지진 배경잡음 상관분석을 이용한 신호 추출

DOI: 10.3938/PhiT.20.032

강 태 섭

Extraction of a Signal by Using Cross-correlation of Ambient Seismic Noise

Tae-Seob KANG

Ambient seismic noise has often been considered to be a useless part of a seismogram, thus being discarded as part of traditional seismic data processing. Recent developments in seismic imaging theory have verified a long-standing postulate concerning the recovery of the useful signal from ambient seismic noise. One may retrieve the impulse response function between two receivers through a cross-correlation of noise at the two receivers. Theoretically and experimentally, a random wavefield has been shown to have correlations to a Green's function representing characteristics of the media. The Green's functions extracted by cross-correlating long sequences of ambient seismic noise can be used to obtain information about the structure of media.

들어가는 말

과학자들은 지구의 내부구조에 관한 단서를 얻기 위하여 보통 자연 지진이나 인공적인 폭발 등으로부터 비롯하는 지진파를 분석한다. 지진이 발생한 진원으로부터 출발한 지진파는 지구 내부를 구성하는 다양한 종류의 암석을 통과하여 지표 가까이에서 위치하고 있는 지진계에 도착한다. 지진 발생 시

저자약력

강태섭 교수는 서울대학교에서 이학박사(2004)를 받고, 한국지질자원연구원 지진연구센터 선임연구원을 거쳐 2009년부터 부경대학교 지구환경과학과 조교수로 재직 중이다. (tskang@pknu.ac.kr)

각인 진원시로부터 지진계에 지진파형이 도착할 때까지의 시간과 이 두 지점 사이의 거리를 이용하여 지구 내부 암석을 통한 지진파의 전파속력을 계산할 수 있다. 지구 내부의 다양한 지점을 통과하는 지진파 전파속력을 도식화하여 전체적인 지구 내부의 물리적인 성질 변화 양상을 설명할 수 있다. 그러나 파동의 전달과정을 매개하는 매질의 불균질성은 파동을 임의의 방향으로 퍼트리는 산란작용을 일으켜서 본래의 파동을 간섭하며 매질 내에 잔존상태를 유지하여 잡음의 역할을 한다. 지진기록으로부터 지진파형 신호의 도착시간을 가능한 한 정확하게 측정하기 위해서는 기록에 항상 내재되어 있는 배경잡음의 영향을 최소화하여야 한다. 많은 지진분석 과정에서 배경잡음은 필터링을 통하여 제거되어야 하는 대상이다. 잡음은 보통 하나의 지점으로부터 다른 지점까지 전달되는 유용한 정보를 불분명하게 만드는 것으로 인식되어 왔다. 그러나 최근 이러한 인식에 반하는 다양한 관측이 이루어지고 있으며, 잡음으로부터 일관성 있는 신호를 추출하여 지구 내부구조를 규명하는 데 이용하려는 시도가 많은 성공을 거두고 있다. 이 글에서 지진학의 새로운 화두로 떠오른 지진파 간섭법(seismic interferometry)을 설명하고 적용 사례와 활용 분야를 소개하고자 한다.

Seismic Interferometry의 원리

Interferometry는 한 쌍의 파동 사이에 존재하는 차이로부터 유용한 정보를 얻기 위하여 이들 사이의 간섭 현상을 관찰하는 것을 말한다. 따라서 Seismic interferometry는 지진과 관련된 신호의 간섭을 연구하는 것을 말한다. 이러한 간섭을 연구하기 위하여 사용되는 기본적인 수학 연산은 두 개의 신호를 상호상관분석(cross-correlation)하는 것이다 [Fig. 1]. 상호상관분석은 두 신호 가운데 하나의 역 시계열과의 대합(convolution)과 동등하기 때문에, 대합을 기본 연산 과정으로 생각할 수도 있다.^[1] 여기서 사용되는 신호는 지구의 배경

- Two wavelets: $A=(2,1,0)$ & $B=(0,2,1)$
- Cross-correlation: $A \otimes B = C$

A:			2	1	0				C	lag
B:	0	2	1						2	-2
		0	2	1					5	-1
			0	2	1				2	0
				0	2	1			0	1
					0	2	1		0	2

Fig. 1. Schematic representation of cross-correlation operations. For a pair of wavelets A and B, the maximum correlation occurs at time lag of -1. If wavelet B were shifted one sample back in time, then two wavelets would have the maximum similarity.

잡음 또는 자연지진과 인공지진 등으로부터 비롯되는 모든 신호를 일컫는다.

지진파 간섭 효과를 분석하는 과정은 매우 단순하다. 즉, 서로 다른 두 개의 지진계에서 기록된 파형을 상관분석하고, 동일한 지점에서 서로 다른 지진원으로부터 생성되거나 다양한 시간 범위에 걸친 기록에 대한 상관분석 결과를 누적한다. 이 과정을 통하여 산출되는 결과는 어떤 가상의 진원 또는 수신점을 갖는 새로운 지진 신호이다[Fig. 2]. 새로운 지진 신호, 즉 상호상관분석 결과는 마치 진원 또는 수신점이 새로운 위치에 있는 것과 같은 효과를 나타낸다. 만일 많은 수신점이 분포하는 경우에 각각의 수신점이 다른 수신점에 대한 진원 역할을 함으로써, 새로운 진원이 없음에도 불구하고 각 수신점과 수신점이 이루는 모든 쌍에 대한 신호를 생성할 수 있다. 이러한 방법은 1970년대 초기부터 지구물리탐사 분야에서 사용되어 왔다.

위와 같은 단일 산란파의 간섭 효과에 대한 설명은 배경잡음과 같은 다중 산란파의 간섭 효과에도 유효하다. 경계면에서의 impulsive source들은 연속적으로 동시에 방출되며 서로 상관되어 있지 않은 잡음원으로 대체할 수 있다. 어떤 두 수신점에서 관측한 연속적인 잡음 기록을 상호상관분석하고 잡음기록의 자기상관(autocorrelation)으로부터 얻을 수 있는 진원시간함수와 대합하면 앞에서 든 예와 같은 결과와 동등한 impulse 응답을 얻을 수 있다. 사실, 이러한 잡음으로부터 매질에 대한 impulse 응답을 추출하는 원리는 일찍이 물리학에서 fluctuation dissipation theorem^[2]으로 알려져 있다. 즉, 어떤 선형 시스템의 외력에 대한 응답은 이 시스템 내부의 임의의 변동(잡음)과 같은 방식으로 거동한다. 이러한 물리현상에 대한 통계적인 접근은 지진 배경잡음 기록에도 적용될 수 있다. 긴 시간에 걸친 지진 배경잡음의 진원 분포는 임의적이며, 또한 지구 내부의 불균질성으로 인한 다중 산란으로

Fig. 2. Concept of seismic interferometry. Correlation of traces creates events with shorter raypaths and traveltimes. The source location at the left is redatumed to be at a geophone location on the right. Modified after Schuster (2009).^[3]

임의성은 배가 된다.

지진과 같이 일시적으로 발생하는 지진원은 보통 두 가지의 서로 다른 지진파를 일으킨다. 하나는 진원으로부터 직접 전파하는 지진파이며, 다른 하나는 지구 내부 매질에서 산란 또는 적어도 한번 이상 반사된 파들로 구성되며 긴 지속시간을 갖는 잡음과 같은 형태의 코다(coda)파이다[Fig. 3]. 지진 배경잡음과 코다파는 지구 내부에서 발생한 다중 산란의 결과이다. 다중 산란파는 간섭효과를 내포하며, 이 간섭효과의 결과로 미약한 일관성이 보존된다. 예를 들어, 산란장에서 임의의 경로를 따라 점 A로부터 점 B로 여행하고 다시 A로 되돌아가는 파동을 가정해보자. 그림[Fig. 4]에서 이에 대한 두 가지의 가능한 경로가 제시되어 있다. 하나는 임의로 선택한 경로이며 다른 하나는 같은 경로이지만 반대 방향으로 진행하는 경로이다. 이 경우에 두 경로는 보강간섭을 일으키며 일관성을 보존하게 된다. 이러한 현상은 Anderson localization으로 잘 알려져 있으며, 최근에 지진파에 대하여도 동일한 효과가 나타나는 것으로 밝혀졌다.^[4] 먼 거리에서 발생한 지진 또는 다중 산란에 의하여 산란 파동장이 생성될 때, 지진계는 불규칙적인 잡음을 기록하게 된다. 서로 다른 두 지점에 위치한 지진계가 이러한 잡음을 동시에 기록하는 경우, 두 지점을 잇는 경로를 따라서 일관성이 유지된 잡음은 보강간섭을 일으켜서 미약한 상관성을 띠게 된다.^[5] 이때 보강간섭을 일으키기 위한 가장 효율적인 경로는 두 지점 사이의 최단 경로와 일치한다.

REFERENCES

- [1] A. Curtis *et al.*, The Leading Edge **25**, 1082 (2006).
- [2] H. B. Callen *et al.*, Phys. Rev. **83**, 1231 (1951).
- [3] G. T. Schuster, *Seismic Interferometry* (Cambridge University Press, 2009).
- [4] E. Larose *et al.*, J. Appl. Phys. **95**, 8393 (2004).
- [5] R. L. Weaver, Science **307**, 1568 (2005).

Fig. 3. Example of seismogram. The seismogram is often consisting of ambient noise, main waves such as P and S waves, and coda.

Fig. 4. Influence of interference effects on the travelling waves in a scattered wavefield. If two waves follow the same path from A to B, they interfere constructively on returning to A. Modified from Lagendijk *et al.* (2009).^[6]

지진 배경잡음으로부터 Green 함수의 추출

어떤 시스템에 단위 충격량이 작용하였을 때, 그 시스템의 응답을 그린함수(Green's function)라고 한다. 앞에서 언급한 바와 같이, fluctuation dissipation theorem은 외력에 대한 시스템의 반응과 시스템 내부의 임의변동이 동등한 방식으로 일어난다는 것을 설명한다. 마찬가지로, 지표면의 두 지점을 포함한 지구 매질에 대하여, 충분히 긴 시간에 걸친 지진 배경잡음 기록을 상호상관분석하여 두 지점 사이의 그린함수를 얻는 것이 가능하다. 지진 배경잡음의 대부분 해양 기원의 microseism과 대기-해양-육지 사이의 상호작용 등과 같이 지표면 가까이에 그 기원을 두고 있다. 또한 지진계는 거의 대부분 지표면에 위치하기 때문에, 지진 배경잡음의 상관분석으로부터 얻을 수 있는 두 관측지점 사이의 그린함수에는 표면파의 영향이 우세하다.

그림[Fig. 5]은 두 개 지진관측소 쌍에 대한 상호상관분석의 예를 보여준다. 연속적인 잡음 기록의 상관분석에서 큰 지

Fig. 5. Example of cross-correlations for ambient seismic noise between pairs of seismic stations. In order to avoid any influence of large events in the correlation of noise sequences, the data are redigitized over a one bit leaving amplitude values at sampled points as either 1 or -1. We can see wave packets in the positive and/or negative time lag. The wave packets indicate the surface wave Green's function between two stations.

진에 의한 영향을 피하기 위하여 샘플 점에서의 진폭값을 부호에 따라 1 또는 -1로 부여함으로써 진폭에 대한 정보를 정규화한다. 이러한 과정을 통하여 진폭효과는 완전히 삭제되고, 단지 위상에 대한 정보만을 상관분석한다. 상관분석 과정에서 계산의 효율을 높이기 위하여 한 달 길이의 자료를 일 단위의 31개 구간으로 나눈다. 이렇게 나뉘어진 자료는 하루의 길이에 해당하는 자료가 한 번에 각 관측소 쌍에 대하여 상호상관분석되고, 31일의 상호상관분석 결과를 중합하여 최종 결과를 산출한다[Fig. 6]. 이 그림으로부터 시간지연을 갖는 파군을 확인할 수 있으며, 두 관측지점 사이의 거리를 상관분석 결과에서 확인된 파군(그린함수)의 지연시간으로 나눈 값이 표면파의 군속력(group speed)이다. 파군의 지연시간을 측정하기 위하여, 상관분석 지진기록에서 포락곡선의 최대 진폭에 일치하는 지연시간을 측정한다.

Seismic Interferometry의 활용

한반도 남부지역에서의 표면파 군속도 분포를 얻기 위하여, 상호상관분석 결과로부터 파군의 도달시간을 측정하고 그 결과에 토모그래피 방법을 적용하였다. 지진파 토모그래피는 병원에서 사용되는 신체의 단층 영상 촬영과 유사한 방법으로, 지구 내부구조를 3차원 영상화하기 위하여 널리 사용된다. 그

REFERENCES

- [6] A. Lagendijk *et al.*, Physics Today **62**(8), 24 (2009).

Fig. 6. Data corresponding to one day are cross-correlated at a time and the results from 31 days of the data are stacked together to enhance any coherent signals.

림[Fig. 7]은 2~4초의 주기대역에서 상관분석 결과를 이용하여 얻은 토모그래피 영상을 제시하고 있다. 공간적인 속도분포와 지질학적 특성을 비교하기 위하여 지질도를 지형에 겹쳐진 속도 분포도와 함께 배치하였다. 그 결과 군속도 분포 영상은 지표지질과 상당한 상관관계를 갖는 것을 확인할 수 있다. 이러한 유사성은 seismic interferometry 분석을 통한 토모그래피 결과의 정확성을 잘 보여준다.

한편, seismic interferometry를 이용하여 추출한 그린함수는 매질의 시간에 따른 상태변화를 모니터링하기 위하여 사용되기도 한다. 1998년 초, 일본 혼슈 북동부에 위치한 Iwate 화산에서 마그마 관입에 따른 화산 지형의 팽창과 지진활동의 증가가 관찰되었다. Nishimura *et al.* (2005)^[7]는 이 화산체 주변에서 6회의 인공발파 실험을 실시하였고, 이로부터 얻은 지진기록에 대하여 seismic interferometry를 적용하였다. 그 결과 지진활동이 활발한 화산체 주변 지역에서 3~6 Hz의 주파수 범위에서 평균 지각속도가 약 1% 정도 감소하였음을 발견하였다. 이러한 지진과 속도 변화는 마그마 관입과 지진으로 인한 화산체의 팽창에 기인한 것으로 설명할 수 있다. 이러한 실험 연구는 seismic interferometry가 1%의 미약한 속도변화를 감지할 수 있을 정도로 민감하며, 이 정도의 변화는 일반적인 지진파 분석으로는 규명하기 어려운 수준이다.

나오는 글

지진 배경잡음의 상관분석은 많은 분야에 활용이 가능한

Fig. 7. Group velocity distribution in comparison with geological features in the southern Korean Peninsula. (A) Geological map. (B) Surface wave group velocity map in period band of 2~4 seconds. The map is constructed by tomographic inversion of group velocities which are obtained by cross correlations of ambient seismic noise recorded during one month in August of the year 2005 at stations of accelerograph networks in the southern Korean Peninsula. After Kang and Shin (2006).^[8]

혁신적인 방법이다. 예를 들어 발파와 같은 별도의 진원을 사용하지 않는 석유 탐사나 한반도와 같이 지진이 상대적으로 드문 지역에서 고르고 조밀한 지진관측소 분포와 연속 기록 유지 등을 통하여 지구의 내부구조를 파악하는 데 매우 효과적이다. 또한 중요한 구조물을 훼손하지 않고 건전도를 평가하기 위한 비파괴 검사 등에도 적용이 가능하다. 지진 배경잡음의 상관분석 결과는 매질의 작은 변화에 매우 민감하다. 유체 이동은 매질의 속도와 밀도의 곱으로 표현되는 음향 임피던스에 영향을 줄 수 있으므로, 시간에 따른 매질의 상태 변화를 모니터링하기 위하여 이 방법을 적용할 수 있다. 무엇보다도 이 방법이 갖는 가장 큰 매력은 과거 쓸모없는 것으로 여겨지던 풍부한 잡음 기록으로부터 극히 예외적이고 상세한 신호를 추출할 수 있다는 점이다.

REFERENCES

- [7] T. Nishimura *et al.*, Earth Planets Space **57**, 491 (2005).
- [8] T.-S. Kang *et al.*, Geophysical Research Letters **33**, L17303 (2006).