

지진파의 가속도 푸리에스펙트럼 크기를 이용한 계측진도 평가

Instrumental Seismic Intensity based on Fourier Acceleration Spectra of the earthquake ground-motion

연관희¹⁾ · 박동희²⁾ · 박세문³⁾

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

국문 요약 >> 지진파의 푸리에 가속도스펙트럼(Fourier Acceleration Spectrum)에 기반한 계측진도 평가방법(Sokolov and Wald, 2002)의 국내 적용성을 평가하기 위해 관련 논문(연관희 등, 2009)에서 평가된 국내 지진의 진도 $MMI \leq IV$ 범위에 대한 진도별 FAS 평균(m)과 표준편차(σ) 모델을 이용하여, FAS 진도평가방법의 타당성을 평가하여 보았다. FAS 통계특성 모델 평가시 사용된 지진관측자료의 FAS를 이용하고 본 연구에서 프로그램으로 구현된 FAS 진도평가기법을 적용할 경우 관측된 진도를 $\sigma = 0.74$ MMI의 오차로 추정할 수 있었으며, 오차의 지진규모-거리 의존성을 추가로 보정할 경우 오차를 $\sigma = 0.61$ MMI 까지도 저감할 수 있었다. 또한 본 방법을 $MMI \leq IV$ 에 대한 국내 FAS 통계특성 모델과 $MMI \geq V$ 에 대한 전 세계 FAS 통계특성 모델을 함께 이용하여, 진도 VI 이상인 국내 피해지진의 진도를 미소지진관측자료의 지진원특성을 이론적으로 증가시켜 도출된 스펙트럼을 이용하여 추정한 결과 최대 진도추정 오차 0.63 이내로 예측할 수 있었다.

주요어 계측 지진진도, 푸리에 가속도 스펙트럼, 부지증폭함수 등급

ABSTRACT >> A method of instrumentally estimating seismic intensity (MMI) based on the Fourier Acceleration Spectrum of earthquake ground-motion, the so-called 'FAS MMI method' of Sokolov and Wald (2002), was evaluated for its applicability to Korea based on the empirical models of mean (m) and standard deviation (σ) for Korea according to individual seismic intensity for $MMI \leq IV$ (Yun *et al.*, 2009). This evaluation showed that the error in estimating the seismic intensity using the FAS MMI method is $\sigma = 0.74$ MMI, and was further reduced to $\sigma = 0.61$ MMI if the dependency of the error on earthquake magnitude and distance is additionally corrected. It is also shown that FAS MMI based on the FAS semi-empirically evaluated from small earthquakes for damaging earthquakes in Korea with maximum $MMI \geq VI$ could predict the observed MMI with the maximum error of 0.63 by using the combined FAS m- σ models of Korea for $MMI \leq IV$ and global region for $MMI \geq V$.

Key words Instrumental seismic intensity, Fourier acceleration spectra, Class of site amplification function

1. 서론

본 연구에서는 지반가속도 지진관측기록의 푸리에 스펙트럼을 이용하여 계측진도를 평가할 수 있는 'FAS (Fourier Acceleration Spectrum) 진도평가 방법'^{(1),(2)}의 국내 적용성을 검토하였다. 관련 논문⁽³⁾에서는 FAS 진도평가 방법을 구현하기 위해 필요한 진도별 지진파 FAS 평균값 및 표준편

차 모델을 진도 IV이하의 국내 지진관측자료를 기반으로 개발한 바 있다. FAS 진도평가 방법은 전 세계적으로 발생한 강진자료의 MM 진도별 지진파 FAS 로그값의 통계적인 특성(그림 1의 평균과 표준편차)을 이용하여 관측된 FAS로부터 관측지점의 최적 MM 진도(Modified Mercalli Intensity, 이하 진도는 MMI를 지칭)를 확률론적으로 추정하는 방법이다. 이 방법은 지역에 따라 경험적으로 개발되는 PGA/V (Peak Ground Acceleration/Velocity)-진도 관계식과는 다르게, 전 세계 지역의 평균적인 진도-스펙트럼 크기를 이용하는 특징이 있다. 국외에서 PGA/V-진도 관계식이 개발되어 있는 지역은 대개 강진 지역으로서 내진설계 수준이 매우 높게 설정되는 점을 고려할 때 내진설계 수준이 상대적으로 낮은 국내에 바로 적용이 어렵다고 판단되며, 오

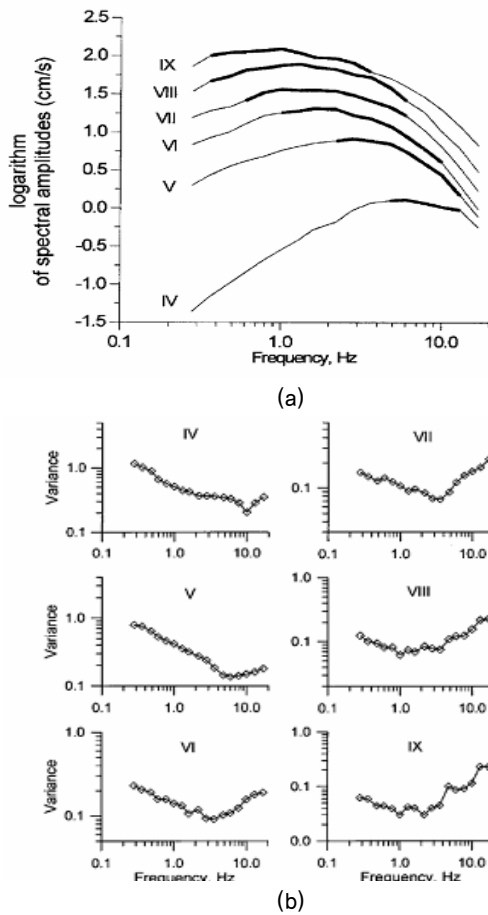
¹⁾ 정희원·한전 전력연구원, 책임연구원
(교신저자 : kyun@kepri.re.kr)

²⁾ 정희원·한전 전력연구원, 선임연구원

³⁾ 한국수력원자력(주) 발전기술원, 책임연구원

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

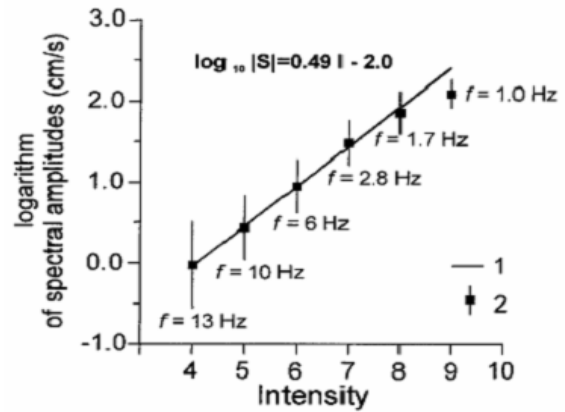
(논문접수일 : 2009. 7. 31 / 수정일 : 2009. 10. 15 / 게재확정일 : 2009. 10. 29)



〈그림 1〉 진도(IV~IX)에 대한 지진관측자료의 주파수별 로그 FAS의 평균(a) 및 분산(b) (Sokolov and Wald⁽²⁾)

히려 국내의 경우는 전 세계지역의 평균적인 스펙트럼-진도 상관성을 이용하여 진도를 평가하는 것이 합리적이라고 판단된다.

진도별로 주파수에 대한 지진파 FAS 평균 및 표준편차 모델이 주어질 경우 FAS 진도평가 방법의 최적 진도 추정값은 관측스펙트럼과 FAS 평균 모델과의 유사 정도 및 비교되는 주파수 대역에서의 FAS 표준편차 모델 크기에 따라 결정된다. 최적 진도 추정에 필요한 진도별 가중치는 관측 스펙트럼과 비교되는 진도의 FAS 평균모델이 서로 유사할 경우 높은 가중치가 부여되며, 아울러 비교되는 주파수대역에서의 FAS 표준편차 모델크기도 고려된다. 이는 관측스펙트럼과 특정 진도의 FAS 평균 모델이 유사하더라도 비교되는 주파수대역의 FAS 표준편차 모델이 크면 평균모델에 대한 불확실성이 크기 때문에 비교되는 진도에는 상대적으로 낮은 가중치가 부여된다. 가장 단순하게는 그림 2에서와 같이 MM 진도별 표준편차가 최소화 되는 구간의 스펙트럼 수준과 진도와의 높은 상관 관계식을 이용하여 진도를 추정할 수도 있다. 진도별로 표준편차가 최소화되는 주파수 영역은 진도가 작은 경우에는 고주파수의 스펙트럼크기에 의



〈그림 2〉 가장 큰 상관계수(0.86)를 갖는 스펙트럼 크기($\log_{10}|S|$)와 진도의 선형관계식. 1은 선형적합결과이며, 2는 스펙트럼 자료에 대한 해당 주파수에서의 평균 ± 1 표준편차를 의미함 (Sokolov and Wald⁽²⁾)

해, 진도가 큰 경우에는 저주파의 스펙트럼 크기에 의해 결정되는 특징이 있다.

이와 같이 FAS 진도평가 방법은 PGA/V 등과 같은 시간영역 최대값만을 이용하는 것이 아니라, 지진의 주요 특징인 스펙트럼의 형상 및 크기, 통계특성, 스펙트럼 크기에 영향을 주는 지속시간까지도 종합적으로 고려하는 방법으로, 진도 추정의 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

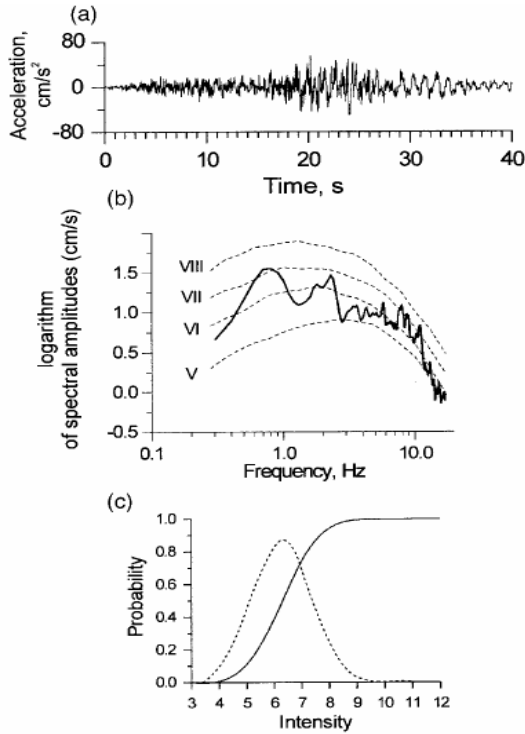
본 연구에서는 FAS 진도평가 방법의 이론을 검토한 후 관련 논문⁽³⁾에서 제시한 진도 IV이하에 대한 국내 지진파의 FAS 통계특성 모델 및 그림 1의 전 세계적인 진도별 FAS 통계특성을 이용한 FAS 진도평가 방법의 국내 적용성을 평가해 보고자 하였다.

2. 가속도 푸리에스펙트럼의 크기를 이용한 계측진도 평가 방법론

FAS 진도평가 방법은 진도별 광대역 주파수영역에 대한 지진파 FAS의 평균 및 표준편차를 이용하여 관측자료의 FAS로부터 관측 지점의 계측진도를 추정하는 방법이다. 이를 위해서는 지진관측소 기록의 FAS에 대해 확률변수로 취급되는 진도가 특정 진도 i 를 초과하지 않는 확률을 의미하는 진도별 누적확률분포를 계산한 후, 이를 미분하여 얻어진 확률밀도함수의 최대값으로부터 최적 계측진도를 추정한다. 이러한 과정은 그림 3의 절차에서와 같이 특정 지진기록에 대해 개념적으로 설명될 수 있다.

확률변수인 진도(I)에 따라 서로 다른 로그 FAS 확률분포를 갖는 경우, 주어진 FAS 관측값에 대해 부여되는 진도가 i 를 초과하지 않을 확률은 개념적으로 FAS 관측값이 진도 i 뿐만 아니라 진도 i 이상의 모든 진도에 대한 확률분포

에 따른 FAS 추정값을 초과하지 않는 조건에 대해 계산된다. 이러한 개념을 구체화시키기 위해 N 개의 이산화 된 진도(I=i)에 대해 주파수 f_j 에서의 FAS 로그값을 특정 정규분



〈그림 3〉 Sokolov and Wald⁽²⁾의 진도 추정 절차 모식도(예 : Hector Mine 지진 시 H05 관측기록) (a) E-W 성분의 가속도기록 (cm/sec²) (b) 실제 기록의 스펙트럼(실선, EW성분)과 다양한 진도 범위(MM V-VIII)에 대한 평균 스펙트럼(점선)의 비교 (c) 특정 진도크기를 초과하지 않을 누적확률함수(실선)와 함수의 1차 미분함수(점선)

포확률($\sim N(m_{ij}, \sigma_{ij})$)를 따르는 확률변수 a_{ij}^* 로 간주하고, 특정 주파수에서 관측된 FAS 로그값의 크기가 a_{0j} 일 때 특정 진도 i 를 초과하지 않는 확률 $P[I < i]$ 을 계산한다.

이러한 확률은 이상에서 개념적으로 언급한 바와 같이 특정 주파수에서의 관측된 FAS 로그값 a_{0j} 가 진도 i 에 대해 부여된 로그 FAS 확률변수값 a_{ij}^* 를 초과해서는 안 될 조건 뿐만 아니라, i 이상의 모든 진도 k 에 대한 확률변수 a_{kj}^* 를 초과해서는 안 될 조건을 동시에 만족하는 경우에 대해 계산된다.

먼저 주파수 f_j 에서 관측된 로그 FAS인 a_{0j} 가 진도 i 에 대해 부여된 로그 FAS 확률변수값 a_{ij}^* 를 초과하지 않는 확률은 다음 식과 같다.

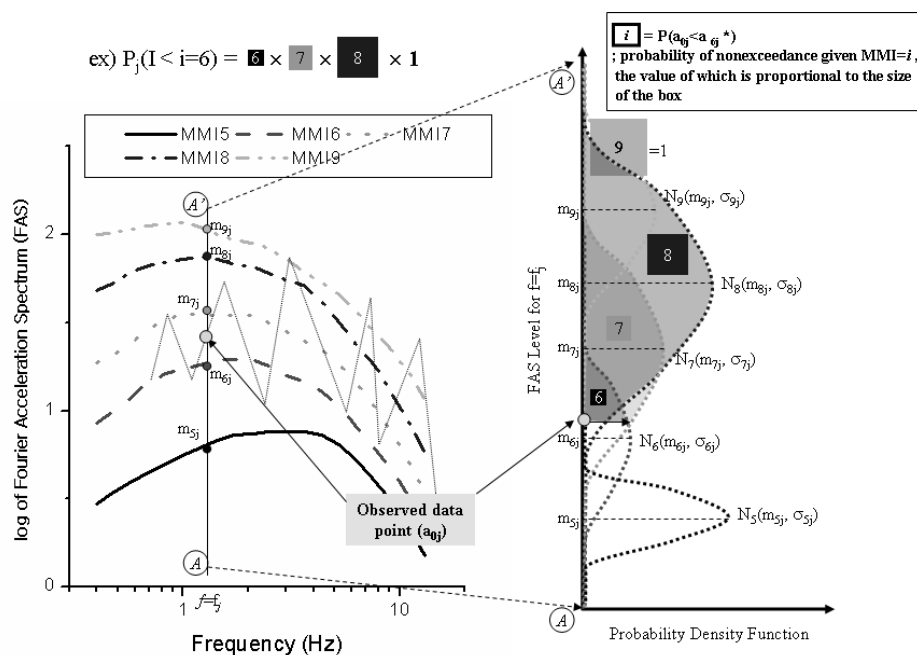
$$P[a_{0j} < a_{ij}^*] = 1 - \frac{1}{\sigma_{ij}\sqrt{2\pi}} \int_{a_{0j}}^{a_{ij}^*} \exp\left(-\frac{(a - m_{ij})^2}{2(\sigma_{ij})^2}\right) da \quad (1)$$

단일 주파수만을 고려할 경우 관측값이 진도 i 를 초과하지 않을 확률은 식 (2)와 같이 계산가능하다. 식 (2)의 N_i 는 최대 진도 등급을 의미한다.

$$P_j[I < i] = \prod_{k=i}^{N_i} P[a_{0j} < a_{kj}^*] \quad (2)$$

그림 4는 주파수 f_j 에서 a_{0j} 가 관측되었을 경우 진도 VI을 초과하지 않을 확률(즉 $P_j[I < i=6]$)을 예제로하여 계산과정을 도식화한 것이다.

그림 4에서 식 (1)의 $P[a_{0j} < a_{ij}^*]$ 는 확률 값에 비례하는 면



〈그림 4〉 FAS에 의한 정량적 진도평가 계산 과정 모식도. 사각형은 주파수 f_j 에서 a_{0j} 가 관측될 경우 진도 i 에 대한 FAS 확률변수값 a_{ij}^* 를 초과하지 않을 확률, 즉 $P[a_{0j} < a_{ij}^*]$ (1)식에 비례하는 면적을 나타냄.

적을 갖는 사각형으로 표시되었으며, 각 진도 i 에 대한 FAS 정규분포의 빗금친 영역의 면적으로 계산될 수 있다. $P[I < i=6]$ 는 진도 VI 이상에 대한 $P[a_{0j} < a_{ij}^*]$ 를 곱하여 계산된다.

한편, 상기 확률은 특정 주파수 f 에 대해 계산된 값을 이용한 결과이고 $l=1, \dots, n_f$ 개의 여러 주파수에 대한 FAS 로그 값 벡터 $\mathbf{a}_0 (= (a_{01}, a_{02}, a_{03}, \dots, a_{0n_f}))$ 가 진도 i 의 여러 주파수에서의 FAS 확률변수값 벡터 \mathbf{a}_i^* 를 초과하지 않을 확률은 다음과 같이 평균적으로 추정할 수 있다.

$$P[\mathbf{a}_0 < \mathbf{a}_i^*] = \left(\sum_{l=1}^{n_f} P[a_{0l} < a_{il}^*] \cdot w_{il} \right) / \sum_{l=1}^{n_f} w_{il} \quad (3)$$

여기서 w_{il} 는 개념적으로 분산의 역수를 가중치로 하여 $\sigma_{i, min}^2 / \sigma_{ij}^2$ 와 같이 계산될 수 있다. $\sigma_{i, min}^2$ 는 i 진도에 대해 주파수별 a_{il}^* 중 최소 분산값을 의미한다.

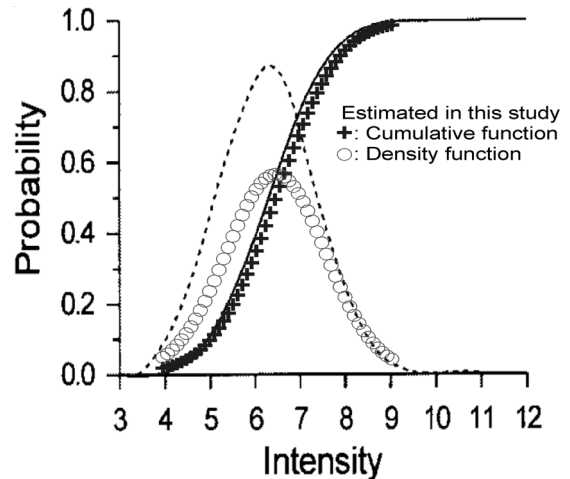
최종적으로 여러 주파수에서의 관측값에 대한 $P[I < i]$ 는 식 (2)와 유사하게 i 이상의 모든 진도 k 에 대해 관측된 \mathbf{a}_0 가 진도별 확률변수 \mathbf{a}_k^* 를 초과해서는 안 될 조건까지 고려하여 다음과 같이 계산된다.

$$P[I < i] = \prod_{k=i}^{N_f} P[\mathbf{a}_0 < \mathbf{a}_k^*] \quad (4)$$

식 (4)는 진도 I 의 누적확률분포함수에 해당하며, 이를 미분하여 진도 I 에 대한 확률밀도함수를 계산한 후 확률밀도함수가 가장 큰 값이 될 때의 진도를 최적 진도로 추정할 수 있다. 한편 식 (4)는 이산화된 I 에 대해서만 계산됨으로 수치적으로 I 에 대해 미분할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 이산화된 $P[I < i]$ 값을 미분 가능한 형태의 정규분포 적분 함수 형태인 오차함수(error function)로 근사시킨 후 확률밀도함수를 계산하였다. 이를 위해 식 (5)의 진도 (I)별 평균(m)과 표준편차(σ) 파라미터를 광범위한 영역에서 변화시켜가며 식 (5)의 오차좌승합이 최소가 되는 경우의 m_1 과 σ_1 의 최적해를 구하게 되면, m_1 의 최적해가 가장 큰 확률밀도함수 값을 갖는 FAS 진도 추정값이 된다.

$$\sum_{i=1}^N |P[I < i] - 0.5 \times (1 - \text{erf}((I - m_1) / \sqrt{2} \sigma_1))|^2 \quad (5)$$

식 (5)에서 $\text{erf}(\cdot)$ 는 m_1 과 σ_1 를 파라미터로 하는 오차함수이다. 본 연구에서는 이상의 방법을 구현하기 위하여 새로운 프로그램을 개발했으며, 프로그램의 검증을 위해 그림 3(b)에 나타난 스펙트럼 자료를 수치화 한 후 FAS 계측진도를 평가하였다. 그림 5는 그림 3(b) 스펙트럼의 수치화된



〈그림 5〉 그림 3(b)의 지진파 FAS 스펙트럼을 Sokolov and Wald⁽²⁾가 계산한 진도확률(그림 3(c))과, 본 연구에서 제시된 진도 평가 계산결과(+ 기호)와 비교. 누적확률함수는 서로 잘 일치하고 있으며, 확률밀도함수(누적확률함수의 1차 미분)간의 불일치(형상은 유사함)는 서로 다른 스케일을 적용하여 발생하는 것으로 추정됨

FAS 자료를 이용하여 자체적인 계산과정을 거쳐 도출한 결과와 Sokolov와 Wald⁽²⁾의 논문에서 예시한 결과를 비교한 결과로서 서로 잘 일치하고 있으며, 이로부터 본 연구에서 적용한 계산과정이 타당함을 알 수 있다.

3. FAS 진도평가 방법의 오차 분석

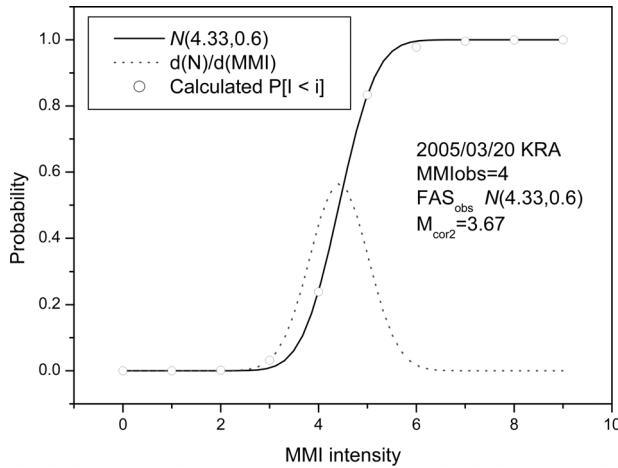
관련 논문⁽³⁾에서 제시된 진도별 FAS 통계특성 모델을 이용하고 통계 특성 모델개발에 사용된 관측자료의 FAS를 이용하면 해당 관측 지점에 대한 진도를 추정할 수 있고 실제 관측된 진도 값과의 비교를 통해 FAS 진도추정 방법의 오차를 분석할 수 있다. 진도별 FAS 통계특성 모델에 사용된 자료는 관측된 FAS를 국내 지반물성을 대표할 수 있는 D 등급 관측소(연관회와 서정희⁽⁴⁾)의 부지증폭특성을 갖도록 변환한 값이다.

본 연구에서 FAS 진도 추정에는 사용되는 주파수 대역은 표 1과 같이 진도 IV 이하의 진도에 대해서는 진도가 작아질수록 고주파 스펙트럼 대역이 보다 많이 활용될 수 있도록 하기 위해 주파수 대역을 진도별로 다르게 변화시켰으며, 진도 V 이상에서는 동일한 주파수대역을 사용하였다. 이때 각 진도별 주파수구간 내의 $0.183 \log_{10}$ 간격의 주파수별 FAS 관측 값을 진도 추정 시 활용하였다.

FAS 진도평가 방법의 오차분석에 사용된 관측자료(연관회 등⁽³⁾의 부록 표 2)로는 S/N비가 3 이상인 가용 주파수 대역의 최대/최소주파수 비율이 10 이상이고 또한 최대 주파수가 8Hz 이상인 자료만 사용되었다. 이러한 기준에 따르

〈표 1〉 진도별 평가 시 사용된 주파수 범위

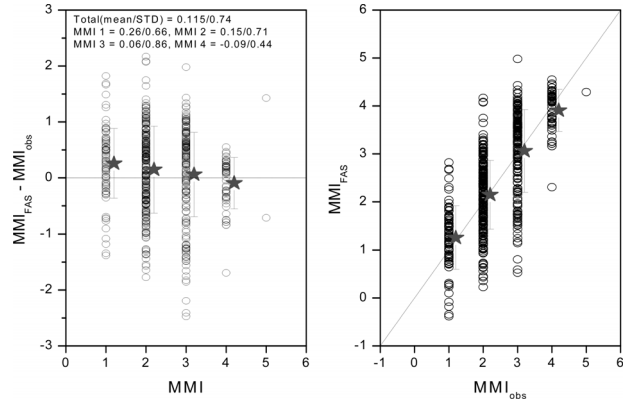
MM 진도	주파수 범위(Hz)	
	최저	최고
0	1	32.49
I	0.83	27.05
II	0.69	22.52
III	0.58	18.75
IV	0.48	15.61
V	0.4	13
VI	0.4	13
VII	0.4	13
VIII	0.4	13
IX	0.4	13



〈그림 6〉 FAS를 이용한 진도 추정 예제. 후쿠오카 지진(2005/03/20, M=7.0)시 KRA(전력연구원 고리원전 지진관측소, R=193.92km, MMI=IV) 관측자료를 D등급 관측소로 변환하여 FAS를 계산. P[I < i]는 i=0,...,9까지의 이산화된 진도에 대해서 계산되며, 이산화된 진도 누적확률분포는 N(4.33, 0.6)의 정규분포 함수에 대한 적분함수(식 (5)참조)로 최적 적합되었으며, 따라서 FAS MMI=4.33으로 계산됨. 한편 이 값을 대상 기록에 대한 규모, 거리에 대한 보정값 0.672을 수정한 결과 3.67임

면 가용 주파수 대역의 최소 주파수가 1Hz이면 최소 10Hz 이상의 주파수 가용 대역을 갖는 자료만이 진도평가에 활용되게 되어, 7Hz 정도의 가용 주파수대역의 최대값을 갖는 20SPS (Sampling per Second) 국내 지진관측자료는 진도 평가시 배제시켜 100SPS 관측자료만을 선별적으로 활용할 수 있다.

그림 6은 관측자료에 대한 FAS 진도추정 평가 예제로서, 진도별 누적확률분포와 이를 미분한 확률밀도함수를 함께 도시하였다. 그림 6에서 관측지점에서의 발표된 진도는 IV이며 FAS를 이용하여 최적 진도는 4.33으로 추정되었다. FAS를 기반으로 추정된 최적 진도는 다음에서 설명되는 바와 같이 규모, 거리에 대해 추가적으로 보정될 수 있다.



〈그림 7〉 관련 논문(연관희 등³⁾) 부록 표 2의 관측 자료에 대한 관측진도 (MMI_{obs})와 FAS MMI 추정진도(MMI_{FAS})의 오차 분포

〈표 2〉 관련 논문(연관희 등, 2009) 부록 표 2의 전체 지진관측자료에 대한 진도 추정오차(=추정치(I_{est})-관측치(I_{obs}))의 평균(m), 표준편차(σ)와 규모-거리 보정에 따른 오차 비교, B(M_m)과 B(M, R)은 각각 식 (6,7)와 같음

진도 (개수)	ΔMMI (=I _{est} -I _{obs})		ΔMMI _{cor1} (=ΔMMI-B(M _m))		ΔMMI _{cor2} (=ΔMMI _{cor1} -B(M, R))	
	m	σ	m	σ	m	σ
I (78)	0.259	0.659	0.435	0.591	0.530	0.444
II (271)	0.149	0.713	0.199	0.653	0.033	0.542
III (178)	0.062	0.863	0.070	0.851	-0.192	0.656
IV (51)	-0.093	0.437	-0.093	0.437	-0.077	0.482
Total	0.120	0.741	0.170	0.711	0.002	0.610

그림 7은 관련 논문(연관희 등, 2009)에서 계산된 국내 지진의 MM 진도별 스펙트럼의 통계특성에 활용된 580개 자료에 대해 추정된 FAS MMI와 보고된 MMI를 비교한 결과로서 오차의 평균(m) 및 표준편차(σ)는 각각 0.115와 0.74로 평가되었다. 진도별 진도 추정오차 m 및 σ는 표 2에 수록되어 있으며, 진도 III이 가장 큰 진도추정 오차(σ=0.863)을 나타내고 있다. 그림 7은 진도 추정오차의 평균이 진도에 따라 선형적으로 감소하는 경향을 보여주고 있어 규모 의존성에 대한 추가적인 보정의 필요성을 제시한다.

미국 캘리포니아의 강진자료를 이용하여 개발된 PGA, PGV를 이용한 진도예측식⁵⁾의 오차는 각각 σ=1.08, 0.98 정도로 평가된 바 있다. 또한 Kaka and Atkinson⁶⁾은 미국 중동부 지역에 대한 PGV-MMI 관계식과, 5Hz PSA(Pseudo Spectral Acceleration)-MMI 관계식을 추정하고 각 관계식에 대한 MMI 추정오차를 각각 σ=0.72, 0.76 MMI으로 평가하였으며, 규모와 거리에 대한 오차의 의존성을 보정할 경우 MMI 추정 오차가 각각 σ=0.65, 0.68 MMI로 저감될 수 있음을 제시하였다. 최근 Atkinson and Kaka⁷⁾는 중규모 지진 이하의 중동부 지진과 캘리포니아의 강진자료를 통합 이용하여 log(PGV(cm/sec))=0.48을 경계로 하여 PGV-

진도 예측식을 분리한 결과 0.8MMI의 σ 를 얻었으며, 규모와 거리까지 보정할 경우 $\sigma=0.76\text{MMI}$ 추정오차를 얻은 바 있다.

이상에서 본 연구에서 사용된 FAS MMI 추정 방법에 대한 오차 $\sigma=0.74$ 는 미국 중동부 지역에 대한 PGV/PSA-MMI 진도 추정 방법의 오차와 유사하며 비교적 낮은 오차 수준임을 알 수 있다.

4. 진도별 FAS 관측 평균의 규모, 거리에 대한 의존성 보정

본 연구에서는 그림 7에 나타난 진도 추정값의 불확실성을 보다 저감할 수 있는 지를 살펴보기 위하여 진도 추정 오차가 지진에 대한 추가적인 정보 즉, 규모와 거리에 대한 의존 정도를 평가하였다. FAS 진도 추정 방법은 진도별 FAS의 평균적인 스펙트럼 형상 및 수준에 의해 결정되는데 규모-거리에 따라 스펙트럼의 형상이 평균적인 형상과 다르게 나타나기 때문에 진도 추정 오차의 규모와 거리에 대한 의존성을 예상할 수 있고 이를 모델링 하여 보정하면 진도 추정의 불확실성을 저감할 수 있을 것으로 생각된다.

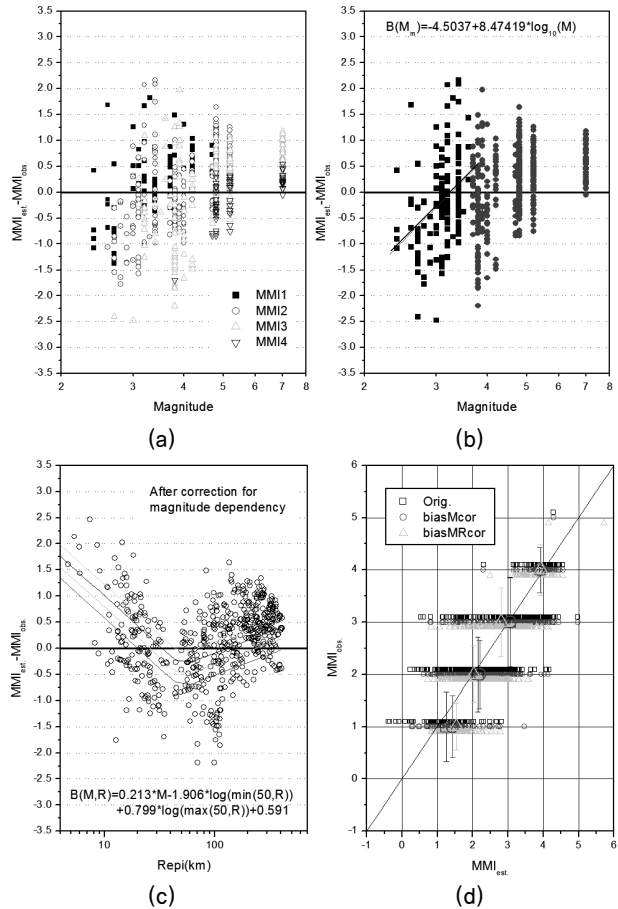
그림 8은 그림 7의 추정오차를 진도 및 거리별로 분리한 후 특별한 의존성이 있는 지를 검토하는 데 사용하였다. 그림 8(a)는 진도의 오차(추정값-관측값)를 규모별로 분리한 그림으로 작은 지진규모의 범위($M < 3.6$)에서 진도 추정의 오차가 규모에 비례한다. 이러한 오차는 그림 8(b)에 나타난 바와 오차-로그규모 영역에서 선형관계인 식 (6)으로 근사될 수 있었다.

$$B(M_m) = -4.5037 + 8.47419 \times \log(M_m) \quad (M_m \leq 3.6) \quad (6)$$

그림 8(c)는 거리에 대한 진도 추정 오차로서 거리(R)에 따라 보다 체계적이고 뚜렷한 오차 변화를 나타내는 강한 의존성을 나타냄을 알 수 있다. 이러한 거리에 따른 오차 변화 경향은 거리 50km를 경계로 하여 오차-로그거리 영역에서의 두개의 직선식 (7)로 모델링 하였다.

$$B(M,R) = 0.591 + 0.213M - 1.906\log(\min(50,R)) + 0.799\log(\max(50,R)) \quad (7)$$

식 (7)의 거리 50km는 기존 연구⁽⁸⁾에서 지진파의 기하학적 감쇠모델이 $1/R$ 에서 $1/\sqrt{R}$ 로 전이하는 거리로 알려져 있는데 이론적으로는 S 파의 체적파에서 Lg 표면파가 우세



〈그림 8〉 관련 논문⁽³⁾ 부록 2의 관측 자료에 대한 관측진도 FAS MMI 추정진도의 오차 분포

한 파형으로 전이하는 구간으로서 이 전이거리를 경계로 하여 50km 이상에서는 고주파의 감쇠율이 낮아지며, 저주파수가 매우 우세하게 나타날 것으로 예상된다. FAS 진도 추정값이 그림 8(c)에서 (7)식으로 모델링된 바와 같이 근거리 및 원거리에 크게 평가되는 이유는 근거리에서는 고주파에서 지진파 스펙트럼이 평균적인 스펙트럼보다 큰 값을 나타내기 때문이며, 50km 이상의 원거리에서는 저주파에서 평균적인 스펙트럼보다 상대적으로 큰 수준을 나타내기 때문이다.

한편, 관측자료에 근거한 FAS 진도추정 오차는 진앙지에 근접할수록 (7)식의 모델 예측값 보다 크게 나타나는 경향이 있는데(그림 8(c)), 이는 진앙지 인근 지역에 대해 발표된 진도 값이 인근 광역 지역을 대표하는 평균 진도(Macro seismic Intensity) 값으로서 진앙지 인근의 국부적인 지역에 대해 정밀평가된 진도의 최대값 보다는 항상 낮은 값을 나타내기 때문이다. 일반적으로 진앙지 인접 지역에서는 지진파의 단층파열방향성, 회전 운동, 지반의 교란 영향 때문에 국부적으로 높은 진도를 나타내는 경우가 많다. 따라서

진앙지 인근의 국부적인 진도를 추정하기 위해서는 규모-거리 보정이 불필요할 것으로 예상된다.

그림 8(d)에는 진도 추정값을 규모가 작은 경우의 의존성을 보정한 경우와(그림 8(d) biasMcor), 전체 규모-거리 범위의 의존성을 보정한 경우(그림 8(d) biasMRcor)의 진도 추정 오차의 변화를 나타내는 그림이다. 표 2는 관련 논문(연관희 등³⁾)부록 표 2의 전체 지진관측자료에 대한 진도 추정오차와 규모-거리 보정에 따른 오차를 비교한 결과이다. 이 두 결과에서 규모가 작은 경우의 의존성을 보정할 경우(표 2의 ΔMMI_{cor1} 열) 진도 II 이하의 작은 진도에 대한 진도 추정오차가 저감되었으며, 전체 범위의 규모-거리를 보정한 경우(표 2의 ΔMMI_{cor2} 열) 오차가 $\sigma=0.74$ 에서 0.61로 상당히 저감되었다. 한편 규모-거리 보정 후 얻어진 진도 추정 오차(MMI_{cor2})인 $\sigma=0.61$ 은 Kaka and Atkinson⁶⁾이 PGV를 이용하고 규모-거리를 보정할 경우 얻어진 $\sigma=0.65$ 보다도 낮은 오차수준으로 PGV와 같은 단일값과는 다르게, 여러 주파수에서의 스펙트럼 관측값을 동시에 사용했기 때문에 나타난 오차 저감효과이다.

표 3과 그림 9는 특정 지진(2004년 울진앞바다지진, 2007년 오대산지진)에 대한 진도의 규모-거리 보정 전후의 오차를 비교한 결과이다. 전체 자료에 대한 분석결과에서 처럼 불확실성 저감효과는 없었으나, 평균값이 편향되지 않게 평가되고 있다.

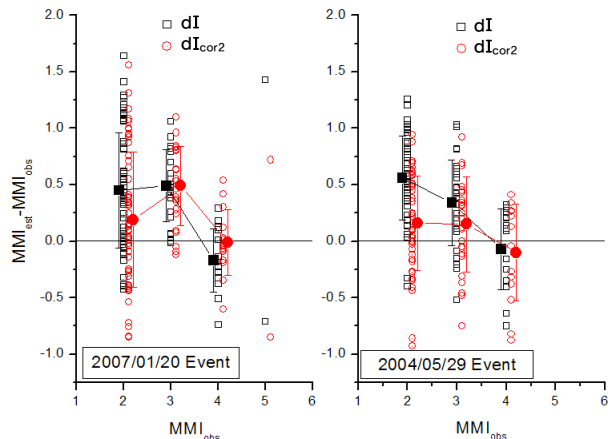
그림 10은 FAS 진도추정결과에 대해 식 (7)을 이용한 지진규모-거리의 진도 의존성을 보정하여 최종적으로 얻어진 오대산지진에 대한 계측진도 평가예제로서, FAS MMI의

〈표 3〉 국내 주요 지진에 대한 진도 추정오차(=추정치(I_{est})-관측치(I_{obs}))의 평균(m), 표준편차(σ)와 식 (7)의 B(M,R)을 이용한 추가적인 규모-거리 보정에 따른 오차 비교

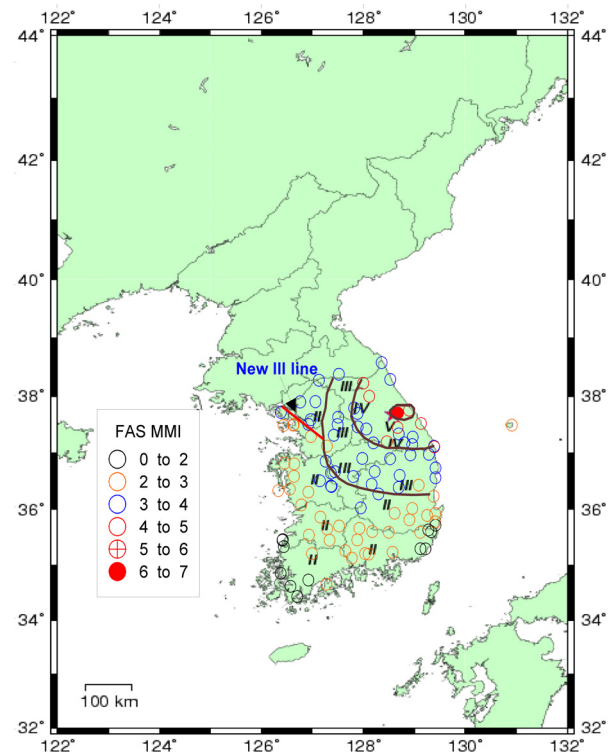
2004/05/29				
	$\Delta MMI (=I_{est}-I_{obs})$		$\Delta MMI_{cor2} (= \Delta MMI - B(M,R))$	
진도(개수)	m	σ	m	σ
III(14)	-0.07	0.36	-0.1	0.43
II(27)	0.34	0.38	0.15	0.42
I(45)	0.56	0.37	0.16	0.42
Total	0.39	0.43	0.11	0.43
2007/01/20				
	$\Delta MMI (=I_{est}-I_{obs})$		$\Delta MMI_{cor2} (= \Delta MMI - B(M,R))$	
진도(개수)	m	σ	m	σ
III(15)	-0.17	0.28	-0.01	0.29
II(21)	0.49	0.32	0.49	0.35
I(62)	0.45	0.51	0.19	0.6
Total	0.37	0.52	0.21	0.54

범위 2.0~3.0, 3.0~4.0, 4.0~5.0, 5.0~6.0은 각각 발표된 진도(박종찬⁹⁾) II, III, IV, V, VI의 등진도구역도와 전반적으로 잘 대비되고 있음을 알 수 있다. 한편 관측소 FAS MMI의 분포로부터 역으로 진도 III에 대한 등진도구역 경계선을 경기지방에 대해 수정(그림 10의 New III line)하는 것을 추가적으로 고려해 볼 수도 있다.

미소지진이 대부분인 국내 지진 진도평가에서 나타난 진



〈그림 9〉 울진 앞바다지진(2004/05/29)과 오대산지진(2007/01/20)에 대한 FAS MMI 추정결과와 관측오차의 비교. dI_{cor2} 는 식 (7)의 규모-거리에 대하여 보정한 결과임. 규모-거리 보정 후 진도별 평균 추정값이 편향되지 않은 값을 나타내고 있음



〈그림 10〉 오대산지진의 진도 분포도. 로마 숫자 : 기상청 발표 MMI 진도, 실선 : 등진도구역도(박종찬⁹⁾), ○ : 관측자료의 FAS MM 진도값. FAS MMI의 구간 2.0~3.0, 3.0~4.0, 4.0~5.0, 5.0~6.0은 각각 MMI II, III, IV, V를 나타냄

도추정의 규모, 거리에 대한 강한 의존성은 큰 규모의 진도에 대해서는 상대적으로 약할 것으로 판단된다. 왜냐하면, 큰 진도를 나타낼 수 있는 지진의 규모-거리 범위는 좁은 반면 작은 진도를 나타낼 수 있는 지진의 규모-거리 범위는 매우 광범위하기 때문이다. 예를 들면, 진도 II는 큰규모 원거리 지진에 기인할 수도 있고, 낮은 규모의 근거리 지진에 기인할 수 있는 반면, 진도 VII, VIII의 경우는 큰 규모, 근거리 지진에 주로 기인하기 때문에 큰 진도를 유발하는 지진의 규모-진도 범위는 매우 좁다. 따라서 본 연구에서 제시한 작은 지진규모 보정 모델식 (6) 및 거리-규모 보정 모델식 (7)의 적용을 진도 IV 이하로 제한하는 것이 바람직하며, 앞에서 언급한 바와 같이 진앙지 인근 정밀 진도평가 때보다는 광역적인 진도 평가 시에 적용이 타당하다고 판단된다.

일반적으로 규모와 진앙지 추정에는 최소 5분 정도의 시간이 걸리며 신속한 진도 평가를 위해서는 부정확하지만 관측된 FAS를 D 등급 관측소(연관회와 서정희⁴⁾)로 보정한 자료로 진도를 개략적으로 추정한 후, 규모와 진앙지가 알려진 이후에는 식 (6)과 (7)의 보정 모델을 이용하여 진도를 보정하면 진도 IV 이하의 낮은 진도까지도 정밀하게 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

〈표 4〉 관련 논문(연관회 등, 2009) 부록 표 2의 전체 지진관측자료 중 관측된 진도값이 6개 이상인 관측소에 대한 진도 추정 오차의 평균(m)과 표준편차(σ)

계측진도오차		# of MMI	STA	계측진도오차		# of MMI	STA
m	σ			m	σ		
-0.034	0.675	14	TJN	-0.057	0.533	7	YGA
-0.087	0.761	13	WSC	0.158	0.485	7	YGB
-0.353	0.564	13	WSN	0.155	0.531	7	YOD
-0.072	0.519	12	WSA	0.110	0.360	6	AND
-0.582	0.333	9	HDB	0.021	0.329	6	CEJ
0.109	0.430	9	KMS	0.042	0.583	6	CHA
0.270	0.507	8	BUY	-0.037	0.394	6	CHJ
0.463	0.687	8	KMC	0.131	0.415	6	CHO
0.239	0.675	8	TEJ	-0.595	1.058	6	GKP
-0.442	0.625	8	ULS	-0.113	0.298	6	GSU
0.472	0.382	7	CHY	-0.020	0.404	6	JEC
0.024	0.389	7	EUS	0.060	0.486	6	KOH
0.136	0.621	7	HKU	-0.754	0.522	6	KRB
-0.143	0.417	7	KWJ	-0.403	0.504	6	KRC
0.179	0.601	7	SEO	-0.037	0.344	6	KUS
0.432	0.475	7	SES	0.179	0.479	6	NPR
0.336	0.438	7	SND	-0.262	0.583	6	WAN
-0.171	0.527	7	WSB	-0.325	0.568	6	WSD

진도추정의 정확성을 향상시키기 위해서 추가적으로 고

려할 요소는 진도 추정에 영향을 줄 수 있는 부지증폭 특성에 대한 가정이다. 본 연구에서는 모든 지역에 대해 동일하게 D 등급 관측소(연관회와 서정희⁴⁾)의 지반조건에 대해 진도를 평가하였으나, 실제 지반특성은 지역별로 차이가 있을 수 있다. 이러한 지역별 지반특성의 차이는 동일한 지반특성을 사용하여 추정된 진도 추정 오차에서 평균값이 0에서 벗어나는 편향(Bias)된 결과를 가져올 수 있으며, 동일관측소에 대해 여러 지진에 대한 진도추정오차의 편향 정도를 분석하면 관측소가 속한 지역의 지반특성 차이를 평가할 수 있다.

표 4는 관측된 진도 분포가 6개 이상인 관측소에 대한 진도 추정 오차 통계특성으로 표준편차는 대체로 지진의 규모-거리 보정한 이후의 진도 추정 오차 $\sigma=0.61$ 보다 낮으며, 오차 평균값이 0에 가까운 값을 갖는다. 한편 몇몇 관측소(WSN, HDB, CHY, SES, KRB 등)에서는 평균값이 뚜렷한 편향성을 나타내고는 있으나 광역적인 지역별 지반특성 차이 추이를 평가하기에는 미비한 관측소 숫자로서 지역별 지반특성 차이에 대한 보정은 본 연구에서는 검토에서 제외하였다.

5. FAS 진도평가 방법의 확장 적용

이상에서 검토된 FAS 진도평가 방법의 국내 적용성은 국내 지진관측 자료가 진도 IV 이하에 대해서만 존재하기 때문에 진도 IV 이하로 제한된다. 그러나 지진 발생시 중대한 지진피해와 관련된 진도의 크기는 VII 이상으로, 본 연구의 진도평가 방법을 현실적으로 적용하기 위해서는 진도 VI 이상의 큰 진도 평가에도 확대 적용할 필요가 있다.

일반적으로 MM 진도 VI를 기준으로 해서 진도 VI 이하는 주로 인체의 느낌과 관련된 현상을 중심으로 정의되며, 진도 VI 보다 큰 진도는 구조물의 피해정도를 기반으로 결정된다. 구조물의 피해는 일반적으로 내진설계 수준 및 지반특성에 따라 결정되는데, 국내의 내진설계 수준이 전 세계적으로 볼 때 비교적 높고, 오래된 지질학적인 환경으로 인해 지반 강성이 전반적으로 높은 점을 고려하면 전세계적인 지진피해의 FAS 통계치를 국내에 보수적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 근거 하에 현재 국내에서는 평가할 수 없는 진도 V 이상에 대한 FAS 평균값과 표준편차 모델의 대안으로 Sokolov and Wald²⁾의 전 세계 지진과 FAS 평균값과 표준편차를 그대로 이용하고 적용 타당성을 평가하였다. 진도 V 이상의 전 세계 지진과 FAS 통계특성을 그대로 사용하기로 결정한 또 다른 이유는 관련 논문³⁾의

〈표 5〉 진도 VI 이상 지진에 대한 FAS MMI 추정을 위해 검토된 지진목록, 지진파스펙트럼 증가에 사용된 파라미터(식 (8)), 발표된 진도 및 추정결과 비교

ID	대상지진 발표 내용(기상청)				대상지진의 지진파 모사를 위한 인근 지역 미소지진 자료의 점지진원 파라미터 증가			FAS MMI 추정치 (오차)	최대 진앙 진도	
	발생일	규모	지역	광역 진도	사용자료 (일자/관측소/ΔR ^A)	모멘트규모 (ΔM) ^C	응력강하 (bar) (Δ(Δσ)) ^C		MMI	참고문헌
①	2007-01-20	4.8	오대산 지진 강원 평창군 도암면-진부면 경계지역	MMI V	07-01-20/DGY/7.9km	0	0	6.47 (+0.47)	VI	a)
②	1997-06-26	4.2	경북 경주 남동쪽 9km 지역	JMA IV	09-06-02/WSC/8.5km	+0.5 (=4.4-3.9)	+30 (=130-100)	5.95 (-1.05)	VII	b)
③	1996-12-13	4.5	영월 지진 강원도 영월 동쪽 약 20Km 지역	JMA III	06-01-19/SND/13.3km	+1.3 (=4.9-3.6)	+90 (=170-80)	6.37 (+0.63)	VII	c, d)
④	1936-07-04	5.0 ^{B)}	지리산 쌍계사 인근	JMA V	07-01-20/DGY/ -	+0.2 (=4.8-5.0)	+50 (=170-120)	7.31 (-0.31)	VII	e)

A) ΔR = 대상지진의 진원위치와 지진원 증가시 사용된 미소지진관측자료의 진원 간의 거리 B) 연관회 등⁽¹⁰⁾ C) 연관회와 박동회⁽¹⁹⁾
 a) 경재북 등⁽¹¹⁾ b) 경재북과 이회옥⁽¹²⁾ c) 조봉곤 등⁽¹³⁾ d) 경재북 등⁽¹⁴⁾ e) 한국동력자원연구소⁽¹⁵⁾

결과에서와 같이 진도 IV에 대한 국내 지진의 FAS 평균과 전 세계 FAS 평균이 서로 유사하기 때문에 진도 IV 보다 큰 진도에 대해 FAS 평균의 유사성을 추론할 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 이상에서와 같이 진도 V 이상에 대해 전 세계 진도별 FAS 통계특성을 그대로 이용하는 것이 타당한지를 평가하기 위해 국내에서 발생한 진도 VI 이상의 피해를 유발한 주요 지진에 대한 FAS를 미소지진자료의 지진원을 이론적으로 증가시켜 추정하고, 추정된 FAS를 이용한 계측진도와 발표된 진도를 비교하여 보았다.

표 5에는 진앙지에서 진도 VI 이상을 갖는 4개의 지진을 선정한(①-④) 결과를 수록한 것으로 오대산지진에 대한 DGY 관측자료를 제외하고는 추정하고자 하는 지진의 진앙지 인근에서의 지진관측자료가 존재하지 않는다. 이 경우에 계측진도를 평가하기 위해 비교적 최근에 인접 지역에서 발생한 작은 지진의 계측자료(표 5의 ‘사용자료’ 열)의 지진원 특성을 이론적으로 증가시켜 스펙트럼을 추정하였다. 표 5에서 지진원을 조정하기 위해 사용한 지진원모델은 Brune^{(16),(17)}의 스펙트럼(식 8)의 $S_B(f; M, \Delta\sigma)$ 으로 식 (8)과 같이 모멘트규모(M)와 응력강하량(Δσ) 파라미터의 영향을 받는다.

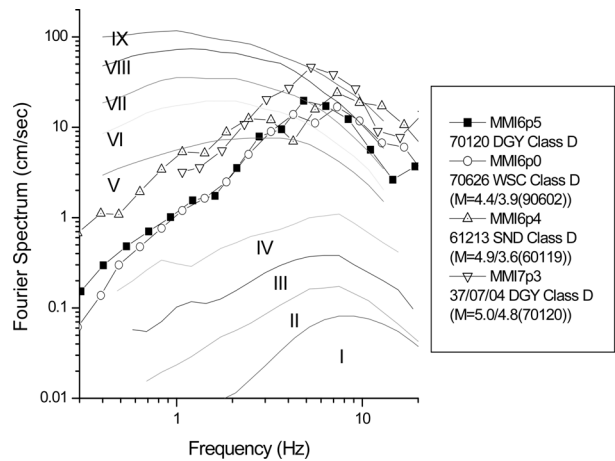
$$S_B(f; M, \Delta\sigma) = C \frac{f^2}{1 + (\frac{f}{f_0})^2} M_0 \quad (8)$$

$$f_0 = \beta_0 (\Delta\sigma / 8.44 M_0)^{1/3}, (\log M_0 = 1.5M + 16.05)$$

f = 주파수, M₀ = 지진모멘트(seismic moment)

β₀ = 지진원 S파 속도, f₀ = 지진원 코너주파수.

표 5에서 지진규모 증가에 따른 스펙트럼의 추정은 관측된 미



〈그림 11〉 표 5의 대상지진에 대한 FAS 스펙트럼 추정값 및 진도평가 결과

소지진 스펙트럼에 $S_B(f; M + \Delta M, \Delta\sigma + \Delta(\Delta\sigma)) / S_B(f; M, \Delta\sigma)$ 을 곱하여 계산될 수가 있다. 표 5에서 지진원 증가에 따른 대상지진의 스펙트럼 추정 결과의 불확실성을 최소화하기 위해 미소지진 관측자료에 대한 지진파 이격거리(ΔR) 및 규모차이(ΔM)가 최소화 되는 관측자료를 이용하였다. 지진 규모 증가에 따른 응력강하의 증가(Δ(Δσ))는 연관회 등⁽¹⁸⁾의 지진규모-응력강하모델에 따라 변화시켰다. 표 5에서 1936년 지리산지진(④)의 규모는 연관회 등⁽¹⁰⁾의 결과를 이용하였으며 나머지는 지진에 대한 모멘트규모와 응력강하량은 연관회와 박동회⁽¹⁹⁾의 연구결과를 이용하였다.

증가된 지진규모에 대해 추정된 FAS 결과는 그림 11과 같으며 이에 대한 진도 추정결과는 표 5에 수록되어 있다.

한편 표 5의 지진관측 스펙트럼 자료는 지진원 규모를 조정하기 이전에 모두 관련 논문⁽³⁾의 방법을 이용하여 D 등급 관측소(연관회와 서정희⁽⁴⁾)의 부지조건으로 변환되었다. 또

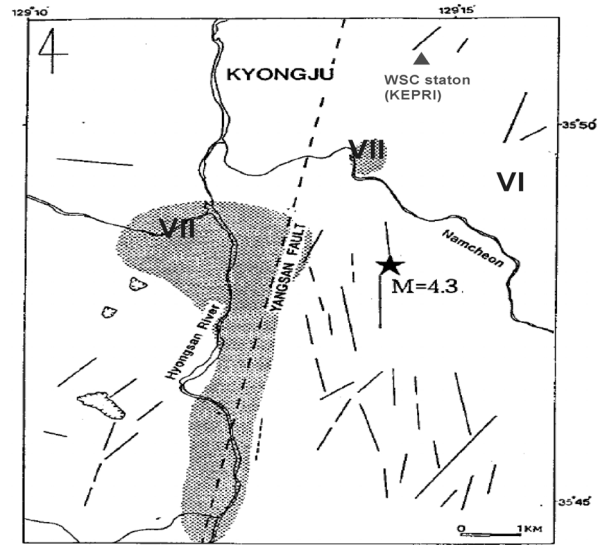
한 이때 추정되는 진도는 광역진도가 아니라 정밀 진도이므로 광역진도평가를 위해 사용되는 식 (7)을 이용한 지진의 규모-거리에 대한 보정은 적용하지 않았다.

표 5의 지리산 지진(④ 지진)의 경우 진앙지 인근 지점에서 관측된 미소 지진자료가 존재하지 않는다. 이 경우 대안으로 1936년 지리산 지진과 가장 근접한 규모를 갖는 오대산 지진의 진앙지 인근 자료(DGY)에 대해 지진원 특성을 증가시켜 얻어진 스펙트럼을 이용하여 진도를 추정하였다.

표 5에는 기상청이 공식적으로 발표한 진도를 수록하였는데 오대산지진(①)의 경우를 제외하고는 JMA 진도로 되어 있어 본 연구에서 미소지진 스펙트럼의 지진원을 이론적으로 증가시켜 간접적으로 추정한 MM 진도와는 직접비교가 힘들다. 또한 오대산지진인 경우, 기상청이 발표한 광역진도(macro seismic intensity) 최대값은 V 이나, 경재복 등⁽¹¹⁾이 진앙지 인근에서 정밀하게 평가한 진도의 최대값은 MMI=VI으로 큰 값을 나타내며, 이 값은 본 연구의 추정치인 6.47과 유사하다. 이 밖에 표 5의 ③, ④ 지진에 대한 진앙진도 평가 결과는 각각 VII, VII로 추정된 진도 6.37, 7.31와 유사하다.

반면 표 5의 ②지진(경주지진)인 경우는 추정치가 발표된 진도 보다 1 정도 낮게 평가되었다. 또한 지진 ②는 규모에 비해 진앙지에서의 최대 진도가 다소 높게 평가되었으며, 규모가 작기 때문에 국부적인 지형, 지질, 지반효과에 의해 진도가 국부적으로 높게 평가되었을 가능성이 높아 진도의 공간적인 분포에 대해 보다 자세히 검토해 보았다. 그림 12는 경재복과 이희욱⁽¹²⁾이 제시한 진도 VII의 피해 지역으로 그림에서는 음영부분과 같이 양산단층을 따라 집중된 것으로 알려져 있다. 한편 지진원 증가에 사용된 미소지진기록의 관측 지점은 그림 12의 관측소 'WSC'로서 진도피해 지역에서 다소 벗어나 있다. 따라서 WSC 관측자료를 이용한 진도추정 결과는 표 5의 ② 지진에 대해 평가된 최대 진앙진도 VII 보다는 이 지진의 인근 지역에 대한 광역진도 크기인 VI과의 비교가 적절하다고 판단되며, 이 경우 발표된 진도 VI와 FAS에 의한 진도추정결과인 5.95는 매우 근접한다.

한편 표 5에 제시된 지진 이외에 국내에서 발생한 피해 지진으로는 홍성지진(1978.10.7)이 있는데 관측자료의 부재로 인해 지진규모 평가의 불확실성이 다소 커 본 검토에서는 제외시켰다. 그러나 기존 연구⁽²⁰⁾에 따르면 홍성지진의 규모가 오대산 지진과 유사한 규모 4.74이고 발생심도가 천부(< 5km)로 가정하여 본 연구의 FAS 진도추정 방법을 적용할 경우 서정희⁽²¹⁾에 의한 진앙지에서의 최소 진도추정값 VII에 근접할 수 있음을 보여 주었다.



〈그림 12〉 경재복과 이희욱⁽¹²⁾의 경주지진(표 5, ②)에 대한 진도평가 결과. 음영 지역 : 경주지진 발생시 지진피해가 집중된 지역 (MMI=VII). 그 밖의 지역 : MMI=VI.
WSC 관측소 : 경주지진의 FAS 진도를 추정시 사용

그림 11에서와 같이 대상지진에 대한 스펙트럼이 MM 진도 VI, VII에 해당되는 스펙트럼 형상과 많은 차이가 있음에도 불구하고 표 5와 같이 진도 추정 오차가 작은 이유는 계측 진도평가에 큰 영향을 주는 분산이 작은 주파수 대역 (~5 Hz, 그림 1 참조)에서 대상지진의 스펙트럼이 MMI 진도 VI, VII에 대한 스펙트럼 크기와 유사하기 때문이다.

이상에서 진도 V 이상의 전 세계적인 진도별 FAS 통계 특성 모델을 이용하여 진도 VI 이상의 국내 지진에 대해 진도를 추정한 결과 최대 0.63 이내의 오차에서 발표된 진도와 잘 부합하는 것으로 나타났다. 따라서 국내에서 발생 가능성이 높은 중규모 지진의 진도 평가에 FAS를 기반으로 한 본 연구의 진도 추정 방법의 확대 적용이 가능할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 지진관측자료의 가속도 푸리에스펙트럼 (FAS) 수준을 이용하여 확률론적으로 최적 진도를 추정하는 방법을 개발하고 국내 적용성을 평가하였다. 이를 위해 관련 논문⁽³⁾에서 제시된 국내 지진의 진도별 지진파 FAS 평균과 표준편차를 이용하고 전산프로그램으로 구현된 Sokolov and Wald⁽²⁾의 FAS 진도 추정방법을 이용하여 국내 지진에 대한 FAS 진도 추정방법의 오차를 분석한 결과 표준편차 (σ)=0.74로 평가되었으며, 지진의 규모, 거리에 대한 의존성을 추가로 보정할 경우 관측 진도값을 $\sigma=0.60$ 오차 범위

내에서 추정할 수 있었다.

본 연구의 FAS 진도 추정방법을 진도 V 이상에 대해 확장 적용이 가능한 지를 평가하기 위하여 진도 VI 이하는 국내 FAS 통계특성 모델을, 진도 V 이상은 전 세계 모델을 그대로 이용하여 진도 VI 이상의 국내 피해지진의 진도를 반경험적으로 추정된 스펙트럼을 기반으로 평가한 결과 최대 0.63 이하의 오차범위에서 비교적 정확하게 추정할 수 있었다.

본 연구에서는 진도를 대표할 수 있는 부지특성이 전국적으로 동일한 D 등급 관측소(연관희와 서정희⁴⁾)라는 가정 하에 진도를 평가하였으나, 지역별로 진도를 대표하는 지반 특성이 차이가 발생할 수 있으므로, 향후 진도평가의 신뢰도를 향상시키기 위해서는 추가적인 지역별 진도보정에 대한 검토가 필요하며, 진도 V 이상에 대한 전 세계적인 FAS 통계특성 모델의 국내 적용성에 대해서는 국내 강진 관측 자료를 기반으로 한 보다 엄밀한 검증이 필요하다.

향후 본 연구의 결과는 국내 지진의 합리적인 계측진도도 평가와 신속 지진피해평가 그리고 역사지진의 진도를 정량적으로 역해석하는 데에도 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 한국수력원자력(주)의 연구지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- 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.
- 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.
- 연관희, 박동희, 박세문, "국내 지진의 진도별 가속도 푸리에 스펙트럼 통계모델," 한국지진공학회 논문집, 제 13권, 6호, 11-25, 2009.
- 연관희, 서정희, "지진동모델 파라미터 동시역산을 이용한 지진관측소 분류," 한국지구물리·물리탐사학회지, 제 10권, 3호, 183-190, 2007.
- 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.
- 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.
- 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.
- 연관희, Walter Silva, 박동희, 장천중, "수정된 Levenberg-Marquardt 역산방법에 의한 한반도 남부의 추계학적 지진 요소 평가," 한국지진공학회 춘계학술발표회, 한국지진공학회, 제 6권, 1호, 20-28, 2002.
- 박종찬, "오대산 지진의 발생현황 및 진도분석," 삼성방재연구소 위험관리지, 봄호, 2007.
- 연관희, 박동희, 박세문, "1936년 지리산지진 및 1978년 홍성 지진의 규모 재평가," 추계지질과학 연합 학술발표회, 대한지질학회, 106, 2008.
- 경재복, 허서윤, 도지영, 조덕래, "2007년 1월 20일 오대산 지진(MI=4.8)의 진도, 단층면해 및 단층과의 관계," 한국지구과학회지, 제 28권, 2호, 202-213, 2008.
- 경재복, 이희욱, "1997년 6월 26일 경주지진의 진도분석 및 지진 지질학적 의미," 지질공학회지, 제 8권, 1호, 13-24, 1998.
- 조봉곤, 김성균, 김우한, 김준경, 박창업, "1996년 12월 13일 영월지진의 진도평가와 한반도 지진에너지감쇠 특성," 한국지진공학회 춘계 학술발표회, 한국지진공학회, 제 1권, 1호, 21-27, 1997.
- 경재복, 이기화, 한세섭, "20C 한반도 지진활동 특성과 영월 지진(1996년 12월 13일)의 피해 및 진도 분석," 한국지진공학회 춘계 학술발표회, 한국지진공학회, 제 1권, 1호, 77-87, 1997.
- 엄상호, 한반도의 지진위험도, 한국동력자원연구소, 대전, 295, 1983.
- Brune, J.N., "Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 75, 4997-5009, 1970.
- Brune, J. N., "Correction," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 76, 5002, 1971.
- 연관희, 박동희, 장천중, "한반도 인근 지진의 Brune 응력강화량(파라미터) 추정에 대한 고찰," 한국지진공학회 학술발표회, 한국지진공학회, 제 10권, 70-77, 2006.
- 연관희, 박동희, "오대산지진(M=4.8, '07. 1. 20)의 점진진원 스펙트럼 모델 특성," 한국지구물리·물리탐사학회지, 제 10권, 4호, 241-251, 2007.
- 연관희, 박동희, 박세문, "홍성시내 임시 지진관측 자료를 이용한 부지특성 평가," 한국지진공학회 학술발표회, 한국지진공학회, 제 13권, 47-54, 2009.
- 서정희, "홍성지진(1978.10.7) 조사보고," 대한광산학회지, 제 10권, 158-165, 1979.