울진앞바다 지진('04. 5. 29, M=5.2)의 추계학적 지진동 평가

Stochastic ground-motion evaluation of the offshore Uljin Earthquake

연관희* 박동희* 최원학* 장천중*
Yun, Kwan-Hee Park, Dong-Hee Choi, Weon-Hack Chang, Chun-Jung

ABSTRACT

Stochastic ground-motion method is adopted to simulate horizontal PGA values for the offshore Uljin earthquake recorded at nationwide seismic stations. For this purpose, the Fourier spectra are calculated at every stations based on comprehensive results of wave propagation and site effect which were previously revealed through inversion process applied to large accumulated spectral D/B. In addition, the apparent source spectrum of the offshore Uljin earthquake is estimated by removing the path and site response from the observed spectra. The distance dependent time-duration model is revised by iteratively fitting the PGA values generated by using the raw spectra data to the observed PGA data. The stochastic ground-motion method predicts the observed PGA values within a error of σ_{log10}=0.1. Transfer functions of a site relative to another site are estimated based on the error residual of the inversion results and used to convert PGA values at multiple stations to expected PGA values at a reference station of TJN. The converted PGA values can be used as basic data to evaluate the ground-motion attenuation relations developed for seismic hazard analysis that concerns the large damaging earthquakes.

1. 서 론

전력연구원 울진 원전 부지내 자유장 지진관측소(UJA)로부터 80㎞ 떨어진 지점에서 2004년 5월 29일 발생한 울진앞바다 지진은 국지규모 5.2의 중규모 지진으로서 국내에서 1978년 지진관측 이래 최대 규모로 기록되었다. 울진앞바다 지진은 국내 고성능 국가 지진관측망이 본격적으로 구축된 1999년 이후 한반도 인근에서 발생한 지진으로 지진학적으로 매우 큰 의미를 갖는데, 먼저 강진 자료가 전무한 국내에서 강진의 특성을 간접적으로 추정할 수 있는 단서를 제공하였다. 또한 1999년 이후에 축적된 다량의 미소지진 관측자료를 통해 지진파 전달 및 관측소특성이 여러 측면에서 규명되어 지진원 스펙트럼에 대한 정밀한 추정이 가능한 시점에서 지진이 발생하였으며, 울진앞바다 지진의 진앙지 인근에 광범위한 규모의 지진군(본진, 전진, 여진)이 발생하여 미소지진과 중규모 지진의 지진원 특성을 비교할 수 있는 중요한 자료를 제공하였다.

본 연구의 목적은 지금까지 축적된 국내 지진관측자료(events=289, records=7,914)를 이용한 지진특성파라미터 역산결과를 기반으로, 울진앞바다 지진에 대한 각 관측소 PGA 값의 추계학적 지진동 평가에 있다. 추계학적 지진동 평가란 지진특성파라미터를 이용하여 추정된 관측소에서의 스펙트럼 값과 거리-지속시간 정보를 이용하여 Parseval의 이론과 RVT(Random Vibration Theory) 방법을 이용하여 시간영역에서의 여러 종류의 지진동(PGA, PSV, SA) 수준을 추정하는 방법이다([1]). 이 밖에 RVT 이론 대신 스펙트럼 매칭과 적절한 시간창을 이용한 반복적인 시간이력생성결과로 부터 지진동을 추정할 수도 있다. 그림 1은 본 연구에서 추계학적 지진동 값 추정을 위해

* 한국전력공사 전력연구원, 정회원

사용된 과정을 나타낸 모식도이다. 본 연구에서는 여러 종류의 지진동 중 수평성분 PGA 값에 대한 추계학적 지진동을 모사하여 관측된 PGA 값과 비교 검토하였다. 또한 그림 1의 절차에 따라 추계학적인 지진동 값을 추정하기 위해 Boore의 SMSIM 프로그램([2])의 스펙트럼 생성 부분을 수정하여 이용하였다.

또한 본 연구에서는 울진앞바다 지진 관측자료로부터 지진재해도의 입력자료인 지진동감쇠식에 대한 검증 및 보정에 필요한 지진동 D/B를 도출하였다. 이를 위해 관측소 간의 지진동특성 변환 방법을 도입하고, 이 방법을 적용하여 국내의 대표적인 기반암 관측소로 변환된 PGA 자료 및 이에 대한 적합식을 제시하였다.

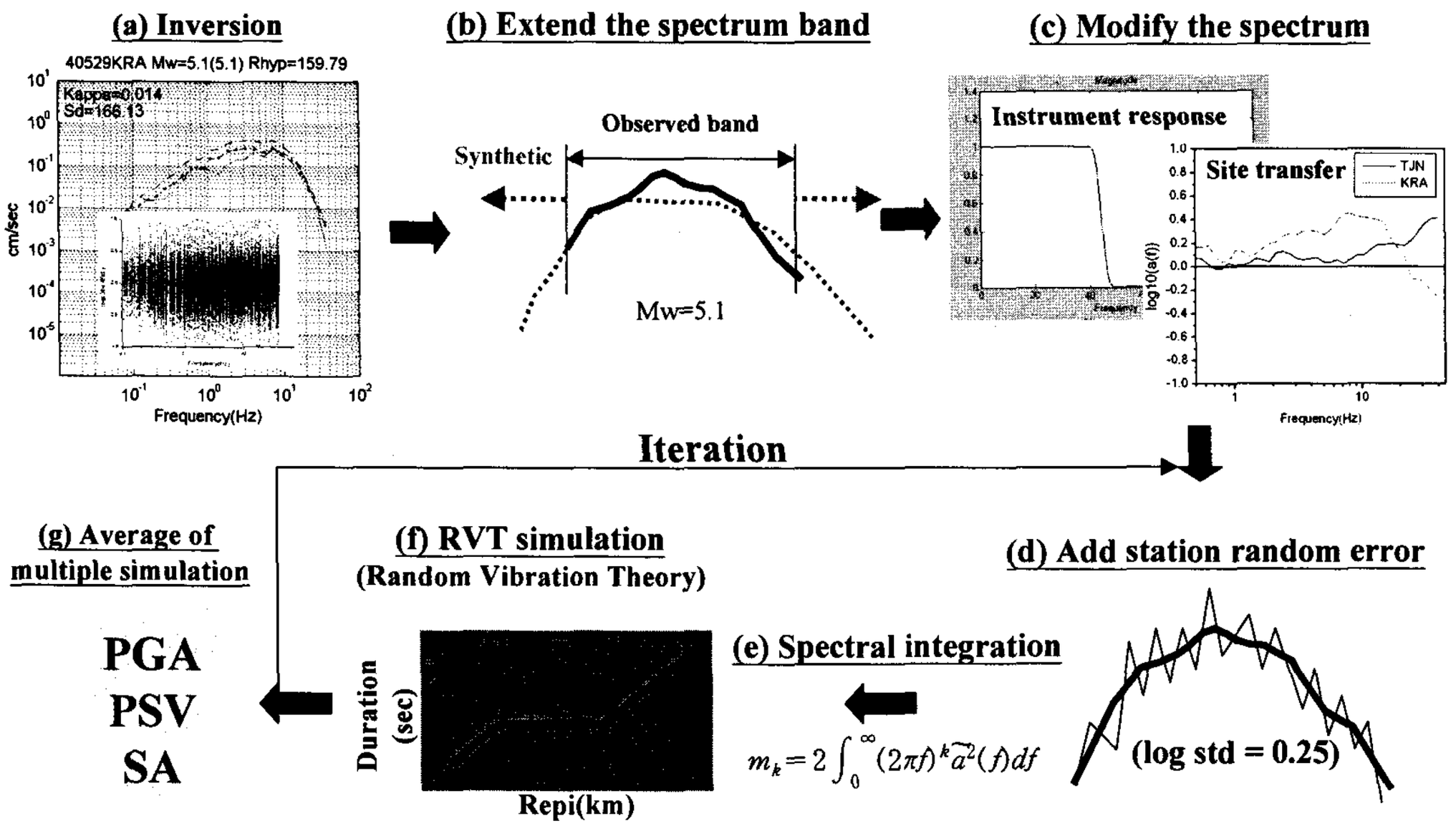

그림 1. 지진특성 파라미터 역산결과로부터 추계학적 지진동 값을 추정하는 절차 모식도

2. 추계학적 지진동 평가 방법

2.1 지진특성파라미터 역산

그림 1(a)의 역산과정은 지진관측자료의 수평 S파 스펙트럼 D/B로부터 지진원, 전달특성, 부지특성과 관련된 파라미터를 추정하는 과정으로 이전 연구결과([3,4])를 통해 기 수행된 바 있다. 역산에 사용된 지진원은 지진모멘트와 응력강하량(stress drop)으로 규정되는 단일코너주파수의 Brune의 ω^2 스펙트럼으로 표현되며, 부지특성은 관측소 직하(1~2km) 매질에 대한 주파수와 무관한 비탄성감쇠 특성을 의미하는 κ0로 나타내었다. 전달특성은 일반적으로 거리(R)에 따라 기울기(a)가 변하는 기하학적감쇠(R^{-a})와 Q 모델 ($=Q_0 f^{\eta}$) 등과 같이 매개변수를 갖는 함수의 조합으로 표현되나, 관측자료를 이용한 지진파 스펙트럼 감쇠의 비매개변수 추정(nonparametric method) 결과 매개변수 함수의 조합은 지진파감쇠현상을 근거리(<100km)나, 저주파수(<3Hz)에서 스펙트럼 감쇠를 적절하게 표현하지 못하는 것으로 확인되었다([5]). 따라서 본 연구의 역산 수행시에는 스펙트럼의 전달특성으로서 비매개변수 방법으로 계산된 거리-주파수별 스펙트럼 감쇠의 경험적인 값([5])을 그대로 이용하였다. 또한 복잡한 국내 지질학적 상황을 고려할 때 국내의 Q 값은 지역별로 차이를 나타낼 것으로 예상되며 이러한 Q의 공간적변화 특성을 반영하여 보다 정밀한 지진원 추정을 하기 위해 한반도 남부지역에 대하여 약 0.4° 격자크기로 2차원 Q0,η 토모그래피 분석을 수행하고 이 결과도 역산의 입력자료로 사용하였다.

한편 이상에서 언급된 지진특성 파라미터를 모두 이용하여 역산을 수행하더라도 관측소별로 통

계적으로 의미를 갖는 잔차분포(상용로그 표준편차≃0.25)가 나타나는데, 이는 천부(~<30m) 지하매질의 부지특성이거나, 계측기가 구조물 내에 존재할 경우의 지반-구조물 상호작용 효과 및 구조물의 기학학적인 크기에 따른 공간적 incoherency, 혹은 계측기 검교정 상태의 불량으로 인한 신호왜곡의 결과일 수 있다. 본 연구에서는 역산의 결과로서 얻어지는 잔차분포의 평균을 관측소 고유의 주파수응답특성으로 간주하여 역산의 입력자료로 재이용하고, 이러한 과정을 관측소별 평균잔차가 더 이상 변화하지 않을 때까지 반복적으로 수행하였다.

2.2 광대역 지진스펙트럼 추정 및 수정

그림 1(a)의 역산결과로부터 S/N비가 약 3이상인 가용 주파수 구간에 적합된 지진특성 파라미터를 도출할 수 있다. 이러한 역산결과를 이용하면 이론적인 계산을 통해 가용 주파수구간 이외의 주파수 구간도 포함하는 광대역스펙트럼을 추정할 수 있다(그림 1(b) 절차). 이때 광대역 전구간에서 이론적으로 계산된 스펙트럼을 이용하거나, 가용 주파수 구간에서는 관측자료의 스펙트럼을 사용하고, 이 이외의 구간에서는 이론치를 혼합하는 두가지 종류의 광대역스펙트럼 생성 방법을 생각할 수 있다.

또한 본 연구에서는 관측된 지진동 값과의 비교를 위하여 지진관측소 계측자료에 적용된 계측기 응답을 이론적으로 계산된 스펙트럼에 적용하였다. 그림 1(c)에서 고려되는 계측기 응답은 국내 모든 지진관측소에서 얻어지는 100 샘플링 자료에 적용되는 최소지연 FIR 필터(f96cm)의 주파수 응답특성으로 200/100 downsampling을 위해 40Hz 이상에서 급격한 신호차단 특성을 갖는다([6]).

한편 역산결과로부터 얻어진 관측소의 주파수응답특성을 나타내는 평균잔차특성이 얻어지면, 식 (1)을 이용하여 임의의 관측소 j의 스펙트럼(혹은 PGA)으로부터 관측소 j로의 스펙트럼(혹은 PGA) 변환이 가능해진다. 식 (1)의 $T_{ji}(f)$는 관측소 j에 대한 관측소 i의 전달함수(transfer function)의 의미를 갖는다. 본 연구에서는 국내 모든 관측소의 응답을 한국지질자원연구원에서 운영하는 TJN(대전) 관측소로 스펙트럼 변환을 수행하였다.

$$T_{ji}(f) = Res(f)_i / Res(f)_j \cdot \exp(-\pi \cdot (\kappa 0_i - \kappa 0_j) \cdot f) \quad (1)$$

(f = 주파수, $Res(f)_i$ = 관측소 i의 주파수별 평균잔차, $\kappa 0_i$ = 관측소 i의 $\kappa 0$)

그림 1의 (d) 와 같이 스펙트럼에 특정 표준편차의 정규분포를 갖는 무작위 잡음을 더하는 절차는 그림 1(a)의 역산과정에 사용된 스펙트럼이 주파수 구간별로 log-log 영역에서 평활화 되었기 때문에 실제 관측된 스펙트럼의 무작위성를 모사하기 위한 절차이다. 본 연구에서는 역산결과 얻어진 관측치와 계산치의 오차인 상용로그 표준편차 0.25가 사용되었다.

2.3 지속시간 모델을 이용한 추계학적 지진동 값 추정

RVT 방법을 이용하여 지진동 값을 추정할 때 중요한 요소는 그림 1(e), (f)와 같은 스펙트럼에 대한 적분과정과 적절한 지속시간 모델의 선정이다. 이 밖에도 스펙트럼 평활화로 인해 무작위성 잡음이 고려되는 주파수 point가 많지 않음으로, 무작위성을 고려한 지진동 평가시 통계적으로 의미 있는 값을 계산하기 위해서는 그림 1(d), (e), (f) 과정을 충분히 반복하고 이에 대한 평균값 취할 필요가 있다.

지속시간 모델은 일반적으로 식 (2)와 같이 지진원의 규모에 따라 변하는 코너주파수(f_c)에 반비례하는 항과 규모와는 무관하지만 진앙거리에 따라 변하는 항으로 구분될 수 있다. 식 (2)의 f_c는 지진모멘트와 응력강하량으로부터 도출될 수 있으며, D(r)은 PGA 관측치와 추계학적으로 얻어진 추정치가 진원거리별로 편향성을 나타내지 않

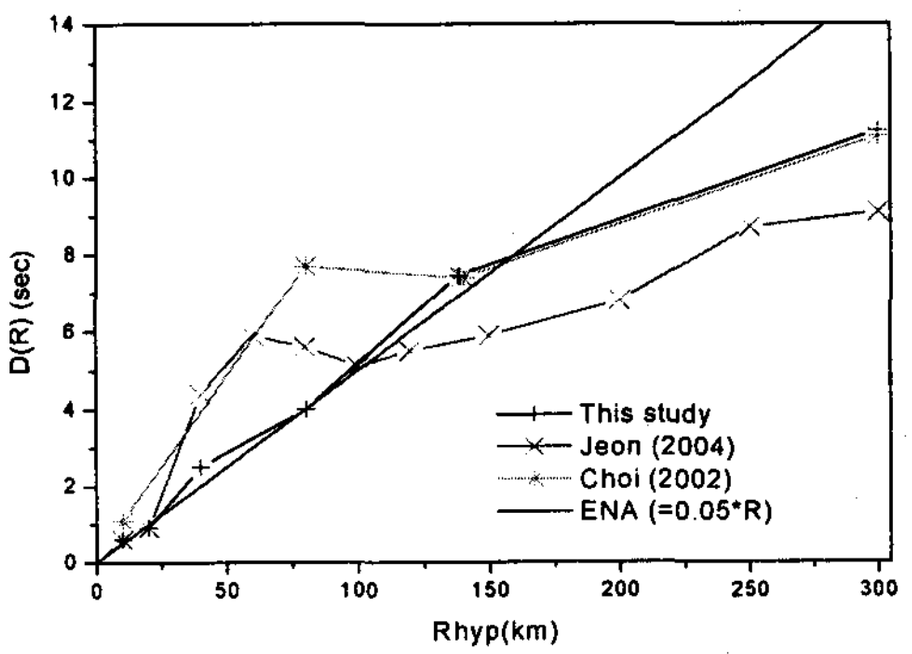

그림 2 기존 지속시간 모델(D(R))과의 비교

도록 (거리, 시간길이) 절점 set을 반복적으로 수정하여 도출되었다. 이때 기존 지속시간 연구결과([7,8])를 초기모델로 활용하였으며, PGA 관측자료로는 가용한 주파수 구간(그림 1(b))에 대한 적분값이 광대역주파수(0~280Hz)에 대한 적분값의 90% 이상이 되는 자료만 선택적으로 사용되었으며 사용된 자료수는 총 390개이다. 이와 같은 자료선택 기준을 설정한 이유는, 국내에서 계측되는 작은 규모(2.5<M<3.5)의 지진에 대해 S/N비가 양호한 PGA 관측자료 만을 이용하여 지속시간 모델을 보정하기 위해서이다. 또한 지속시간 모델 평가를 위한 추계학적 지진동 모사시 관측자료로부터 얻어진 평활화되지 않은 스펙트럼을 그림 1(b) 과정에 이용하였고 그림 1(d) 과정은 생략되었다.

$$T_d = 1/f_c \text{ (지진원 지속시간항)} + D(R) \qquad (2)$$

그림 2에는 기존 지속시간모델과의 비교 결과가 나타나 있는데, 그림에서 진원거리 140km 미만에서는 미국 중동부(Eastern North America) 지역의 지속시간 모델을 따르고 이 이상에서는 최([7])의 모델이 이용되었다. 그림 3은 그림 2의 지속시간 모델을 이용하여 추정된 PGA 값과 관측된 PGA 값의 비교 결과이다.

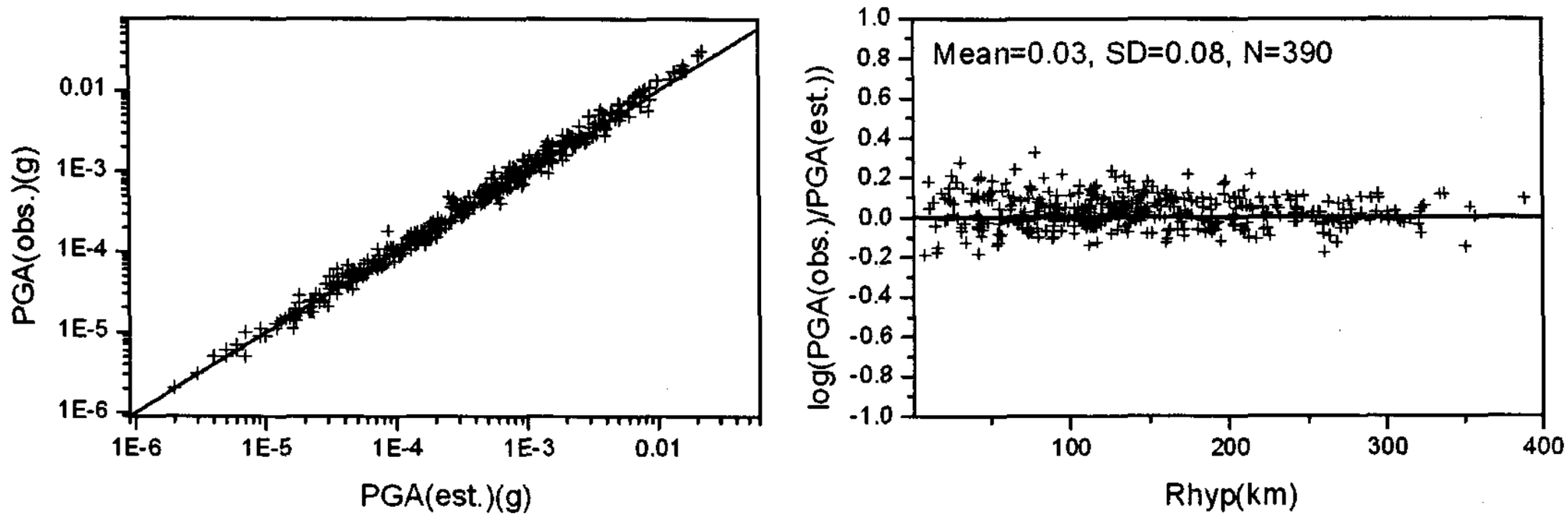

그림 3. 그림 2의 지속시간 모델과 평활화되지 않은 관측자료 스펙트럼을 이용하여 추정된 PGA 값과 PGA 관측값의 PGA 수준별 진원거리별 오차

3. 추계학적 지진동 평가 결과

3.1 울진앞바다 지진에 대한 추계학적 지진동 모사

추계학적 지진동 모사 결과의 타당성 평가를 위해 관측 PGA 자료와의 비교가 이루어졌으며, 비교를 위한 관측 PGA 값은 지속시간 모델 평가에 활용된 PGA 자료의 경우처럼, 가용한 주파수 구간에 대한 적분값이 광대역주파수에 대한 적분값의 90%이상이 되는 자료 만이 사용되었다. 한편 그림 1의 절차를 통해 추계학적 지진동을 모사할 경우 광대역 스펙트럼 추정시(그림 1(b)) 전 스펙트럼 구간에 대해 이론적으로 계산된 스펙트럼을 이용하거나 가용 주파수 구간에 대해서는 관측된 스펙트럼을 혼합하여 사용할 수 있다.

먼저 관측된 스펙트럼과 이론적인 스펙트럼을 혼합한 광대역스펙트럼을 이용하고(그림 4의 hybrid 경우), 식 (1)의 지속시간 모델과 그림 1의 절차로 추정된 PGA 값과 관측 PGA 값의 진원거리별, PGA 수준별, 지진파의 진행방향별 비교결과(=log('관측 PGA값'/'추정

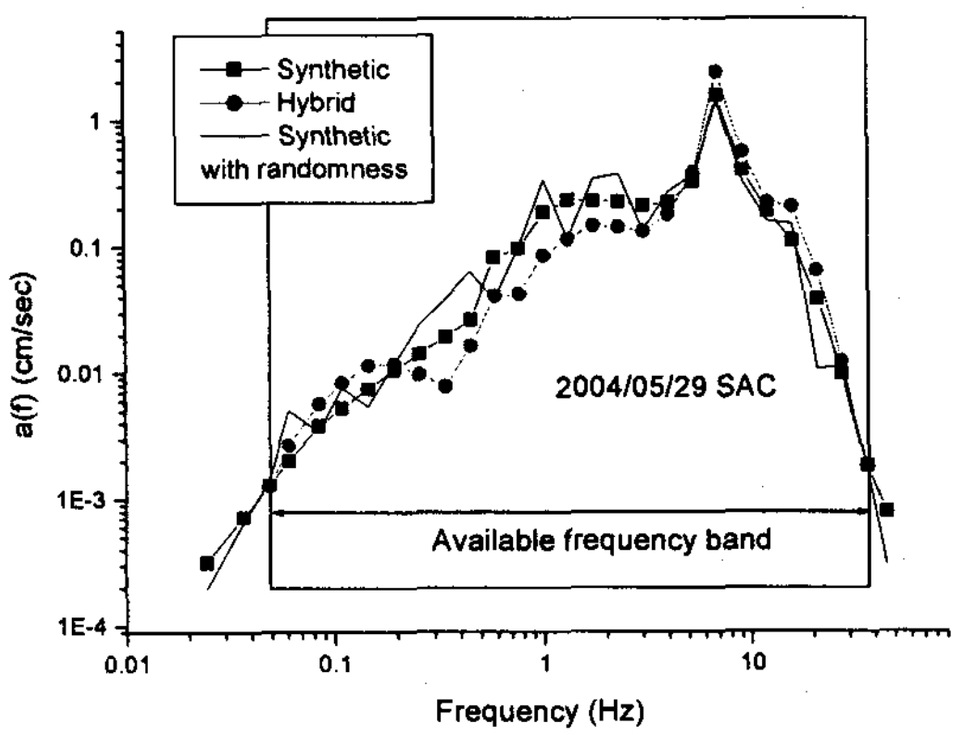

그림 4. 여러 방법을 이용한 광대역스펙트럼 생성(그림 1(b)) 예제 (SAC 관측소)

PGA'))가 그림 5, 6에 도시되어 있다. 비교 결과 진행방향, 진원거리, PGA 수준별로 편향성은 확인되지 않으나 그림 3의 전체자료를 이용한 경우보다 관측값이 추정값보다 약간 높게 평가됨을 알 수 있다.

다음으로는 스펙트럼의 전구간에 대해 이론적인 스펙트럼을 이용할 경우(그림 4의 synthetic 경우)의 추계학적 PGA 추정 결과를 살펴보고자 한다. 관측소의 이론적인 스펙트럼 계산을 위해서는 지진원 스펙트럼, 스펙트럼 거리-감쇠 특성, 관측소 주파수응답특성 등이 계산되어야 한다. 스펙트럼 거리-감쇠 특성 및 관측소 주파수응답특성은 기존 자료에 적용된 그림 1(a)의 역산 결과를 활용하였다.

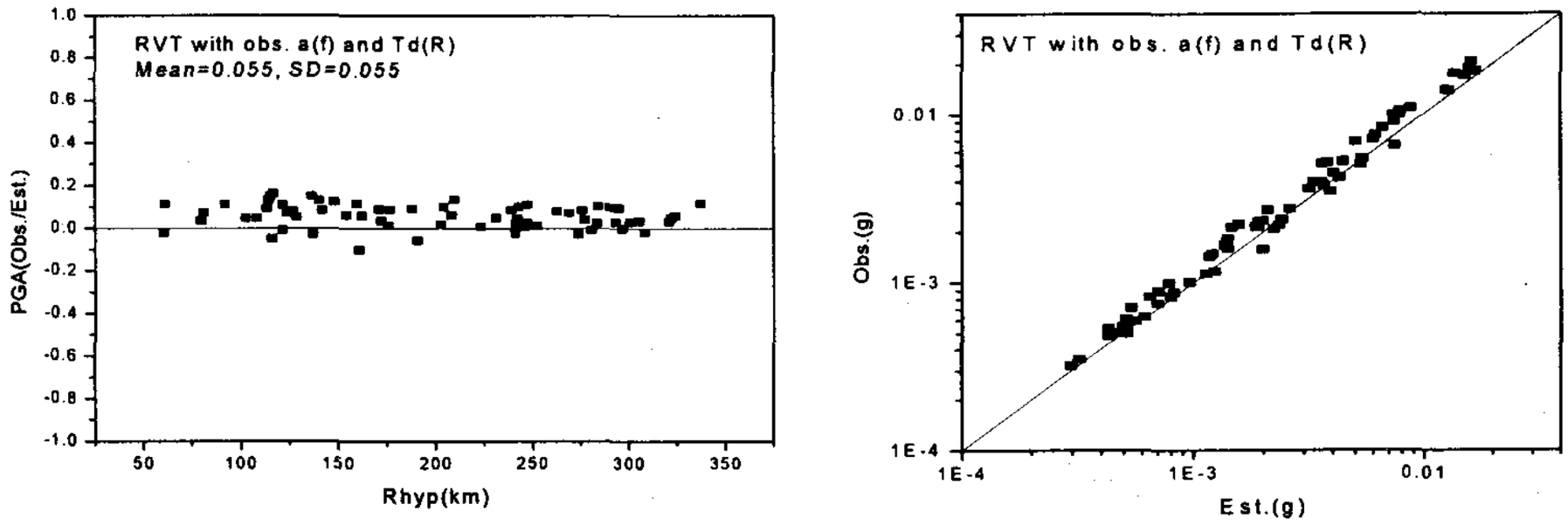

그림 5. 울진앞바다 지진에 대한 진원거리별(좌측), PGA 수준별(우측) 관측 PGA와 RVT 방법으로 추정된 PGA의 비. 그림 1(b)의 광대역스펙트럼으로 관측스펙트럼을 이용한 결과

지진원 스펙트럼은 가상의 진원거리 1km에 대해 추정되었으며, 비매개변수법으로 추정된 스펙트럼 거리-기하학적 감쇠특성과, 파선이 경유하는 지역에 따라 변하는 Q 값에 의한 비탄성 감쇠를 고려하고, 관측소별 κ0와 관측소 주파수응답특성을 의미하는 평균잔차를 보정하여 추정되었다. 한편 Brune의 단일주파수 ω^2 지진원 스펙트럼에 대한 적합결과는 Mw=5.1, Stress drop=166bar로 나타났다. 그림 7(a)는 모든 지진관측소의 관측스펙트럼을 1km로 보정한 결과로서 평균적으로 상용로그 표준편차 0.2 이내의 오차분포를 나타내었다. Brune의 지진원스펙트럼 적합결과와의 비교에서는, 1Hz 근방에서는 보정된 관측 지진원 스펙트럼이 낮게 평가되고 10Hz 근방에서는 관측 스펙트럼이 높게 평가되는 2-corner 지진원 스펙트럼 형상의 징후를 나타낸다. 미국 중동부 지역에 대해서도 2-corner 지진원스펙트럼 모델이 개발된 바 있으며([9]), Jeon은 국내 지진원 스펙트럼에 대한 2-corner 지진원스펙트럼을 미국 중동부 지역의 모델 계수를 수정하여 제시하였으며([8]), 그림 7(b)은 본 연구결과와의 비교 그림이다. 그림 7(b)의 비교 결과 Jeon의 결과와 3Hz 미만에서는 서로 잘 일치함을 알 수 있으나, 이 이상에서는 잘 일치하지 않고 있음을 알 수 있다. 근거리 강지진동 모사시 3Hz 이상의 고주파 스펙트럼 수준은 공학적으로 의미 있는 지진동 값과 밀접한 관계가 있음으로 향후 지진원의 고주파 수준에 대한 정확한 규명이 필요하다고 판단된다.

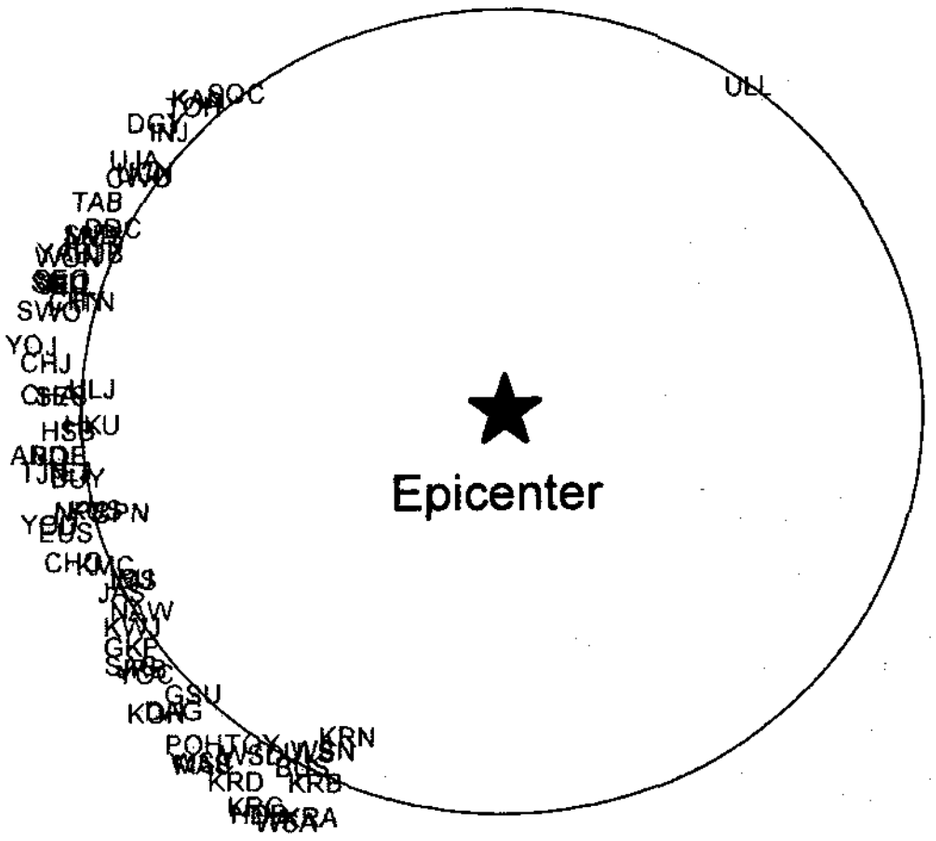

그림 6. 파의 진행방향별 관측값과 추정치의 비. 동심원은 관측값/추정치=1

그림 8은 이론적인 광대역스펙트럼을 이용하여 추정된 PGA 값과 관측 PGA 값의 진앙거리별, PGA 수준별 비교 그림이다. 특히 그림 8에는 그림 1의 (d),(e),(f) 절차의 반복을 1회 수행할 경우와 100회 수행할 경우의 추계학적 PGA 모사 결과가 제시되어 있는데, 반복회수 증가에 따라 표준

편차가 현저히 줄어듦을 확인할 수 있으며 100회 이상에서는 표준편차가 변하지 않았다. 추계학적 PGA 모사 결과 그림 5의 경우처럼 추정값이 약간 작게 평가되었으나, 상용로그 표준편차는 0.1 이내로 양호한 적합결과를 나타내었다. 이상과 같이 추정값이 작게 평가된 이유는 식 (1)의 지진원 지속시간항으로 Brune의 단일 f_c를 이용했기 때문으로 판단되며, 2-corner 모델의 f_B([9])를 사용하면 개선된 결과가 기대된다.

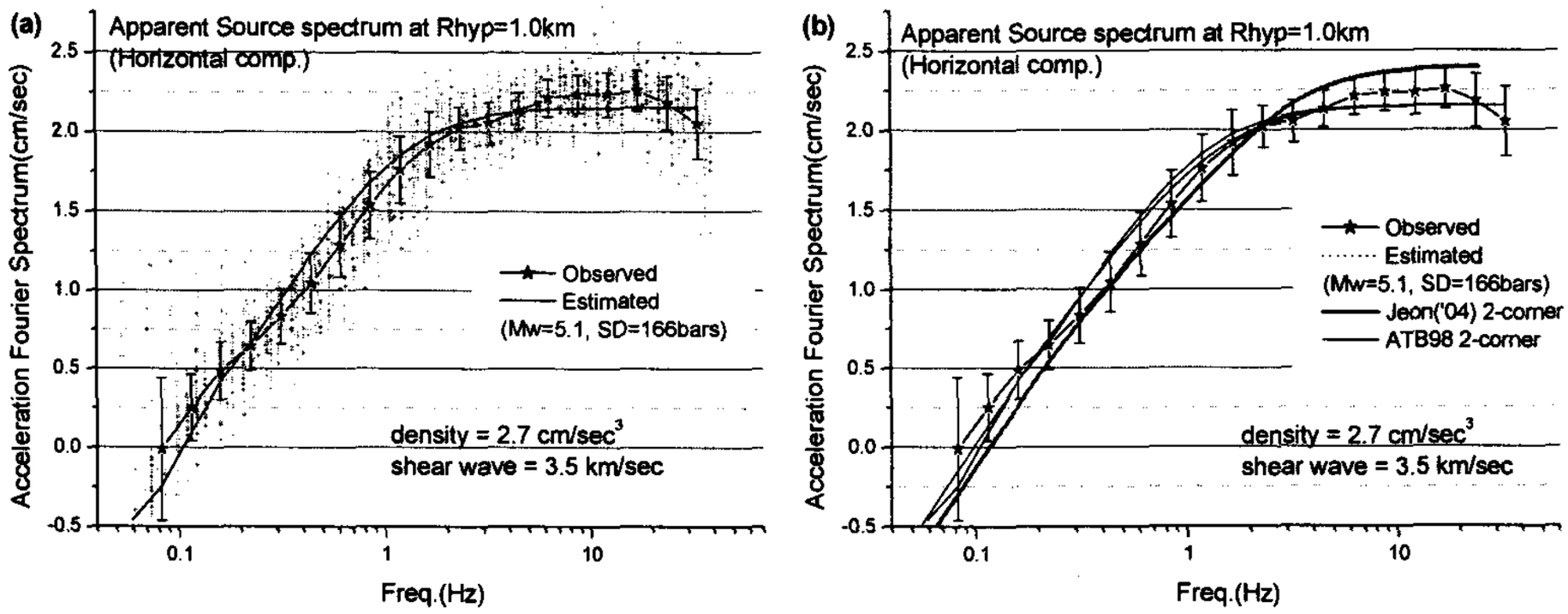

그림 7. 관측 스펙트럼을 진원거리 1km로 보정하여 얻어진 지진원스펙트럼 추정결과 및 Brune의 지진원스펙트럼 적합결과((a)) 그리고 타 지진원스펙트럼 연구결과와의 비교((b))

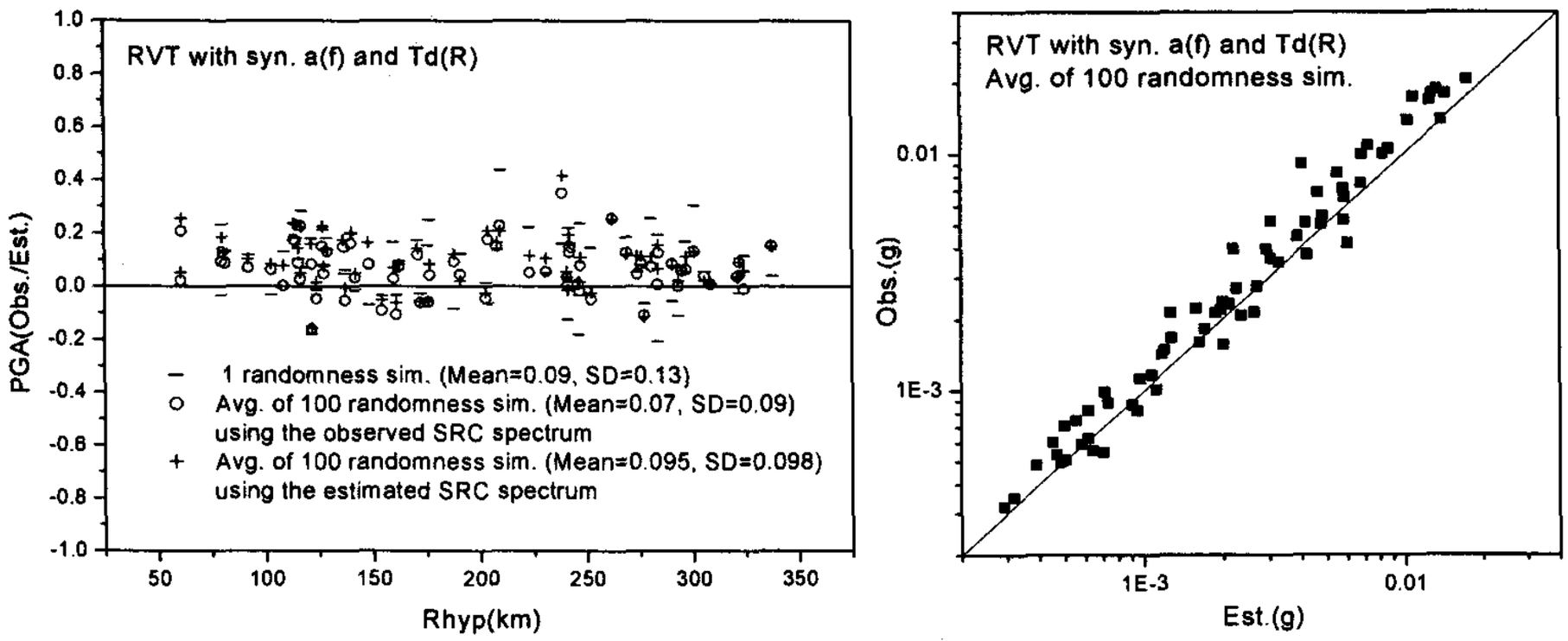

그림 8. 지속시간정보와 이론적으로 계산된 광대역스펙트럼을 이용한 추계학적 PGA 모사 결과

3.2 PGA의 관측소 주파수응답특성 변환 및 지진동감쇠식 비교

상기한 바와 같이 국내 지진관측소에 대한 주파수특성이 계산되었음으로 식 (1)을 이용하여 관측소간의 변환이 가능하다. 본 연구에서는 모든 관측소의 자료를 TJN 관측소 자료로 변환하였다. 특별히 TJN 관측소를 선택한 이유는 이 관측소가 한반도 남부 중심에 위치하고 있고, 양호한 암반상에 설치되어 있기 때문이다. 관측소간 PGA 변환을 한 이유는 그림 10처럼 거리별로 관측된 PGA값의 분포가 너무 변화가 심해, 관측 PGA 값을 이용하여 이미 개발된 지진동감쇠식의 타당성을 평가하기 어렵기 때문이다. 이렇게 지진관측소의 PGA 값 변화가 심한 이유는 그림 9에 도시된 바와 같이 관측소의 주파수특성이 매우 상이하기 때문이다([10]).

그림 10에는 관측소에서 계측된 PGA 값과 TJN 관측소로 변환된 PGA값이 함께 도시되어 있다. 변환된 PGA 값은 PGA 관측 자료분포 중 거리별로 최저 부분으로 이동되고 있음을 알 수 있으며, 대략 10배 정도의 PGA 보정이 이루어지는 많은 관측소 들을 확인할 수 있다.

한편 확률론적 지진재해도(Probabilistic Seismic Hazard Analysis) 분석시 이용되는 지진동감쇠식은

일반적으로 관측자료에 최대한 보정되어야 하는데 TJN 관측소로 변환된 PGA 자료는 지진동감쇠식을 보정하기 위한 기초자료로 활용될 수 있으며, 활용의 편의성을 위해 그림 10과 같이 log-log 영역상의 선형 함수로 적합시켜 식 (3)의 결과를 얻었다. 따라서 향후 이용되는 지진동감쇠식은 최소한 식 (3)에 보정되어야 한다고 판단된다.

$$\log10(PGA(g)) = 1.38989 - 1.90074 \cdot \log10(R_{hyp}) \quad (60km < R_{hyp} < 300km) \qquad (3)$$

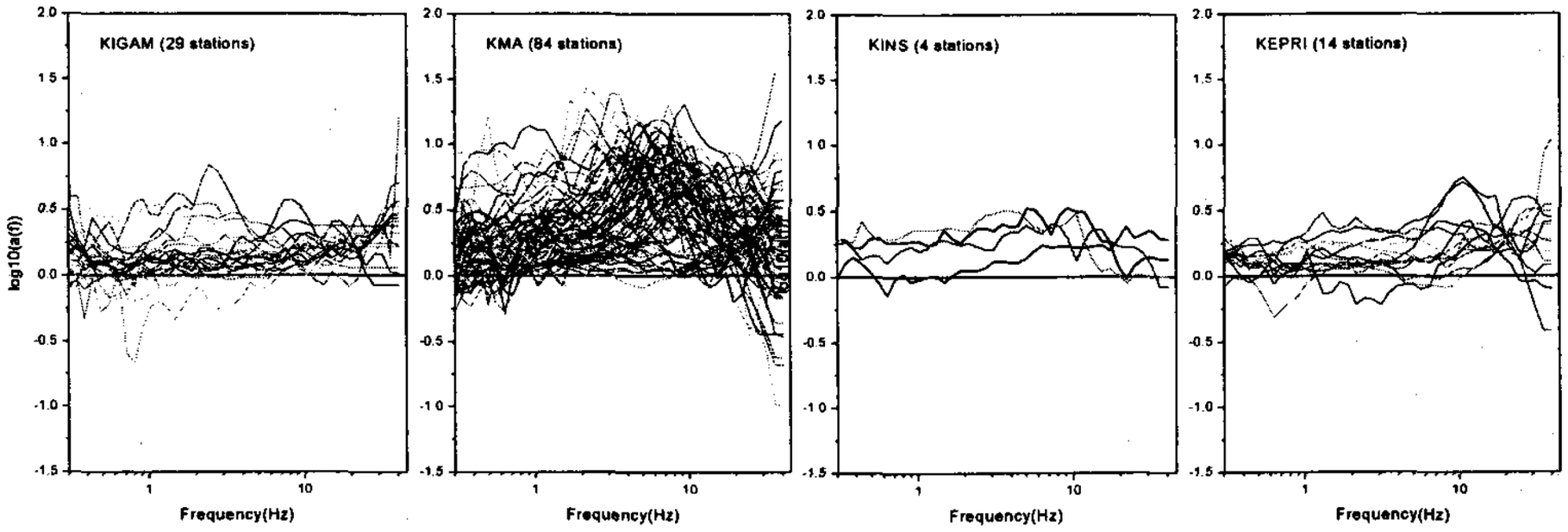

그림 9. 국내 지진관측망 운영기관이 운영 중인 관측소의 주파수별 평균잔차 특성

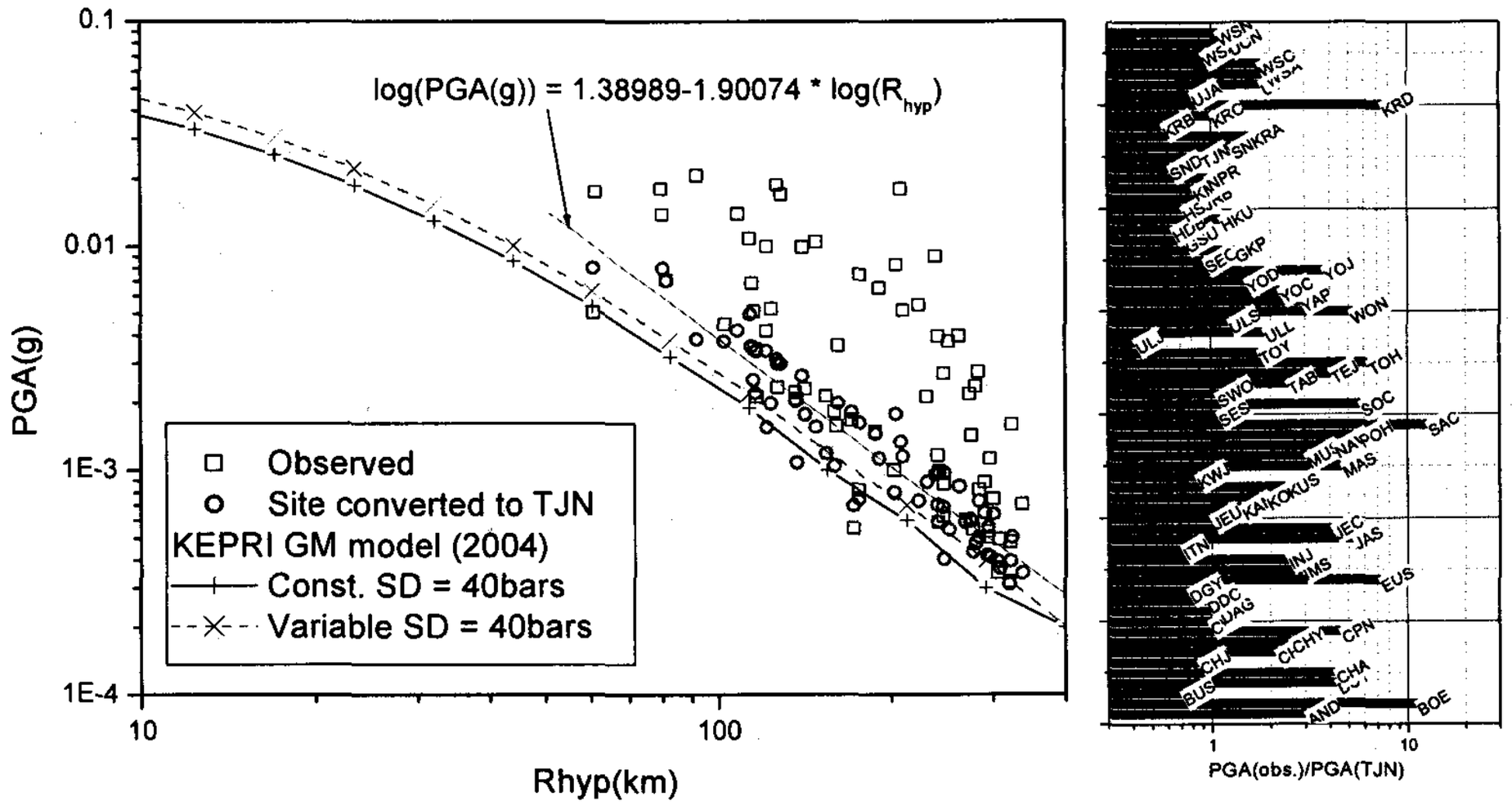

그림 10. 식 (1)을 이용한 지진관측소간 주파수특성 변환에 의해 얻어진 PGA 값 및 변환된 PGA 자료에 대한 적합결과. 그리고 기존에 제시된 지진동감쇠식과의 비교

한편 기존에 제시된 여러 지진동감쇠식 중 고리원전부지에 대해 제시된 식 (4)의 지진동감쇠식([11])과 TJN 관측소로 변환된 PGA 자료를 비교하였다.

$$\ln y = 4.5621+0.04638 \cdot M+(-3.27048+0.21070 \cdot M) \cdot \ln(R+\exp(3.2))-0.13303 \cdot (M-6)^2 \qquad (4)$$

(M = moment magnitude, R = epicentral distance, $\sigma_{\ln y}$=0.8830)

식 (4)는 대략 40bar의 응력강하량과 κ0=0.01, $Q=348f^{n}$, $G(R)=R^{-1}(R<50km)$, $R^{-0.5}(R>50km)$에 대해 개발된 식으로 TJN으로 변환된 PGA 값보다는 작기는 하지만 거리별 감쇠 양상은 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 식 (4)의 지진동감쇠식이 변환된 PGA 값보다 작은 이유는 울진앞바다 지진의 Brune 응력강하량이 100bar 이상으로 높게 평가되었기 때문으로 추정된다.

이상의 결과로부터 지진동감쇠식 개발 및 보정에 필요한 PGA 관측값 선택시 관측소의 주파수 응답특성이 중요한 요소로 작용함을 알 수 있었다. 따라서 향후 공학적인 용도로 축적되는 국내 PGA D/B 구성시에는 이러한 관측소 특성에 대한 정보가 정성적 혹은 정량적으로 제시되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 지금까지 축적된 방대한 S파 수평성분 스펙트럼 D/B를 이용한 지진특성파라미터 역산결과를 기반으로, 울진앞바다 지진에 대한 지진관측소별 수평 PGA 값의 추계학적 지진동 평가를 수행하였다. 추계학적 지진동 평가에 필요한 지속시간 모델은 관측 PGA 자료를 이용하여 도출하였으며, 추정된 PGA 값과 관측 PGA 값과의 오차는 상용로그 표준편차 0.1 (약 24%) 이내로서 양호한 적합결과를 얻었으나, 추정값이 관측값보다 다소 낮게 평가되었다. 향후 결과 개선을 위해서는 2-corner 모델의 코너주파수를 이용한 지진원 지속시간항(식(1)) 보정이 요구된다.

또한 지진재해도의 입력자료인 지진동감쇠식에 대한 검증 및 보정에 필요한 지진동 D/B를 도출하기 위해 관측소 주파수응답특성을 이용한 관측소 간의 지진동특성 변환방법을 도입하고, 국내의 대표적인 기반암 관측소인 TJN 관측소로 변환된 PGA 자료 및 이에 대한 적합식(식(3))을 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 2005년도 원자력연구개발 중장기계획사업 “원전부지 최대지진력 평가연구” 과제로 수행되었음을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] David M. Boore (2003), Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method, Pure appl. geophys. 160, 635-676.

[2] David M. Boore (1996), SMSIM-Fortran program for simulating ground motions from earthquakes, Version 1.0, U.S. Geol. Surv. Open-file Report, pp. 1-54.

[3] 연관희, Walter Silva, 박동희, 장천중 (2002), "수정된 Levenberg-Marquardt 역산방법에 의한 한반도 남부의 추계학적 지진 요소 평가", 한국지진공학회 춘계학술대회 Vol. 6. No. 1, 20-27.

[4] 연관희 (2004), 한반도 지진관측자료를 이용한 울진앞바다 지진('04.5.29, M=5.2) 스펙트럼 분석, 한국지진공학회 추계워크샵 발표논문집.

[5] Kwan-Hee Yun, Dong-Hee Park, Jeong-Moon Seo (2004), “BROADBAND NONPARAMETRIC GROUND -MOTION EVALUATION OF HORIZONTAL SHEAR-WAVE FOURIER SPECTRA”, OECD/NEA Workshop on Seismic input motions, incorporating recent geological studies, NIED (Tsukuba, Japan), Nov. 15-17.

[6] 연관희, 박동희, 김성주, 최원학, 장천중 (2001), "지진관측자료의 효과적인 활용에 관한 고찰", 한국지진공학회 추계학술대회 Vol. 5. No. 2, 36-43.

[7] 최호선, 박창업, 조남대 (2002), 남한 지진의 지속시간과 H/V 비율, 한국지진공학회 춘계학술발표회 논문집.

[8] Young-Soo Jeon (2004), High Frequency Earthquake Ground Motion Scaling in Southeastern Canada and Korea(Dissertation), Saint Louis University in U.S.A.

[9] Atkinson, G. M. and Boore, D. M (1998), Evaluation of Models For Earthquake Source Spectra in Eastern North America, Bull. Seismol. Soc. Am. 88, 919-934.

[10] 장천중, 최원학, 연관희, 박동희 (2005), 원전부지 지진관측망 2004년도 지진관측연보, 한전전력연구원.

[11] 이종림, 장천중, 최원학, 연관희, 박동희 (2004), 원전부지 지진안전성 정밀평가 기술개발 (01NS17, 최종보고서), 한국수력원자력(주), 한전전력연구원.