

논문

교통차량진동 자료에 대한 최적 가상공통송신원모음 제작 연구

손우현¹ · 최윤석^{1*} · 장성형¹ · 이동훈¹ · 정순홍² · 주용환¹ · 김병엽¹

¹한국지질자원연구원 해저지질에너지연구본부

²한국지질자원연구원 기후변화대응연구본부

A Study on Generating Virtual Shot-Gathers from Traffic Noise Data

Woohyun Son¹, Yunsuk Choi^{1*}, Seonghyung Jang¹, Donghoon Lee¹, Snons Cheong², Yonghwan Joo¹, and Byoungyeop Kim¹

¹Marine Geology and Energy Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Climate Change Response Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

요약

도심지에서 화약, 기계적 진동 등의 인공 송신원을 이용할 경우 진동 및 소음으로 인한 민원발생으로 탄성파탐사에 어려움이 있다. 인공 송신원의 대안으로 교통차량의 진동에 의해 발생하는 표면파를 이용하여 도심 지하 천부의 물성을 파악할 수 있다. 그러나 교통차량 진동은 일정 속도로 연속적으로 이동하는 평면파의 형태를 하고 있어, 기존의 표면파 처리 및 역산 기법을 적용하기 위해서는 탄성파 간섭법을 적용하여 교통차량 진동 자료를 점-송신원 형태의 가상공통송신원모음으로 변환시켜야 한다. 본 연구에서는 교통차량 진동 자료에 다양한 탄성파 간섭법을 적용하고, 타우-피 및 주파수-파수 영역에서 그 결과를 비교하여 최적의 탄성파 간섭법을 도출하였다. 또한, 다양한 방향의 수진기 배열로 취득된 자료들에 대해 탄성파 간섭법을 적용하고, 그 결과들을 비교 및 분석하여 탐사에 가장 적합한 수진기 배열 방향을 도출하였다.

주요어

인공송신원, 표면파, 교통차량 진동, 탄성파 간섭법, 가상공통송신원모음

ABSTRACT

The use of artificial sources such as explosives and mechanical vibrations for seismic exploration in urban areas poses challenges, as the vibrations and noise generated can lead to complaints. As an alternative to artificial sources, the surface waves generated by traffic noise can be used to investigate the subsurface properties of urban areas. However, traffic noise takes the form of plane waves moving continuously at a constant speed. To apply existing surface wave processing/inversion techniques to traffic noise, the recorded data need to be transformed into a virtual shot gather format using seismic interferometry. In this study, various seismic interferometry methods were applied to traffic noise data, and the optimal method was derived by comparing the results in the Radon and F-K domains. Additionally, the data acquired using various receiver arrays were processed using seismic interferometry, and the results were compared and analyzed to determine the most optimal receiver array direction for exploration.

KEYWORDS

artificial source, surface wave, traffic noise, seismic interferometry, virtual shot-gathers

서론

도심지에서 건물 및 기간시설의 안전한 설계와 시공을 위한

목적뿐만 아니라 싱크홀 및 연약지반에 의한 지질재해, 침출수에 의한 환경오염 등의 사회 문제에 대응하기 위해 도심지 지하 천부 물성정보 확보는 필수적이다. 도심지 천부 물성정보를

Received: 18 October 2023; Revised: 8 November 2023; Accepted: 10 November 2023

*Corresponding author

E-mail: ychoi@kigam.re.kr

Address: 124, Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34132, Korea

©2023, 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.

연기 위해서는 시추 및 다양한 물리탐사 방법(전자기 탐사, 탄성파탐사 등)이 활용될 수 있지만, 도심지 특성과 비용을 감안할 때 표면파를 이용한 탄성파 탐사가 유력한 방법 중 하나가 된다.

토목 및 건설 분야에서는 해머나 화약 등을 이용하여 표면파를 발생시키고 소수(2개)의 수진기를 이용하여 지하 천부 물성정보를 획득하는 SASW(Spectral Analysis of Surface Waves) 탐사기법을 많이 수행하였다(Nazarian *et al.*, 1983; Stokoe *et al.*, 1994). 그러나 소수의 수진기만을 이용할 경우 표면파의 처리와 역산의 정확성에 한계가 따를 수밖에 없다. 지하 물성정보의 정확성과 신뢰성을 높이기 위해 Park *et al.* (1999)은 여러 개의 수진기를 이용하여 표면파를 기록하고 처리/역산을 통해 지하 물성정보를 파악하는 MASW(Multi-channel Analysis of Surface Waves) 기법을 제안하였다(Xia *et al.*, 1999; Park *et al.*, 2007).

그러나, 도심지에서 화약이나 기계적 진동과 같은 인공송신원으로 표면파를 생성하는 것은 진동 및 소음으로 인한 민원으로 제약을 받는다. 인공송신원의 대안으로 환경잡음으로 여겨지는 교통차량 진동에 의해 발생하는 표면파를 이용하여 도심 지하 천부의 물성정보를 파악할 수 있다(Riahi and Gerstoft, 2015; Dou *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2019). 교통차량 진동은 일상의 환경잡음으로 인식되므로, 민원발생없이 표면파 탄성파탐사를 수행할 수 있는 장점이 있다.

화약이나 해머, 기계적 진동 등의 인공송신원은 공간의 한 점에서 송신원이 발생하는 반면, 교통차량 진동은 일정한 속도로 이동하는 송신원이기에 표면파 처리/역산 기법인 SASW나 MASW를 교통차량 진동으로부터 기인하는 표면파에 바로 적용할 수 없으며, 탄성파 간섭법(seismic interferometry, Curtis *et al.*, 2006; Wapenaar and Fokkema, 2006)을 이용하여 교통차량 진동 자료를 점-송신원(point-source) 형태의 가상공동송신원모음(virtual common shot-gather)으로 변환하는 과정을 거쳐야 한다.

탄성파 간섭법은 두 탄성파 트레이스의 상관(correlation)을 계산하여 가상의 새로운 음원 위치를 가지는 트레이스를 생성하게 된다. 탄성파 간섭법은 시간영역과 주파수영역에서 각각 계산이 가능하며, 교차상관(cross-correlation, Schuster *et al.*, 2004; Snieder *et al.*, 2006), 곱풀기(deconvolution, Vasconcelos and Snieder, 2008), 교차결맞음(cross-coherence, Nakata *et al.*, 2011) 등 다양한 기법이 있다. 본 연구에서는 교통차량 진동 자료에 다양한 탄성파 간섭법을 적용하여 그 결과들을 비교 및 분석하고, 최적의 탄성파 간섭법을 도출한다. 이를 위해 탄성파 간섭법을 적용하여 생성된 가상공동송신원모음을 타우-피(Tau-P) 및 주파수-파수(F-K) 영역으로 변환하여 그 결과를 정량적으로 비교한다. 한편 교통차량이 운행하는 도로에 대해 수진기가 배열되는 방향에 따라 탄성파 간섭법을 적용한 결과는 달라진다. 본 연구에서는 교통차량 운행 도로에 대해 다양

한 방향(각도)의 수진기 배열로 자료를 취득하고, 취득된 자료들에 대해 탄성파 간섭법을 적용하여 도출된 가상공동송신원모음 결과들을 비교 및 분석하여 최적의 수진기 배열 방향을 도출한다.

가상공동송신원모음 제작 기술

교통차량 진동 기반 자료는 송신원이 무작위적이며 연속적인 자료이므로, 지하물성 파악을 위해 점 송신원 형태로 변환해야 한다. 본 연구에서는 탄성파 간섭법을 교통차량 진동 자료에 적용하여 최적의 점 송신원 형태의 가상공동송신원모음을 도출하고자 한다. 다양한 탄성파 간섭법을 시간영역과 주파수영역에서 적용하고, 그 결과를 비교 및 분석한다.

시간영역 탄성파 간섭법(interferometry)

교통차량 진동 자료에 대한 탄성파 간섭법 기술은 기준(reference) 수진기에서의 한 트레이스(trace)를 각각의 모든 수진기의 트레이스에 상관 시켜주는 과정이다.

$$d_c(x, t) = d(x_r, t) \otimes d(x, t) \quad (1)$$

식 (1)에서 $d(x, t)$ 는 수진기 위치 x 에서 시간 t 에 기록한 자료이며, $d(x_r, t)$ 는 기준 수진기 위치 x_r 에서 기록한 자료이다. 통상 기준 수진기는 송신원에서 거리상 가장 가까운 수진기를 사용한다. 식 (1)에서 $d_c(x, t)$ 는 탄성파 간섭법 기술이 적용된 가상공동송신원모음을 나타내며, \otimes 는 상관을 의미하며 식 (2)와 같이 표현된다.

$$a(t) \otimes b(t) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t)b(t - \tau)dt \quad (2)$$

교통차량 진동 자료는 수진기의 커플링 정도, 장비의 오차 등에 의해 자료의 진폭이 일정하지 않을 수 있다. 이를 보정하기 위해 식 (1)의 탄성파 간섭법 기술에서 각각의 트레이스를 자신의 길이(length, norm)으로 나어준 후 상관을 수행함으로써 정규화된 가상공동송신원 모음(식 (3))을 얻을 수 있다.

$$d_{nc}(x, t) = \frac{d(x_r, t)}{|d(x_r, t)|} \otimes \frac{d(x, t)}{|d(x, t)|} \quad (3)$$

식 (3)에서 $||$ 는 트레이스의 길이(또는 norm)을 나타낸다. 잡음에 가까운 교통차량진동 신호에 대한 탄성파 간섭법 기술의 효율성을 검증하기 위해 KIGAM 포항분원에서 1 m 간격의 무선 지오폰 51개 설치하여 현장 자료를 취득하였다(Fig. 1).

탄성파 간섭법 기술 적용을 위해 추출된 교통차량 진동기반 표면파를 기록한 수직 성분의 원시 자료를 Fig. 2(a)에 도시하였다. 샘플링 간격(sampling rate)은 0.5 ms이고, 기록 시간은 5 s이다. 본 현장 자료는 도로에서 차량의 무작위적(random)인

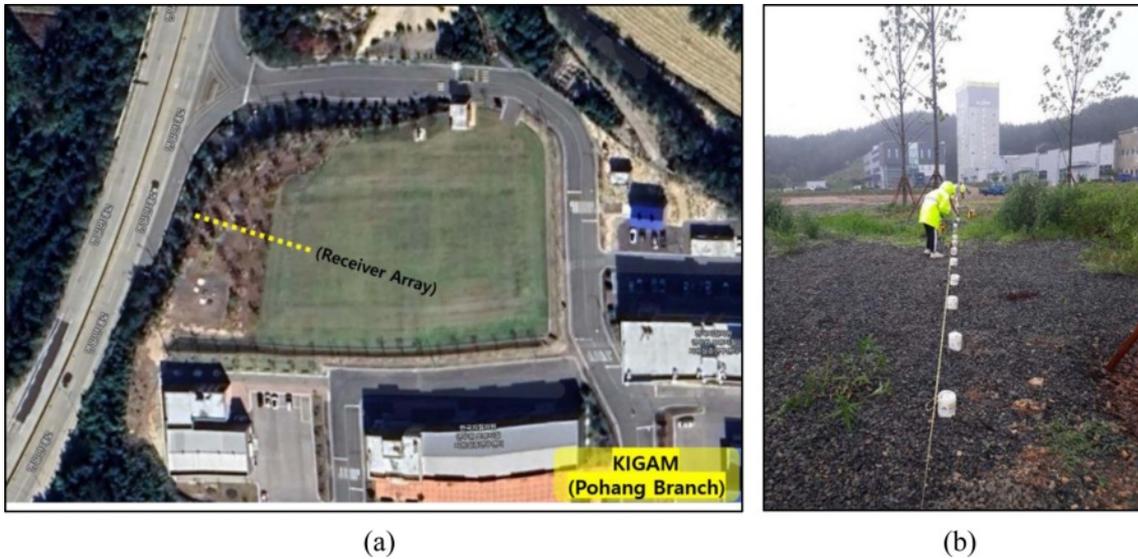


Fig. 1. (a) Survey area (KIGAM Pohang Branch) and (b) receiver displacement.

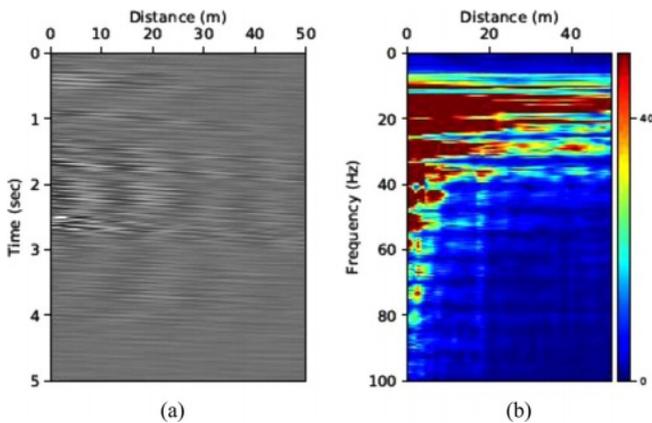


Fig. 2. (a) Raw data acquired from traffic noise and (b) their frequency spectrum.

운행으로 인해 표면파의 파동이 무작위적으로 기록되어 있다. Fig. 2(b)는 Fig. 2(a) 자료에 대한 주파수영역 스펙트럼을 도시한 것으로, 본 자료의 주파수 대역이 10~60 Hz 임을 확인할 수 있다.

먼저, 시간영역에서 탄성과 간섭법 기술을 적용하기 전 원시자료(Fig. 2a)의 특징을 더 잘 파악하기 위해서 0~1초 구간을 확대하여 도시하였다(Fig. 3a). 탄성과 간섭법 기술은 Fig. 3(a)의 자료가 아니라 5초 자료인 Fig. 2(a)에 적용하였다. 이후 언급될 탄성과 간섭법 기술 적용 후 결과들도 5초까지의 결과를 가지지만, 자세한 특징을 보여주기 위해 편의상 1초까지만 도시하였다. 원시자료에 대해 타우-피 변환을 수행한 자료는 Fig. 3(b)에 도시하였다. 점 송신원 자료에 가까운 자료일수록 타우-피 영역에서 에너지는 타우(Tau)가 0에 가까운 특정 P값에 집중된다. 그러나 교통차량 진동 자료는 무작위적 송신원 형태를 갖기에 Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 타우(Tau)가 0이

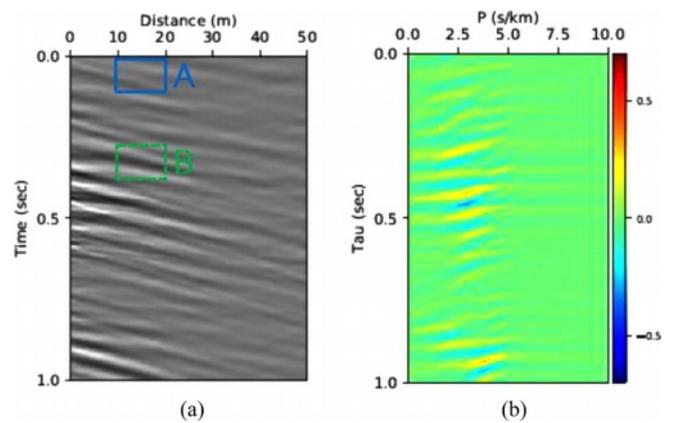


Fig. 3. (a) Raw data in Fig. 2(a) enlarged to 1s and (b) their tau-p transformation.

아닌 불특정 값들에 집중되어 있음을 확인할 수 있다.

잡음 수준의 교통차량진동 신호 (Fig. 2a)를 점 송신원 형태의 유의미한 신호로 변환하기 위해 앞서 기술한 두 가지 탄성과 간섭법 기법(식 (1)의 단순 상관기법 및 식 (3)의 정규화 상관기법)을 각각 적용 후 비교한다. 먼저, 시간영역 탄성과 간섭법 기술 중 식 (1)에 기술된 단순 상관 기법을 원시자료에 적용한 결과는 Fig. 4(a)에 도시하였다. 이 결과를 통해 원시자료(Fig. 3a)에 비해 0시간에서 파동이 시작되는 등 조금 더 점 송신원 형태의 자료로 변환되었음을 확인할 수 있다. 타우-피 변환된 자료(Fig. 4b)에서도 가장 큰 에너지가 타우값이 0 근처에 나타남을 확인하였다. 이를 통해 단순 상관 기법이 원시 자료를 어느 정도 점 송신원 형태의 자료로 변환시킬 수 있다. 하지만, 여전히 0초 이후 시간에도 에너지들이 반복되어 전파되는 양상을 보여 주기 때문에, 단순 상관 기법을 이용한 탄성과 간섭법 기술에는 많은 한계가 있음을 알 수 있다.

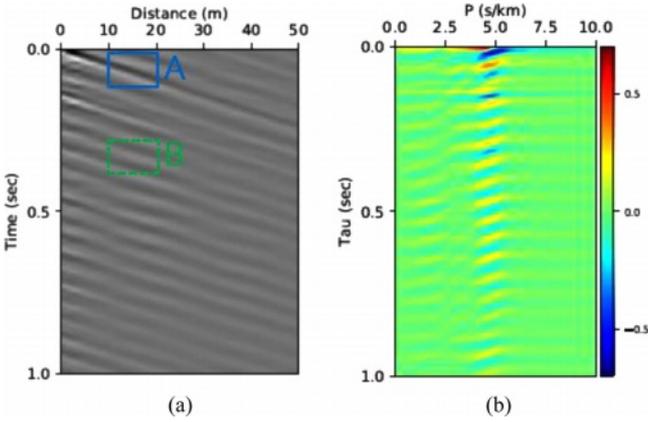


Fig. 4. (a) Data after applying the correlation technique and (b) their tau-p transformation.

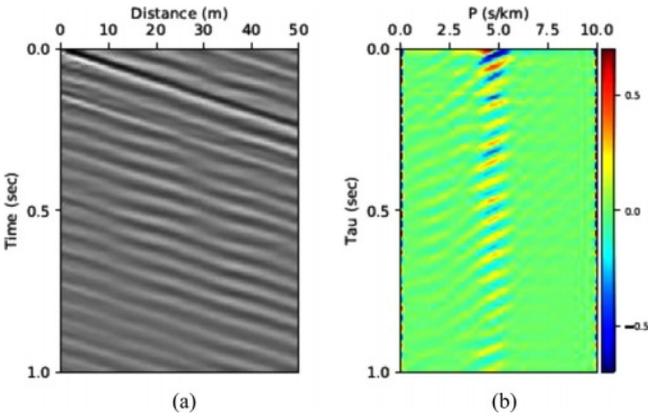


Fig. 5. (a) Data after applying the normalized correlation technique and (b) their tau-p transformation.

다음으로 식 (3)에 기술된 정규화 상관(normalized correlation) 기법을 원시자료에 적용하였고, 그 결과는 Fig. 5(a)에 도시하였다. 단순 상관 기법(Fig. 4a)에 비해 전체 수신기에서 자료의 진폭이 정규화 되었으나, 여전히 0초 이후 시간에도 상당히 큰 에너지의 파동들이 반복적으로 전파되는 양상을 보여준다.

주파수영역 탄성과 간섭법(interferometry)

본 연구에서는 가상공통송신원 모음을 도출하기 위한 기술 중 하나인 주파수영역 탄성과 간섭법 기술도 원시자료에 적용하고, 그 결과를 시간영역 탄성과 간섭법 기술의 결과와 비교하고자 한다. 주파수영역 상관 기반 탄성과 간섭법 기술(Schuster *et al.*, 2004; Snieder *et al.*, 2006)은 자료에 대해 시간 축으로 푸리에 변환(Fourier transform)을 수행한 후, 푸리에 변환된 기준 수신기 자료에 켈레 복소수를 취한 후 각각의 수신기 자료에 곱하고, 이후 역 푸리에 변환(inverse Fourier transform)을 취하여 시간영역 자료를 얻게 된다(식 (4)).

$$d_{fc}(x, t) = F^{-1} \left\{ F(d(x_r, t))^* F(d(x, t)) \right\} \quad (4)$$

여기서, F 는 시간축에 대한 푸리에 변환, F^{-1} 는 역 푸리에 변환, 그리고 *는 켈레 복소수(complex conjugate)를 나타낸다. 식 (4)를 통해서 얻어지는 탄성과 간섭법 기술은 이론적으로 식 (1)의 시간영역 상관 기반 탄성과 간섭법 기술과 동일하다.

주파수영역 상관 기반 탄성과 간섭법 기술에서 정규화를 통해 신호의 품질을 향상할 수 있다. 식 (4)의 분모를 각각의 진폭으로 나누어 주면, 식 (5)와 같은 교차결맞음 기반 탄성과 간섭법 기술(Nakata *et al.*, 2011)이 된다.

$$d_{coh}(x, t) = F^{-1} \left\{ \frac{F(d(x_r, t))^* F(d(x, t))}{|F(d(x_r, t))| |F(d(x, t))|} \right\} \quad (5)$$

식 (5)와 유사하게 푸리에 변환된 기준 트레이스 진폭의 제곱으로 나누어 주면, 식 (6)과 같이 곱풀기 기반 탄성과 간섭법 기술(Vasconcelos and Snieder, 2008)이 된다.

$$d_{dec}(x, t) = F^{-1} \left\{ \frac{F(d(x_r, t))^* F(d(x, t))}{|F(d(x_r, t))|^2} \right\} \quad (6)$$

시간영역과 달리 주파수영역에서는 상관, 교차결맞음, 그리고 곱풀기에 기반한 탄성과 간섭법 기술을 각각 적용하고, 그 결과들을 비교 분석할 수 있다. 주파수영역 상관을 이용한 탄성과 간섭법 기술(식 (4))을 원시 자료(Fig. 2a)에 적용하면 Fig. 6의 결과를 얻게 된다. 주파수영역에서 단순 상관 기반 탄성과 간섭법 기술을 적용한 가상공통송신원 모음 자료(Fig. 6a)와 타우-피 변환된 자료(Fig. 6b)는 시간영역 단순 상관 기법을 적용한 결과(Figs. 4a-b)와 유사한 형태로 도출되었다. 하지만, 0초 이후에 반복적으로 전파되는 파형의 형태를 줄이기 위한 효과적인 기법 적용이 필요하다.

식 (5)의 주파수영역 교차결맞음 기반 탄성과 간섭법 기술을 적용한 결과는 Fig. 7에 도시하였다. 주파수영역 상관 기법(Fig. 6)을 적용하였을 때보다 더 선명하게 점 송신원 형태의 파형 전파 형태를 보여주며(Fig. 7a), 타우-피 변환된 자료에서

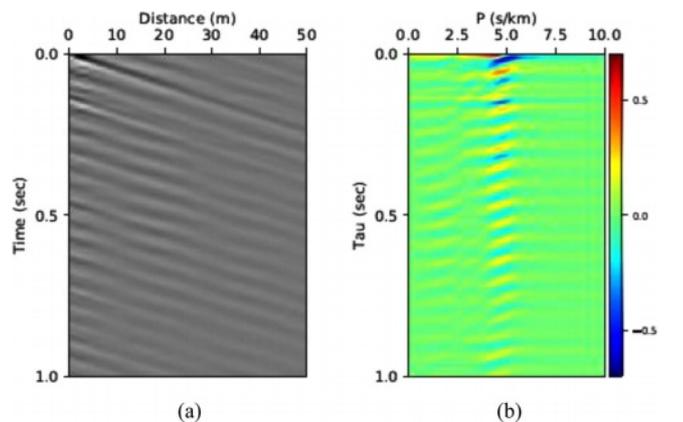


Fig. 6. (a) Data after applying the frequency-domain correlation technique and (b) their tau-p transformation.

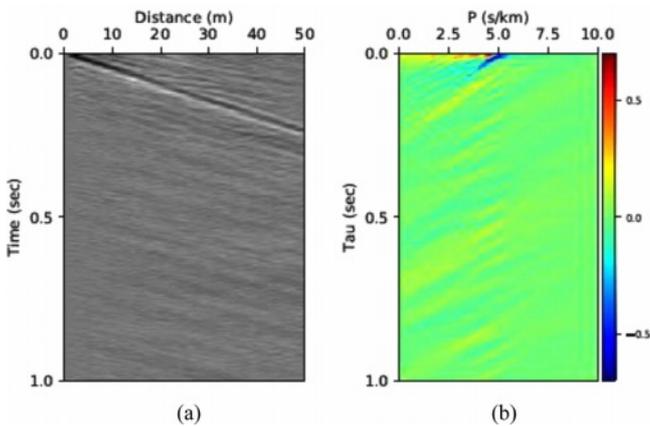


Fig. 7. (a) Data after applying the frequency-domain cross-coherence technique and (b) their tau-p transformation.

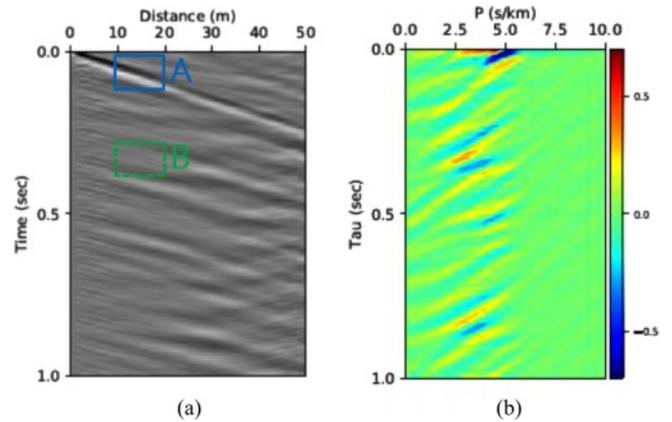


Fig. 9. (a) Data after applying the frequency-domain deconvolution technique and band-pass filter (10~60 Hz), and (b) their tau-p transformation.

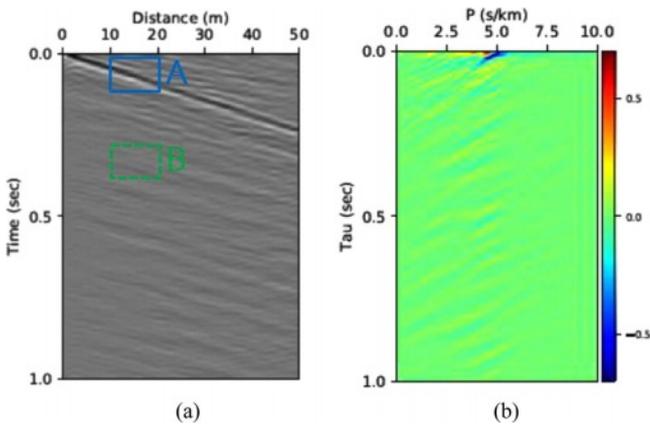


Fig. 8. (a) Data after applying the frequency-domain cross-coherence technique and band-pass filter (10~60 Hz), and (b) their tau-p transformation.

도 0초 근처에 에너지가 더욱 집중되어 나타난다(Fig. 7b). 그러나, 주파수영역 교차결맞음 기법을 사용할 경우 100 Hz 이상 고주파수 효과 역시 강조되어 고주파수 잡음이 생성된다(Fig. 7a). 고주파수 잡음 효과를 줄이기 위해서 교차결맞음 기법 적용 자료(Fig. 7a)에 10~60 Hz의 띠통과(band-pass) 필터를 적용하였다(Fig. 8). 띠통과 필터를 적용하였을 때 고주파수 잡음이 줄어들어 더욱 선명한 점 송신원 형태의 파형 자료로 변환되었음을 확인할 수 있다(Fig. 8a). 타우-피 변환된 자료(Fig. 8b)에서도 띠통과 필터를 적용하기 전에 비해 고주파수 잡음이 줄어 0초 근처에 더욱 에너지가 집중되었음을 확인할 수 있다.

다음으로, 식 (6)의 주파수영역 곱풀기 기반 탄성과 간섭법 기술을 적용한 결과를 Fig. 9에 도시하였다. Fig. 9는 고주파수 잡음을 줄이기 위해 10~60 Hz의 띠통과 필터를 적용한 결과이다. 이 결과는 고주파수 잡음이 적고 선명한 점 송신원 형태의 파형 전파 형태를 보여주고 있다(Fig. 9a). 하지만, 주파수영역 교차결맞음 기법에 비해 상당한 진폭의 유사 잡음

(coherent noise)이 형성되어 있으며(Fig. 9a), 타우-피 변환된 자료에서도 유사 잡음에 의해 0초 이외의 시간대에서 에너지가 형성되고 있다(Fig. 9b).

주파수영역 탄성과 간섭법 중 분모에서 진폭으로 나누어주는 기법의 경우 위상이 차지하는 역할이 상대적으로 커지기에 탄성과 간섭법에 쓰이는 트레이스들의 진폭 차이가 큰 경우에도 가상공통송신원 모음에서 선명한 파형을 확인할 수 있다. 그 중 곱풀기 기반 간섭법의 경우 기준자료의 진폭만으로 두 번 나누어 주기 때문에 진폭 영향이 완전히 사라지지 않는 반면, 교차결맞음 기반 간섭법의 경우 기준자료와 측정자료의 진폭으로 각각 나누어 주기 때문에 진폭 영향이 완전히 사라지고 위상 성분만이 남게 된다. 이와 같은 이유로 교차결맞음 간섭법이 가장 선명한 파형을 보여주는 결과를 도출하게 된다.

평균 RMS 비율 비교

본 연구에서는 교통차량 진동 취득 자료가 탄성과 간섭법 기술 적용을 통해 점 송신원 형태로 변화되는 정도를 정량적으로 분석하기 위해, 대표적인 결과에 대한 평균 RMS비를 계산 후 비교한다. 먼저, 원시 자료(Fig. 3a)에서 A 영역(사각형 실선)에 대한 RMS(root-mean-square) 값을 식 (7)을 이용하여 계산하고, 이를 RMS1이라 정의한다. 또한, B 영역(사각형 점선)에 대해 식 (7)을 이용하여 계산된 RMS 값을 RMS2라고 정의한다.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}} \quad (7)$$

여기서, d_i 는 i -번째 데이터의 진폭이고, n 은 전체 데이터 개수이다. 최종 평균 RMS비는 $RMS2/RMS1$ 으로 정의한다.

본 연구에서는 원시자료(Fig. 3a), 시간영역 상관 적용 자료(Fig. 4a), 주파수영역 교차결맞음(Fig. 8a) 적용 자료, 그리고

Table 1. RMS ratio of the proposed interferometry methods.

Method	Raw data	Time-domain correlation	Frequency-domain cross-coherence	Frequency-domain deconvolution
RMS ratio (%)	242.9	49.9	16.1	31.5

주파수영역 곱풀기 적용 자료(Fig. 9a)에 대해서 평균 RMS 비를 계산하였고, 그 값을 Table 1에 나타내었다. 원시자료의 경우 평균 RMS 비가 매우 높지만, 탄성파 간섭법 기술을 적용하여 점 송신원 형태로 변환될 때 평균 RMS 비가 크게 낮아졌다. 특히, 주파수영역 교차결맞음 기법을 적용하였을 때 평균 RMS 비가 가장 낮아져, 신호대잡음비(signal-to-noise ratio)가 크게 향상됨을 확인할 수 있다.

타우-피(Tau-P) 영역 분산 값 비교

본 연구에서는 타우-피 영역 자료의 집중도를 알아보기 위해 타우-피 영역 자료를 그 크기(length 또는 norm)으로 정규화해준 후 분산 값을 계산하였다. 원시자료(Fig. 3b), 시간영역 상관 적용 자료(Fig. 4b), 주파수영역 교차결맞음(Fig. 8b), 그리고 주파수영역 곱풀기 적용 자료(Fig. 9b)에 대해 계산한 분산 값을 Table 2에 나타내었다. 원시자료의 경우 타우-피 영역의 분산 값이 가장 낮고, 탄성파 간섭법 기술을 적용하였을 때 더 높은 값들이 계산되었다. 평균 RMS 비율 결과와 유사하게, 주파수영역 교차결맞음 기법을 적용하였을 때 타우-피 영역의 분산 값이 가장 높게 나왔다.

따라서, 평균 RMS 비율 및 타우-피 영역 분산 값 결과 비교를 통해, 잡음 형태의 교통차량 진동 신호에 대해 주파수영역 교차결맞음 기법 기반 탄성파 간섭법 기술을 적용하는 것이 최적의 가상공통송신원 모음 자료를 도출함을 확인할 수 있다.

교통차량 진동에 대한 수진기 배열 최적 설계

교통차량이 운행하는 도로나 방향에 대해서 다양한 수진기 배열이 가능하다. 본 연구에서는 다양한 수진기 배열을 이용하여 취득된 교통차량 진동 자료를 주파수-파수 영역에서 분석하여 최적의 수진기 배열을 도출하고자 한다.

배경잡음 자료와 교통차량 진동 자료의 주파수-파수 영역 비교

주파수-파수 영역에서 나타나는 원점 기원 직선의 기울기는 파동의 속도를 나타낸다. 파동의 속도가 타당한지를 판단하여 수진기 배열의 타당성을 결정할 수 있다. 주파수-파수 영역의

자료는 공통송신원 모음 자료를 시간축과 공간축으로 두 번 푸리에 변환하여 얻을 수 있다(식 8).

$$d_{jk}(k, f) = F_x \{ F_t \{ d(x, t) \} \} \quad (8)$$

여기서, F_x 와 F_t 는 각각 거리와 시간에 대한 푸리에 변환을 나타내며, k 와 f 는 각각 파수와 주파수를 나타낸다. 주파수-파수 영역에서 원점 기원 직선의 기울기는 속도(v)를 나타내며, 식 (9)와 같이 표현된다.

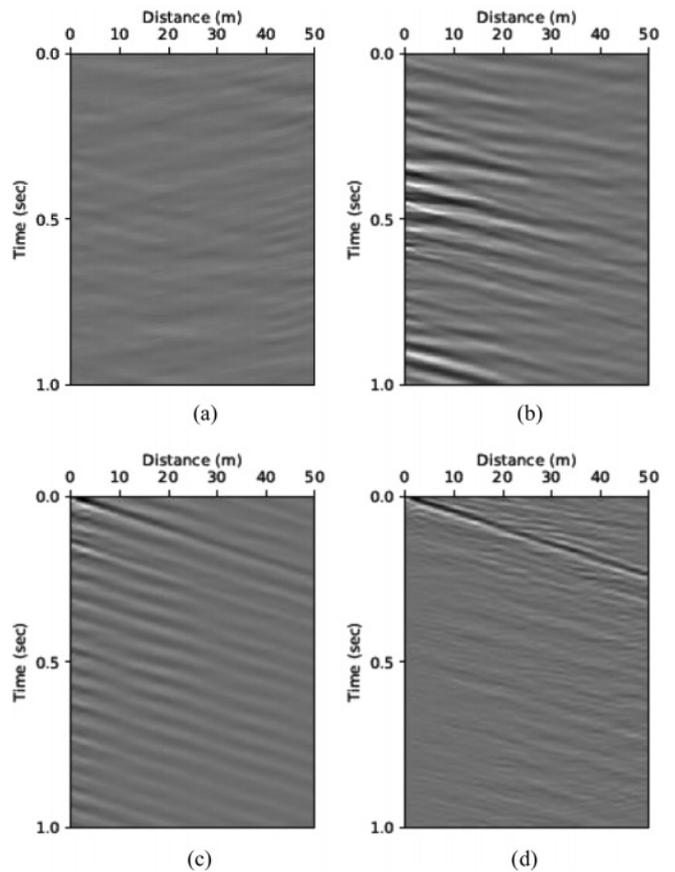


Fig. 10. (a) Background noise data, (b) raw traffic noise data, (c) data after applying the time-domain correlation technique, and (d) data after applying the frequency-domain cross-coherence technique.

Table 2. Tau-P domain dispersion value of the proposed interferometry methods.

Method	Raw data	Time-domain correlation	Frequency-domain cross-coherence	Frequency-domain deconvolution
Dispersion value	6.417E-07	4.045E-06	4.088E-06	3.295E-06

$$v = \frac{f}{k} \tag{9}$$

배경잡음 자료와 교통차량 진동 자료를 주파수-파수 영역에서 비교하여 교통차량 진동에 의한 일정 에너지 파동의 전파를 측정할 수 있는지 여부를 판단한다. 먼저, 차량이 다니지 않을 때 측정된 자료를 배경잡음 자료로 정의하였고, 이에 해당하는 신호를 추출한다. Fig. 10에 배경잡음 자료(Fig. 10a), 교통차량 진동 원시 자료(Fig. 10b), 시간영역 상관 기법(Fig. 10c), 그리고 주파수 영역 교차결맞음 기법(Fig. 10d)을 적용한 자료를 도시하였다. 자료는 5초까지 기록된 자료로서 탄성파 간섭법 기술과 주파수-파수 영역 변환을 위해서 5초까지 자료를 이용하였으며, Fig. 10에서는 자료의 특성을 더 잘 파악하

기 위해서 0~1초까지의 자료를 확대하여 도시하였다. 배경잡음 자료에는 파동의 전파 양상이 보이지 않는 반면(Fig. 10a), 그 외 교통차량진동 원시자료와 탄성파 간섭법 기술을 적용한 자료에는 특정 에너지의 파동이 전파되는 양상을 볼 수 있다 (Figs. 10b-d).

Fig. 10의 자료에 대해 주파수-파수 영역에서 파동 전파 양상을 분석한다. Fig. 10의 각각의 파동장에 식 (8)과 같이 두 번의 푸리에 변환을 통해 각각의 주파수-파수 영역 자료를 도출한다(Fig. 11).

주파수-파수 영역에서 배경잡음 자료는 특정한 패턴을 보여 주지 않는 반면(Fig. 11a), 교통차량 진동 측정 자료의 경우 주파수-파수 영역에서 1, 3 사분면에서 일정한 속도의 기울기를 가지는 패턴을 보여준다(Figs. 11b-d). 특히, 주파수 영역 교차결맞음 기법을 적용한 자료의 경우, 주파수-파수 영역에서 매우 선명한 직선 형태의 패턴을 1, 3 사분면에서 볼 수 있다 (Fig. 11d). 따라서, 주파수-파수 영역 분석을 통해서 무선 수신기를 이용한 탐사에서 교통차량 진동 에너지에 기반한 파동이 효과적으로 기록되었음을 확인할 수 있다.

다양한 수신기 배열별 교통차량 진동 자료의 주파수-파수 영역 비교

본 연구에서는 다양한 수신기 배열에서 취득한 교통차량 진동 자료들을 주파수-파수 영역에서 비교 분석하여 최적의 수신기 배열을 도출하고자 한다. Fig. 12는 교통차량이 운행하는 도로에 대해 수직, 수평, 사선 방향으로 2m 간격으로 설치한 수신기 배열들을 보여준다. 4가지 배열의 수신기 자료에서 동일한 시간대에 얻은 원시자료를 Fig. 13에 도시하였다. Fig. 13은 전체 5초 자료 중 0~1초 기록만 도시한 것으로, 이 시간대에는 차량이 한 방향(Fig. 12에서 남쪽에서 북쪽 방향)으로만 이동하였다. 차량이 이동하며 발생하는 파는 평면파의 형태 (Fig. 12에서 남서쪽에서 북동쪽 방향으로 전파하는 평면파)이기 때문에 Line 1, 2, 3(Figs. 13a-c)의 경우 원점에서 거리에 따라 파가 전파하는 양상이지만, Line 4의 경우 수신기 배열이 평면파의 파선에 가까운 형태가 되어 Fig. 13(d)와 같은 양상

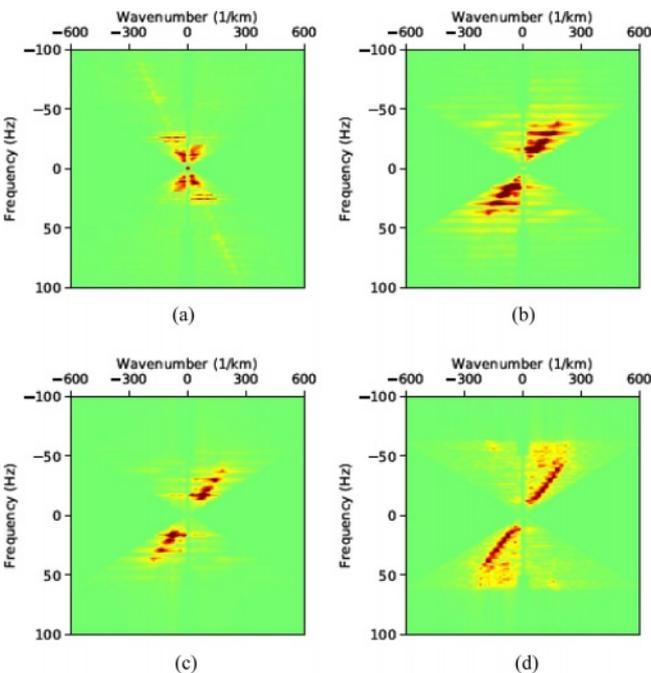


Fig. 11. Corresponding spectra of the data shown in Fig. 10 in the F-K domain.

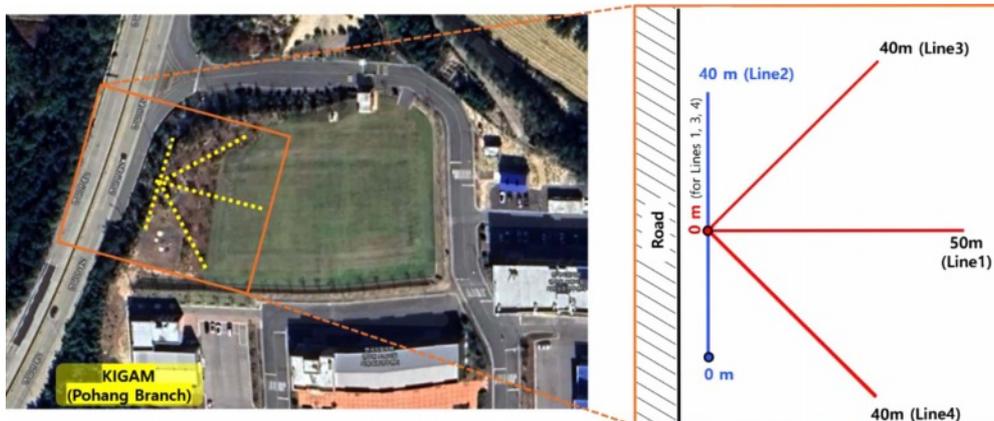


Fig. 12. Schematic diagram of various receiver arrays for traffic noise acquisition.

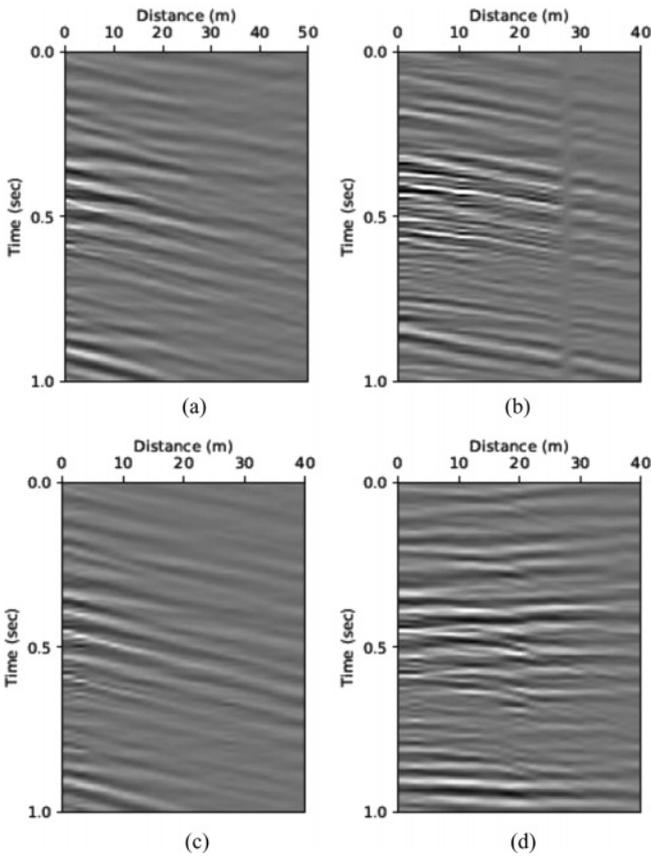


Fig. 13. Raw data acquired from (a) Line 1, (b) Line 2, (c) Line 3, and (d) Line 4.

이 나타난다. Line 2(Fig. 13b)의 28m 지점은 탐사 시 수진기가 미작동하여 신호가 기록되지 않은 null 트레이스(trace)에 해당한다. Fig. 13의 원시자료들의 비교를 통해서 배열의 특징을 분석하기 어렵다.

실제 간섭법 적용을 위해 5초의 원시자료에 주파수영역 교차결맞음 기법을 적용한 결과는 Fig. 14에 도시하였다. Line 1 배열의 경우 일정한 속도로 전파되는 선명한 파동장을 확인 가능하다(Fig. 14a). Line 3과 Line 4의 배열의 경우 일정한 속도로 전파되는 파동장이 보이지만 동시에 반대 방향으로 운행되는 교통차량으로 인해 간섭되는 현상이 나타난다(Fig. 14c, d). 반면, Line 2의 경우 서로 반대 방향으로 운행되는 교통차량으로 인한 파동장의 속도 위상이 반대가 되어, 탄성파 간섭법 기술을 적용하였을 때 제대로 된 파동장의 양상을 보여주지 못한다(Fig. 14b).

탄성파 간섭법 기술을 적용한 자료의 주파수-파수 영역 양상은 Fig. 15에 도시하였다. Line 1 배열의 경우 약 202 m/s의 속도를 갖는 선명한 직선의 형태를 보여준다(Fig. 15a). Line 3 배열의 경우 약 289 m/s의 속도의 패턴을 보여주었으나, Line 1 배열에 비해 집중도가 낮게 나타났다(Fig. 15c). Line 4 배열의 경우 약 162 m/s 속도의 패턴을 보여주었고, 다른 속도의 패턴도 함께 나타났다. 이는 반대 방향으로 운행하는 차량에

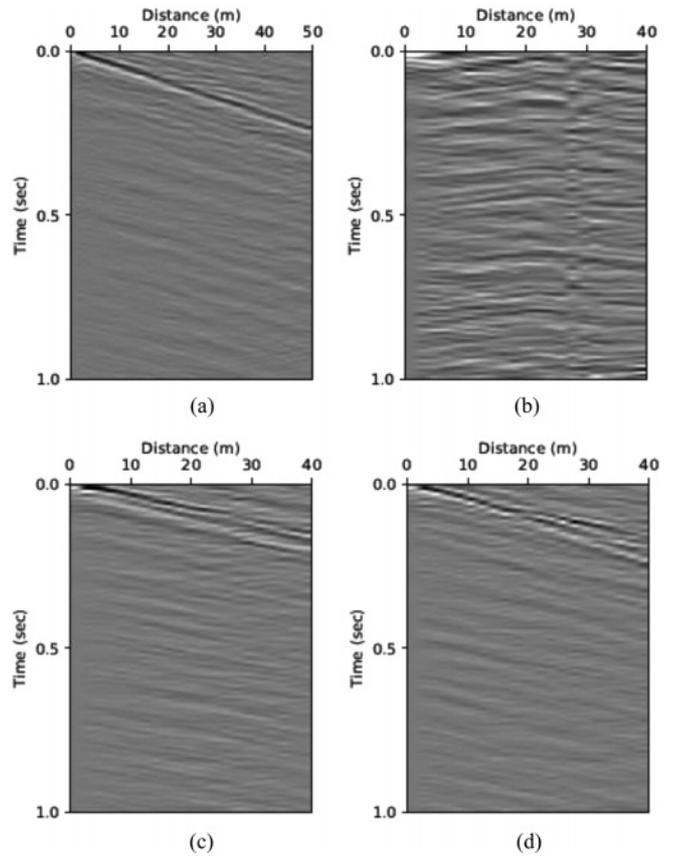


Fig. 14. Corresponding results of the data shown in Fig. 13 after applying the frequency-domain cross-coherence technique and band-pass filter (10~60 Hz).

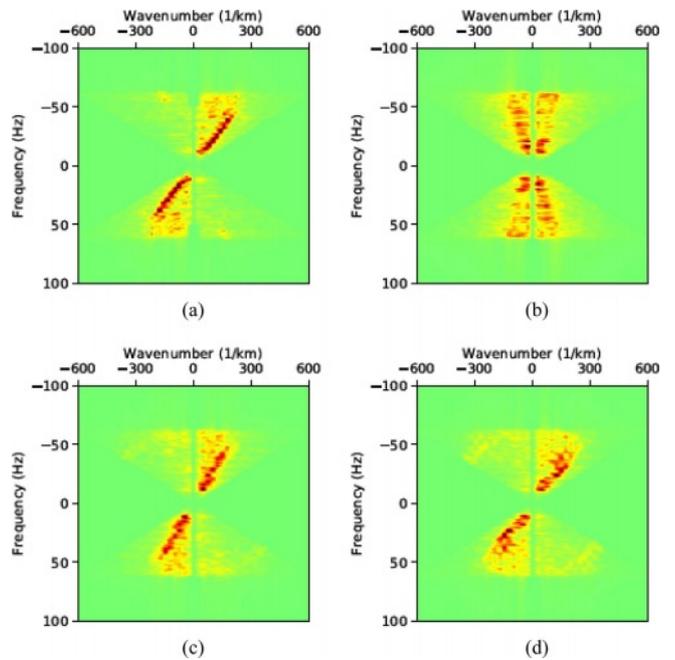


Fig. 15. Corresponding spectra of the data shown in Fig. 14 in the F-K domain.

의한 파동장의 간섭 효과에 의한 것이다(Fig. 15d). Line 2 배열의 경우 특정 속도를 지정할 수 없다(Fig. 15b). 탄성과 간섭법 기술이 적용된 자료와 주파수-파수 영역 분석을 통해서 Line 1 배열(도로에 수직)이 교통차량 진동 기반 파동을 기록하고 취득하는데 최적의 배열임을 확인하였다.

결론

본 연구에서는 교통차량 진동 자료에 탄성과 간섭법 기술을 적용하여 점 송신원 형태의 가상공통송신원모음 자료를 제작한다. 탄성과 간섭법 기술 중 단순 상관 기법을 시간영역이나 주파수영역에서 적용한 경우, 타우-피 변환된 결과에서 0초 이후의 시간에도 에너지들이 반복되어 전파되는 양상을 보여준다. 시간영역에서 정규화 상관(normalized correlation) 기법을 적용하더라도, 각 수진기의 상대적 진폭은 정규화가 되지만 여전히 파형이 반복되어 나타난다. 주파수영역 교차결맞음 기법을 적용 시 점 송신원 형태에 가까우며 반복적 파형이 줄어드는 가상공통송신원모음을 얻을 수 있고, 타우-피 변환된 자료에서도 0초 근처에 에너지가 집중되어 나타난다. 또한, 고주파수 잡음을 제거하기 위해 10~60 Hz 띠통과 필터를 적용하면, 더욱 향상된 품질의 자료를 도출할 수 있다. 주파수영역 곱셈기법을 사용할 경우 점 송신원 형태에 상당히 가까운 자료를 얻을 수 있지만, 상당한 진폭의 유사 잡음(coherent noise)이 발생되어 신호가 왜곡되는 현상이 나타난다. 따라서, 잡음 형태의 교통차량 진동 자료로부터 점 송신원 형태의 자료를 생성하기 위한 탄성과 간섭법 기술 중 주파수영역 교차결맞음 기법을 적용한 후 띠통과 필터를 적용하였을 때, 가장 향상된 품질을 가지는 최적의 가상공통송신원 모음을 제작할 수 있다. 또한, 교통차량진동 자료를 주파수-파수 영역에서 분석함으로써, 현장 탐사에서 이용한 무선수진기로 유의미한 교통차량 진동 기반 파동장을 취득할 수 있음을 확인하였다. 교통 도로에 대한 다양한 배열의 수진기 자료에 대한 비교 분석을 통해서, 도로에 수직인 수진기 배열이 교통차량 진동 자료취득에 최적의 배열임을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 “교통차량 진동을 이용한 도심 지질탐사 및 상시 모니터링 기술 개발(23-3806)” 과제 및 “3D 해저 정밀영상화를 위한 복합 탄성과 탐사 및 실규모 고분해능 처리기술 개발(23-3312)” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

Curtis, A., Gerstoft, P., Sato, H., Snieder, R., and Wapenaar, K., 2006, Seismic interferometry turning noise into signal, *The Leading Edge*, **25**(9), 1082-1092. <https://doi.org/10.1190/1.2349814>

- Dou, S., Lindsey, N., Wagner, A. M., Daley, T. M., Freifeld, B., Robertson, M., Peterson, J., Ulrich, C., Martin, E. R., and Ajo-Franklin, J. B., 2017, Distributed acoustic sensing for seismic monitoring of the near surface: A traffic-noise interferometry case study, *Scientific Reports*, **7**, 11620, doi: [10.1038/s41598-017-11986-4](https://doi.org/10.1038/s41598-017-11986-4)
- Nakata, N., Snieder, R., Tsuji, T., Larner, K., and Matsuoka, T., 2011, Shear wave imaging from traffic noise using seismic interferometry by cross-coherence, *Geophysics*, **76**(6), SA97-SA106. <https://doi.org/10.1190/geo2010-0188.1>
- Nazarian, S., Stokoe, K. H., and Hudson, W. R., 1983, Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thickness of pavement systems, *Transport. Res. Record*, **930**, 38-45. <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1983/930/930-006.pdf>
- Park, C. B., Miller, R. D., and Xia, J., 1999, Multichannel analysis of surface waves, *Geophysics*, **64**(3), 800-808. <https://www.kgs.ku.edu/software/surfseis/Publications/ParkEtAl1999.pdf>
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., and Ivanov, J., 2007, Multichannel analysis of surface waves (MASW)-active and passive methods, *The Leading Edge*, **26**(1), 60-64. <https://doi.org/10.1190/1.2431832>
- Riahi, N., and Gerstoft, P., 2015, The seismic traffic footprint: Tracking trains, aircraft, and cars seismically, *Geophys. Res. Lett.*, **42**(8), 2674-2681. <https://doi.org/10.1002/2015GL063558>
- Schuster, G. T., Yu, J., Sheng, J., and Rickett, J., 2004, Interferometric/daylight seismic imaging, *Geophysical Journal International*, **157**(2), 838-852. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02251.x>
- Snieder, R., Wapenaar, K., and Larner, K., 2006, Spurious multiples in seismic interferometry of primaries, *Geophysics*, **71**(4), S111-S124. <https://research.tudelft.nl/en/publications/spurious-multiples-in-seismic-interferometry-of-primaries>
- Stokoe, K. H., Wright, S. G., Bay, J. A., and Roesset, J. M., 1994, Characterization of geotechnical sites by SASW method, in Woods, R. D., Ed., *Geophysical Characterization of Sites*, 15-25. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=6402538>
- Vasconcelos, I., and Snieder, R., 2008, Interferometry by deconvolution: Part 1 – Theory for acoustic waves and numerical examples, *Geophysics*, **73**(3), S115-S128. <https://doi.org/10.1190/1.2904554>
- Wapenaar, K., and Fokkema, J., 2006, Green's function representations for seismic interferometry, *Geophysics*, **71**(4), S133-S146. <https://doi.org/10.1190/1.2213955>
- Xia, J., Miller, R. D., and Park, C. B., 1999, Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves, *Geophysics*, **64**(3), 691-700. <https://doi.org/10.1190/1.1444578>
- Zhang, Y., Li, Y. E., Zhang, H., and Ku, T., 2019, Near-surface site investigation by seismic interferometry using urban traffic noise in Singapore, *Geophysics*, **84**(2), B169-B180. <https://doi.org/10.1190/geo2017-0798.1>