

근거리 지진관측자료의 S파를 이용한 지진규모 평가 연구

A Study on Estimating Earthquake Magnitudes Based on the Observed S-Wave Seismograms at the Near-Source Region

연관희^{1)*} · 최신규²⁾ · 이강렬²⁾

Yun, Kwan-Hee^{1)*} · Choi, Shin-Kyu²⁾ · Lee, Kang-Ryel²⁾

¹⁾한전전력연구원 구조건설연구실 수석연구원, ²⁾한전전력연구원 구조건설연구실 선임연구원

¹⁾Chief Researcher, Structural & Construction Tech, Group, Korea Electric Power Corporation (KEPCO) Research Institute, ²⁾Senior Researcher, Structural & Construction Tech, Group, KEPCO Research Institute

/ A B S T R A C T /

There are growing concerns that the recently implemented Earthquake Early Warning service is overestimating the rapidly provided earthquake magnitudes (M). As a result, the predicted damages unnecessarily activate earthquake protection systems for critical facilities and lifeline infrastructures that are far away. This study is conducted to improve the estimation accuracy of M by incorporating the observed S-wave seismograms in the near source region after removing the site effects of the seismograms in real time by filtering in the time domain. The ensemble of horizontal S-wave spectra from at least five seismograms without site effects is calculated and normalized to a hypocentric target distance (21.54 km) by using the distance attenuation model of $Q(f)=348f^{0.52}$ and a cross-over distance of 50 km. The natural logarithmic mean of the S-wave ensemble spectra is then fitted to Brune's source spectrum to obtain the best estimates for M and stress drop (SD) with the fitting weight of $1/\text{standard deviation}$. The proposed methodology was tested on the 18 recent inland earthquakes in South Korea, and the condition of at least five records for the near-source region is sufficiently fulfilled at an epicentral distance of 30 km. The natural logarithmic standard deviation of the observed S-wave spectra of the ensemble was calculated to be 0.53 using records near the source for 1~10 Hz, compared to 0.42 using whole records. The result shows that the root-mean-square error of M and $\ln(SD)$ is approximately 0.17 and 0.6, respectively. This accuracy can provide a confidence interval of 0.4~2.3 of Peak Ground Acceleration values in the distant range.

Key words: Earthquake early warning, Near-Source region, S-Wave spectra, Earthquake magnitude, Stress drop

1. 서론

지진규모는 지진발생후 지진관측자료를 기반으로 분석되는 지진피해 평가의 기본 입력자료이다. 지진피해평가는 지진통보를 기반으로 한 사전 예측과 사후평가가 있다. 사전예측의 원리는 국내에서 관측된 지진관측자료 및 관련된 지진학 이론을 기반으로 하여 개발된 지진규모-(진원, 진앙) 거리 관계식을 이용하고 통보된 지진발생정보를 기반으로 기반암 수준에 대한 지진동 크기를 지진파 도착전에 추정하고, 해당 부지의 지진파 지반증폭특성을 반영해 지진동의 크기를 정밀하게 분석한후, 지진동의 여러 파라미터(최대지반가속도, 스펙트럴가속도, 구간누적값, 계측진도, 스펙트럴

진도 등) 크기와 시설물의 피해 상관성을 활용하여 주요 시설물의 피해현황을 확률론적으로 예측하는 방법이다.

현재 국내의 지진규모는 기상청이 공식적으로 통보하고 있으며, 지진조기경보, 신속분석, 정밀분석 등의 절차를 통해 일반인들에게 휴대폰 문자서비스를 포함한 각종 미디어 매체 정보서비스를 제공하거나, 주요 시설물을 운영하는 기관인 정부 및 공공기관의 재난관리책임기관인 경우에는 온라인을 통해 해당 기관의 서버로 지진정보서비스를 실시간으로 제공하고 있다. 지진조기경보·신속분석(이하 '지진최초분석')을 통해서도 국내에서 발생한 규모 3.5 이상의 지진에 대해, 인근 지역 혹은 전국을 대상으로 문자 및 관련 정보를 제공하고 있으며, 이때 포함되는 지진의 정보는 지진규모, 발생시간, 진앙위치 등이다. 기상청은 지진최초분석 정보의 제공시간을 인근 지진계 최초 감지후 5~10초까지 단축하고자, 국내의 전국적인 지진관측망을 2024년까지 366개 까지 확충하고자(관측망 밀도 7 km) 노력하고 있으며[1], 최근 발생한 중규모 지진에 대해서도 성공적으로 대국민 서비스

*Corresponding author: Yun, Kwan-Hee

E-mail: geoyun0@kepcoco.kr

(Received December 21, 2023; Revised January 22, 2024; Accepted January 23, 2024)

를 시행한 바 있다. 현재 기상청은 지진최초분석을 위해 진앙지 인근에서 3 개 이상의 지진계에 감지되는 지진의 P파를 활용하고 있으며, 최초 지진계 탐지후 5~10초 이내에 지진통보를 목표로 하고 있다.

본 연구는 주요 시설물 운영 기관의 지진피해예측 정확도를 향상시키고자, 기상청이 제공하는 지진최초분석 정보 중 하나인 지진규모의 정확도를 개선하고자 수행하였으며, 이를 위해 진앙지 인근의 지진파 중 기상청이 지진최초분석에 활용하고 있는 지진의 P파 이외에 S파를 이용하여 지진규모의 정확도 향상 가능성 검토 및 지진피해추정의 신뢰도 평가를 위한 관련 분석을 수행하였다. 지진규모 이외의 지진최초분석 정보로는 진앙지 좌표 및 지진발생시각 등이 있는데, 본 연구에서는 이러한 정보의 정확도는 공학적인 측면에서 기상청의 최종 정밀분석 정보와 충분히 일치한다고 판단하여, 관련 기상청 정밀분석 정보를 대신 이용하였다. 또한 이하의 분석에서 지진최초분석시 제공되지 않는 지진의 깊이는 일반적인 값인 10 km(참고로 기상청은 지진조기경보시 8 km 깊이 사용)로 고정하여 사용하였다.

2. 본 론

2.1 분석 대상 지진 및 기상청 지진최초분석 현황

Table 1은 본 연구에서 사용한 18개 지진의 목록과 관련 정보이다[2]. Table 1에는 기상청이 제공한 지진최초분석의 규모(M_{EEW})와 최종 지진(국지)규모(M_L), 그리고 별도 분석을 통해 제시된 모멘트 지진파형 역산결과(M_w)와 관련 출처를 포함하고 있다. Table 1의 18개 지진은, 2023년도에 국내에서 발생한 지진중 내륙에서 발생하여 근거리 지진관측자료가 상대적으로 많은 지진과, 지진조기경보 서비스가 성공적으로 시행된 2021년 이후의 주요 지진을 포함하고 있다.

Table 1에서 알 수 있는 바와 같이, 지진조기경보가 발령된 5개의 주요 지진(SN 2, 5, 16, 17, 18)에 대한 최초 지진규모(M_{EEW})는 최종적인 국지 규모(M_L)와 평균 +0.36의 오차를 나타내며, 모멘트 지진파형 역산 규모(M_w)와는 +0.54의 오차를 나타내고 있다. 이로부터 대부분 지진의 경우에는 최초 지진규모가 최종 지진규모(모멘트 지진파형 역산 규모 혹은 국지규모)를 과대평가하고 있음을 알 수 있다. 이 문제의 가능한 원인으로는 진앙지 인근 지역의 P파만을 이용하여 지진조기경보나 신속분석이 발령되어야 하나, 인근 지진파의 경우 P파와 S파의 간격이 짧아 P파 시간원도우 내에 에너지가 큰 S파가 포함되어, 지진조기경보 지진규모를 과대 평가하였을 것으로 추정된다. 지진조기경보의 규모가 최종적인 지진규모보다 클 경우에는, 이를 기반으로 예측되는 원거리의 지진파 크기는 과대 평가될 수 있다.

일반적으로 지진파형의 최대값은 지진원의 모서리 주파수 이상에서의 지진파(가속도)고주파 스펙트럼에 비례하며, 지진파 고주파 스펙트럼(a_{hr})과 지진모멘트(M₀ in dyne · cm), (모멘트)지진규모(M_w) 그리고 응력강하량(Δσ in bars)의 관계식은 식 (1), (2)와 같다. 식 (1), (2)로부터, 지진파의 고주파 스펙트럼의 로그값 변화(dlog₁₀(a_{hr}))는 지진규모의 변화와 직접적인 영향이 있음을 알 수 있으며, 식 (1)로부터 지진규모가 동일하다면, 응력강하량은 지진파의 고주파 스펙트럼에 거의 비례하는 영향을 끼칠 수 있다. 따라서 지진규모와 함께 지진의 응력강하량을 신속히 추정할 수 있다면, 원거리에서의 지진파 크기 정확도 및 이에 따른 지진피해추정의 정확도를 향상시킬 수 있다.

$$a_{hr} \propto \Delta\sigma^{2/3} \cdot M_0^{1/3} \quad [4] \tag{1}$$

$$M_w = 2/3 \cdot \log_{10}(M_0) - 10.7 \quad [5] \tag{2}$$

Table 1. Inland earthquake catalog in the South Korea for the analysis and related additional information

SN	Year	Mon.	Day	Hour	Min.	Sec	M _L	Depth (km)	M _{EEW}	M _w	Reference	administrative district of the location
1	2023	12	8	6	31	18	2.5	3	-	-	-	4.6 km S of Dogye-eup, Samcheok-si, Gangwon
2	2023	11	30	4	55	24	4.0	12	4.3	3.60	NECIS	1.2 km SSE of Yangbuk-myeon, Gyeongju-si, Gyeongbuk
3	2023	10	25	21	46	30	3.4	12	-	3.17	NECIS	3.2 km NE of Tancheon-myeon, Gongju-si, Chungnam
4	2023	9	16	4	28	25	2.2	7	-	-	-	4.0 km SSW of Guseong-myeon, Gimcheon-si, Gyeongbuk
5	2023	7	29	19	7	59	3.5	6	4.1	3.48	NECIS	5.7 km SW of Dongyang-myeon, Jinan-gun, Jeonbuk
6	2023	7	17	10	37	10	2.4	13	-	-	-	3.4 km SW of Buk-myeon, Uichang-gu, Changwon-si, Gyeongnam
7	2023	6	5	12	42	18	2.1	5	-	-	-	2.8 km S of Dongseohakng, Wansan-gu, Jeonju-si, Jeonbuk
8	2023	5	10	16	32	10	2.5	16	-	-	-	1.2 km SSW of Songjeong-dong, Donghae-si, Gangwon
9	2023	5	10	1	53	36	2.5	15	-	-	-	1.6 km SE of Songjeong-dong, Donghae-si, Gangwon
10	2023	5	8	19	51	34	2.5	17	-	-	-	1.1 km SSE of Songjeong-dong, Donghae-si, Gangwon
11	2023	4	30	19	3	29	3.1	6	-	3.26	Cho[3]	1.6 km SE of Cheongseong-myeon, Okcheon-gun, Chungbuk
12	2023	4	25	13	22	40	2.7	12	-	-	-	2.9 km S of Masung-myeon, Mungyeong-si, Gyeongbuk
13	2023	3	3	11	26	54	3.0	8	-	-	-	1.2 km NE of Sugok-myeon, Jinju-si, Gyeongnam
14	2023	2	19	7	29	52	2.5	8	-	-	-	3.2 km SW of Guyeok-myeon, Goheung-gun, Jeonnam
15	2023	2	11	8	22	1	2.3	13	-	-	-	1.6 km SE of Songnisan-myeon, Boeun-gun, Chungbuk
16	2023	1	9	1	28	15	3.7	19	4.0	3.50	NECIS	8.8 km N of Seodo-myeon, Ganghwa-gun, Incheon
17	2022	10	29	8	27	49	4.1	12	4.3	3.95	NECIS	11 km NE of Goesan-gun, Chungbuk
18	2021	12	14	17	19	14	4.9	17	5.3	4.77	NECIS	41 km SW of Seogwipo-si, Jeju

PGA(최대지반가속도)에 대한 M_w 와 응력강하량의 영향을 체계학적 지진동의 이론적인 모델[6]을 기반으로 분석한 선행 연구결과[7, 8]에 따르면, 지진규모 약 3.0 이상부터 응력강하량이 M_w 와 함께 PGA에 큰 영향을 주며, 규모 5.0 이상에서는 식 (3)처럼 근사시킬 수 있다.

$$\partial \log_{10}PGA / \partial M_w \approx 0.5, \quad \partial \log_{10}PGA / \partial \log_{10}\Delta\sigma \approx 1.0 \quad (3)$$

이러한 근사식(3)은 규모 5.0 이상에서 규모+1.0 및 $\log_{10}\Delta\sigma$ 의 +1.0($\Delta\sigma$ 는 10배 증가)에 따른 $\log_{10}PGA$ 의 개략적인 증가율 +0.5, +1.0로부터[7, 8] 각각 추정되었다. PGA를 M_w 와 $\log_{10}\Delta\sigma$ 의 함수로 보면, 이로부터 식 (4)를 최종적으로 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned} d\log_{10}(PGA) &= \partial \log_{10}PGA / \partial M_w \cdot dM_w \\ &+ \partial \log_{10}PGA / \partial \log_{10}\Delta\sigma \cdot d\log_{10}\Delta\sigma \\ &\approx 0.5 \cdot dM_w + 1.0/\ln(10) \cdot d\ln(\Delta\sigma) \quad (M_w > 5.0) \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)는 근거리 지진관측자료를 기반으로 본 연구에서 제시된 방법론을 적용하여 도출한 지진규모 및 응력강하량 추정 오차로부터, 원거리에서의 PGA 오차범위를 개략적으로 유추할 때 사용할 수 있다.

2.2 S파 스펙트럼 기반 지진규모 평가 방법론

본 연구에서는 여러 지진관측소에서 관측된 S파의 수평 스펙트럼을 특정 진원거리에서 추정되는 값으로 이론적으로 변환한 정규화된 스펙트럼의 평균과 표준편차에 대한 통계치를 계산한후, 지진규모와 응력강하량을 입력변수로 갖는 이론적인 지진원 스펙트럼과 정규화된 스펙트럼의 오차를 최소화하는, 최적 지진규모와 응력강하량을 추정하였다.

2.2.1 관측자료에 대한 S파 수평성분 거리 정규화 스펙트럼 계산

모든 관측자료에 대한 지진파의 S파 수평 정규화 스펙트럼 계산을 위해, 먼저 S파를 자동으로 선별하고 해당 수평성분 S파의 신호구간 주파수대역을 자동으로 추출(신호대 잡음비 2.5배 이상)한 후, 특정 진원거리(21.54 km)로 보정하였다. 이때 지진파의 부지보정은 실시간 부지보정필터[9]를 이용하여, 기반암에서 예상되는 지진파의 크기로 신속하게 보정하였다. 본 연구에 사용된 지진관측자료는 부지보정필터가 확보된 기상청 242개소, 지질자원연구원 36개소 및 한전 전력연구원 59개소의 초당 100샘플링 3 성분 가속도 지진관측자료를 활용하였다. 본 연구에서 사용된 관측소별 부지보정필터는 41개의 필터계수 및 선형 위상지연 특성을 갖는다.

지진파의 S파 시간구간은 진앙거리에 대해, 자동으로 계산되는 모델 [10]을 사용하였다. Yun(2007)[10]에 따르면, 진원거리에 따라 증가하는 평균 S파 속도(V_s)는 2.7~3.6 km/s이며, 시간차 길이는 진원거리 R에 대해 $[R/(V_s-1.0)-R/V_s]$ 로 계산된다. S파 시간차 구간에 대해서는 동서-남북 2개의 수평성분에 대한 푸리에스펙트럼을 벡터합성한후 $\sqrt{2}$ 로 나눈 스펙트럼을 계산하였는데, 스펙트럼 계산에는 시간차 길이에 관계없이 나이퀴스트 주파수인 50 Hz 이내에서 선형적으로 등간격을 갖는 1,024개의 주파수 계산점을 일괄적으로 이용하였다. 1,024개의 주파수 값에 대한 푸리에스

펙트럼에 대하여 0.01~5 Hz 구간에서는 12개의 로그 등간격 주파수 구간을 갖고, 5~50 Hz 구간에서는 28개의 선형 등간격 주파수 구간을 갖는 총 40개의 주파수 간격에 대해 스펙트럼의 평활화를 적용하였다. 이때 평활화된 푸리에스펙트럼은 40개 구간별로 구간내의 푸리에스펙트럼의 산술평균으로 계산되었다.

S파 시간차에 대한 푸리에스펙트럼을 계산한후, P파 도착 전 잠음 시간구간에 대하여 동일한 방법으로 계산한 수평성분 스펙트럼과의 비교를 통해 신호대 잡음비가 2.5이상인 주파수 구간을 선정하였다. S파의 신호 스펙트럼에 대해서는 거리감쇠 보정을 통해 특정 진원거리로 보정하였다. 지진파의 거리 감쇠특성에 대한 이론적인 보정을 위해 국내에서 제안된 여러 모델 중 $Q(f)=348f^{0.52}$ 의 비탄성 감쇠모델과 50 km의 교차거리(cross-over distance)를 기준으로 하여 근거리는 R^{-1} , 원거리는 $R^{-0.5}$ 의 기하학적 감쇠 모델[11]이 사용되었다.

진앙거리 20 km 이내에 인접한 지진관측자료의 경우에는, 고정된 가상의 지진원 깊이(10 km)에 대해 자동으로 설정되는 S파 시간구간에 영향을 줄 수 있는데, 실제 진원깊이와의 오차 영향을 최소화하기 위해 P파까지도 포함하는 충분한 시간구간을 설정(5초)하여 스펙트럼을 계산하였다. 이때 S파의 스펙트럼은 P파의 스펙트럼 크기보다 충분히 크기 때문에, P파의 S파 스펙트럼에 대한 영향은 미미하다는 가정을 합리적으로 할 수 있다.

2.2.2 최적 지진규모 및 응력강하량 추정

특정 거리로 정규화된 다수의 관측소별 (평활화된 수평성분)S파 스펙트럼에 대해 자연로그 평균과 표준편차를 계산한 후, 신호대 잡음비가 2.5 이상인 최소 주파수에서 최대 주파수 구간의 평균 S파 스펙트럼을 Brune의 단일 모서리 모델[12, 13]로 적합하여 최적 지진규모와 응력강하량을 추정하였다. 이때 최소 주파수는 지진규모와 응력강하량을 지진최소규모(M_i) 및 응력강하량(σ)=180 bars로 가정하고, Brune의 지진원 모델 단일 모서리 주파수(f_c)를 계산한 후 $\min(0.2 \cdot f_c, 1.58 \text{ Hz})$ 함수로부터 계산되었다. 최적해를 위해 탐색되는 지진규모(M)의 범위는 $(M_i-1.0) < M < (M_i+1.0)$ 및 응력강하량의 범위는 $10 \text{ bar} < \sigma < 1000 \text{ bar}$ 이며, 20개의 선형 등간격 규모 및 로그 등간격 응력강하량 값에 대해, 관측스펙트럼과 Brune의 지진원 스펙트럼간에 최소오차를 갖는 Brune의 단일 모서리 모델에 대한 지진규모와 응력강하량을 산정하였다. 이때 주파수별 오차 계산시에는 해당 주파수별 표준편차의 역수가 가중치로 사용되었다.

2.3 분석 결과 및 토의

본 연구의 목적은 지진파해평가의 신뢰도를 향상시키기 위해 기상청이 제공하는 지진조기경보 규모의 정확도 개선이다. 이를 위해서는 지진규모의 정확도 개선을 확인하기 위한 비교 기준인 지진규모의 참값을 먼저 추정해야 한다. 본 연구에서는 Table 1의 목록에 수록된 지진에 대한 지진규모의 참값으로서 모멘트 파형역산을 통해 얻어진 지진규모를 간주하였고, 지진규모가 작아($M \leq 3.0$) 모멘트 파형역산 지진규모가 없을 경우에는 해당 지진에 대한 전체 거리범위에서 관측된 지진자료를 기반으로 추정된 최적 지진규모를 참값으로 결정하였다. 참값은 Table 2에서 ' M_{true} '로 표기하였다. 전체 지진관측자료에 대한 최적 지진규모 추정은 본 연구에서 언급한 방법

Table 2. Best estimates of Brune's earthquake magnitudes (M_{tot} , $M_{R<50}$, $M_{R<30}$) and stress drops (SD_{tot} , $SD_{R<50}$, $SD_{R<30}$, in bars) fitted to the distance normalized S-wave spectra without site effects for the records of $R<\infty$, $R<50$ km and $R<30$ km, regarding the 18 inland earthquakes listed in Table 1 along with their error statistics over the earthquakes

SN	ID	Region	M_{true} (= M_w or M_{tot})	M_w	Total R range ($R<\infty$)			epicentral $R<50$ km			epicentral $R<30$ km			M_{true} $-M_w$	$M_{R<50}$ $-M_w$	$\ln(SD_{R<50}$ $/SD_{tot})$	$M_{R<30}$ $-M_{true}$	$\ln(SD_{R<30}$ $/SD_{tot})$	M_{Rnear} $-M_{true}$
					M_{tot}	# of data	$SD_{R<50}$	$M_{R<50}$	# of data	$SD_{R<30}$	$M_{R<30}$	# of data	$SD_{R<30}$						
1	20231208	Samcheok	2.80	-	2.8	10.0	276	2.6	10.0	20	2.7	10.0	9	-	0.000	-0.10	0.000	$M_{R<30}$	-0.10
2	20231130	Gyeongju	3.60	3.60	3.7	88.6	315	3.7	88.6	18	3.7	112.9	9	0.10	0.000	0.10	0.10	$M_{R<30}$	0.10
3	20231025	Gongju	3.17	3.17	3.3	113.0	317	3.2	233.6	23	3.3	297.6	6	0.13	0.727	0.13	0.13	$M_{R<30}$	0.13
4	20230916	Gimcheon	2.60	-	2.6	54.6	308	2.5	33.6	19	2.5	26.0	6	-	-0.486	-0.10	-	$M_{R<30}$	-0.10
5	20230729	Jinan	3.48	3.48	3.5	69.5	317	3.6	42.8	16	3.7	33.6	5	0.02	-0.485	0.22	0.22	$M_{R<30}$	0.22
6	20230717	Changwon	2.50	-	2.5	183.0	234	2.5	297.6	21	2.6	379.3	7	-	0.485	0.10	-	$M_{R<30}$	0.10
7	20230605	Jeonju	2.60	-	2.6	88.6	296	2.6	33.6	15	2.6	54.6	5	-	-0.970	0.00	-	$M_{R<30}$	0.00
8	20230510b	Donghae	2.60	-	2.6	77.4	247	2.6	60.0	12	2.5	77.4	5	-	-0.256	-0.10	-	$M_{R<30}$	-0.10
9	20230510	Donghae	2.70	-	2.7	27.8	282	2.5	60.0	12	-	-	4	-	0.767	-	-	$M_{R<50}$	-0.20
10	20230508	Donghae	2.70	-	2.7	54.6	261	2.6	69.5	12	2.6	69.5	4	-	0.241	-0.10	-	$M_{R<30}$	-0.10
11	20230430	Okcheon	3.26	3.26	3.4	88.6	310	3.2	88.6	22	3.3	54.6	7	0.14	0.000	0.04	0.04	$M_{R<30}$	0.04
12	20230425a	Mungyeong	2.80	-	2.8	113.0	302	2.7	233.6	13	2.8	183.3	7	-	0.727	0.00	-	$M_{R<30}$	0.00
13	20230303	Jinju	3.10	-	3.1	69.5	308	3.1	42.8	16	3.2	42.8	5	-	-0.485	0.10	-	$M_{R<30}$	0.10
14	20230219	Goheung	2.80	-	2.8	183.0	301	2.7	143.8	14	-	-	4	-	-0.243	-	-	$M_{R<50}$	-0.10
15	20230211	Boeun	2.60	-	2.6	113.0	294	2.5	234.0	20	2.4	1000.0	5	-	0.729	-0.20	-	$M_{R<30}$	-0.20
16	20230109	Ganghwa	3.50	3.50	3.5	54.6	315	3.4	143.8	9	-	-	-	0.00	0.968	-	-	$M_{R<50}$	-0.10
17	20221029	Goesan	3.95	3.95	3.8	88.6	317	3.8	129.2	18	3.7	215.4	6	-0.15	0.377	-0.25	-0.25	$M_{R<30}$	-0.25
18	20211214	Jeju	4.77	4.77	4.8	88.6	313	-	-	-	-	-	-	0.03	-	-	-	$M_{R<70}$	-0.47*
Mean													0.039	-0.056	0.123	-0.011	0.048	-0.201	-0.057
Standard Deviation													0.100	0.093	0.110	0.135	0.179	0.813	0.165
RMS (Root Mean Square) error													0.100	0.106	0.101	0.131	0.167	0.808	0.170

* Near source distance of $R<70$ km is applied to Jeju earthquake to meet the condition of at least 5 records (7 records for Jeju earthquake) with Brune's best estimate of $M=4.3$

론(2.2절 참조)을 적용하여 도출되었으며 그 결과가 Table 2에 나타나 있다 (M_{tot}). Table 2에는 M_{tot} 와 함께 해당 지진에 대한 응력강하량(SD, Stress Drop) 및 사용된 전체 지진관측자료의 최대 개수가 표시되어 있다(주파수 구간별로 사용된 지진자료의 개수가 다름). 전체 지진관측자료를 이용한 최적 지진규모(M_{tot})가 참값을 대표할 수 있는 지를 검토한 결과, 모멘트 파형 역산 지진규모(M_w)가 제시된 7개의 지진에 대한 오차($M_{tot}-M_w$)는 0.039 (± 0.100)로서 약간의 편향된 결과를 보이지만, 지진공학적인 측면에서는 RMS(Root Mean Square) 오차가 0.1로서, M_w 가 보고되지 않은 미소지진에 한해서는 Table 2에서처럼 전체 지진관측자료에 대한 최적 지진규모(M_{tot})가 참값으로서 의미가 있다고 판단할 수 있다(즉, $M_{true} \approx M_{tot}$). Fig. 1에는 본 연구의 방법론을 통해 추정된 지진별 최적 M_{tot} 와 응력강하량(SD) 계산에 사용된, 거리정규화된 지진파 수평성분 S파 스펙트럼의 평균값과 표준편차 범위가 나타나 있으며, 정규화된 스펙트럼의 자연로그 표준편차는 1~10 Hz의 주파수범위에 대해 0.42로 계산되었다.

기상청이 제공한 지진조기경보 규모의 정확도 개선을 위해서는, 기상청이 지진조기경보를 제공하는 시점(최초감지후 5~10초 + 수초)에서 지진관측망의 서버에 수신될 수 있는 근거리 지진관측자료를 활용해야 한다. 본 연구에서는 근거리의 기준을 진앙거리 30 km로 임의로 설정하였다. 30 km 진앙거리는 S파의 전달속도를 3.5 km/s로 가정할 경우, 국내 지진관측망에서 지진발생후 10초 이내에 S파의 주요 에너지를 포함하는 지진관측 파형을 중앙서버에서 충분히 수신할 수 있는 거리기준으로 판단된다. 본 연구에서는 30 km 이내의 근거리에 5개 이상의 지진관측자료가 없으면 근거리의 기준을 50 km로 상향하였으며, 해당 근거리 이내에 있는 지진파의 S파 스펙트럼을 이용하여 최적 지진규모($M_{R<30}$) 및 응력강하량($SD_{R<30}$)을 추정하였다(Table 2 참조). Table 2에서 $R<30$ km 인 지진관측자료의 평균 개수는 5.9개로 평가되었으며, 내륙이지만 해안가 근처에서 발생한 3개 지진(Table 2의 Donghae(SN 9), Goheung, Ganghwa)의 경우 관측자료의 개수가 5개 미만이었다. Table 2의 SN 18 Jeju(20211214)의 경우에는 5개 이상의 관측소가 있는 근거리의 기준을 예외적으로 70 km로 설정하였다. 본 연구에서 사용된 18개의 지진에 대한 근거리($R<30$ km 혹은 $R<50$ km, $R<70$ km) S파 스펙트럼의 자연로그 평균과 표준편차는, 전범위 진앙거리 지진관측자료에 대한 거리정규화된 S파 스펙트럼('total')과 함께 Fig. 1에 표시되어 있다. 근거리 S파 스펙트럼의 자연로그 표준편차 평균은 1~10 Hz 주파수범위에서 $R<30$ km, $R<50$ km 인 지진관측자료에 대해 0.53, 0.51로 계산되었다. Fig. 2에는 전범위 진앙거리 및 근거리 지진관측자료 기반의 거리정규화된 S파 스펙트럼에 적합한 Brune의 최적 지진원 모델(각각 Fig. 2의 'total est', ' $R<30$ km(or $R<50, 70$ km)')이 함께 표시되어 있다. Fig. 2에서 대부분의 ' $R<30$ km(or $R<50, 70$ km)' Brune 모델은, 전범위 진앙거리 지진관측자료에 대해 거리정규화된 S파 스펙트럼('total')의 오차범위 이내에 분포하고 Brune의 'total est' 모델과도 잘 일치함을 알 수 있다.

Table 2에는 $R<30$ km(혹은 $R<50$ km)인 경우에 대한 규모추정 오차가 표시되어 있다. 최종적인 근거리 지진파의 S파 스펙트럼 기반 지진규모(M_{Rnear})는 지진관측자료의 개수가 5개 이상인 기준거리에 대해 계산되었으며, 규모추정 오차($M_{Rnear}-M_{true}$)는 Table 2와 같이 RMS(Root Mean Square) 오차 0.17로 계산되었다. Table 2의 결과에서 특징적인 사항은, Table 1에서 18개 지진에 대한 실제 지진의 진원깊이는 3~19 km로 다양하

지만, 근거리 지진파형에 대해 진원깊이를 10 km로 가정후 거리정규화된 S파 스펙트럼을 활용했음에도 불구하고, Table 2에서처럼 규모추정 오차($M_{Rnear}-M_{true}$)가 RMS=0.17로 비교적 정확한 지진규모를 추정할 수 있다는 점이다. 이 점은 실질적인 현장 적용시 중요한 의미를 갖는데, 그 이유는 지진조기경보시에는 지진발생 위치 및 발생 시간만 제공하고 지진원의 깊이를 정보를 제공하지 않는데, 지진원의 깊이를 일반적인 지진의 값인 10 km로 임의로 가정하고 인근 지진관측자료만을 이용하더라도 정확한 지진규모를 산정할 수 있음을 의미한다. Table 2에서 Jeju(211214)의 경우, 지진규모 오차가 상대적으로 큰 값인 -0.47를 나타내고 있다. 제주(Jeju) 지진의 경우 오차가 큰 값을 나타내는 원인으로는, 제주도 지역에서의 감쇠특성이 한라산 하부의 마그마방 존재로 인한 지역별로 큰 차이를 나타내기 때문이거나 제주지역의 지진관측자료에 대한 부지보정시 사용된 부지보정필터의 부정확성에 기인할 것으로 판단된다. 또는 진앙지 인근 지역의 지각속도 및 감쇠구조 특이성이나 지진깊이에 따른 근거리 지진파 감쇠특성의 변화가 큰 지진규모 오차의 원인일 수도 있다. 참고적으로 부지보정되지 않은 70 km 이내의 인근 관측소 원자료를 이용한 최적 지진규모(M_{Rnear})는 4.7로서 참값인 $M_w=4.77$ 에 근접하였다.

근거리 지진파의 S파 스펙트럼을 이용할 경우, 이상에서와 같이 정확한 지진규모 추정이 가능해질 뿐만 아니라, 공학적으로도 의미있는 응력강하량을 추가로 계산할 수 있다. 응력강하량은 식 (1)과 관련해서 언급한 바와 같이 지진파의 최대값과 거의 비례하는 상관성을 갖고 있다. 전거리 범위의 지진관측자료에 대한 응력강하량(SD_{tot})을 참값으로 간주할 경우, $R<30$ km 및 $R<50$ km의 근거리 기준에 대해 추정된 응력강하량($SD_{R<30}$, $SD_{R<50}$)의 자연로그 RMS 오차는 각각 0.808, 0.559로 산정되었다(Table 2 참조). $SD_{R<30}$ 에 대한 자연로그 RMS 오차 0.808은, 비정상적으로 크게 계산된 미소지진인 보은지진(20230211, $M=2.6$)의 응력강하량을 제외시키면 0.581로 저감된다. 이상에서, 근거리 지진관측자료를 이용한 응력강하량 추정시 합리적인 최종 오차는 자연로그 RMS=0.6 이하로 평가된다. 한편 자연로그 RMS=0.6 오차가 가속도 지진파의 고주파 스펙트럼(a_{hi})에 미치는 영향은 식 (1)로부터 0.7~1.5배 추정된다.

근거리 지진관측자료를 기반으로 이상에서 추정된 규모추정 RMS 오차($M_{Rnear}-M_{true}$)=0.17과, 응력강하량 추정에 대한 자연로그 RMS 오차=0.6을 식 (4)의 aM_w , $d \ln(\Delta\sigma)$ 에 대입하면, $\log_{10}PGA$ 에 대한 RMS 오차는 대략 0.36으로 계산되며, 이러한 오차는 원거리에 대한 PGA 추정을 0.4~2.3배 이내의 표준편차 범위내에서 정확하게 추정할 수 있음을 의미한다.

기상청이 현재 목표로 하고 있는 지진조기경보 시간은 지진파 최초 감지 후 대략 5~10초 사이인데, 지진파 최초 감지 시간에 약 2초가 소요되고 S파 속도=3.5 km/s로 가정할 경우, S파 도달 거리는 약 24.5 km~42 km이다. 이 경우 기상청 지진조기경보 수신후 수초(예를 들어 2~3초) 지연하면 진앙거리 30 km 이내에서 실시간으로 수신되는 지진관측자료만을 대상으로 할 경우에는 해당 관측자료에 대한 S파까지도 활용이 가능할 것으로 예상된다. 이 경우 S파를 활용하는 본 연구의 방법론을 적용하면 기상청이 제공하는 지진조기경보의 지진정보를 기반으로 정확한 지진규모 뿐만 아니라 응력강하량도 추정함으로써, 원거리 주요 시설물에 대한 지진조기경보 지진정보의 신뢰성을 향상시킬 수 있으며, 이를 통해 원거리에 위치한 주요 시설물의 지진피해예측(진도 추정 등)의 정확도도 향상시킬 수 있다.

한편 실질적인 현장 적용을 위해서는 지진조기경보의 활용 용도에 따른

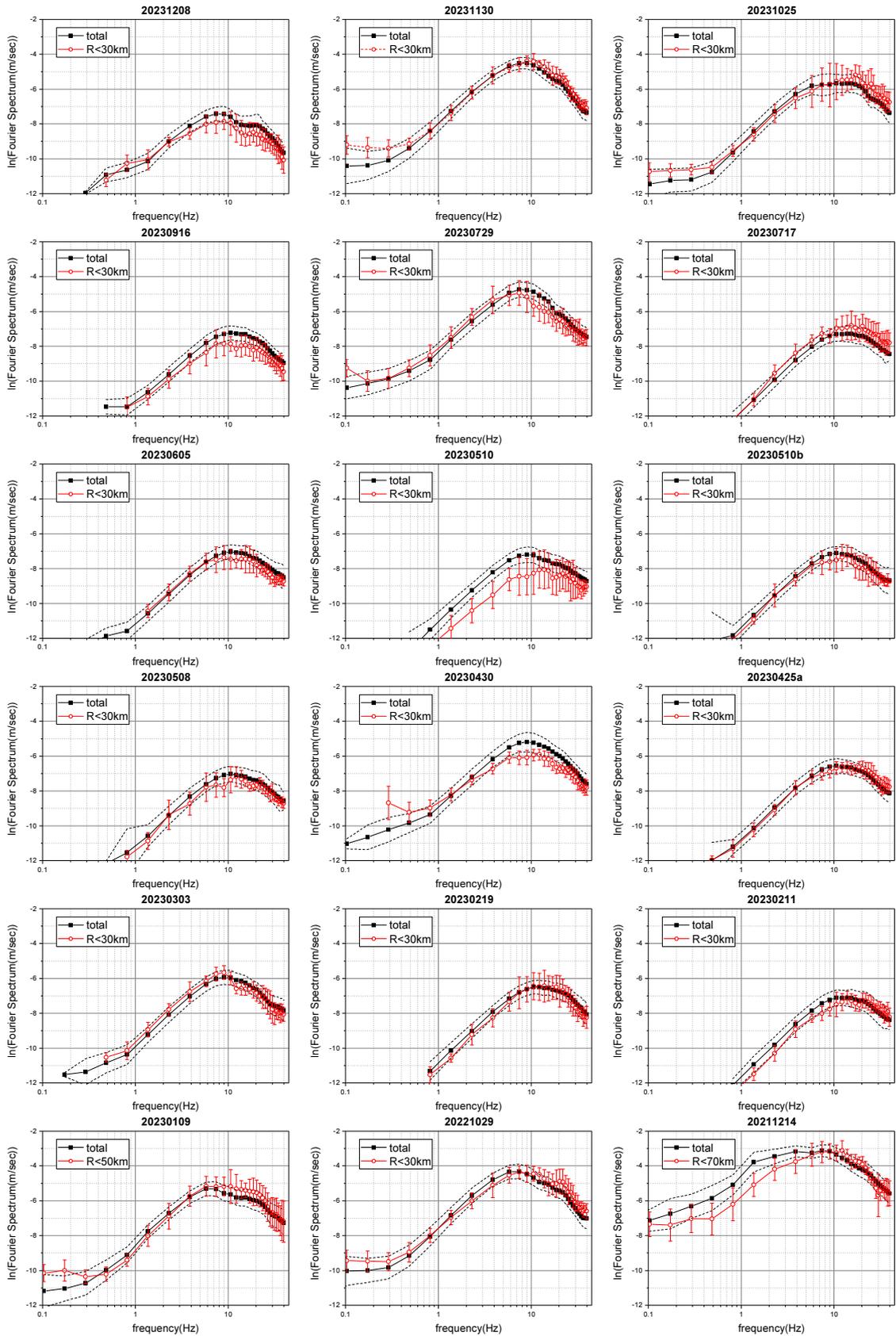


Fig. 1. Graphs of mean and standard deviation of the natural logarithmic horizontal apparent S-wave spectra normalized to a target hypocentral distance of 21.54 km without site effects, regarding the earthquake catalog in Table 1 and ID in Table 2. 'total' represents the distance normalized observed S-wave spectra without site effects for the seismograms of $R < \infty$. The error statistics of S-wave spectra calculated by using at least 5 records at the near source region are also displayed with the epicentral distance of $R < 30$ km. If the condition of at least 5 records is not met, near source distance criteria of 50 km or 70 km are applied instead

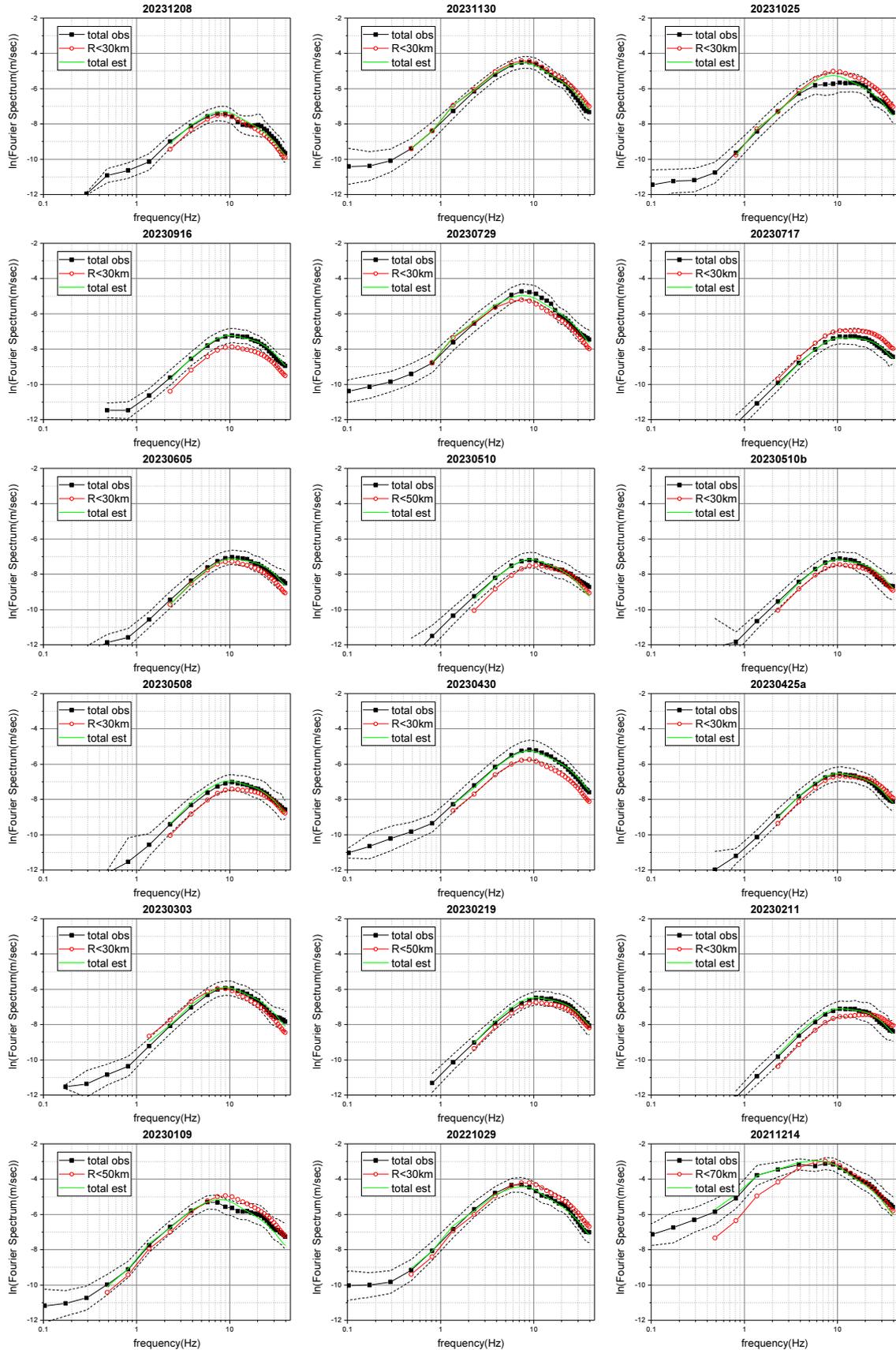


Fig. 2. Graphs of mean and standard deviation of the 'total obs' ('total' in Fig. 1). The mean standard deviation of 'total obs' for 18 inland earthquakes in Table 1 is 0.42 for 1–10 Hz, compared to 0.53 and 0.51 for those of R<30 km, R<50 km, respectively. Spectral estimates of the Brune's model fitted to the distance normalized S-wave spectra without site effects at the distance range of R< ∞ ('total est') and R<30 km (or R<50, 70 km) are also displayed

적정 통보시간 및 지진관측망의 통신·서버의 성능 및 용량에 따라 관련 파라미터를 최적화해야 할 것으로 판단된다. 또한 전체 관측자료를 활용하여 계산되는 지진규모(Table 2의 M_{tot})를 지진발생후 지진진도 추정에 활용하면, 지진진도 추정의 오차를 최소화하여 신속 지진대응을 효율적으로 수행할 수도 있다.

3. 결론

최근 기상청은 조밀한 지진관측망을 기반으로 지진 최초 탐지후 5~10 초 이내에 지진정보를 제공하는 지진조기경보 서비스를 시행하고 있다. 본 연구에서는 기상청이 신속하게 제공하는 지진조기경보 서비스의 내용 중, 최근 과대 평가(모멘트 지진규모 기준 평균 +0.54, Table 1 참조)되고 있는 지진규모의 정확도를 개선할 수 있는 방법에 관한 연구를 수행하였다. 지진조기경보 지진규모의 정확도를 개선하기 위한 방법으로는, 진앙지 인근의 근거리에서 관측되는 지진파의 수평성분 S파를 추가로 활용하였다. 이때 관측된 지진파형은 실시간으로 부지보정된 후 특정 진원거리(21.54 km)로 정규화되었으며, 근거리의 기준은 최소 5개의 지진관측자료를 포함하도록 설정하였다. 현재의 국내 지진관측망을 고려할 경우, 내륙지진 발생시에는 진앙거리 30 km 가 근거리 기준으로 적합하였다. 2021년 12월 이후 국내에서 발생한 18개 내륙지진을 대상으로, 근거리 기준 이내의 거리 정규화된 지진관측자료의 수평성분 S파 스펙트럼을 Brune의 단일 모서리주파수 모델[12, 13]에 적합하여 얻어진 최적 지진규모의 RMS 오차는 0.17로 평가되었다. 아울러 이때 추가적으로 추정되는 Brune의 응력강하량에 대한 자연로그 RMS 오차는 0.6 정도로 평가되었는데, 이상에서 얻어진 지진규모 추정 오차와 응력강하량 추정 오차를 함께 고려할 경우, 원거리에 대한 PGA 예측값의 오차는 상용로그 표준편차 0.36(0.4~2.3 배)으로 평가되었다.

본 연구결과는 기상청이 제공하는 지진조기경보의 지진규모를 최소 수 초의 지연을 통해 후속 예보 등에 활용함으로써 최초로 공시된 지진규모의 정확도를 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라, 규모 5.0 이상에서 PGA에 큰 영향을 주는 공학적으로 중요한 파라미터인 응력강하량을 추가로 추정할 수 있는 방법론과 기술적인 근거를 제공하여, 원거리에 위치한 주요 시설물이나, 신속한 지진피해평가를 필요로 하는 인근 시설물 및 설비에 대한 지진피해 예측정확도를 향상시키는 데 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

/ 감사의 글 /

본 논문은 한전 전력연구원의 『변전소 지진관측정보 자동 품질평가 기술개발(R22SA03)』 연구 일환으로 수행되었음.

/ REFERENCES /

1. Korea Meteorological Administration, Documentation for the second half of year 2023 Earthquake·Tsunami and Volcanic activity Council of Observation Agencies; c2023, 59 p. (in Korean).
2. NECIS (National Earthquake Comprehensive Information System) of Korea Meteorological Administration [Internet]. [cited 2024 Apr] Available from: <https://necis.kma.go.kr>.
3. Cho CS, Personal Communication; c2023.
4. Atkinson GM, Hanks TC, A high-frequency magnitude scale, Bull Seismol Soc Am, 1995 Jun;85(3):825-833.
5. Hanks TC, Kanamori H, A moment magnitude scale, J Geophys Res, 1979 May;84(B5):2348-2350.
6. Boore DM, Simulation of ground motion using the stochastic method, Pure Appl Geophys, 2003 Mar;160:635-676.
7. Lior I, Ziv A, The relation between ground motion, earthquake source parameters and attenuation: Implications for source parameter inversion and ground motion prediction equations, J Geophys Res, 2018 Jul;123(7):5886-5901.
8. Lior I, Ziv A, Generic source parameter determination and ground Motion prediction for earthquake early warning, Bull Seismol Soc Am, 2020 Jan;110(1):345-356.
9. Yun KH, Park DH, Method of estimating the Ground-Motion Intensity Measures at a nearby site by using the Time-domain Transformation of Site Response, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists, 2010 Aug;13(2):219-226 (in Korean).
10. Yun KH, Two-dimensional Q tomography inversion for the southern part of the Korean Peninsula, Ph. D. Dissertation, Seoul National University; c2007 (in Korean).
11. Yun KH, Silva W, Park DH, Chang CJ, Inversion of stochastic earthquake model parameters using the modified Levenberg-Marquardt's method in Korea, Proceedings of EESK Conference, 2002 Mar 1; Seoul; c2002, p. 20-27 (in Korean).
12. Brune JN, Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, J Geophys Res, 1970 Sep;75(26):4997-5009.
13. Brune JN, Correction, J Geophys Res, 1971 Jul;76(20):5002.