소규모 배열식 지진관측소를 이용한 미소지진 관측

신동훈^{1*} · 조창수² · 이희일²

¹전남대학교 지구환경과학부 조교수

²한국지질자원연구원

Microseismic Monitoring Using Seismic Mini-Array

Dong-Hoon Sheen^{1*}, Chang Soo Cho², and Hee Il Lee²

¹Faculty of Earth Systems and Environmental Sciences, Chonnam National University

²Earthquake research center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

요 약: 효과적으로 미소지진을 관측하고 분석할 수 있는 소규모 배열식 지진 관측소와 분석 방법을 소개하였으며, 관측 능력을 확인하기 위해 2012년 12월 19일부터 2013년 1월 9일까지 시험 관측을 수행하였다. 중앙에 6 채널 지진 기록계 1 대와 3 성분 지진계 1 대를 설치하고 수직성분 지진계 3 대를 중앙으로부터 약 100 m 정도 떨어진 지점에 삼각형 형태로 각 꼭짓점에 설치하여 소규모 배열식 지진관측소를 구성하였다. 모든 지진계는 동일한 계기 응답 함수를 가지며 하나의 6 채널 지진 기록계에 연결되어 200 sps 의 간격으로 관측 자료를 저장하였다. 3 주의 시험 관측 기간 동안 총 16 개의 미소 지진을 관측하였다. 수직성분 지진계에서 관측한 P파의 도달시간 차이, 3 성분 지진계에서 관측한 P파와 S파의 도달시간 차이, P파와 S파 지진 파형의 배열식 분석으로 얻은 후방 방위각들을 이용해 지진의 진원을 결정하기 때문에 하나의 소규모 배열식 관측소만으로도 진원 결정이 가능하였다. 가장 가까운 거리에서 발생한 미소 지진 2 개의 진원은 관측 부지로부터 1.3 km 거리에 있는 채석장으로 분석되었으며, 채석장의 발파 기록과 분석된 결과가 서로 일치함을 확인하였다.

주요어: 배열식 지진관측소, 미소지진 관측

Abstract: It was introduced a seismic mini-array that could monitor microseismicity efficiently and analyzed seismic data obtained from the mini-array that was operated from December 19, 2012 to January 9, 2013. The mini-array consisted of a six channel data logger, a central 3 components seismometer, and a tripartite array of vertical sensors centered around the 3 components seismometer as an equilateral triangle with about 100 m aperture. All seismometers that had the same instrument response were connected a 6 channel data logger, which was set to record seismograms at a sampling rate of 200 sps. During the three weeks of campaign, a total of 16 microearthquakes were detected. Using time differences of P wave arrivals from the vertical components, S-P time from 3 components seismometers, and back azimuth from the seismic array analysis, it was possible to locate the hypocenter of the microearthquake even with one seismic mini-array. The epicenters of two nearest microearthquakes were a quarry site located 1.3 km from the mini-array. The records of quarry blasting confirmed the our analysis.

Keywords: seismic array, microseismic monitoring

서 론

미소지진의 관측을 통한 시공간적 미소지진활동의 규명은

2013년 1월 24일 접수; 2013년 1월 29일 수정; 2013년 1월 30일 채택

*Corresponding author

E-mail: dhsheen@jnu.ac.kr

Address: Faculty of Earth Systems and Environmental Sciences, Chonnam National University, 77 Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju

©2013, 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.

지표 지질조사를 통해 얻어진 단층 정보에 비해 지진을 유발할 수 있는 활동성 단층과 현생 응력 분포에 대한 보다 직접적인 정보를 제공할 수 있으므로 지진재해 경감을 위한 전통적인 지진학에서 매우 중요한 의미를 가져왔다(Hauksson *et al.*, 1984; De Matteis *et al.*, 2012; Serpetsidaki *et al.*, 2012). 또한 마그마의 이동과 관련해 발생하는 화산성 지진의 관측은 화산 분화 예측을 위한 직접적인 지시자로 사용되어 화산 재해를 경감하는 가장 중요한 도구들 중 하나로 사용되고 있다 (Sparks *et al.*, 2012).

최근 비전통적 유전에서 수압파쇄를 이용한 수평 시추공으로부터 셰일가스나 치밀가스 등을 생산하는 유정자극법

(stimulation)이 전 세계적으로 사용되어지고 있는데, 이때 미소 지진의 시공간적 발생 특성은 수평 시추를 최적화 하거나 파쇄 압력을 조절하는데 중요한 역할을 하고 있다(Goodway, 2012). 그리고 인공 지열 저류층 생성 기술(Enhanced Geothermal System)에 의해 생성된 파쇄대나 유발 지진의 모니터링에서도 미소지진의 관측 및 분석은 매우 중요한 의미를 지닌다(Phillips, 2000; Tosha *et al.*, 2000; Julian and Foulger, 2009).

일반적으로 지진의 분석은 지진의 진원과 진원시, 규모 등과 같은 가장 기본적인 진원 요소와 지진의 발진 기구 등을 규명하는 것을 포함하는데, 고전적인 방법에 의하면 최소한 3 개소 이상의 지진관측소에서 지진파를 관측해야 지진의 진원을 결정할 수 있다. 그런데 지진파가 전파되는 매질의 3 차원 속도구조를 정확하게 알 수 없기 때문에, 다수의 지진 관측 자료를 사용한 역산을 통해 진원을 정확하게 결정할 수 있다. 따라서 규모 1.0 이하의 지진활동까지 정밀하게 관측하려면 많은 지진관측소가 매우 조밀하게 설치되어야 하는데, 이러한 지진 관측망을 구축하려면 많은 비용과 시간이 소요된다.

Joswig (2008)은 고전적인 형태의 조밀한 지진관측망 구성을 하지 않고도 매우 작은 규모의 지진을 관측할 수 있는 Nanoseismic monitoring 기법을 소개하였다. 이 방법은 Seismic Navigation System (SNS)라 부르는 소규모 배열식 지진관측소를 이용해 지진을 관측하고 분석하는 방법인데, 각 SNS는 중앙에 3성분 지진계와 삼각형의 배열을 구성하는 각 꼭짓점에 3 개의 수직성분 지진계로 구성된다.

이 연구에서는 Joswig (2008)의 Nanoseismic monitoring 기법을 소개하고, 2012년 12월 19일부터 2013년 1월 9일까지 국내에 시험적으로 설치한 1 개의 SNS로부터 얻은 자료를 분석하여, 소규모 배열식 지진관측소의 관측능력을 알아보고자 하였다.

Nanoseismic Monitoring

Nanoseismic monitoring은 Wust-Bloch and Joswig (2006)이 싱크홀 현장 조사에 적용하여 그 유용성을 처음으로 소개하였다. 또한 이 방법은 포괄적 핵실험 금지조약기구 준비 위원회(CTBTO Preparatory Commission)에서 핵실험을 수행한 것으로 의심되는 지역을 조사하기 위한 현장 사찰(On-Site Inspection)에서도 사용되고 있다(Joswig, 2008). 특히 현장 사찰에서 가장 중요한 요소 중 하나는 지하 핵실험 수행 후 매질의 응력변화로 인해 야기되는 여진을 감지하는 것이며, 신호대 잡음비가 낮아 지진 관측 환경이 좋지 못한 조건에서도 매우 작은 규모의 여진도 관측할 수 있어야 한다. 특히 Häge and Joswig (2009)에 의하면 SNS를 이용한 지진관측은 관측할 수 있는 지진의 규모를 일반적인 지진관측망에 비해 1 정도 낮출 수 있는 장점을 가지고 있다.

Nanoseismic monitoring의 핵심은 SNS라고 부르는 소규모

배열식 지진관측소인데 중앙에 3 성분 지진계와 삼각형 형태의 각 꼭짓점에 3 개의 수직성분 지진계가 설치된다. 중앙의 지진계로부터 각 꼭짓점까지의 거리는 약 100 m 정도이다. 6 채널 이상의 지진 기록계를 사용한다면 하나의 SNS에 속한 4 개의 지진계를 동시에 연결할 수 있으므로, 기록계에 연결된 하나의 GPS에 의해 각 지진계에서 관측한 지진 자료의 시간을 동기화할 수 있다.

진원 결정에는 고전적인 세 가지 진앙 결정 방법을 동시에 사용한다. 첫 번째 방법은 단일 SNS에 속한 4 개의 수직 성분에서 관측한 P파의 도달 시간 차이를 이용하는 것이고, 두 번째는 중앙에 위치한 3 성분 자료로부터 얻은 P파와 S파의 도달시간 차이를 이용하는 것이다. 이 진앙 결정 방법들은 Pujol (2004)에 자세히 기술되어 있다. 세 번째 방법은 4 개의 관측소에서 관측한 지진 파형을 상호상관하여 후방방위각을 계산하는 배열식 지진분석법(Rost and Thomas, 2002)을 사용하는 것이다. 일반적으로 이 세 방법들은 진앙결정에 많이 사용되고 있지만, Nanoseismic monitoring에서는 층상 지각 구조에 기반하여 파선추적법으로 지진파 도달시간을 계산하여 지진의 진원까지 결정할 수 있도록 개발된 Hypoline (Joswig, 2008)이라는 소프트웨어를 이용해 진원을 결정한다.

Seismic Navigation System

이 연구에서 시험관측에 사용한 장비들이 Fig. 1에 제시되었는데, 지진계는 이동식 지진관측을 위해 휴대하기 편리하며 소형의 Lennartz electronic의 단주기 지진계들을 사용하였다. 중앙에 설치할 3 성분 지진계는 LE-3Dlite이고 세 개의 꼭짓점에 설치할 수직 성분 지진계는 LE-1DV이다. 이 두 종류의 지진계들은 동일한 계기 응답 함수를 가지며, 이는 지진 파형 분석 과정을 단순화 시키는 역할을 한다.

세 개의 수직성분 지진계는 긴 케이블을 통해 break-out box

Fig. 1. Seismic instruments used in this study. A Q330s datalogger, a 3 components seismometer (LE-3Dlite), three vertical component seismometers (LE-1DV), a 12-V battery, break-out box, and cables are shown.

를 거쳐 Kinometrics의 6 채널 Q330S 기록계에 연결되며 3 성분 지진계는 짧은 케이블을 통해 직접 기록계와 연결되는데, 모든 기록은 200 sps (samples per second)의 간격으로 저장하도록 설정하였다.

Lennartz electronic의 LE-3Dlite와 LE-1DV 단주기 지진계들은 고유 주파수가 1 Hz인 동일한 계기 응답 함수를 가지며, 1 Hz ~ 10 Hz 사이 주파수 구간에서는 국내에서 많이 사용하는 단주기 지진계인 CMG-40T-1과 거의 비슷한 계기 응답 특성을 보여준다(Fig. 2). SNS에서 사용하는 지진계들은 동일한 계기 응답 함수를 가지므로 계기 응답 함수 제거와 같은 복잡한 연산을 하지 않고도 각 지진계에서 기록한 지진 파형의 직접적인 비교가 가능하다. 이러한 특징으로 인해 배경잡음 수준이 높아 하나의 지진계로 잡음과 신호의 구분이 어려운 지역에서도 각 지진계에서 동일한 형태로 지진 신호가 관측되므로 잡음과 지진 신호를 구분하기 쉬워진다. 그리고 후방 방위각을 추정하기 위한 배열식 분석과정 또한 단순한 파형 비교만으로도 가능해 진다.

지금까지 국내에서 Lennartz electronic에서 제작한 지진계를 사용한 적이 없기 때문에 국내에서 많이 사용하고 있는 Guralp 광대역 지진계인 CMG-3T와의 비교 관측을 수행하여 지진 관측 능력을 검토하였다. LE-3Dlite와 CMG-3T 지진계

를 하나의 6 채널 Q330S 기록계에 연결하여 2012년 9월 19일에서 2012년 9월 21일까지 기상청 영암(MOK) 관측소에서 지진을 관측하였다. 매 15 분마다 30 분 길이의 관측 자료를 계기 보정한 뒤, 파워스펙트럼밀도를 구하고 특정 주파수의 잡음 수준을 확률밀도함수로 표현하여 수직 성분 자료의 배경잡음 수준을 도시하였다(Fig. 3). CMG-3T 지진계의 계기 응답 함수는 Fig. 2에 제시하였다. CMG-3T에서 관측한 배경잡음 수준과 비교할 때 LE-3Dlite는 단주기 지진계이지만 3 초 보다 짧은 주기를 가지는 지반 진동까지 관측할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 4는 관측지점으로부터 178 km 떨어진 경남 거제 해역에서 2012년 9월 19일 14시 52분경 발생한 규모 2.0의 지진을 관측한 것이다. 진원시를 기준으로 지진 파형을 도시하였으며 수직 성분 기록을 비교하기 위해 P파가 도달하는 시간창(Fig. 4a)과 수평 성분 기록을 비교하기 위해 S파가 도달하는 시간창(Fig. 4b)으로 구분하였다. 두 지진계가 서로 다른 계기 응답 함수를 가지므로 각 지진계의 계기 응답 함수들은 제거하였으며, 1 ~ 10 Hz 구간의 대역통과 필터를 적용하였다. P파의 수직성분 파형과 S파의 전단성분 파형이 매우 잘 일치하므로 LE-3Dlite 지진계가 국지지진 관측에 적합한 성능을 보여주는 것으로 여겨진다.

Fig. 2. Instrument response spectra of LE-3Dlite/1DV of Lennartz electronic and CMG-40T-1 and CMG-3T of Guralp.

Fig. 3. Probability density function plots of power spectral density of background seismic noise recorded with LE-3Dlite (a) and CMG-3T (b)

시험 관측 및 지진 자료 분석

2012년 12월 19일부터 2013년 1월 9일까지 전북 부안군 보안면 상입석리 일대에서 Nanoseismic monitoring을 위한 하나

Fig. 4. Seismograms of a local event (ML=2.0) recorded with LE-3Dlite and CMG-3T. (a) seismograms of P wave window of vertical component (b) seismograms of S wave window of transverse component. The epicentral distance is 178 km. The time is from the origin time of the event.

의 SNS를 구성하여 지진을 관측하였다. Fig. 5는 시험 관측을 위해 설치한 소규모 배열식 지진관측소로, 네모가 중앙의 3 성분 지진계가 설치된 곳이고 원들이 3 개의 수직성분 지진계가 설치된 곳을 나타낸다. 하나의 관측점이 독립적으로 운영되는 일반 배열식 관측소에 비해 관측점 사이의 간격은 좁지만 4 개의 지진계를 하나의 기록계에 연결해야 한다. 따라서 케이블 길이로 인해 제한된 공간에 모든 지진계를 설치해야 하므로 적절한 관측 부지를 선정하는 것이 다소 어렵다. 이 연구에서는 접근의 용이성과 장비 도난 위험을 고려하여 복원 중인 폐 채석장에 관측소를 설치하였다. 채석장 복원을 위해 부지의 많

Fig. 5. Distribution of four seismometers forming a seismic navigation system (modified from Naver map). A square and circles represent locations of a 3 component seismometer and three vertical seismometers.

Fig. 6. Seismograms of two short distance events, EV06 and EV09. C, E, N and W represent locations of seismometers of a SNS, center, east, north and west, respectively. The time is from the origin time of the event, given in the text.

은 지역이 복토되었기 때문에 관측 및 분석에 이상적인 정삼각형 형태로 관측점을 선정할 수 없었지만, Trimble의 GPS 수신기인 GeoExplorer 2008로 정확한 관측점들의 위치를 측정하여 지진파 분석에 사용하였다.

3 주 동안의 관측 기간 동안 총 16 회의 근거리 지진을 관측하였는데 대부분은 인근 채석장의 발파에 의해 발생한 신호로 분석되었다. Fig. 6은 가장 가까운 지역에서 발생한 신호들이다. 지진 파형은 분석된 진원시를 기준으로 도시하였으며, 한국 표준시를 기준으로 EV06의 진원시는 2012년 12월 26일 12시 58분 40초이고 EV09는 12월 29일 11시 55분 21초로 분석되었다. 두 신호 모두 발파에 의해 발생한 것이지만 큰 진폭의 S파가 잘 관찰되며, S파에 이어 지표 근처에서 발생한 신호임을 지시하는 Rg파가 잘 발달하여 전단 성분에 비해 수직 성분과 방사 성분 파형에서 두드러지게 나타난다.

Hypoline 소프트웨어(Joswig, 2008)로 지진파를 분석하였으며 Chang and Baag (2006)의 속도구조를 사용하여 진원을 결정하였다. 4 개 수직성분 파형의 P파 도달시간 차이를 이용하여 포물선을 그리고, 3 성분 지진계에서 추출한 P파와 S파의 도달시간을 이용하여 진원거리를 결정하였다. 마지막으로 4 개 수직성분의 P파 파형의 파형비교를 통해 P파의 후방 방위각을 결정한다. 이 세 결과가 겹쳐지는 곳이 진원이 되는데, Fig. 7은 두 이벤트를 Hypoline을 이용해 분석한 결과를 보여주는 화면이다. 그림에 표시된 JNUAE는 시험관측에 사용한 배열식 지진관측소 중 동쪽부분에 위치한 지진계를 의미하는데, 화면을 확대하면 분석에 사용한 모든 지진계의 위치를 지도에서 확인할 수 있다. 방사상으로 그려진 선은 각 지진계에서 관측한 P파 도달시간 차이를 이용한 선이고, 원은 진원거리를 나타낸다. 배열식 분석 결과는 빔 형태로 관측소를 중심으로 북북동쪽 방향을 가리키고 있다. 이러한 결과를 종합하여 결정한 진원과 진원시가 화면 위쪽에 표시된다. EV06의 분석 결과 진원은 위경도가 각각 35.6552°, 126.6901°, 깊이는 10 m이며, EV09는 35.6550°, 126.6889°, 깊이는 10 m로 분석되었다.

분석된 두 이벤트의 진원은 관측 지점으로부터 1.3 km 떨어진 채석장으로 결정되었다. 국내의 모든 발파 작업은 반드시

Fig. 7. Processing results for the events, EV06 and EV09, of Fig. 6. Hyperbolae, circles, fans are computed from P onsets, P-S time, and array beams, respectively.

신고해야 하므로 신고 기록을 확인하면 지진과 분석의 성공 여부를 쉽게 확인할 수 있는데, 두 신호가 관찰된 날짜에 이 채석장의 발파 신고가 관찰 경찰서에 접수되었음을 확인하였다. 따라서 Nanoseismic monitoring에서 사용하는 하나의 소규모 배열식 지진관측소인 SNS에서 관측한 신호가 정확하게 분석되어 진원이 잘 결정되었음을 알 수 있었다.

토의 및 결론

미소 지진의 관측은 지진재해 경감을 위한 활동성 단층, 현생 응력 분포 및 응력장 변화에 대한 직접적인 정보를 제공할 수 있으며, 마그마 유동에 의해 발생한 미소지진 활동 감시는 화산 재해 경감을 위한 중요한 도구로 사용되어 오고 있다. 또한 최근에는 비전통적 유전의 셰일 가스 등 생산을 위해 사용하는 유정자극법, 인공 지열 저류층 생성 기술 등의 안정성과 효과를 극대화를 위해 미소 지진 관측 및 정확한 분석의 중요성이 강조되고 있다.

작은 규모의 지진 관측 및 정확한 분석을 위해서 많은 지진 관측소가 조밀하게 설치된 지진관측망이 필요하나 이를 구축하려면 많은 비용과 시간이 소요된다. 따라서 이 연구에서는 미소 지진 관측에 매우 효과적인 방식으로 알려진 Joswig (2008)의 Nanoseismic monitoring 기법을 소개하고, 시험 관측을 통한 효용성과 한계를 살펴보았다.

삼각형 형태의 세 꼭짓점에 3 개의 수직성분 지진계와 중앙에 3 성분 지진계가 설치되는 소규모 배열식 관측소인 SNS는 Nanoseismic monitoring의 핵심이라 할 수 있다. 그리고 이때 사용되는 4 개의 지진계가 동일한 계기 응답 함수를 가지는 것은 자료처리 및 분석 과정의 편리함을 주는데 중요한 역할을 한다.

미소 지진의 관측은 관측하려는 지진파의 진폭이 작기 때문에 주변 배경잡음의 영향을 많이 받는다. 따라서 관측 부지는 배경잡음의 영향을 최소화 할 수 있는 지점으로 선정해야한다. 그런데 Sheen *et al.* (2009)에서 지적한 바와 같이, 배경잡음의 영향을 최소화시키기 위해 노력하여 설치한 국내 고정식 관측소도 인간에 의해 발생한 지진 잡음의 영향을 적잖게 받고 있다. SNS와 같이 소규모 배열식 지진관측소에서 관측한 신호들은 신호 대 잡음비가 낮은 자료에서도 일관된 형태로 관측되는 작은 진폭의 지진 신호를 구분하기 쉬운 특징을 가지고 있기 때문에 잡음 수준이 비교적 높은 국내 환경에 유리하다. 다만 하나의 SNS를 구축하기 위해 제한된 지역에서 4 개의 관측점을 동시에 확보할 수 있는 관측 부지 선정이 다소 어려운 문제가 있다.

이 연구에서 사용한 Quanterra Q330S의 최대 샘플링 간격은 200 sps인데, 관측점 사이 간격이 좁기 때문에 각 지진계에서 P파나 S파의 0.005 초 도달시간 차이는 진원결정에 많은 영향을 미칠 수 있다. 따라서 보다 정확하고 안정적인 지진 분

석을 위해서는 가급적 지진계 배열을 넓히며 정삼각형 형태를 갖추고, 보다 높은 샘플링 간격의 자료를 획득하는 것이 필요할 것으로 여겨진다.

감사의 글

지진관측소 운영 및 자료 획득에 수고한 전남대학교 지구환경과학과 대학원의 민기훈, 이현경, 김정성, 박지환, 이해원에게 감사한다. 그리고 Nanoseismic monitoring workshop을 통해 기술 교육과 Hypoline 소프트웨어를 제공해 준 Stuttgart University의 Manfred Joswig 교수에게 감사한다. 이 연구는 기상기술개발관리단의 지진기술개발사업(CATER 2012-8154)의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- Chang, S.-J., and Baag, C.-E., 2006, Crustal structure in Southern Korea from joint analysis of regional broadband waveforms and travel times, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **96**, 856-870.
- De Matteis, R., Matrullo, E., Rivera, L., Stabile, T. A., Pasquale, G., and Zollo, A., 2012, Fault delineation and regional stress direction from the analysis of background microseismicity in Southern Apennines, Italy, *Bull. seism. Soc. Am.*, **102**, 1899 - 1907.
- Goodway, B., 2012, Introduction to this special section: Passive seismic and microseismic-Part 1, *The leading edge*, **31**, 1296-1299.
- Häge, M., and Joswig, M., 2009, Spatiotemporal characterization of interswarm period seismicity in the focal area Nov Kostel (West Bohemia/Vogtland) by a short-term microseismic study, *Geophys. J. Int.*, **179**, 1071-1079.
- Hauksson, E., Armbruster, J., and Dobbs, S., 1984, Seismicity patterns (1963-1983) as stress indicators in the Shumagin seismic gap, Alaska, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **74**, 2541-2558.
- Joswig, M., 2008, Nanoseismic monitoring fills the gap between microseismic networks and passive seismic, *First break*, **26**, 117-124.
- Julian, B. R., and Foulger, G. R., 2009, Monitoring geothermal process with microearthquake mechanisms, 34th workshop on geothermal reservoir engineering, Proceedings, SGP-TR-187.
- Phillips, W. S., 2000, Precise microearthquake locations and fluid flow in the geothermal reservoir at Soultz-sous-Forts, France, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **90**, 212-228.
- Pujol, J., 2004, Earthquake location tutorial: graphical approach and approximate epicentral location techniques, *Seism. Res. Let.*, **75**, 63-74.
- Rost, S., and Thomas, C., 2002, Array seismology: methods and applications, *Rev. Geophys.*, **40**, 1008, doi:10.1029/2000RG000100.
- Serpetsidaki, A., Tselentis G.-A., Martakis, N., and Sokos, E., 2012, Seismicity and seismotectonics study in southwestern

- Albania using a local dense seismic network, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **102**, 2090-2097.
- Sheen, D.-H., Shin, J. S., and Kang, T.-S., 2009, Seismic noise level variation in South Korea, *Geosciences Journal*, **13**, 183-190.
- Sparks, R. S. J., Biggs, J., and Neuberg, J. W., 2012, Monitoring volcanoes, *Science*, **335**, 1310-1311.
- Tosha T., Doi, N., and Koide, K., 2000, Monitoring of a geothermal reservoir utilizing microearthquakes, 25th workshop on geothermal reservoir engineering, Proceedings, SGP-TR-165.
- Wust-Bloch, G. H., and Joswig, M., 2006, Pre-collapse identification of sinkholes in unconsolidated media at Dead Sea area by 'Nanoseismic Monitoring' (graphical jackknife-location of weak sources by few, low-SNR records). *Geophys. J. Int.*, **167**, 1220-1232.