

## 공간 자기상관(SPAC) 분석 비교: 시간 평균과 공간 평균

박제찬 · 강태섭\*

부경대학교 지구환경과학과

### Comparison of Spatial Autocorrelation (SPAC) Analyses: Temporal Averaging and Spatial Averaging

Jechan Park and Tae-Seob Kang\*

Department of Earth and Environmental Sciences, Pukyong National University

#### 서 론

지층의 전단파 속도는 강지진동 감쇄식 개발이나 부지응답 효과 추정 등과 같이 지진학뿐만 아니라 지진공학에서 다루어 지는 가장 중요한 정보 가운데 하나이다. 어떤 부지의 전단파 속도 정보를 얻는 가장 직접적인 방법은 시추공을 통하여 깊이 에 따른 속도변화를 측정하는 것이다. 그러나 이 방법은 시추과정에서 소요되는 막대한 비용과 환경문제 등으로 인하여 광범위하게 적용하기는 어렵다. 이에 대한 대안으로 지표면에 설치한 지진계에서 얻은 기록을 이용하여 간접적으로 속도 단면을 결정하는 방법을 사용할 수 있다. 이러한 간접적인 방법 가운데에서 지진 배경잡음에 해당하는 상시미동을 이용하는 방법은 인공 또는 자연지진 관측 기록을 이용하는 방법에 비하여 간편할 뿐만 아니라 시간과 공간에 대한 제약이 상대적으로 적기 때문에 경제적이며 친환경적인 비파괴 방법이다.

상시미동을 이용한 지층의 지진응답 특성 추정 및 속도구조 결정을 위하여 지진계 배열법이 널리 사용되고 있다. 이 방법은 주로 지진계의 수직성분 기록에서 기록되는 레일리(Rayleigh)파의 전파를 가정하여 상시미동의 상관성을 분석하는 것이 일반적이다. 상시미동을 상관 분석하여 지층의 전단파 속도구조를 결정하는 방법은 Aki (1957)가 소개한 이후 지금까지 50여 년 동안 SPAC (SPatial AutoCorrelation)이라는 명

칭으로 널리 활용되고 있다. SPAC 방법의 유효성을 검증하면서 레일리와 위상속도 분산을 성공적으로 추정하는 사례는 매우 다양하다(예, Ferrazzini *et al.*, 1991; Chouet *et al.*, 1998; Cho *et al.*, 2008; Yokoi and Margaryan, 2008; Margaryan *et al.*, 2009; Clapgood *et al.*, 2011; Salloum *et al.*, 2014).

SPAC 방법이 유효하기 위해서는 상시미동에 대한 두 가지 가정이 필요하다. 첫째는 상시미동이 시간과 공간에서 상시성(stationarity)이 유지되어야 한다는 것이고, 둘째는 지표면에서 관측하는 상시미동의 파동장이 자유면을 따라 전파하는 분산 파로 이루어져 있어야 한다는 것이다. 이러한 가정에 따라서, Aki (1957)는 모든 방향으로 전파되는 상시미동을 일정한 거리를 갖는 서로 다른 방향의 쌍을 이루는 지진계에서 기록하고 이를 상관 분석하여 공간 평균(또는 방향 평균)을 구한 결과 파와 주파수 및 위상속도의 함수로 나타내질 수 있음을 보였다.

많은 SPAC 방법을 적용한 사례에서 정삼각형과 같이 꼭지점을 둘러싼 원형 내에 중심으로부터 일정한 거리를 유지하는 기하 형태를 갖는 지진계 배열을 사용하고 있다(예, Chouet *et al.*, 1998; Cho *et al.*, 2004). 이러한 규칙적인 상시미동 관측 배열을 유지하는 것은 SPAC 방법에 필요한 가정에 따라서 시간과 공간에 대한 상시성을 유지하기 위한 목적에서이다. 한편, Ohori *et al.* (2002), Okada (2003), Chávez-García *et al.* (2005) 등은 이러한 원형의 지진계 배열에 대한 제한이 없이도 SPAC 방법을 적용하는 것이 가능함을 보였다. 즉, 충분히 긴 시간의 지진 배경잡음 기록이 있을 때, 한 쌍의 지진계에 대한 시간 평균 상관분석 결과로 원형의 배열로부터 얻을 수 있는 공간 평균을 대체할 수 있다는 것이다. 이와 같은 결과는 SPAC 방법의 적용성을 크게 확장시킬 수 있으며, Chávez-García *et al.* (2005)은 이에 대한 이론적인 배경을 상세하게 다루고 있다. 그러나 동일한 상시미동 자료에 대하여 SPAC 방법의 공간 평균과 시간 평균의 등가성을 실증하는 결과는 아

Received: 7 August 2015; Final version Received: 21 August 2015;

Accepted: 24 August 2015

\*Corresponding author

E-mail: tskang@pknu.ac.kr

Address: Department of Earth and Environmental Sciences, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

©2015, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

직까지 찾아보기 어렵다. 따라서 이 연구에서는 일반적인 SPAC 방법에서 사용하는 간단한 상시미동 배열관측 자료를 이용하여 각각 공간 평균과 시간 평균 방법을 적용한 상관 분석 결과를 구하고 이들을 서로 비교하고자 한다.

## 공간 자기상관 분석

이 방법의 핵심은 같은 거리를 유지하면서 서로 다른 방향으로 쌍을 이루는 지진관측소 배열에서 얻은 지진기록이 있을 때, 파동의 전파 방향에 상관없이 배열을 가로지르는 파동의 위상속도를 계산할 수 있다는 것이다. 이 방법은 지진관측소 배열에서 기록한 2차원 파동장이 시간과 공간적으로 임의적이고 상시적이어서 합을 가정하며, 다음 식과 같이 하나의 지진관측소 쌍에서 기록한 지진기록의 상관계수에 대한 방향 평균으로 요약할 수 있다.

$$\rho(r, \omega) = J_0 \left\{ \frac{\omega}{c(\omega)} r \right\} \quad (1)$$

식 (1)은 쌍을 이루는 두 지진관측소에서 동시에 기록한 지진 배경잡음의 상관계수  $\rho$ 를 제1종 0차 베셀(Bessel) 함수인  $J_0$ 로 나타낼 수 있으며, 이 베셀함수의 인수는 각주파수  $\omega$ 와 이 각주파수에서 두 지진관측소를 가로지르는 파동이 갖는 위상속도  $c$ 의 비에 대한 두 지진관측소 사이의 거리  $r$ 의 곱으로 구성된다. 이 식의 유도과정은 Aki (1957)에서 상세하게 다루고 있다.

이 방정식은 상시미동의 상관계수  $\rho$ 를 계산할 수 있다면 위상속도  $c$ 를 결정할 수 있음을 나타낸다. 그러나 베셀함수를 통하여 상관계수와 위상속도가 서로 비선형 관계에 있기 때문에, 실제 위상속도를 계산하기 위해서는 반복 역산을 수행하여야 한다. 위상속도는 주파수의 함수이기 때문에, SPAC을 적용하여 얻을 수 있는 최종 결과는 배열을 구성하는 모든 지진관측소 하부에 대하여 같은 것으로 가정하는 지층의 속도구조에 상응하는 위상속도 분산곡선이다. 전단파 속도 단면을 얻기 위해서는, 이 분산곡선을 다시 역산하여야 한다. 이러한 과정이 유효하기 위해서는 단일 표면파 모드가 상관 함수를 지배할 수 있을 정도로 충분히 배열 하부의 속도구조가 평탄하여야 한다. 반면에 3차원의 속도구조를 고려하여야 하는 경우에는 상시미동 상관분석을 통하여 위상속도 분산곡선을 얻을 수 있을지라도, 이 분산곡선이 1차원 속도 단면을 구하기 위하여 역산할 수 있는 조건을 만족하지 못한다(Chávez-García and Kang, 2014).

## 실험 자료와 비교 분석

SPAC 방법의 시간 평균과 공간 평균의 등가성을 평가하기 위하여, Kang and Shin (2011)이 수행한 상시미동 배열 관측

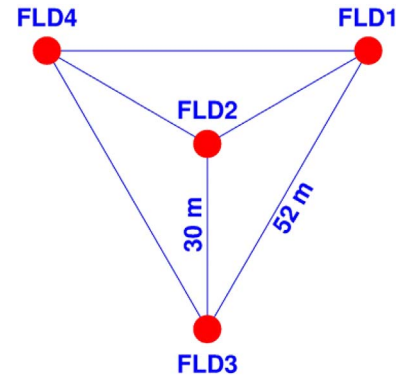
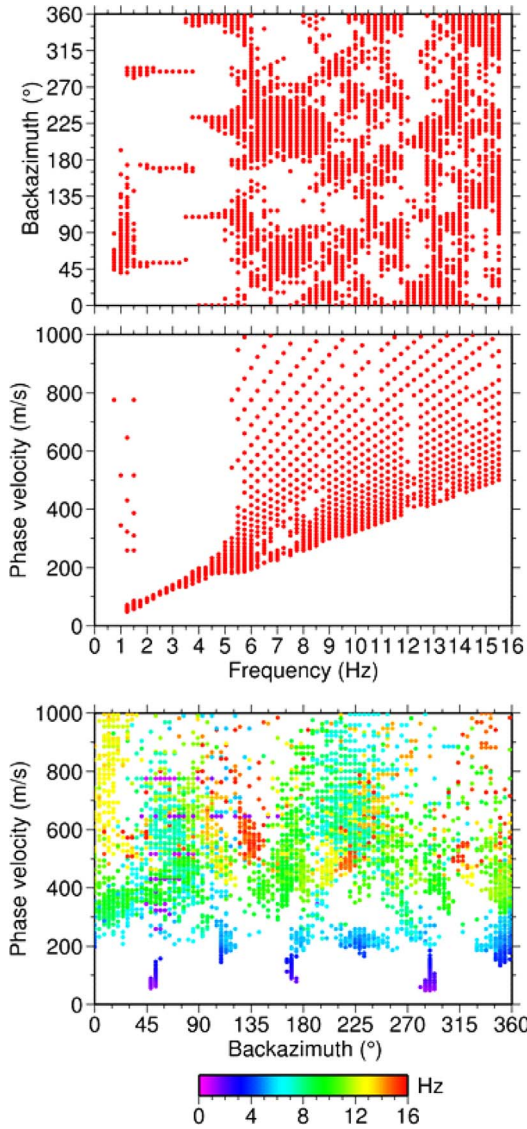


Fig. 1. Configuration of the spatial autocorrelation (SPAC) array used to record microtremor.

자료를 이용하였다. 이들은 상시미동의 안정성과 상관 특성을 분석하기 위하여 한국지질자원연구원 구내에 정삼각형 형태의 배열 지진관측을 실시하였다. 이 지진계 배열은 중앙에 위치한 지진계로부터 반경 30 m인 외접원 내에 정삼각형의 각 꼭짓점에 설치된 세 개의 지진계로 이루어져 있다(Fig. 1). 상시미동 관측에 사용한 지진계는 Guralp CMG-40T-1 3성분 센서와 Quanterra Q330 기록계로 구성되어 있다. 시각 동기화를 위하여 각 지진계에 독립적으로 설치된 GPS 수신기를 이용하였고, 초당 200 샘플의 간격으로 12일간의 연속기록을 얻었다. 이 기록에서 인위적인 잡음이 가장 적은 3시간 동안의 상시미동을 분석에 사용하였다.

상시미동 관측 자료에 대하여 SPAC 방법을 적용하기에 앞서서, 모든 방향에서 동등한 에너지를 가지고 전파하는 상시미동의 등방성에 대한 가정이 유효한지를 파악할 필요가 있다. 이를 위하여, SPAC 분석에 사용할 상시미동 기록을 이용하여 주파수-파수(frequency-wavenumber; f-k) 분석을 수행하였다. 상시미동을 60초 길이로 서로 겹치지 않게 150개의 시간창을 만들었다. 각 시간창 기록을 다시 0.5 Hz에서 15.75 Hz까지 주파수 구간에 대하여 0.5 Hz 크기의 주파수창으로 0.25 Hz 크기만큼 겹치게 하는 60개의 연속적인 필터 구간을 설정하고 Butterworth 대역필터를 적용하였다. 이를 이용하여 일반적인 f-k 스펙트럼과 최대우도(maximum likelihood) 추정 방법을 적용한 고분해능 f-k 스펙트럼을 계산하였다(Capon, 1969). 이 두 결과 사이에서 확연한 차이를 발견하기 어려웠으므로, 고분해능 f-k 분석 결과만을 Fig. 2에 도시하였다.

상시미동 발생원에 대한 후방위각은 약 5.5 Hz 이상에서부터 비교적 고른 분포를 보이고 있다(Fig. 2상). 이러한 양상은 서로 다른 위치에 있는 다양한 진원으로부터 상시미동이 발생하고 있으며, 지층의 구조가 특정한 전파 방향과 관계가 없음을 의미한다. 따라서 상시미동이 거의 모든 방향에서 동등한 크기로 전파하여야 하는 파동장의 등방성이 약 5.5 Hz 이상의 주파수에 대하여 유효하다는 것을 알 수 있다. Fig. 2는 또한 f-k 분석으로부터 결정된 위상속도를 나타내고 있다(Fig. 2중).



**Fig. 2.** Results of frequency-wavenumber (f-k) analysis. (top) Backazimuth distribution over frequency. (middle) Phase velocity distribution over frequency. (bottom) Phase velocity distribution over backazimuth.

f-k 스펙트럼으로부터 대부분의 에너지가 상대적으로 낮은 위상속도로 전파하고 있음을 알 수 있으며, 상대적으로 높은 위상속도를 갖는 에너지 분포는 점진적으로 감소하고 있다. 그러나 사용한 단순한 삼각형 배열에 따른 위상속도의 알리아싱(aliasing)과 많은 신호가 동등한 크기로 상시미동 기록에 존재할 때 f-k 스펙트럼으로부터 위상속도를 결정하기 어려운 문제 등으로 인하여, 이 f-k 분석 결과의 분해능은 매우 낮다. 상대적으로 고주파 에너지(녹색 주파수 구간)의 위상속도는 후방 위각에 크게 좌우되지 않고 비교적 고르게 분포하는 것을 알 수 있다(Fig. 2하).

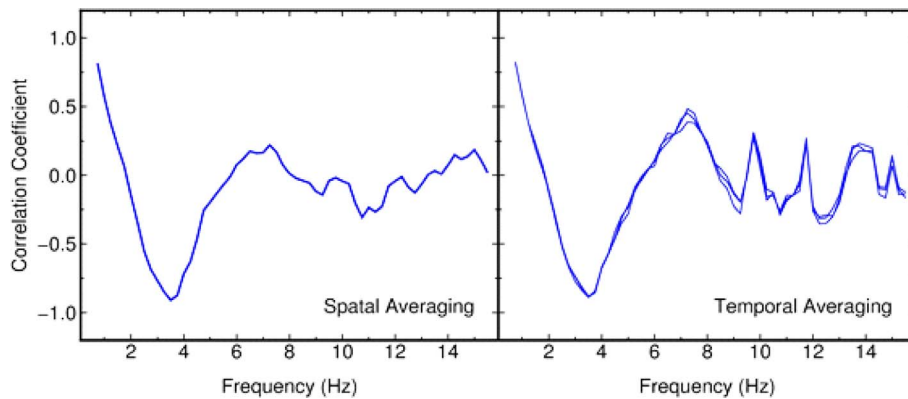
SPAC 방법을 적용하기 위하여 다음 식과 같이 중심에 있는 지진계와 이를 둘러싼 세 개의 지진계 각각에 대한 교차 스펙트럼 밀도(cross spectrum density)를 중심 지진계의 파워 스펙트럼 밀도(power spectrum density)로 나누어 각 지진계 쌍에 대한 상관계수를 구하였다.

$$\rho_0(r, \omega, \theta) = \frac{\rho(r, \omega, \theta)}{\rho(0, \omega)} \quad (2)$$

위 식에서  $\theta$ 는 각 지진계 쌍에 대한 방위각을 나타내며, 분모  $\rho(0, \omega)$ 는 중심 지진계에서 기록한 상시미동의 파워 스펙트럼 밀도를 나타낸다. 전체 지진계 배열에 대한 공간 평균 SPAC 상관계수를 얻기 위하여 다음 식과 같이 모든 방위각에 대한 방향 평균을 계산하였다.

$$\bar{\rho}_0(r, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \rho_0(r, \omega, \theta) d\theta \quad (3)$$

SPAC 방법의 시간 평균과 방향 평균의 등가성 여부를 확인하기 위하여, 식 (3)을 통하여 얻은 전체 배열의 방향 평균을 단 하나의 지진계 쌍에 대한 시간평균과 비교하였다. 시간평균을 나타내는 상관계수를 얻기 위하여, 중심과 주변 지진계가 이루는 세 개의 쌍 가운데 하나를 선택하여 식 (2)만을 이용하여 3개의 서로 다른 시간 기록에 대한 상관계수를 구하고 이를 산술평균하였다. 전체 배열의 방향 평균 상관계수를 구하기



**Fig. 3.** Results of spatial autocorrelation (SPAC) analysis to compare between temporal and spatial averagings of SPAC coefficients. (left) Spatial averaging over array. (right) Temporal averaging for a pair of seismographs from the SPAC array.

위하여 사용한 자료는 f-k 분석에서 사용한 것과 동일한 자료로부터 3분의 1의 시간에 해당하는 최초 50분 길이의 상시미동 기록이다. 또한, 시간 평균 상관계수에 대하여는 방향 평균과 동일한 시간대의 첫 번째 상시미동 기록을 포함하여, 이후 연속한 100분의 추가 상시미동 기록을 각각 50분씩 두 개의 시간대로 나누어 모두 세 개의 독립적인 시간 기록을 구성하여 계산에 사용하였다.

Fig. 3는 SPAC 분석 결과를 제시하고 있다. 공간 평균과 시간 평균 상관계수가 나타내는 각각의 특성을 확인하기 위하여 그림에서 나란히 배치하였다. Fig. 3의 왼쪽은 중심과 주변 지진계에 대한 상관계수를 모두 고려한 방향 평균 결과이며, Fig. 3의 오른쪽은 배열을 구성하는 한 쌍의 지진계에 대하여 세 개의 독립적인 상시미동 시간 기록으로부터 구한 각각의 시간 평균 상관계수를 나타낸다. 고주파수 성분에서 보이는 차이는 시간 평균이 한 쌍의 지진계에서 기록한 상시미동으로부터 상관계수를 구한데 비하여, 공간 평균상관계수는 이를 포함한 세 쌍의 지진계를 방향 평균하여 평활화된 결과에서 비롯한다. 그러므로 시간 평균 상관계수는 공간 평균 상관계수에 비하여 고주파수 성분에 대하여 다소 변동이 심한 결과를 보여준다. 나머지 다른 두 개의 쌍에 대하여 동일한 과정을 거쳐 구한 시간 평균 역시 유사한 결과를 보여주었다. 시간 평균 결과에서 주파수가 증가할수록 변화폭이 다소 커지는 양상에도 불구하고, 두 결과는 거의 유사한 양상을 나타낸다.

## 결 론

SPAC 상관계수의 공간 평균과 시간 평균을 비교하고, 두 결과가 거의 유사함을 확인할 수 있었다. 이 실험 분석 결과로부터 단일 지진계 쌍에 대한 SPAC 상관계수가 일반적인 지진계 배열로부터 추정하는 공간 평균 SPAC 상관계수를 대체할 수 있음을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 이러한 대체가 가능하기 위해서는 상시미동이 상대적으로 긴 시간에 걸쳐 일정한 에너지를 유지하고 상시미동이 모든 방향에서 고르게 전파하여야 한다는 조건을 만족하여야 한다. 이러한 대체가 가능할 경우에, 시간 평균 공간 자기상관법의 유효성은 다음과 같은 측면에서 장점이 있다. 첫째, 불규칙한 지진관측망에 대하여 이 방법을 적용하는 것이 가능하다. 둘째, 모든 배열 관측망에 대하여 동시 관측을 수행하여야 하는 어려움을 피할 수 있고, 단지 두 개의 지진계 쌍을 서로 다른 시간에 여러 지점에서 작동하여 지진기록을 얻고 공간 자기상관법을 적용할 수 있다. 셋째, 규칙적인 배열 형태를 유지하는 것은 지진계 설치 장소의 확보 및 장비 보호의 측면에서 어려움이 있는 반면에, 두 개의 지진계 쌍은 서로 다른 거리에서 가능한 설치 지점에서 관측을 수행할 수 있기 때문에, 장소 선정에 있어서 현장 여건에 따라 달리 적용할 수 있다. 이러한 경우, 원형 배열과 같은 규칙성을 피하여 다양한 거리에 대한 공간 자기상관법 적용이

가능하다.

## 감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2014년)에 의하여 연구되었음.

## References

- Aki, K., 1957, Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, *Bulletin of Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, **25**, 415-457.
- Capon, J., 1969, High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis, *Proceedings of the IEEE*, **57**, 1408-1418.
- Chávez-García, F. J., and Kang, T.-S., 2014, Lateral heterogeneities and microtremors: Limitations of HVSR and SPAC based studies for site response, *Engineering Geology*, **174**, 1-10.
- Chávez-García, F. J., Rodríguez, M., and Stephenson, W. R., 2005, An alternative approach to the SPAC analysis of microtremors: exploiting stationarity of noise, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **95**, 277-293.
- Cho, I., Tada, T., and Shinozaki, Y., 2004, A new method to determine phase velocities of Rayleigh waves from microseisms, *Geophysics*, **69**, 1535-1551.
- Cho, I., Tada, T., and Shinozaki, Y., 2008, Assessing the applicability of the spatial autocorrelation method: A theoretical approach, *Journal of Geophysical Research*, **113**, B06307.
- Chouet, B. C., DeLuca, G., Milana, P., Dawson, M., Martini, C., and Scarpa, R., 1998, Shallow velocity structure of Stromboli volcano, Italy, derived from small-aperture array measurements of Strombolian tremor, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **88**, 653-666.
- Claproud, M., Asten, M. W., and Kristek, J., 2011, Using the SPAC microtremor method to identify 2D effects and evaluate 1D shear-wave velocity profile in valleys, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **101**, 826-847.
- Ferrazzini, V., Aki, K., and Chouet, B., 1991, Characteristics of seismic waves composing Hawaiian volcanic tremor and gas-piston events observed by a near-source array, *Journal of Geophysical Research*, **96**, 6199-6209.
- Kang, T.-S., and Shin, J. S., 2011, Stability and correlation properties of microtremor response, *Geosciences Journal*, **15**, 95-103.
- Margaryan, S., Yokoi, T., and Hayashi, K., 2009, Experiments on the stability of the spatial autocorrelation method (SPAC) and linear array methods and on the imaginary part of the SPAC coefficients as an indicator of data quality, *Exploration Geophysics*, **40**, 121-131.
- Ohuri, M., Nobata, A., and Wakamatsu, K., 2002, A comparison of ESAC and FK methods of estimating phase velocity using arbitrarily shaped microtremor arrays, *Bulletin of the Seismo-*

- logical Society of America*, **92**, 2323-2332.
- Okada, H., 2003, The microtremor survey method, Society of Exploration Geophysicists of Japan, Translated by Koya Suto, Geophysical Monograph Series No. 12, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa.
- Salloum, N., Jongmans, D., Cornou, C., Massih, D. Y. A., Chegade, F. H., Voisin, C., and Mariscal, A., 2014, The shear wave velocity structure of the heterogeneous alluvial plain of Beirut (Lebanon): combined analysis of geophysical and geotechnical data, *Geophysical Journal International*, **199**, 894-913.
- Yokoi, T., and Margaryan, S., 2008, Consistency of the spatial autocorrelation method with seismic interferometry and its consequence, *Geophysical Prospecting*, **56**, 435-451.