FAS 통계특성의 신뢰성을 향상시키고자 하였다. 따라서 최종적으로 작성된 등진도구역도는 진도가 알려진 지역만을 대표하는 최소 면적의 등진도구역도로서, 실제 등진도구역도와 동일하지 않을 수 있다. 한편, 지진의 등진도구역도가 알려진 경우에는 그대로 이용하였다.

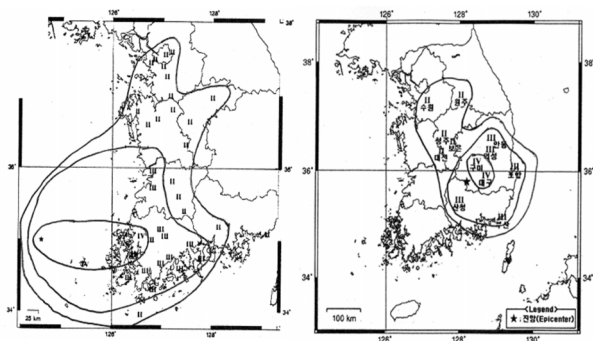
그림 6에는 상기 방법으로 개략적으로 평가한 등진도구역도를 제시하였다.

이상에서 작성된 등진도구역도 내에서 관측된 FAS를 이용하면 진도별 FAS의 통계특성을 추정할 수 있다. 부록 표 2에는 그림 6의 등진도구역도에서 특정 진도구역 내에 위치한 관측소의 지진기록(580개)을 부록 표 1의 해당 지진원 ID와 해당 진도, 진앙거리와 함께 수록하였다.

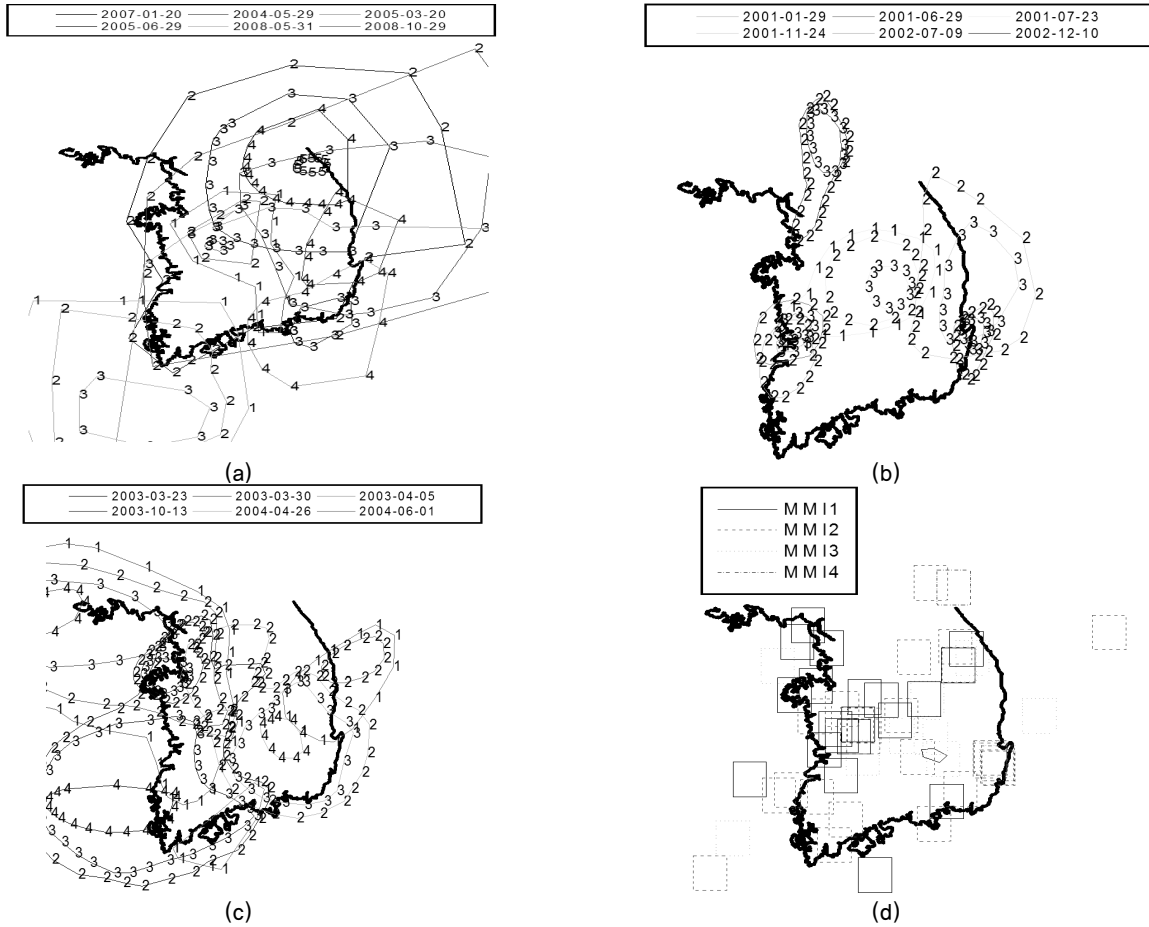
부록 표 2에 나타난 바와 같이 분석에 이용한 대부분의 자료는 2000년 이후의 자료이다. 이는 2000년 이후 현대적인 지진관측망이 전국적으로 설치되어 관측된 자료의 수가 비교적 많기 때문일 뿐만 아니라, 2000년 이전의 자료는 자료의 수도 부족하며 JMA 진도를 사용하였기 때문에 본 연구의 MM 진도추정 방법에는 적합하지 않았기 때문에 사용하지 않았다.

FAS 진도평가 방법을 국내에 적용하기 위해서 국내에 적합한 진도별 FAS의 평균과 표준편차의 통계적인 특성은 부록 표 2의 지진관측기록에 대한 FAS 및 부여된 진도를 기반으로 평가하였다. 부록 표 2에서 국내 지진에 대해 보고된 최대 MM 진도는 V이지만 MM 진도 V를 대표하는 관측 자료의 수는 2개 밖에 되지 않아 실제로 진도별 FAS 통계특성을 계산할 수 있는 진도의 범위는 IV 이하로 제한되었다.

FAS 진도추정 방법은 진도별 관측자료의 특성을 기반으로 추정되기 때문에 진도 추정 범위를 넘어서는 진도에 대해서는 진도 추정의 신뢰성이 낮아진다. 본 연구에서는 진도 I의 추정 신뢰도를 향상하기 위해 유감지진(Felt Earthquake)과 무감지진의 경계에 해당되는 진도 0의 개념을 도입하고 진도 0의 FAS 평균값은 유감지진 관측자료에 대한 통계적인 하한 극한값으로 결정하였다. 이를 위해 유감지진으로 분류될 수 있는 MM 진도 I, II 구역에서 지진관측자료의 스펙트럼을 통계처리한 후, 평균 - 2σ 수준을 진도 0의 평균값으로 하였다. MM 진도 0에 대한 FAS 표준편차는 MM 진도 I 과 동일하게 사용하였다.



〈그림 5〉 다수 지점의 진도(기상청 연보⁽¹⁵⁾)로부터 작성된 등진도구역도 예제. (좌) 2003/03/23(M=4.7) 지진 (우) 2004/04/25 (M=3.9) 지진



〈그림 6〉 국내 지진의 진도별 푸리에스펙트럼의 통계적 특성 평가를 위해 사용된 65개 지진(부록 1)에 대해 작성된 등진도구역도의 진도 분포. 2007년 오대산지진에 대한 등진도구역도는 박종찬⁽¹⁶⁾의 진도평가결과를 이용. (a)-(c)는 2개 이상의 지점에 대해 진도가 보고 된 경우에 작성된 등진도 구역도로서 진도구역도 상의 숫자는 숫자에 해당되는 진도구역도의 외각선을 의미하며, (d)는 단일 지점에 대해서만 진도가 발표된 경우에 발표 지점을 중심으로 설정된 사각형(25×25km²)의 등진도구역도임

〈표 2〉 국내 지진에 대한 진도 IV 이하의 진도별 FAS 로그값의 통계특성

진도	MMI 0		MMI I		MMI II		MMI III		MMI IV	
	m_I	σ_I	m_I	σ_I	m_I	σ_I	m_I	σ_I	m_I	σ_I
0.48	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.82	0.77
0.58	-	-	-	-	-	-	-0.92	0.96	-0.72	0.77
0.69	-	-	-	-	-1.79	0.87	-0.95	0.92	-0.59	0.75
0.83	-	-	-2.48	0.7	-1.69	0.88	-0.87	0.9	-0.47	0.74
1	-3.37	0.7	-2.36	0.7	-1.61	0.89	-0.74	0.89	-0.47	0.72
1.2	-3.14	0.7	-2.23	0.7	-1.51	0.87	-0.71	0.87	-0.46	0.69
1.44	-2.9	0.71	-2.12	0.71	-1.4	0.85	-0.74	0.85	-0.38	0.65
1.73	-2.77	0.72	-2.01	0.72	-1.33	0.82	-0.71	0.81	-0.3	0.62
2.08	-2.63	0.71	-1.9	0.71	-1.26	0.79	-0.62	0.77	-0.24	0.61
2.5	-2.43	0.68	-1.75	0.68	-1.17	0.74	-0.55	0.72	-0.18	0.61
3	-2.23	0.64	-1.57	0.64	-1.08	0.7	-0.47	0.68	-0.13	0.57
3.61	-2	0.63	-1.39	0.63	-0.96	0.66	-0.41	0.64	-0.07	0.53
4.33	-1.81	0.62	-1.23	0.62	-0.87	0.64	-0.37	0.6	-0.02	0.52
5.2	-1.7	0.61	-1.11	0.61	-0.81	0.64	-0.34	0.57	0.03	0.51
6.25	-1.62	0.6	-1.04	0.6	-0.78	0.64	-0.33	0.56	0.04	0.49
7.5	-1.6	0.58	-1	0.58	-0.79	0.63	-0.35	0.56	0.05	0.46
9.01	-1.65	0.58	-1.01	0.58	-0.84	0.63	-0.47	0.59	-0.05	0.48
10.82	-1.77	0.59	-1.04	0.59	-0.95	0.64	-0.59	0.61	-0.16	0.5
13	-1.94	0.6	-1.12	0.6	-1.07	0.67	-0.67	0.66	-0.26	0.52
15.61	-2.14	0.61	-1.2	0.61	-1.19	0.71	-0.76	0.7	-0.37	0.54
18.75	-2.39	0.63	-1.29	0.63	-1.36	0.76	-1.02	0.76	-	-
22.52	-2.67	0.66	-1.38	0.66	-1.54	0.8	-	-	-	-
27.05	-2.95	0.71	-1.5	0.71	-	-	-	-	-	-
32.49	-3.23	0.77	-	-	-	-	-	-	-	-

* m_I, σ_I = 진도 I에 대한 \log_{10} (FAS(cm/sec))의 평균 및 표준편차를 의미

한편 진도별 관측 FAS 자료 통계처리를 위해서 각 파형의 S파 구간의 수평성분 FAS 벡터합 스펙트럼 중 S/N(Signal to Noise) 비가 3 이상인 구간의 주파수 대역 스펙트럼을 사용하였다. 진도별 관측 FAS 자료 통계처리 이전에는 본 논문 2.1에서 이미 언급된 바와 같이 관측자료를 국내 지반의 평균 지반물성을 대표할 수 있는 것으로 평가된 D 등급 관측소의 지반특성으로 변환할 필요가 있다. 이를 위해 관측된 스펙트럼을 D 등급관측소(연관희와 서정희⁽¹¹⁾)의 부지증폭특성을 갖는 스펙트럼으로 변환하기 위해 식 (4)를 이용하였다.

$$FAS_i^D(f) = FAS_i(f) \times A_D(f)^{class} / A_i(f) \quad (4)$$

식 (4)의 $FAS_i(f)$ 는 관측소 i에서 관측된 푸리에 가속도스펙트럼(Fourier Acceleration Spectra) 값을 의미하며, $A_i(f)$, $A_D(f)^{class}$ 는 각각 관측소 i의 부지증폭함수 및 D 등급 관측소의 평균 부지증폭함수(그림 1의 우측 하단 그림 참조)를 의미한다. $A_i(f)$ 로는 2008년까지의 국내 지진의 S파 스펙

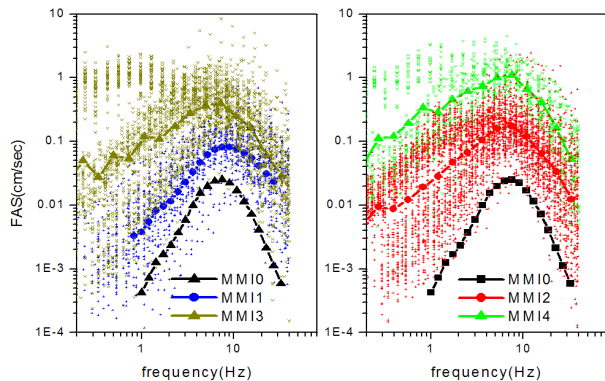
트럼을 추계학적 지진동모델에 적합한 후 얻어진 잔차를 기반으로 평가되어 2008년 전력연구원 지진관측연보(장천중 등⁽¹⁷⁾)에 수록된 관측소별 부지증폭 함수를 이용하였다.

2.2.2 진도별 FAS 통계특성 평가 결과 분석

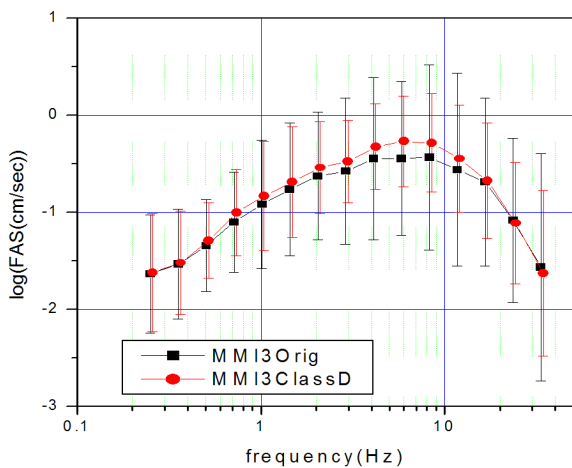
그림 7은 D 등급 관측소의 부지증폭함수 특성으로 변환된 지진관측자료를 이용하여 도출된 MM 진도 IV 이하의 진도별 FAS 평균 및 변환된 FAS 관측자료의 진도별 분포를 나타낸다. 그림 7에서 진도 II, III, IV의 경우 저주파 대역 관측 FAS 자료 분포에서 이산된 군집성을 나타내고 있는데, 이는 동일한 진도를 갖기는 하지만 각각의 군집을 대표할 수 있는 다양한 지진의 규모, 거리에 대한 FAS 관측자료를 동일 진도에 대한 통계특성 평가에 이용하였기 때문이다.

그림 8은 식 (4)에 의해 FAS 관측자료를 D 등급 관측소로 변환하기 전과 후의 진도 III에 대한 FAS 통계특성을 비교한 그림으로 평균은 큰 변화가 없으나 표준편차가 현저히 낮아짐(약 40%)을 확인할 수 있다. 표준편차가 낮아지면 FAS를 기반으로 한 진도평가방법의 불확실성을 상대적으로 저감할 수 있다.

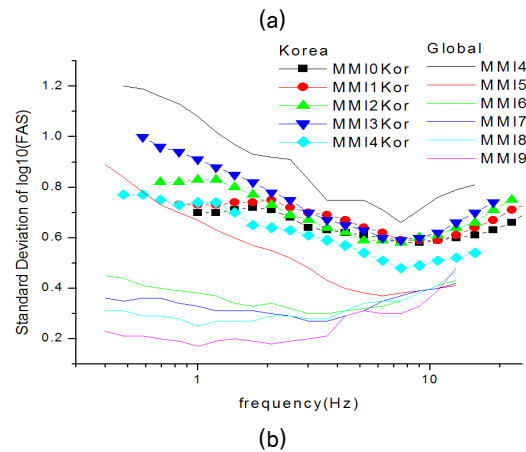
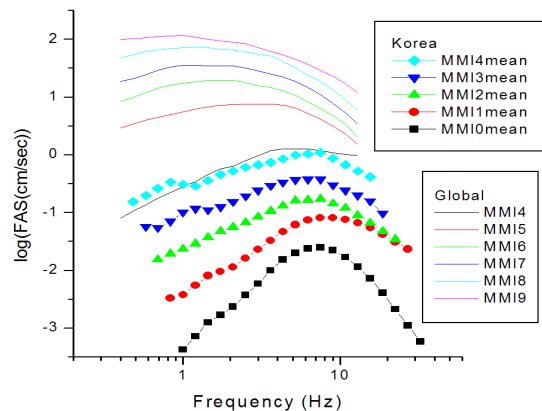
그림 9에는 부록 표 2에 수록된 지진의 진도 IV 이하에



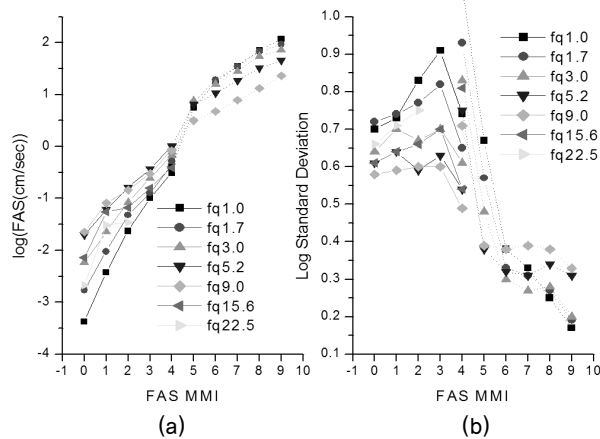
〈그림 7〉 부록 표 2의 지진관측자료에 대한 진도별 FAS 계산값. 이때 FAS는 (4)식을 이용하여 D등급 관측소의 부지증폭함수를 갖도록 변환된 값임



〈그림 8〉 진도 III 구역에서 계측된 파형을 이용하여 추정된 FAS 통계특성(MM13Orig)과 (4)식을 이용하여 관측소 D 등급의 부지조건으로 변환된 FAS에 대한 통계특성(MM13ClassD) 비교 결과



〈그림 9〉 전 세계적인 MM 진도($\geq IV$)별 FAS 통계특성(Global)과 국내 지진의 MM 진도($\leq IV$)별 FAS 통계특성(Korea) 비교. (a), (b)는 각각 진도별 FAS 평균값과 표준편차에 대한 비교임



〈그림 10〉 특정 주파수에 대한 국내지진의 진도별(MMI ≤ IV) FAS 통계특성 ((a)는 FAS 로그 평균 (b)는 FAS 로그 표준편차)의 변화(실선)와 국외 강진에 대한 진도별(MMI ≥ IV) FAS 통계특성의 진도에 따른 변화(점선) 양상을 비교한 결과

대한 FAS 통계특성을 추정한 결과(그림 9의 Korea)와 국외 지진에 대한 진도 IV 이상의 통계특성(그림 9의 Global; Sokolov and Wald⁽³⁾)을 함께 도시하였다. 그림 10은 동일 주파수에 대해 진도에 따른 FAS 평균과 표준편차의 변화 양상을 비교하기 위해 그림 9의 자료를 이용하여 도시한 그림이다.

그림 9의 MM 진도 IV에 대해 추정된 FAS 평균은 Sokolov and Wald⁽³⁾가 제시한 전 세계 FAS 평균값과 거의 유사하게 나타났다. 서로 다른 지진관측 자료를 활용했음에도 불구하고 진도 IV에 대해 유사한 스펙트럼 수준이 나타난 결과는 매우 흥미롭다.

그림 10은 동일 주파수별로 진도에 따른 FAS 통계특성의 변화를 나타내었다. 그림 10에서 FAS 평균은 대체로 로그영역에서 진도에 따라 선형적이며 연속적으로 변화하는 양상을 보이는 반면, FAS 표준편차는 진도 IV에서 갑작스러운 변화를 나타냄을 알 수 있다. 진도는 유감진동 수준이나 구조물의 피해 등을 간접적으로 지시하는 정성적인 수치로 FAS의 진도별 평균값 크기는 로그영역에서 대체로 선형적임을 예상할 수 있다.

FAS의 표준편차 역시 FAS의 평균 크기처럼 진도에 따른 일관된 증가 혹은 감소 경향을 따를 것으로 가정한다면, MMI IV 이하의 표준편차 크기는 전세계 지진의 진도 IV에 대한 표준편차의 크기 보다 커야할 것이나, 반대로 국내 지진의 MMI IV 이하의 진도별 FAS 자료의 표준편차는 전세계적인 지진의 진도 IV에 대한 FAS 표준편차보다 현저히 낮은 0.6 ~ 0.7 정도로 평가되었다 (그림 9(b), 10(b)).

국내 지진의 진도 IV 이하의 FAS 관측자료에 대한 표준편차가 상대적으로 현저히 낮은 이유는 진도 IV에 대한 지

진의 규모 및 거리의 범위가 국내 지진의 경우에는 매우 좁은 반면, 진도 IV에 대한 전세계적인 FAS 모델의 지진규모-거리 범위는 광범위할 수 있기 때문이다. 또는 국내 지진인 경우는 특정 지진관측소 등급의 부지증폭함수로 보정한 것에 비해 국외 지진자료는 여러 종류의 지반상에 위치한 관측소에서 기록된 원자료를 그대로 이용했기 때문으로 판단된다. 즉, 사용된 지진의 규모-거리 범위 및 지반에 따른 부지증폭함수의 다양성으로 인해 국외 FAS 자료의 표준편차는 국내의 경우 보다 높게 평가된 결과를 나타낼 수 있다. 또 다른 해석은 국내에서 진도 IV 이하의 표준편차가 현저히 작지 않고 그림 10(b)에서 알 수 있듯이 전 세계적인 지진 진도 V 이상의 표준편차 보다는 크다는 점과, 전세계 지진진도의 표준편차 중 진도 IV의 표준편차가 유난히 크게 나타난 점을 고려한다면, 국외 지진진도 IV에 대한 FAS 로그값의 표준편차 평가결과(Sokolov and Wald⁽³⁾) 자체가 신중하게 평가되지 않았을 가능성을 배제할 수 없다.

그림 9, 10에 대한 이상의 검토 결과를 요약하면 진도 IV의 전 세계적인 FAS 관측값의 평균값과 국내 지진의 진도 IV에 대한 FAS 관측값의 평균값은 서로 유사하나, 국내 지진의 진도 IV에 대한 표준편차는 진도 IV에 대한 전 세계적인 FAS 관측값의 표준편차 보다는 현저히 낮았으며, 진도 V 이상의 전세계적인 관측값 표준편차 보다는 크다.

그림 9(b), 10(b)에서 국내의 모든 지진자료에 대한 MMI V 이하의 진도별 FAS 표준편차는 7~10Hz에서 제일 낮은 값을 나타내며, 저주파에서는 높은 표준편차를 나타냄을 알 수 있다. FAS 진도평가 방법에 있어서는 표준편차가 낮고 진도별 FAS 평균값 간의 간격이 큰 구간의 주파수대역이(즉 진도별 평균 스펙트럼 수준 간에 현저한 차이가 나면) 진도결정에 큰 영향을 준다. 한편 진도 IV 이하에 대해서는 7~10Hz 범위의 FAS 평균값의 간격이 10Hz 이상의 고주파 대역의 FAS 평균값의 진도별 간격 보다는 크고, 표준편차는 진도별 평균값 간격이 유사한 저주파 대역 보다는 낮아, 7~10Hz 대역의 스펙트럼 관측값이 FAS 진도 추정에 큰 기여도를 갖게 됨을 예상할 수 있다.

그림 9(a) 중 특이한 양상으로는 진도 I, II의 경우 고주파(>10Hz)에서 스펙트럼의 크기가 거의 동일하게 나타나고 있는데, 이는 주관적으로 결정되는 진도 I 과 II의 구분이 실제로 매우 어려워 진도 I, II의 발표 결과에 오류가 있었거나, 진도 I, II 자체가 고주파수 스펙트럼 크기에는 무관하기 때문에 나타난 결과일 수 있다. 결과적으로는 10Hz 이상에서는 진도 I 과 II를 대표하는 스펙트럼의 수준이 비슷하여 고주파 스펙트럼 관측값 크기만으로는 진도 I 과 II를 구분함이 어렵다는 것을 알 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 지진관측자료의 가속도 푸리에스펙트럼 (FAS) 수준을 이용하여 계측진도를 추정하는 방법의 국내 적용성 평가에 필요한 지진파의 진도별 FAS 통계특성 모델을 국내 지진관측자료를 이용하여 계산하였다. 이를 위해 65개 지진에 대한 등진도구역도(Isoseismal Map)를 기상청 연보를 기반으로 작성하고, 진도구역도 내의 580개 관측기록을 이용하여 MM 진도 IV 이하의 국내 지진에 대한 진도별 수평성분 FAS의 평균과 표준편차를 도출하였다. 이때 관측된 스펙트럼은 국내의 평균 지반전단파속도(V_{S30})=560 m/sec과 상응한 특성을 갖도록 보정 되었다. 이를 위해 기존에 임의로 분류된 5개의 지진관측소 등급(연관회와 서정희⁽¹¹⁾)의 평균 부지증폭함수에 대해 V_{S30} 을 평가하였다. 기존 관측소 등급별 V_{S30} 은 관측소 등급별로 개발된 이론적인 PGV 거리감쇠식과 V_{S30} 에 대해 경험적으로 개발된 Kanno *et al.*⁽¹²⁾의 PGV 거리감쇠식을 비교하여 평가되었다. 비교 결과 D등급 관측소의 평균 부지증폭함수가 국내 지반의 평균 V_{S30} 와 가장 근접한 것으로 나타났으며, 관측스펙트럼 보정을 위한 기준 부지증폭함수로 사용되었다.

또한 낮은 진도에 대한 추정의 편의성을 위해 유감지진 (Felt Earthquake)과 무감지진의 경계에 해당되는 진도 0의 개념이 도입하였다. 국내 지진의 진도 $0 \leq MMI \leq IV$ 에 대해 평가된 FAS 평균값은 대체로 로그영역에서 진도에 비례하는 선형성을 나타내었으며, 진도 IV에 대한 FAS 평균은 전 세계적인 모델과 유사한 특징을 보였다. 또한 진도 $0 \leq MMI \leq IV$ 의 표준편차는 진도 V 이상의 전 세계적인 모델의 표준편차 보다는 크게 평가되었으나, 진도 IV에 대한 전 세계적인 모델의 표준편차보다는 현저히 낮은 값을 나타내었다.

감사의 글

본 논문은 한국수력원자력(주)의 연구지원으로 수행되었음.

참고 문헌

1. Boore, D.M., "Simulation of ground motion using the stochastic method," *Pure and applied geophysics*, Vol. 160, 635-676, 2003.
2. Wald, D.J., Quitoriano, V., Heaton, T.H., Kanamori, H., Scrivner, C.V, and Worden, C.B., "TriNet 'ShakeMaps' : rapid generation of peak ground motion and intensity maps

- in California," *Earthquake Spectra*, Vol. 15, 537-556, 1999.
3. Wald, D.J., Quitoriano, V., Heaton, T.H., and Kanamori, H., "Relationships between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California," *Earthquake Spectra*, Vol. 15, No. 3, 557-564, 1999.
4. Sokolov, V.Y., and Wald, D.J., "Instrumental Intensity Distribution for the Hector Mine, California, and the Chi-Chi, Taiwan, Earthquakes: Comparison of Two Methods," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 92, No. 4, 2145-2162, 2002.
5. Kaka, S.I., and Atkinson, G.M., "Relationships between Instrumental Ground-Motion Parameters and Modified Mercalli Intensity in Eastern North America," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 94, No. 5, 1728-1736, 2004.
6. Atkinson, G.M., and Kaka, S.I., "Relationships between Felt Intensity and Instrumental Ground Motion in the Central United States and California," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 97, No. 2, 497-510, 2007.
7. 김우한, 김성균, 박창업, "가속도 관측망 구성 및 계기진도도 최적화 방안 연구," 한국지진공학회/기상청, 107, 2006.
8. 임창복, 장천중, 김재관, 최인길, 원전부지 지진안전성 평가기반 기술개발(원전부지 최대 지진력 평가 연구), KEPRI/TR.E08.C2006.225, 원자력안전기술원/한전전력연구원, 대전, 531, 2006.
9. Chernov, Y.K., and Sokolov, V.Y., "Correlation of Seismic Intensity with Fourier Acceleration Spectra," *Physics and Chemistry of the Earth (A)*, Vol. 24, No. 6, 523-528, 1999.
10. Sun, C.G., Kim, D.S., and Chung, C.K., "Geologic site conditions and site coefficients for estimating earthquake ground motions in the inland areas of Korea," *Engineering Geology*, Vol. 81, No. 4, 446-469, 2005.
11. 연관회, 서정희, "지진동모델 파라미터 동시역산을 이용한 지진관측소 분류," 한국지구물리·물리탐사학회지, 제 10권, 3호, 183-190, 2007.
12. Kanno, T., Narita, A., Morikawa, N., Fujiwara, H., and Fukushima, Y., "A New Attenuation Relation for Strong Ground Motion in Japan Based on Recorded Data," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 96, No. 3, 879 - 897, 2006.
13. 연관회, 박동희, 장천중, 심택모, "지진관측자료를 이용한 지진동감쇠식의 불확실성 평가," 한국지진공학회 학술발표회, 한국지진공학회, Vol. 12, 116-123, 2008.
14. Building Seismic Safety Council(BSSC), NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings, Part 1-Provisions, FEMA 222A, Federal Emergency Management Agency, 290, 1994.
15. 기상청, 2001~2008, 지진연보.
16. 박종찬, 2007, 오대산 지진의 발생현황 및 진도분석, 삼성방재연구소 위험관리지 보호.
17. 장천중, 최원학, 연관회, 박동희, 2008년 전력연구원 지진관측연보, '09전력연-단0053, 한전전력연구원, 대전, 370, 2009.

〈표 2〉 진도별 FAS 통계특성 평가에 사용된 지진관측자료. EQ ID는 부록 표 1에서 지진별로 부여된 고유번호(SN)임. (R_{epi} =진앙거리, Sta. = 지진관측소의 고유 ID)

SN	EQ ID	R_{epi}	Sta.	MMI	SN	EQ ID	R_{epi}	Sta.	MMI	SN	EQ ID	R_{epi}	Sta.	MMI
1	1	5.34	WSC	II	46	11	49.13	YOD	III	91	23	15.9	WSN	III
2	1	17.74	DKJ	II	47	11	62.54	UCN	III	92	23	15.96	WSA	III
3	1	23.27	HAK	II	48	11	64.52	UJA	III	93	23	16.19	MKL	III
4	1	23.65	WSB	II	49	11	91.94	CHY	II	94	23	16.72	WSC	III
5	1	24.8	WSA	II	50	11	93.65	HAK	III	95	23	27.59	ULS	III
6	1	24.85	WSN	II	51	11	96.75	TAB	II	96	24	10.82	KUM	III
7	2	8.58	WSC	III	52	11	107.97	AND	II	97	25	98.08	HUK	IV
8	2	14.71	MKL	III	53	11	110.24	DKJ	III	98	25	177.66	MOP	IV
9	2	18.84	WSA	III	54	11	110.63	SND	II	99	25	177.66	MOP	IV
10	2	18.84	WOL	III	55	11	112.15	WSC	II	100	25	185.24	YGB	III
11	2	18.9	WSN	III	56	11	113.23	TOH	II	101	25	185.63	YGN	III
12	2	19.52	WSB	III	57	11	115.47	EUS	II	102	25	186.5	YGA	III
13	2	23.56	DKJ	III	58	11	117.05	WSN	II	103	25	199.53	HAN	III
14	3	5.93	WSC	II	59	11	117.18	HDB	II	104	25	216.8	WAN	III
15	3	14.55	MKL	II	60	11	117.78	YOC	II	105	25	228.58	JAH	III
16	3	25.41	WSA	II	61	11	146.8	KAN	II	106	25	233.14	KWJ	III
17	3	26.13	WSN	II	62	11	147.18	TAG	II	107	25	243.24	POR	II
18	4	28.67	TEJ	I	63	11	147.24	GKP	II	108	25	246.02	KUS	III
19	4	29.19	TJN	I	64	12	25.1	CGD	II	109	25	249.97	NPR	III
20	5	31.29	WAN	II	65	13	15.78	POR	II	110	25	261.83	KOH	III
21	6	33.78	YGA	II	66	14	12.66	BR2	III	111	25	263.46	CHO	II
22	6	43.84	KUS	II	67	14	16.99	BRD	III	112	25	265.22	HSB	II
23	6	44.8	YGB	II	68	15	14.32	BR2	III	113	25	266.7	BUY	II
24	7	58.76	BUY	II	69	15	20.43	BRD	III	114	25	267.76	IMS	II
25	7	60.29	POR	II	70	16	17.55	WON	II	115	25	271.82	SES	II
26	8	25.29	BOE	II	71	16	20.73	JEC	II	116	25	275.1	GRE	II
27	8	30.79	CPN	II	72	17	21.19	KUJ	II	117	25	302.74	KMS	II
28	8	50.96	KUM	I	73	18	67.36	CHN	III	118	25	306.97	TJN	II
29	8	55.26	KMC	I	74	18	101.44	PCH	II	119	25	310.25	PYT	II
30	8	56.55	TEJ	II	75	18	156.27	SEO	II	120	25	313.83	CHA	II
31	8	56.99	TJN	II	76	19	27.76	CHA	II	121	25	315.84	SAC	II
32	8	58.66	HKU	II	77	20	10.68	WSC	II	122	25	320.37	HKU	II
33	8	61.15	KMS	I	78	20	19.8	HDB	II	123	25	327.75	CEJ	II
34	8	66.49	EUS	I	79	20	21.21	DKJ	II	124	25	333.54	GSU	II
35	8	67.53	YOJ	II	80	20	25.79	WSN	II	125	25	335.67	CHI	II
36	8	80.25	JEC	II	81	20	26.04	WSA	II	126	25	340.27	INC	II
37	8	84.6	CHA	I	82	21	14.46	WSN	II	127	25	340.49	SCP	II
38	8	97.65	BUY	I	83	21	14.93	WSA	II	128	25	341.9	ICN	II
39	8	97.72	WON	I	84	21	20.3	WSC	II	129	25	342	BOE	II
40	8	100.1	CHY	I	85	21	20.78	ULS	II	130	25	356.57	SNU	II
41	8	107.1	SND	I	86	21	35.03	DKJ	II	131	25	357.62	SEO	II
42	8	114.5	KUS	I	87	22	20.89	YGB	II	132	25	382.15	CHJ	II
43	9	23.06	KMC	II	88	22	26.32	YGA	II	133	26	76.94	BR2	IV
44	10	28.74	YOJ	III	89	23	11.87	HDB	III	134	26	84.2	BRD	IV
45	11	44.93	ULJ	III	90	23	15.16	WSD	III	135	26	224.71	KHD	III

〈표 2〉 진도별 FAS 통계특성 평가에 사용된 지진관측자료. EQ ID는 부록 표 1에서 지진별로 부여된 고유번호(SN)임. (R_{epi} =진앙거리, Sta. = 지진관측소의 고유 ID)(계속)

SN	EQ ID	R_{epi}	Sta.	MMI	SN	EQ ID	R_{epi}	Sta.	MMI	SN	EQ ID	R_{epi}	Sta.	MMI
136	26	231.4	YJD	III	181	34	70.47	CHI	III	226	36	61.22	YOD	IV
137	26	247.8	INC	II	182	34	71.57	EUS	III	227	36	79.57	UJB	IV
138	26	248.6	ICN	II	183	34	75.05	KMS	II	228	36	80.06	UCN	IV
139	26	254	SES	II	184	34	76.34	GSU	II	229	36	80.64	UL5	IV
140	26	273.6	SEO	II	185	34	77.48	MAS	III	230	36	80.92	UL2	IV
141	26	274.5	PYT	II	186	34	84.81	KRD	III	231	36	81.21	UJA	IV
142	26	277.4	SNU	II	187	34	86.82	BOE	II	232	36	91.96	POH	IV
143	26	280.4	HSB	II	188	34	90.87	WSC	III	233	36	102.65	WSD	IV
144	26	309.5	CHA	II	189	34	93.09	AND	III	234	36	108.33	CHY	III
145	26	328.1	NPR	I	190	34	96.86	KRC	III	235	36	113.48	TAB	III
146	26	336	HKU	II	191	34	98.96	TEJ	II	236	36	114.42	WSC	IV
147	26	347	TJN	II	192	34	99.33	MAK	III	237	36	115.31	WSA	III
148	26	363.3	CHO	I	193	34	100.13	TJN	II	238	36	116.2	WSN	III
149	26	400.5	KWJ	I	194	34	102.03	BUS	III	239	36	116.81	HDB	IV
150	27	17.89	KMS	II	195	34	102.43	ULS	III	240	36	121.64	AND	III
151	28	18.06	KMS	II	196	34	104.98	POH	III	241	36	121.73	ULL	III
152	28	25.28	TJN	II	197	34	105.23	WSD	III	242	36	123.83	YOC	IV
153	28	26.12	TJN	II	198	34	105.59	HDB	III	243	36	124.61	MKL	IV
154	29	15.9	TJN	II	199	34	107.08	WSB	III	244	36	127.02	EUS	III
155	30	24.16	SES	III	200	34	109.24	KRB	III	245	36	127.28	SND	III
156	30	29.06	PYT	III	201	34	111.42	KRN	III	246	36	128.89	TOH	III
157	30	51.37	HSB	II	202	34	111.68	KRA	III	247	36	136.63	KRC	III
158	30	54.55	SWO	II	203	34	112.03	WSN	III	248	36	137.31	ULS	III
159	30	56.42	INC	II	204	34	112.62	WSA	III	249	36	140.41	YOJ	III
160	30	57.91	ICN	II	205	34	115.49	CEJ	II	250	36	141.98	DAG	IV
161	30	67.74	SNU	II	206	34	119.28	CHJ	II	251	36	148.24	KRD	III
162	30	68.97	SEO	II	207	34	130.79	YOD	II	252	36	154.42	GKP	III
163	31	10.72	HDB	II	208	34	138.11	CHY	II	253	36	155.46	YOW	III
164	31	11.05	WSB	II	209	34	145.77	CHA	II	254	36	159.79	KRA	III
165	31	13.23	WSN	II	210	34	148.14	JEC	II	255	36	160.97	KRN	III
166	31	13.72	WSA	II	211	34	170.19	WON	II	256	36	161.55	MAK	III
167	31	19.08	KRC	II	212	34	179.03	ITN	II	257	36	162.29	KAN	III
168	31	20.02	ULS	II	213	34	182.96	KSR	II	258	36	170.98	DGY	III
169	31	22.12	WSC	II	214	34	196.52	YAP	II	259	36	172.17	KRB	III
170	32	16.34	BUY	I	215	34	196.75	SWO	II	260	36	172.28	SRJ	III
171	32	21.54	NPR	I	216	35	8.15	HDB	II	261	36	175.94	BUS	III
172	32	25.11	KUS	I	217	35	13.16	WSD	II	262	36	176.48	JEC	III
173	33	12.79	GKP	III	218	35	13.28	WSN	II	263	36	187.92	CHJ	III
174	34	31.48	HAC	III	219	35	13.34	MKL	II	264	36	190.73	CPN	II
175	34	32.88	KMC	III	220	35	13.43	WSA	II	265	36	202.65	KMC	II
176	34	34.89	GKP	IV	221	35	14.11	WSC	II	266	36	204.02	WON	III
177	34	49.66	CPN	III	222	35	14.97	WSB	II	267	36	207.5	HAC	II
178	34	57.59	SAC	III	223	35	23.25	KRC	II	268	36	208.15	BOE	II
179	34	60.17	DAG	III	224	35	25.26	ULS	II	269	36	209.51	MAS	II
180	34	66.71	YOC	III	225	36	60.58	ULJ	IV	270	36	212.83	KSR	III

〈표 2〉 진도별 FAS 통계특성 평가에 사용된 지진관측자료. EQ ID는 부록 표 1에서 지진별로 부여된 고유번호(SN)임. (R_{epi} =진앙거리, Sta. = 지진관측소의 고유 ID)(계속)

SN	EQ ID	R_{epi}	Sta.	MMI	SN	EQ ID	R_{epi}	Sta.	MMI	SN	EQ ID	R_{epi}	Sta.	MMI
271	36	220.8	KUC	II	316	38	84.27	ULJ	I	361	43	320.55	EUS	III
272	36	223.2	SOC	II	317	38	85.81	UJB	II	362	43	321.93	KMC	III
273	36	230.8	INJ	II	318	38	95.78	YOD	I	363	43	322.91	JAS	III
274	36	235.9	CHI	II	319	38	117.59	CHY	I	364	43	327.79	WAN	III
275	36	237.9	KMS	II	320	38	146.97	AND	I	365	43	331.76	KWJ	III
276	36	238.9	SAC	II	321	38	159.45	EUS	I	366	43	335.78	IMS	III
277	36	240.9	HKU	II	322	39	17.63	CHO	III	367	43	336.76	BGD	III
278	36	241.2	GSU	II	323	39	28.62	JAS	III	368	43	337.84	JJU	III
279	36	242	TEJ	II	324	39	31.07	KMS	III	369	43	339.75	CPN	III
280	36	242.5	TJN	II	325	40	12.43	YJD	I	370	43	341.83	AND	III
281	36	246.2	ITN	II	326	40	22.06	KHD	I	371	43	344.29	HAN	III
282	36	246.7	TOY	II	327	41	14.24	SEO	I	372	43	344.97	SGP	III
283	36	247.1	YAP	II	328	41	15.96	SNU	I	373	43	355.1	JEU	III
284	36	252.2	JAS	II	329	41	24.58	SWO	I	374	43	359.31	KMS	III
285	36	255.7	SCP	II	330	42	20.79	YGN	II	375	43	359.72	CHO	III
286	36	262.5	CHA	II	331	42	21.34	YGA	II	376	43	368.49	MOP	III
287	36	268.7	JRB	II	332	42	25.19	YGB	II	377	43	375.21	GOS	III
288	36	273.7	IMS	II	333	43	189.46	KRB	IV	378	43	377.52	BOE	III
289	36	275.6	CHO	II	334	43	193.43	KRN	IV	379	43	379.02	YOJ	III
290	36	278.7	NAH	II	335	43	193.92	KRA	IV	380	43	382.97	YGB	III
291	36	280.4	NAW	II	336	43	194.09	BUS	IV	381	43	387.9	TEJ	III
292	36	283.4	BUY	II	337	43	201.61	TOY	IV	382	43	389.12	TJN	III
293	36	283.8	SWO	II	338	43	218.13	MAS	IV	383	43	390.68	YGN	III
294	36	290.2	SNU	II	339	43	221.57	KRC	IV	384	43	390.76	YGA	III
295	36	292.8	PYT	II	340	43	223.27	KRD	IV	385	43	395.22	NPR	III
296	36	293	NPR	II	341	43	228.16	WSN	IV	386	43	396.07	KUS	III
297	36	294.6	SEO	II	342	43	228.61	WSA	IV	387	43	401.55	CHJ	III
298	36	296.7	KUS	II	343	43	232.54	HDB	IV	388	43	406.7	CEJ	III
299	36	297	YOS	II	344	43	238.72	NAH	IV	389	43	408.4	BUY	III
300	36	305.4	HSB	II	345	43	246.72	GSU	IV	390	43	408.97	HKU	III
301	36	308.1	JEU	II	346	43	248.72	WSD	IV	391	44	36.95	SGP	II
302	36	318.5	ICN	II	347	43	248.92	CHI	IV	392	44	50	JJU	II
303	36	320.8	KWJ	II	348	43	249.34	WSC	IV	393	45	94.35	KRB	III
304	36	321.8	SES	II	349	43	249.69	YOS	III	394	45	94.87	BUS	III
305	36	335.3	ANM	II	350	43	254.08	DAG	III	395	45	103.41	KRN	III
306	36	337.3	KOH	II	351	43	272.15	YOC	III	396	45	104.41	KRA	III
307	36	353.9	YGA	II	352	43	272.88	HAC	III	397	46	54.28	KOH	I
308	36	355	YGN	II	353	43	278.29	GKP	III	398	46	66.62	YOS	I
309	36	388.9	MOP	II	354	43	280.38	SAC	III	399	46	81.61	NAH	I
310	36	392.6	WAN	II	355	43	282.59	PHA	III	400	46	127.78	CHI	I
311	37	62.36	ULJ	I	356	43	283.78	KOH	III	401	47	19.11	SUC	II
312	37	64.66	YOD	I	357	43	283.82	JRB	III	402	47	23.17	KWJ	II
313	37	79.78	UJB	I	358	43	307.76	SSP	III	403	48	4.71	SND	II
314	38	75.14	UCN	II	359	43	317.09	JAH	III	404	48	16.05	JSB	II
315	38	75.56	UJA	II	360	43	317.63	YOD	III	405	48	19.33	TAB	II

〈표 2〉 진도별 FAS 통계특성 평가에 사용된 지진관측자료. EQ ID는 부록 표 1에서 지진별로 부여된 고유번호(SN)임. (R_{epi} =진앙거리, Sta. = 지진관측소의 고유 ID)(계속)

SN	EQ ID	R_{epi}	Sta.	MMI	SN	EQ ID	R_{epi}	Sta.	MMI	SN	EQ ID	R_{epi}	Sta.	MMI
406	49	5.97	SND	III	451	55	122.12	MGB	III	496	55	242.09	KRC	II
407	50	9.09	SND	I	452	55	125.76	AND	III	497	55	243.42	KRD	II
408	50	15.65	JSB	III	453	55	132.47	ULJ	III	498	55	244.16	GUS	II
409	50	17.98	JSB	I	454	55	133.15	NAS	III	499	55	244.36	CHO	II
410	50	18.89	TAB	III	455	55	136.64	DDC	II	500	55	245.49	JAS	II
411	50	21.32	TAB	I	456	55	143.64	SOD	II	501	55	246.73	ULS	II
412	50	31.5	CHY	I	457	55	144.01	CHN	II	502	55	259.4	IMS	II
413	51	11.04	TJN	I	458	55	145.34	BON	III	503	55	262.07	SAC	II
414	52	15.95	TBD	II	459	55	148.01	SAJ	III	504	55	275.86	BUS	II
415	52	16.49	TJC	II	460	55	148.97	SEO	II	505	55	277.83	KRB	II
416	52	16.57	TEJ	II	461	55	149.19	YOD	III	506	55	278.18	NAW	II
417	52	16.93	TJN	II	462	55	149.58	EUS	III	507	55	280.47	MAS	II
418	53	17.72	CEJ	I	463	55	150.76	SWO	II	508	55	285.67	JEU	II
419	53	24.79	HKU	I	464	55	151.39	CH2	III	509	55	285.8	JIN	II
420	54	14.13	BON	II	465	55	152.38	CEA	II	510	55	285.83	GSU	II
421	54	22.76	SAJ	II	466	55	155.56	CEJ	III	511	55	288.64	JRB	II
422	54	28.03	CPR	II	467	55	162.25	HKU	II	512	55	299.57	HAD	II
423	55	15.31	DGY	V	468	55	162.38	MUS	II	513	55	315.62	KWJ	II
424	55	30.45	KAN	V	469	55	164.38	GUM	II	514	55	318.87	YGA	II
425	55	32.41	JES	IV	470	55	173.86	ICN	II	515	55	320.23	YGN	II
426	55	44.59	JSB	IV	471	55	174.99	INC	II	516	55	329.05	YGB	II
427	55	53.39	TOH	IV	472	55	180.97	PHA	II	517	55	362.49	KOH	II
428	55	54.71	IJA	IV	473	55	182.14	TJN	II	518	55	366.26	JAH	II
429	55	58.09	WJU	IV	474	55	182.6	TEJ	II	519	55	376.82	MOP	II
430	55	59.86	YOW	IV	475	55	186.6	KOJ	II	520	55	391.21	HAN	II
431	55	59.87	NTB	IV	476	55	191.53	YJD	II	521	55	404.37	WAN	II
432	55	63.29	HOC	IV	477	55	194.3	YOC	II	522	56	8.86	CPR	III
433	55	63.7	SND	IV	478	55	194.41	KHD	II	523	56	21.97	KMC	III
434	55	68.32	SKC	IV	479	55	198.45	KMC	II	524	56	31.71	SAJ	III
435	55	68.75	KSR	IV	480	55	200.01	NSS	II	525	57	7.35	MAS	I
436	55	69.62	CHC	IV	481	55	200.98	GKP	II	526	58	13.37	NSS	I
437	55	70.12	JEC	IV	482	55	205.92	ULL	II	527	58	19.13	SES	I
438	55	72.07	TBA	IV	483	55	213.6	WSC	II	528	59	19.14	NTB	I
439	55	79.9	YKB	IV	484	55	213.87	SES	II	529	59	19.88	JES	I
440	55	89.53	CHY	III	485	55	214.05	WSD	II	530	59	21.15	JSB	I
441	55	92.43	YOJ	III	486	55	214.23	HSB	II	531	59	23.2	TOH	I
442	55	96.41	NGP	III	487	55	215.85	DAG	II	532	60	140.72	ANM	I
443	55	97.38	UJA	III	488	55	216.72	BUY	II	533	60	169.23	SES	I
444	55	98.58	UCN	III	489	55	230.06	HDB	II	534	61	21.76	GUS	I
445	55	99.77	YAP	III	490	55	236.07	POR	II	535	61	29.4	NPR	I
446	55	103.3	KSA	III	491	55	236.43	WSB	II	536	61	34.28	PUA	I
447	55	103.7	UJB	III	492	55	237.6	ANM	II	537	62	18.42	KHD	I
448	55	104.3	CWO	III	493	55	238.69	KCH	II	538	63	52.95	GOS	III
449	55	106.4	CHJ	III	494	55	239.11	CHR	II	539	63	79.86	JJU	III
450	55	112.9	ITN	3	495	55	240.37	HAC	II	540	63	81.04	SGP	III

〈표 2〉 진도별 FAS 통계특성 평가에 사용된 지진관측자료. EQ ID는 부록 표 1에서 지진별로 부여된 고유번호(SN)임. (R_{epi} =진앙거리, Sta. = 지진관측소의 고유 ID)(계속)

SN	EQ ID	R_{epi}	Sta.	MMI	SN	EQ ID	R_{epi}	Sta.	MMI	SN	EQ ID	R_{epi}	Sta.	MMI
541	63	89.58	JJB	III	555	63	207	YEG	I	569	65	72.73	PTK	I
542	63	105.2	BGD	II	556	63	212	GWJ	I	570	65	73.76	KMC	I
543	63	110.6	SSP	III	557	63	215.6	KWJ	I	571	65	79.72	MGY	I
544	63	119.4	JDO	II	558	63	220.6	SCH	I	572	65	80.93	SAJ	I
545	63	131.3	HUK	II	559	64	69.7	HUK	III	573	65	81.42	GIC	I
546	63	132.3	WAN	II	560	65	11.57	TJN	III	574	65	83.78	NAS	I
547	63	140.4	HAN	II	561	65	11.85	TEJ	III	575	65	86.95	CHJ	II
548	63	166.6	MOK	II	562	65	18.19	KOJ	II	576	65	106.6	CIG	I
549	63	169.7	JAH	II	563	65	31.99	BUY	I	577	65	120.2	HAC	I
550	63	181.6	MAN	I	564	65	34.29	KMS	II	578	65	122.5	JEC	I
551	63	187	KOH	I	565	65	36.49	CEJ	II	579	65	149.1	JIN	I
552	63	194.1	HWS	I	566	65	53.45	CEA	I	580	65	153	GSU	I
553	63	195.1	NAJ	I	567	65	53.55	BON	II					
554	63	206.3	YGB	I	568	65	67.42	CPR	I					