

3성분 지진기록 합성에 의한 푸리에 진폭스펙트럼 분석

노명현 · 최강룡 · 김태경

한국원자력안전기술원

요 약

3성분 지진기록을 주파수 영역에서 벡터적으로 합성하여 푸리에 진폭스펙트럼 분석의 불확실성을 저감하는 방법을 제시하였다. 3성분 합성 푸리에 진폭스펙트럼을 이용한 분석기법은 두 가지 장점이 있다. 첫째, 단일 성분에서 나타나는 벡터 분할비를 제거함으로써 지진모멘트 추정치의 신뢰도를 향상시킨다. 둘째, 푸리에 스펙트럼의 형상을 강화시킴으로써 지진모멘트, 모서리 주파수, 고주파성분 감쇠상수(χ) 등을 정확하게 추정할 수 있다. 특히, 두 번째 장점은 신호/잡음비가 낮은 미소지진 기록의 분석에 유용하다.

주요어: 합성 진폭스펙트럼, 벡터 분할비 제거, 스펙트럼 형상 강화

Myunghyun Noh, Kang-Ryong Choi and Tae-Kyung Kim, 2003, Analysis of Fourier Amplitude Spectrum by Composing 3-component Seismic Records. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 6, n. 1, p. 25-29

ABSTRACT: We suggest a method that vectorially composes 3-component earthquake records in the frequency domain, to reduce the uncertainties in the analysis of the Fourier amplitude spectrum. The use of the Fourier amplitude spectrum composed from 3 components has two advantages. First, it provides a more accurate estimate of seismic moment by eliminating the vector-partition term that appears in individual component. Second, it provides more accurate estimates of seismic moment, corner frequency, high-frequency decay constant (χ), etc., by enhancing the shape of the Fourier amplitude spectrum. The latter is especially useful in the analysis of small earthquakes with low signal-to-noise ratios.

Key words: composed amplitude spectrum, elimination of vector partition, spectrum-shape enhancement

(Myunghyun Noh, Kang-Ryong Choi and Tae-Kyung Kim, 19 Kusong-Dong, Yusong-Ku, Taejon, 305-338. Republic of Korea)

1. 서 론

실체파의 극성분석(polarity analysis)과 같은 벡터적 특성분석이나 성분별 지진파합성(Waveform synthesis)과 같은 경우와 달리 지진파 진폭스펙트럼 분석의 경우, 단일성분(Single component)을 이용한 분석이 3성분을 합성한 분석보다 유리할 이유가 없다. 그럼에도 불구하고, 현재까지 지진기록 분석은 주로 단일성분(Single channel)을 이용하여 이루어져 왔다. 이는 초기의 지진계가 아날로그 방식으로서 3성분 지진기록을 벡터적으

로 합성할 경우 정확도가 매우 낮아 실용성이 제한된다는 사실에 기인한다. 또한, 디지털 지진계가 개발된 이후에도 비용상의 문제로 단일성분(주로 수직성분)만을 설치한 경우가 많아 아직도 많은 연구가 단일성분 기록을 이용하고 있는 추세이다.

Lachet *et al.*(1996)은 Horizontal-to-vertical (H/V) spectral ratio를 이용한 부지효과 분석에서 수평 2성분에 대한 H/V spectral ratio가 유사하다는 점에 착안하여 수평 2성분의 진폭스펙트럼 벡터의 합을 이용하여 더욱 안정적인 H/V

spectral ratio 추정에 적용한 바 있다. 3성분 합성 푸리에 진폭스펙트럼을 이용할 경우 진폭스펙트럼의 형태를 한층 강화할 수 있으며, 합성과정에서 진폭벡터의 분할비(Partition)를 제거함으로써 진폭스펙트럼의 절대값 추정의 정확도를 크게 높일 수 있다.

2. 방법 및 효과

3성분 지진계의 축 방향을 각각 x , y 및 z 축이라고 할 때, 시간영역에서 지진파 진폭벡터 $s(t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$s(t) = [s_x(t), s_y(t), s_z(t)] \quad (1)$$

$s(t)$ 의 푸리에 변환을 $S(f) = [S_x(f), S_y(f), S_z(f)]$ 라고 할 때, 3성분을 합성한 진폭스펙트럼은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} |S(f)| &= \sqrt{S(f) \cdot S^*(f)} \\ &= \sqrt{S_x(f) S_x^*(f) + S_y(f) S_y^*(f) + S_z(f) S_z^*(f)} \end{aligned} \quad (2)$$

위에서 \cdot 및 $*$ 는 각각 내적(Inner product) 및 켈레복소수(Complex conjugate)를 나타낸다.

통상적인 Ω^2 모델(Aki, 1967, Brune, 1970)을 가정할 경우, 성분별 진폭스펙트럼은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} |S_i(f)| &= \sqrt{S(f)_i S^*(f)_i} \\ &= n_i \frac{R_{\theta\theta} F}{4\pi\rho\beta^3} \frac{M_0}{1+(f/f_c)^2} D(r, f) I(f) \end{aligned} \quad (3)$$

$, i = x, y, \text{ or } z$

위에서 ρ 및 β 는 매질의 밀도 및 전단파 속도, $R_{\theta\theta}$ 는 방사특성, F 는 지표효과, M_0 는 지진모멘트(Seismic moment), f_c 는 모서리주파수(Corner frequency)이며, $D(r, f)$ 는 기하학적 감쇠 및 비탄성 감쇠를 나타내는 감쇠함수

(Diminution function)이고, $I(f)$ 는 변위, 속도 또는 가속도 스펙트럼에 대한 형상필터(Shaping filter)이다. 또한, n_i 는 진폭벡터의 분할(Partition)로서 $n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 = 1$ 이므로, 식 (3)을 식 (2)에 대입하면, 다음과 같이 된다.

$$|S(f)| = \frac{R_{\theta\theta} F}{4\pi\rho\beta^3} \frac{M_0}{1+(f/f_c)^2} D(r, f) I(f) \quad (4)$$

즉, 단일성분 진폭스펙트럼(식 3)에 비하여 3성분 합성 진폭스펙트럼(식 4)이 갖는 이점은 성분별 진폭분할(n_i)에 대한 항을 더 이상 고려할 필요가 없다는 것이다. 진폭분할 n_i 의 추정 값은 사출각(Take-off angle)과 매질의 속도구조의 함수로서, 상당한 불확실성을 내포하기 때문에 진폭분할의 제거가 가져오는 효과는 매우 크다. 또한, 이러한 추정도 단일위상(Single phase)이나 소수의 단일위상 조합에 대해서 가능할 뿐, Lg 파와 같이 다중위상(Multiple phase)이 복잡하게 섞인 경우에는 추정하는 것 자체가 의미가 없다.

이밖에 3성분 합성 진폭스펙트럼을 취할 경우, 일반적으로 지진신호의 진폭스펙트럼이 강화되는 것이 관찰된다. 지진파의 진폭스펙트럼은 전파과정에서 비탄성 감쇠, 산란, 공명 등을 통하여 변형되며, 대부분의 경우 변형의 정도 또는 변형이 발생하는 주파수 대역은 성분별로 다소 다르게 나타난다. 여기에 잡음이 더해지는 경우 진폭스펙트럼의 형태는 이론적으로 예측되는 형태에서 더욱 멀어진다. 경험에 의하면, 3성분 합성을 통하여 진폭스펙트럼의 형상이 강화되어, 단일성분 진폭스펙트럼에서보다 정확하게 지진모멘트, 모서리주파수, 고주파 성분 감쇠상수(α) 등을 추정할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 3성분을 합성하는 과정에서, 일관성이 있는 지진파 신호(Coherent earthquake signal)는 상대적으로 강화되고, 그렇지 않은 잡음은 상대적으로 약화되기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서는 이에 대한 정량적인 분석을 하지 못했으며, 단지 몇 가지 사례를 들어 설명하였다.

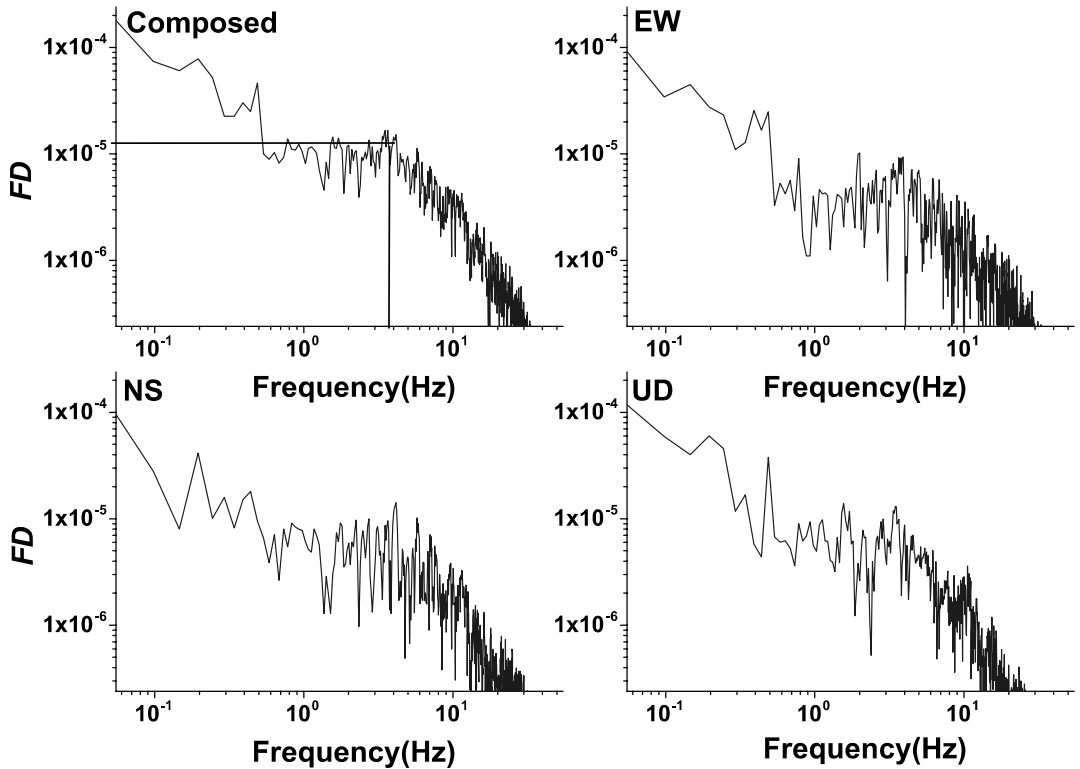


Fig. 1. An example of the Fourier displacement amplitude spectra recorded at Station SEO of KMA at 106 km from the epicenter of the earthquake of magnitude 2.5 on April 1, 2002. The graph at the top left is the amplitude spectrum composed from 3-components. The rest are those from single components in east-west, north-south, and up-down directions in clockwise sense.

3. 적용 예

Fig. 1은 3성분을 합성한 변위 스펙트럼과 합성하지 않은 성분별 변위 스펙트럼을 비교한 예이다. 이 지진파는 2002년 4월 1일에 발생한 규모 2.5의 지진으로 진앙거리 106 km 지점에서 기록된 것이다. EW 성분에서는 모서리주파수를 중심으로 저주파 대역에서 변위 스펙트럼이 낮게 나타나기 때문에, 지진모멘트 추정이 어려우며, 이는 모서리주파수 추정에도 영향을 미칠 수 있다. EW 성분에서와 달리, NS 성분에서는 저주파 대역에서 변위 스펙트럼이 낮아지는 현상은 관찰되지 않는다. 그러나 모서리주파수 근처에서 변위 스펙트럼의 변화가 매우 커 정확한 모서리주파수의 추정이 어렵다. UD 성분의 변위 스펙트럼은 가장 불량하며, 상대적으로 작은 값의 모서리주파수가 추정된다. 반면, 3성분 합성 변위 스펙트럼

에서는 지진파 스펙트럼의 형상이 강화되어 지진 모멘트나 모서리주파수를 개인적인 편차 없이 추정할 수 있다.

Fig. 2는 2002년 1월 7일에 발생한 규모 3.1의 지진으로서 진앙거리 65 km에서 관측된 가속도 스펙트럼이다. 가속도 스펙트럼에서는 고주파 성분 감소상수인 α 값 추정에 초점을 두었다. 성분별 가속도 스펙트럼인 EW, NS 및 UD 성분에서는 고주파 성분 감소추세(기울기)의 변동이 심하여 분석구간 선정에 주관적인 편차가 크게 개입될 수 있다. 이러한 현상은 지진파 신호가 미약할수록 심하게 나타나므로, 대부분이 작은 규모의 지진으로 구성된 우리나라의 지진기록 분석에서 심각한 문제가 된다. Fig. 1에서와 마찬가지로 Fig. 2에서도 진폭스펙트럼의 형상이 강화되어 고주파 성분 감소추세가 한결 명료해 졌음을 알 수 있다.

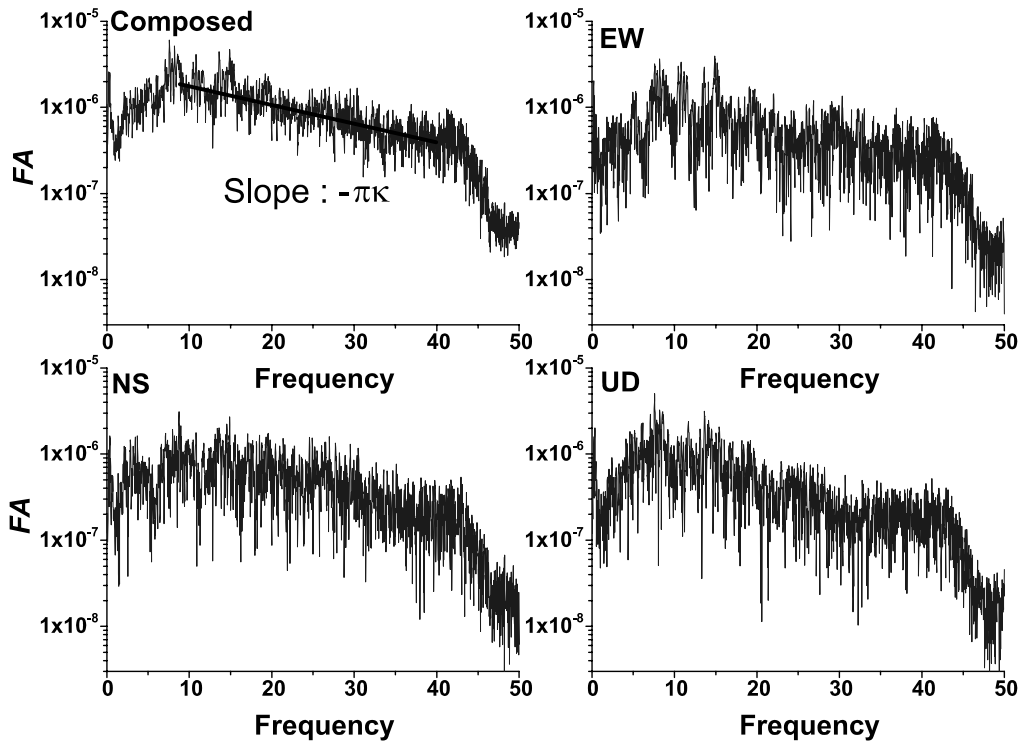


Fig. 2. An example of the Fourier acceleration amplitude spectra recorded at Station HDB of KIGAM at 65 km from the epicenter of the earthquake of magnitude 3.1 on January 7, 2002. The other notions are the same as in Fig.1.

4. 토론 및 결론

잡음에 비하여 지진파 신호가 큰 경우에는 단 일성분 진폭스펙트럼으로부터 지진모멘트, 모서리주파수, 고주파 감쇠상수(χ) 등의 스펙트럼 요소를 어렵지 않게 추정할 수 있으며, 추정된 값에 개입된 주관적인 편차도 크게 줄일 수 있다. 지진파 신호가 미약할수록 스펙트럼 요소의 추정이 어려워지는 것이 일반적이다. Andrews(1986)는 왜곡된 진폭스펙트럼으로부터 지진모멘트와 모서리주파수를 추정하는 방법을 제안한 바 있다. 그러나 이는 단지 적분 값을 이용하여 주관적 판단을 최소화했을 뿐 최적의 방법은 아닌 것으로 보인다. 이 방법은 신호/잡음비가 작은 경우에 오히려 그래프를 이용한 전통적인 방법보다 의미 없는 값을 추정하기도 한다(Snoke, 1987). 이러한 이유로 Snoke(1987)은 지진모멘트를 전통적인 방법으로 추정 한 후, 이를 선행정보(A priori information)로

삼아 Andrews(1986)와 유사한 과정을 거쳐 응력강하(Stress drop)를 추정하는 방법을 제시하기도 하였다. 이 2가지 방법의 공통된 한계는 진폭스펙트럼 자체의 개선과는 무관하다는 것에 있다. 이에 비하여 3성분 합성법은 진폭스펙트럼 자체를 개선한다는 사실을 앞서 제시한 예에서 확인할 수 있다. 또한, Andrews(1986)와 Snoke(1987)의 방법은 3성분 합성 진폭스펙트럼에도 적용될 수 있다.

3성분 합성법의 또 다른 효과는 성분별 진폭분할에 수반된 불확실성을 제거하여 보다 정확한 지진모멘트 추정을 가능하게 한다. 위의 진폭스펙트럼 강화와는 달리, 진폭분할의 불확실성은 지진파 신호의 강, 약에 관계없이 수반되는 문제이다.

결론적으로 3성분 합성을 통한 진폭스펙트럼의 강화와 진폭분할의 불확실성 제거는 앞으로 지진모멘트, 모서리주파수, 고주파 감쇠상수 등의 추정에 수반된 불확실성을 저감시킬 것으로 기대된다.

이러한 3성분 합성의 효과는 신호/잡음비가 낮은 미소지진의 지진파 신호를 분석할 때 더욱 효과적이다. 따라서, 최근 국내에서 기록되고 있는 양질의 미소지진 분석에 특히 유용하게 이용될 것으로 예상된다. 본 논문에서는 지진파 푸리에 진폭스펙트럼에서 지진모멘트(Seismic moment), 고주파 성분 감소(High-frequency decay) 및 모서리주파수(Corner frequency)에 초점을 맞추었으나, 푸리에 진폭스펙트럼을 이용하는 모든 분석(예를 들면 Q 값 분석)에 활용될 수 있다.

참고문헌

Aki, K., 1967. Scaling law of seismic spectrum, *Jour. Geophys. Res.*, 72, 1217-1231.
 Andrews, D.J., 1986. Objective determination of source

parameters and similarity of earthquakes of different size, in *Proc. 5th Maurice Ewing Symp. Earthquake Source Mechanics*, S. Das, J. Boatwright, and C.H. Scholtz, Editors, American Geophysical Union, Washington, D.C., 259-647.
 Brune, J.N., 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *Jour. Geophys. Res.* 75, 4997-5009.
 Lachet, C., Hatzfeld, D., Bard, P.-Y., Theodulidis, N., Papaioannou, C., and Savvaidis, A., 1996. Site effects and microzonation in the city of Thessaloniki (Greece) comparison of different approaches, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 1692-1903.
 Snoko J.A., 1987. Stable determination of (Brune) Stress Drops, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 77, 530-538.

2003년 1월 29일 원고접수
 2003년 3월 24일 원고채택