Journal of the Korean Society of Civil Engineers
Vol. 33, No. 4: 1509~1521, July 2013
DOI: http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2013.33.4.1509

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2287-934X (Online)
www.kscejournal.or.kr

Geotechnical Engineering **지반공학**

탄성파시험의 이동성 확보를 위한 마이크로폰 센서의 활용

조성호* · 부카리** · 노리나***
Sung-Ho Joh*, Bukhari Ramli**, Norinah Abd Rahman***

Utilization of a Microphone to Acquire Mobility in Seismic Testing

ABSTRACT

Social demand for the stability of structures lead to the development of the technology to accomplish it. The non-destructive seismic technique, which is able to assess structural integrity of infrastructures, belongs to this category. Seismic technique is focused on the measurement of seismic velocity propagating through the material, and has to utilize sensors coupled to material surface, which does not allow the testing to be performed on the fly. In this paper, a general vocal microphone, which works as a non-contact sensor, was adopted to facilitate seismic testing with mobility and efficiency improved. The target of using microphones was oriented toward quality assessment of compacted subgrade, stiffness evaluation and health monitoring of concrete structures. Experimental parametric study and field applications were performed to investigate reliability and efficiency of microphones. Finally, the optimal test configuration of microphones was suggested for resonance tests and surface-wave tests.

Key words : NDT, Seismic tests, Resonance test, Surface-wave test, Microphone, Non-contact sensor

초 록

구조물의 안정성에 대한 사회적 요구는 이를 충족시키기 위한 기술발전으로 이어지게 되었고, 지각구조를 이해하기 위해 개발된 탄성파기법도 구조물의 건전성을 평가하는 비파괴 기법으로 자리매김하게 되었다. 비파괴 탄성파기법의 핵심은 측정대상 매질의 탄성파 속도를 측정하는 것으로, 탄성파의 전파를 측정하는 센서를 필수적으로 사용하여야 한다. 기존의 탄성파기법은 접촉식 센서를 사용하기 때문에 이동중 연속시험이 불가능한 문제점이 있었고, 탄성파 시험의 효율성이 실용적 요구조건에 부합하지 못하는 한계성이 있었다. 본 연구에서는 비접촉식 센서의 일종인 보급형 마이크로폰을 센서로 활용하여 기존 탄성파 시험의 문제점을 극복하고자 하는 연구를 수행하였다. 다짐지반의 실시간 다짐품질 확인, 콘크리트 구조물의 재료강성 및 내부결함의 확인 등을 위한 표면파 시험과 공진시험 등을 마이크로폰 활용대상으로 설정하였고, 마이크로폰센서의 영향인자 연구, 실구조물에 대한 현장시험 등을 수행하였다. 이를 통하여 마이크로폰 센서의 신뢰성과 효율성을 확인할 수 있었으며, 최적의 마이크로폰 활용방안을 제안하였다.

검색어 : 비파괴시험, 탄성파시험, 공진시험, 표면파시험, 마이크로폰, 비접촉식 센서

1. 서 론

1980년대 이후 탄성파의 전파속도는 토목 구조물의 설계 및 시공에 있어서 중요한 공학적 물성으로 인식되어 왔고, 최근에는 내진해석, 콘크리트 구조물의 비파괴 건전도 평가, 도로노상 및 철도노반의 다짐관리 등에 있어서 중요한 인자로 자리매김하고 있다. 지난 수십년 동안 지반이나 구조물에서의 탄성파 전파속도의 측정, 탄성파속도 활용의 타당성 검증 등에 많은 연구가 진행되어 왔고, 또한 성공적이었다

* 정회원 · 교신저자 · 중앙대학교 건설환경공학과 교수 (**Corresponding Author** · Chung-Ang University · shjoh@cau.ac.kr)
** 중앙대학교 토목공학과 · 석사과정 (bramli99@gmail.com)
*** 정회원 · 중앙대학교 토목공학과 · 박사과정 (norinah05@gmail.com)

Received February 20 2013, **Revised** May 21 2013, **Accepted** June 11 2013

Copyright ⓒ 2013 by the Korean Society of Civil Engineers
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.

(Joh, et al., 1994, 2008; Rix and Stokoe, 1989; Bueno, et al., 1999; Terrel et al., 2003). 이제 구조물 비파괴 평가, 토사의 다짐관리 등에 탄성파속도의 본격적인 활용을 위하여 탄성파기법 자체의 연구이외에 실용성 증진을 위한 대책이 필요한 시점이 되었다. 현재까지의 탄성파 측정은 탄성파 측정을 위한 센서를 시험대상 매질에 고정하여 시험을 수행하는 정적인 방법이었지만, 효율적이고 실용적인 향후의 탄성파 측정은 시험 및 해석의 자동화, 이동 중 시험 등의 기능을 구현하는 이동식 시험방법이어야 한다. 이는 다짐지반 및 콘크리트 구조물의 전반적인 건전도 상태를 평가하기 위해서는 시험체의 특정 지점에 대해서 제한적으로 평가를 수행하기 보다는 시험체 전체에 대하여 광범위하게 평가를 수행해야 하기 때문이다. 결과적으로 탄성파 시험이 수행되어야 하는 측점의 개수가 수백 또는 수천 지점에 이를 수 있고, 건전도 평가시험의 특성상 시험 및 결과보고가 신속하게 진행되어야 하는 시간제한적인 상황에 놓일 수도 있기 때문이다. 한편, 이동식 탄성파 측정이 가능하기 위해서는 탄성파를 감지하는 센서가 비접촉식이거나 또는 센서가 장착된 시스템이 이동식이어야 한다. 비접촉식 센서의 경우, 레이저 센서, 마이크로폰 센서 등을 활용할 수 있으며, 주로 콘크리트 구조물에의 적용을 위해 연구가 진행되고 있는 상황이다(Ryden, et al. 2006; Zhu, 2005; Zhu and Popovics, 2005, 2006). 후자의 경우 대표적인 사례로는 RDD (Rolling Dynamic Deflectometer; Bay, 1995)가 있으며, 주로 콘크리트 및 아스팔트 포장의 건전도 평가에 활용되고 있다. 본 연구에서도 다짐지반 및 콘크리트 구조체에 대한 평가시험에 있어서 실용성과 효율성을 확보할 수 있는 방안을 확보하는 연구를 수행하였다. 즉 신속한 이동식 시험을 위해서 필수적인 비접촉식 센서로서 보급형 음성용 마이크로폰을 탄성파 측정의 센서로 채택하고, 탄성파 시험에서 마이크로폰 센서의 성능을 최적화 할 수 있는 영향인자 연구를 실험적으로 수행하였다. 또한 다짐 지반 및 실제 콘크리트 구조물에 적용하여 최적의 시험조건을 확인하였는데, 다짐 지반의 경우는 표면파 시험에 대하여, 콘크리트 구조물의 경우는 공진시험과 표면파 시험 등에 대하여 집중적으로 연구하였다.

2. 이론적 배경과 선행연구

공기와 접하고 있는 고체매질의 표면에서 레일레이파가 어떻게 전파하는지에 대한 연구는 Ewing (1957)에 의해 체계적으로 수행된 바가 있다. Ewing에 따르면 공기와 고체매질의 밀도차가 매우 크기 때문에 공기의 영향은 무시할만하지만, 고체매질이 공기 대신 유체와 접하고 있을 때는 두 개의 반무한체에 대한 파동전파를 고려하여야 할 정도로 그 영향이 중요하다고 하였다. 이렇게 액체와 고체 매질이 접하고 있는 물리적 여건에서는 누출 레일레이파

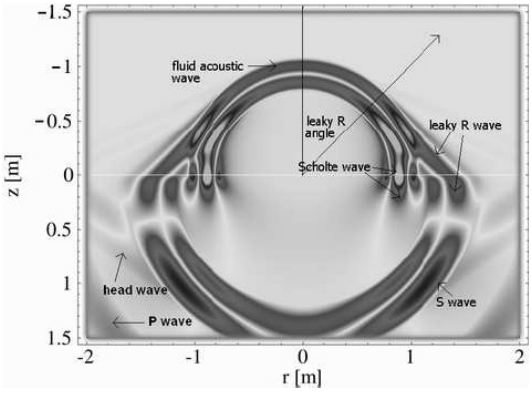

Fig. 1. Image of pressure propagation in fluid and stress-wave propagation in solid (Zhu, 2005)

(leaky Rayleigh waves)가 발생하게 되는데, 이에 관해서는 Viktorov (1967)가 심층적으로 연구를 수행한 바 있다. 한편 가장 최근에는 유체와 고체가 접하고 있는 반무한체에 있어서 순간충격에너지가 가해지는 경우에 대한 Zhu (2005)의 연구가 있었고, Fig. 1에서 누출 레일레이파의 파동을 시각적으로 확인할 수 있다.

한편, Larson 등(2005)은 지뢰탐지 시스템을 개발하면서 마이크로폰의 효용성을 검토하였는데, 마이크로폰이 비교적 사용하기 간편한 센서이며 비용도 상대적으로 저렴하여 장점이 많으나, 순간충격에너지에 의해 발생된 레일레이파를 측정하기 위해서는 마이크로폰을 지표면 가까이 설치할 필요가 있다고 했다. 또한 Nils와 Ryden (2009)은 이동식 마이크로폰 배열을 이용한 비접촉식 표면파 시험을 수행하여 포장층의 물성 평가를 하는 연구를 수행하기도 했다. 특히, Zu와 Popovics (2005)는 마이크로폰 센서에 대한 그들의 경험을 충격반향시험(Sansalone and Carino, 1986)과 SASW 시험(Stokoe et al., 1994) 등에 적용하여 그 적용성을 확인하는 시도를 하기도 하였으나, 시험대상 매질에 따른 최적의 시험구성을 제시하지는 않았다.

본 연구에서는 기존의 연구결과와 본 연구진의 탄성파 시험경험을 병합하여, 시험대상 매질에 따른 최적의 탄성파 시험구성을 제시하는 연구를 별도로 수행한 결과를 본 논문에 제시하였다.

3. 마이크로폰 센서의 영향인자 연구

마이크로폰이 탄성파 시험용 센서로 효율적으로 활용되기 위해서 어떠한 설정이 가장 효율적인지 결정하기 위한 영향인자 연구를 실험적으로 수행하였다. 본 연구에서 고려한 영향인자로는 발진원과 마이크로폰 간의 간격, 마이크로폰의 설치 높이, 마이크로폰 센서에 효과적인 발진원의 종류, 마이크로폰의 차음(遮音) 여부 등을 포함하였다.

마이크로폰 시험설정의 영향인자연구를 위하여 충격반향시험과 표면파 시험 등의 탄성파 시험을 두께 30cm의 콘크리트 슬래브 표면에서 수행하였으며, 콘크리트 슬래브의 평균 P-파 속도는 3,225m/sec이었다. 본 시험에 활용된 마이크로폰은 일반적으로 음성신호에 사용되는 단일지향성 콘덴서형식이며, 직경 3cm, 길이 6.9cm의 제원을 가지고 있으며, 40~12,000Hz사이에서 일정한 주파수 특성을 가지고 있는 음성용 마이크로폰이었다.

3.1 발진원 이격거리의 영향

가속도계나 속도계와 같은 부착식 센서를 사용할 때와 달리 마이크로폰을 센서로 사용할 때는 발진원이 마이크로폰에서 충분히 떨어져 있을 필요가 있다. 이는 발진원이 시험체를 타격할 때 발생하는 충격음이 공기 매질을 타고 마이크로폰에 큰 신호로 전달되기 때문에, 콘크리트 매질을 타고 전해오는 누출 레일레이파의 신호보다 상대적으로 크기 때문이다. 콘크리트 매질에 대한 탄성파 시험의 경우 가장 적합한 발진원 이격거리를 결정하기 위하여, 5, 7, 10, 15, 20, 25, 30cm 등의 이격거리에 대한 충격반향 시험을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 2에 도시하였다.

Fig. 2에는 가속도계와 마이크로폰으로 동일 지점에서 측정한 신호를 비교하여 도시하였다. 파워스펙트럼으로 변환된 탄성파 신호를 살펴보면, 기본적으로 약 5,000Hz 이상의 주파수 대역에서는 지배주파수, 탄성파 파동에너지의 주파수 특성 등의 측면에서 마이크로폰 신호의 패턴이 가속도계 신호의 패턴과 비교적 유사한 것을 확인할 수 있다. 그러나 약 5,0000Hz 이하의 주파수 대역에서는 가속도계 신호와 마이크로폰 신호가 현저히 다른 패턴으로 비교되고 있다. 즉 5,000Hz 이하의 저주파 대역에서는 공기매질을 타고 온 해머의 타격음이 지배적으로 감지되어 누출 마이크로폰 신호가 거의 관찰되지 않고 있다.

Fig. 2의 비교를 통해 확인할 수 있는 사실은 마이크로폰을 센서로 사용하고 해머충격을 발진원으로 사용할 때, 발진원의 신호성분이 특정 주파수(Fig. 2의 경우는 5,000Hz) 이하에 분포한다는 것이다. 따라서 충격반향 시험에서 마이크로폰을 센서로 사용하기 위해서는 사용 해머 신호의 주파수대역이 시험체의 예상 공진주파수보다 작은 해머를 선택하는 것이 중요하다. 또한 발진원은 일정한 거리 이내에(Fig. 2의 경우는 약 5~10cm) 위치하는 것이 양호한 결과를 제시하기 때문에, 이 또한 해머의 특성 파악에서 파악해야 하는 영향인자 중의 하나이다.

3.2 마이크로폰 설치 높이의 영향

해머의 타격으로 발생된 탄성파는 매질을 따라 전파되다가 시험체 표면의 진동이 공기의 진동으로 변화되어 마이크로폰으로 전달된다. 이 때 마이크로폰의 높이에 따라 마이크로폰으로 전달되는 탄성파 에너지 성분이 다를 것으로 판단되어, 탄성파 진동의 측정에 가장 효과적인 마이크로폰 위치를 결정하기 위한 시험을 수행하였다.

마이크로폰의 최적 높이를 결정하기 위한 시험은 시험체의 공진특성을 결정하기 위한 탄성파의 공진시험이었다. 마이크로폰은 일정 높이의 플라스틱 원통 위에 설치하였으며, 플라스틱 원통을 이용하여 해머충격으로 발생된 직접 전달되는 음파를 최소화하도록 함으로써, 매질의 표면에서 마이크로폰까지 전파되는 탄성파에너지의 전파특성만 평가하고자 하였다. 시험에 사용된 마이크로폰

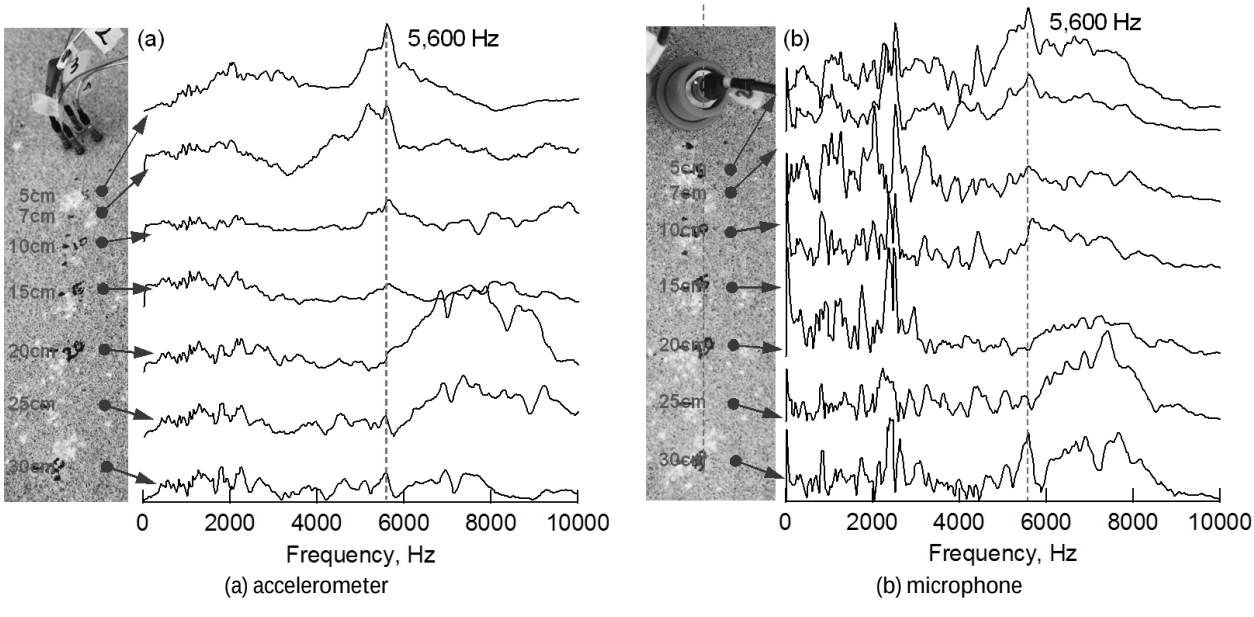

Fig. 2. Effect of source offset on the quality of microphone signals

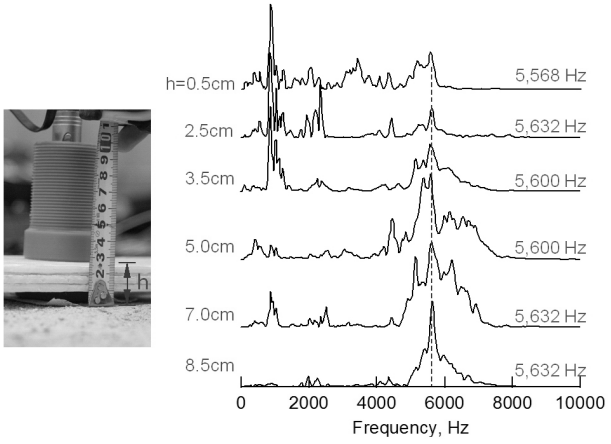

Fig. 3. Effect of microphone elevation on the quality of signals

의 높이는 0.5, 2.5, 3.5, 5, 7, 8.5cm 등 모두 6개이었으며, 각 높이에 대한 마이크로폰 신호를 Fig. 3에 비교하였다.

Fig. 3에 도시한 것처럼, 마이크로폰 신호는 파워스펙트럼으로 변환되어 비교하였다. Fig. 2의 실험에서 확인하였던 5,600Hz의 공진주파수가 Fig. 3에서도 명확하게 관찰되고 있다. 특히 마이크로폰의 높이가 커질수록 또는 마이크로폰이 시험체 표면에서 높아질수록, 마이크로폰으로 측정한 공진주파수는 명확하게 측정되고 있다. 이는 마이크로폰의 높이가 높아질수록, 단일지향성의 마이크로폰이 공기진동으로 변환된 탄성파의 수직성분을 더 예민하게 감지하였기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 3의 결과를 참조할 때, 공진시험의 경우 가장 적합한 마이크로폰의 높이는 3.5~10cm인 것으로 파악되며, 3.5cm 이하의 높이는 바람직하지 않은 것으로 평가되었다.

한편, 매질을 따라 전파되는 표면파의 속도를 측정하는 표면파 시험의 경우, 공기진동으로 전달된 표면파의 크기보다는 마이크로폰 센서에 도착하는 에너지의 상대속도를 측정하는 것이다. 따라서 마이크로폰의 위치를 모두 일정하게만 유지한다면, 마이크로폰의 위치는 측정되는 표면파 속도에 영향을 주지 않기 때문에, 표면파 시험에 대한 마이크로폰 위치의 영향 평가는 별도로 수행하지 않았다.

3.3 발진원 종류의 영향

마이크로폰 센서를 이용한 탄성파의 측정에서 가장 효과적인 발진원을 결정하기 위한 비교시험을 수행하였다. 물론 특정 해머와 시험대상체간의 충격으로 발생되는 탄성파의 주파수 범위는 해머의 재질, 해머의 무게 등의 인자에 따라 현저히 달라지게 된다. 발진원 종류에 대한 영향은 콘크리트 구조물에 대한 시험으로 국한하였는데, 이는 토사지반의 경우 발진원 종류의 영향이 미미하지만 콘크리트 재료의 경우 발진원 종류에 따라 비교적 넓은 주파수 범위의 음파를 발생시키기 때문이다. 본 연구에서 고려한 발진원의 무게와 해머재질은 모두 네가지로 그 시험결과를 그림 4에 도시하였다.

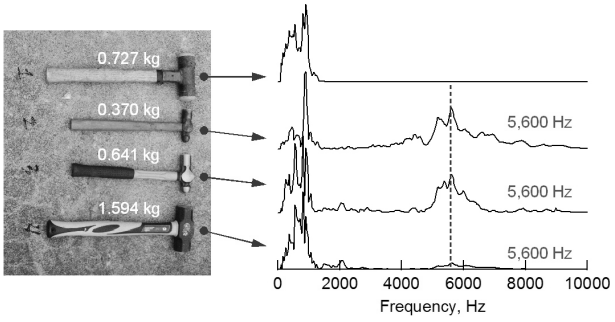

Fig. 4. Effect of source type on the quality of microphone signals

비교시험 결과 5,600Hz의 공진 주파수 측정이라는 측면에서 가장 양호한 해머는 Fig. 4에 도시된 바와 같이 0.37, 0.64kg의 금속재질 해머이었다. 이로부터 이해할 수 있는 것은 공기입자를 강하게 진동시킬 수 있는 큰 에너지의 충격 발진원보다는 에너지는 작더라도 측정목표가 되는 주파수 성분을 발생시킬 수 있는 발진원이 더 바람직한 것을 알 수 있다. 즉, 0.37kg이라는 작은 해머에 의해서 발생되는 충격 에너지가 작을 것이라는 우려에도 불구하고, 공기입자의 진동을 통해 측정된 신호에는 필요한 고주파의 성분이 포함되어 있음을 확인할 수 있었다.

3.4 마이크로폰의 차음 효과

마이크로폰은 공기압을 전기신호로 변환시키는 장치로서, 시험체 매질입자의 진동으로 인한 공기압만을 측정하기 위해서는 공기매질을 통해 전파되는 환경소음, 직접 전달 음파 등을 차단하는 것이 바람직하다. 본 절에서는 마이크로폰 주변 공간의 차음으로 인하여 얼마나 탄성파신호에 대한 마이크로폰 신호 품질이 개선되는지를 확인해 보고자 하였다. Fig. 5에 차음을 한 경우와 그렇지 않은 경우에 대한 신호를 비교하고 있다. 마이크로폰의 차음은 단순히 플라스틱 병, 즉 한 장의 플라스틱 판을 이용하여 마이크로폰을 덮어두는 정도의 최소한의 장치를 이용하였는데, 이 정도의

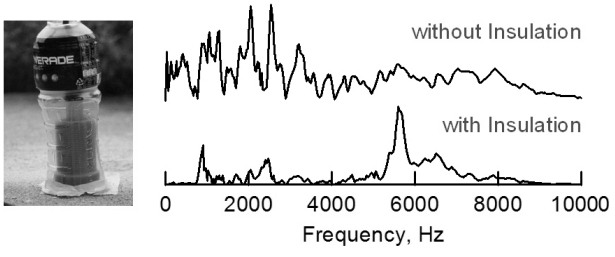

Fig. 5. Effect of microphone insulation on the quality of signals

장치만으로도 환경소음, 직접 전달 음파를 충분히 소거할 수 있었다. 한편 Fig. 3과 4의 실험에 있어서도 마이크로폰을 플라스틱 원통 위에 올려놓는 정도의 차음을 하였음에도 신호품질이 실제적으로 개선된 사실을 참고하면, 실제 마이크로폰을 센서로 활용할 때, 어떤 형태이든지 마이크로폰의 차음은 양질의 탄성파 신호를 획득하는데 매우 중요한 역할을 하게 된다는 사실을 고려하여야 할 것이다.

4. 거보역변환에 의한 환경소음, 직접전달 음파의 소거

마이크로폰을 탄성파 측정센서로 활용하여 양질의 탄성파 신호를 획득하기 위해서는 환경소음과 직접 전달 음파를 최소화하거나 소거하는 것이 매우 중요하며, 이 사실은 3장의 영향인자 평가를 위한 실험에서 확인할 수 있었다. 그런데 환경소음과 직접 전달 음파를 최소화하거나 소거하기 위해서는 이러한 하드웨어적 접근 방법이외에 소프트웨어적인 방법을 활용할 수 있다. 이는 거보역변환(Inverse Gabor Transformation; Norinah, 2011)을 이용하는 것으로, 거보역변환을 사용하여 시간-주파수 영역에서 환경소음과 직접전달 음파를 필터링하여 소거하는 것이다.

Norinah (2011)가 제안한 거보역변환은 시간영역의 탄성파 신호를 시간-주파수 영역으로 변환한 다음, 시험대상체를 따라 전파된 탄성파 성분을 찾고, 이를 제외한 나머지 에너지성분을 필터링하여 소거한 후, 다시 시간영역으로 역변환하는 기법이다. 이와 같은 거보역변환을 이용하여 실제 마이크로폰 신호를 처리한 사례를 Fig. 6에 도시하였다. Fig. 6(a)은 마이크로폰으로 측정한 원신호의 선형스펙트럼이고, 이를 거보변환하여 시간-주파수 영역으로 도시한 거보스펙트럼이 Fig. 6(b), 이 거보스펙트럼에서 환경소음, 직접전달 음파 등을 필터링한 결과가 Fig. 6(c), 필터링된 거보스펙트럼을 다시 시간영역으로 역변환하여 선형스펙트럼을 구한 최종결과가 Fig. 6(d)이다. Fig. 6(a)와 Fig. 6(d)를 비교하여 보면, Fig. 6(a)는 환경소음, 직접전달 음파 성분이 더 크게 나타나서 실제 탄성파 성분은 찾아볼 수 없다. 그러나 Fig. 6(d)에는 분명하게 탄성파 성분에 대한 지배주파수를 명확하게 확인할 수 있다. 따라서 Fig. 6의 사례를 통해 확인할 수 있듯이, 하드웨어적으로 직접전달

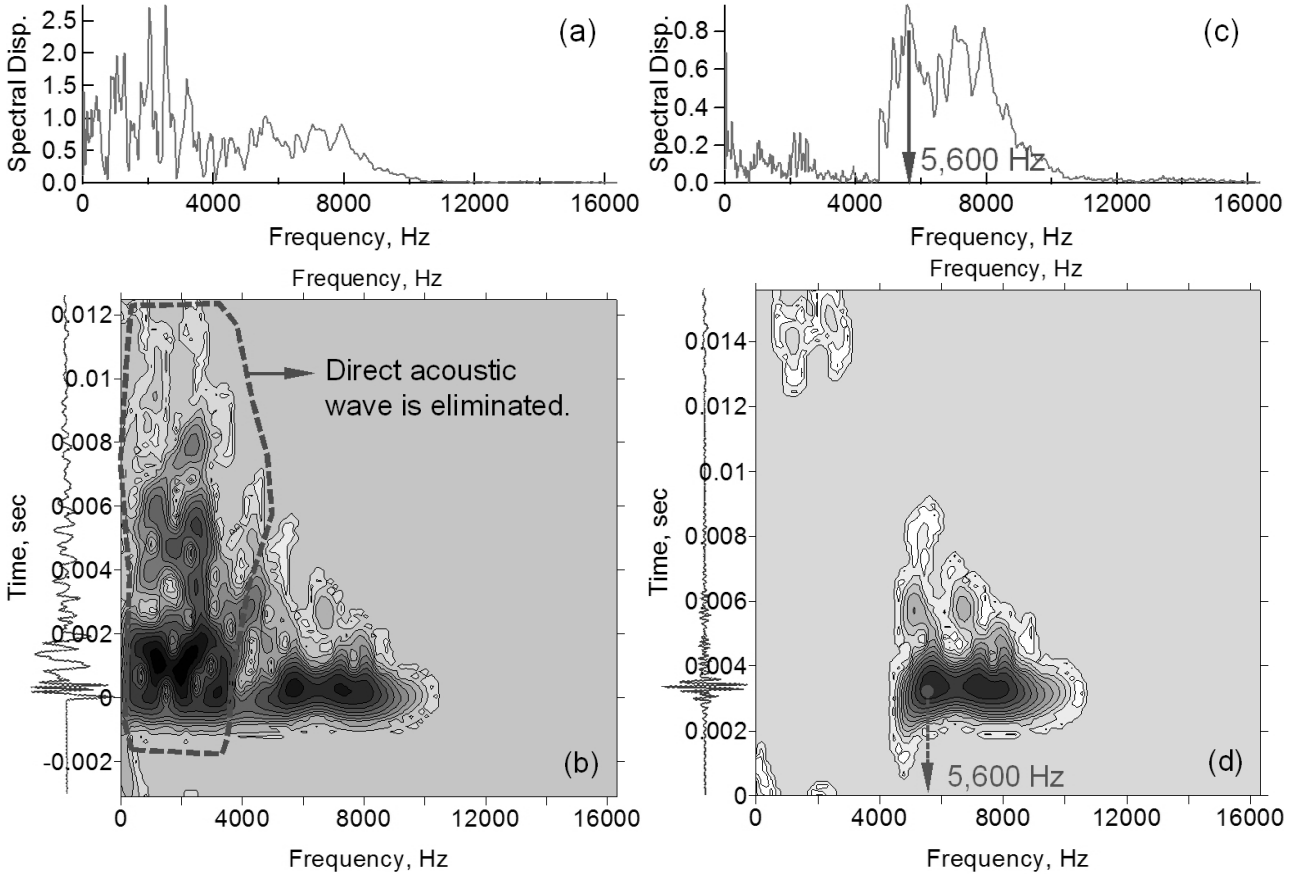

Fig. 6. Inverse Gabor transformation technique to filter out undesired acoustic wave group in microphone signals: (a) and (b) before filtering, (c) and (d) after filtering

음파의 영향을 제거할 수 없을 때, 거보역변환에 의하여 환경소음, 직접전달 음파 등을 소거함으로써 마이크로폰 신호의 품질을 개선하는 방법은 신호개선의 실제적 대안으로 충분히 효과적이라고 할 수 있다.

한편 거보스펙트럼에서 시험대상체를 통해 전파되는 탄성파 성분에 대한 파군(wave group)을 인식하는 것은 다소 난해한 문제일 수 있지만, 탄성파 전파에 대한 기지 정보를 활용하면 대부분의 경우 성공적으로 탄성파 파군을 인식할 수 있다. 그 탄성파 전파에 대한 기지정보의 예로는 탄성파 전파에 소요되는 시간, 탄성파 파동과 음파의 예상 주파수 대역, 파군의 형태 등이 될 수 있다. 예를 들어, 탄성파 전파시간은 개략적으로 파악되는 매질의 탄성파 속도(관련 문헌에서 확인가능)를 이용하여 추정할 수 있다. 그리고 탄성파 파동은 광역의 주파수 범위에 퍼져 분포하게 되지만, 음파의 경우는 특정 주파수 범위에 집중하는 형태를 띠게 된다.

5. 탄성파 측정을 위한 마이크로폰 센서의 현장적용

5.1 콘크리트 슬래브에 대한 공진시험

앞 장에서는 마이크로폰의 탄성파 측정센서로서의 가능성을 실험적 영향인자 연구를 통하여 확인하였고, 또한 본 장에서는 마이크로폰 센서의 검증을 위해서 실규모 콘크리트 슬래브에 대한 현장실험을 수행하였다. 연구에서 사용한 시험체는 길이 10m, 폭 9m, 두께 30cm의 콘크리트 슬래브이었으며, 정밀시공을 통하여 슬래브의 두께를 일정하게 유지하도록 하였다. 정밀시공을 위하여 레벨 측량을 통한 슬래브거치 노반의 동일고도 확보, 측면 거푸집과 미장도구 등을 이용한 슬래브 상부표면의 동일 높이 유지 등의 방법을 이용하였다.

콘트리트 슬래브는 그 하부에 그라우팅재를 주입하여 슬래브의 높이를 조정하는 목적으로 활용되는 연구용 시험체로 슬래브 바닥에는 다짐된 토사가 지지하고 있다. 본 연구에서는 콘크리트 슬래브의 두께 및 콘크리트 재료의 강성을 평가할 목적으로 충격반향 시험 즉 공진시험을 수행하였다. 일부 제한된 개소보다는 시험체 전체를 평가할 목적으로 횡방향과 종방향 1m 간격으로 모두 72개의 절점을 시험위치로 설정하였다. 마이크로폰 센서의 신뢰성 및 성능을 검증할 목적으로 가속도계와 마이크로폰을 사용하는 두 세트의 시험을 수행하였다. 시험에 사용된 가속도계는 PCB 사의 PCB-353B65를 사용하였고, 마이크로폰은 오디오테크니카사의 보급형 단일지향 콘덴서 마이크인 ES947을 사용하였다. 또한 동적신호 측정과 실시간 주파수분석을 위해서 National Instruments 사의 동적신호측정용 NI-4474 카드가 장착된 휴대용 컴퓨터를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 마이크로폰은 40~10kHz 대역에서 일정한 주파수응답과 7.9mV/Pa의 예민도의 특성을 갖고 있다. 공진시험에서 사용한 마이크로폰의 시험설정은 3장에서 확인한 결과를 준용하여 적용하였습니다. 그리고 탄성파의 공진현상을 발생시키기 위해 사용한 발진원으로는 0.64kg 무게의 금속재질 해머를 사용하였다.

콘크리트 슬래브에서 마이크로폰 센서로 획득한 대표적인 신호를 가속도계 신호와 비교하여 Fig. 7에 비교하였다. Fig. 7(a)의 가속도계 신호에서 측정한 공진주파수는 4,170Hz, 마이크로폰 센서로 측정한 공진주파수는 4,061Hz로 실험오차를 고려한다면 거의 동일한 주파수로 측정되었다고 할 수 있다. 한편 Fig. 7(c)에는 종방향 시험측선 Y선상의 8개 측점에서 측정한 공진주파수를 가속도계와 마이크로폰 센서에 대해 비교하고 있다. 가속도계로 측정한 공진주파수는 4,000~5,000Hz 사이로 분산된 결과를 보이고 있지

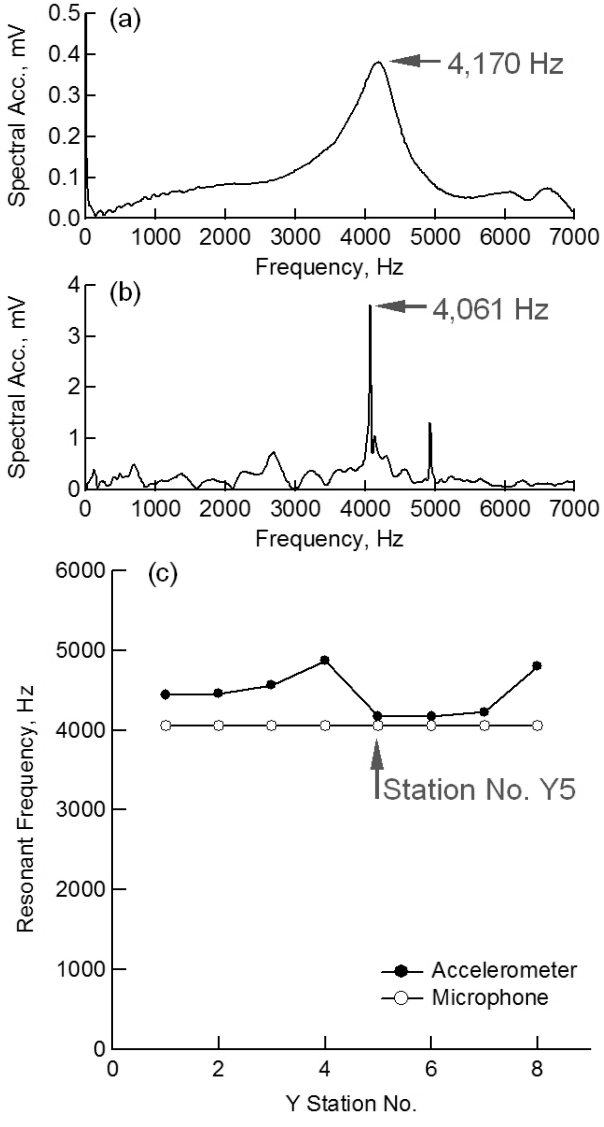

Fig. 7. Comparison of resonant frequencies at grid point (X4,Y5): (a) accelerometer, (b) microphone, (c) resonant frequencies at measurement line X4

만, 마이크로폰 센서의 경우는 4,060Hz로 거의 동일한 결과를 보이고 있다. 또한 전체 72개 측점에서 획득 한 공진주파수와 이로부터 추정된 슬래브 두께를 2-D 컨투어로 도시한 결과(Fig. 8)를 살펴보면, Fig. 7(c)에서 확인된 경향을 재차 확인할 수 있다. 즉, 가속도계는 측점별로 다소의 편차를 보이고 있지만, 마이크로폰 센서로 측정한 결과는 거의 균질한 값으로 분포하고 있다.

동일한 배합과 재료의 레미콘 트럭으로 동일한 시점에서 타설한 콘크리트 슬래브 타설과정을 고려해 보면 콘크리트 슬래브의 매질은 재료의 균질성이 있어야 한다. 또한 슬래브가 타설된 지반이 충분한 다짐으로 준비된 기초지반이라는 사실을 고려할 때에 콘크리트 슬래브 두께도 어느 정도 일정하게 관리가 되어있다고 할 수 있을 것이다. 이러한 특성을 반영해 보면, 공진시험에서 측정되는 공진주파수나 추정된 슬래브의 두께가 모두 일정하여야 할 것이라는 것은 충분히 예측할 수 있다. 따라서 이와 같은 측면에서 공진시험을 위한 센서로서 공진시험에서 마이크로폰 센서(ES947)도 충분히 신뢰성이 있는 결과를 도출할 수 있음을 확인할 수 있다.

5.2 콘크리트 사방댐에서의 표면파 시험

탄성파를 이용한 공진시험에서 센서로서의 마이크로폰의 성능을 확인하였듯이, 콘크리트 구조물에서 표면파시험을 위한 센서로서의 성능을 평가하여 보았다. 본 연구에서는 강원도 원통리에 시공되어 있는 콘크리트 사방댐에 있어서 댐마루 표층 매질의 품질을 평가하

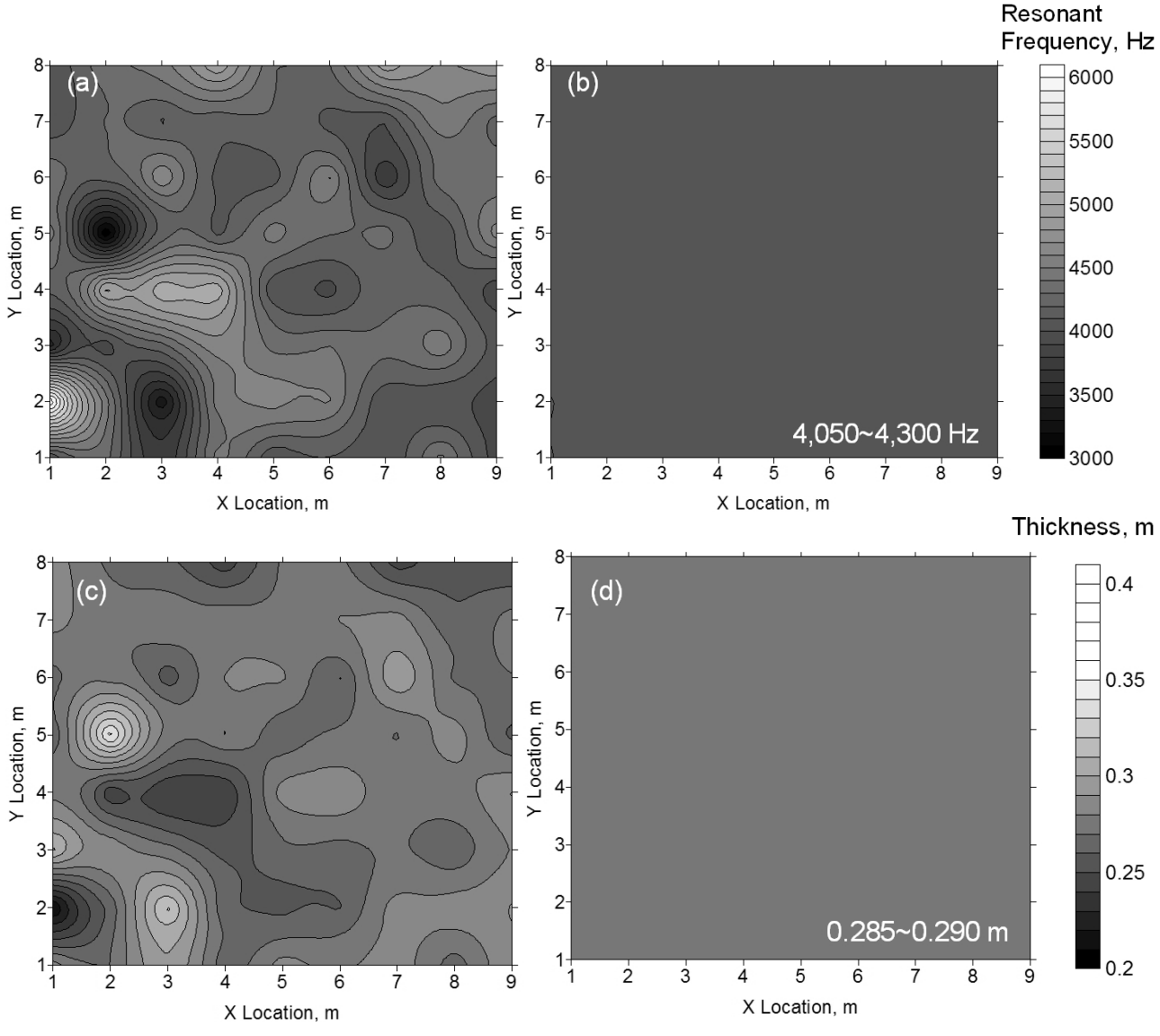

Fig. 8. Resonant frequency and thickness contours of the concrete track model determined by resonance frequencies using: (a) and (c) accelerometer, (b) and (d) microphone

기 위하여 표면파 시험을 수행하였는데, 가속도계와 마이크로폰을 동시에 사용하여 그 결과를 비교하였다. 비교시험이 수행된 콘크리트 사방댐은 시공에 있어서 일정한 배합과 골재를 이용하여 콘크리트를 타설하였을 가능성이 높기에 최소한 댐마루의 매질은 균질하게 조성되었을 가능성이 높다고 예상되는 상황이다. 한편 표면파 시험 댐마루의 표층매질을 조사하기 위한 표면파 시험에서 센서간격은 가속도계의 경우 30cm, 마이크로폰의 경우 20cm로 설정하였다. 발진원과 첫 번째 센서의 간격은 센서간의 간격과 동일하게 설정하였다. 그리고 탄성파의 공진현상을 발생시키기 위해 사용한 발진원으로는 0.64kg 무게의 금속재질 해머를 사용하였다. 공진시험에서 사용한 마이크로폰의 시험설정은 3장에서 확인한 결과를 준용하여 적용하였습니다. 표면파 시험에서 가속도계와 마이크로폰의 센서간격을 다르게 설정한 것은 사전연구를 통한 경험으로부터 획득한 정보를 본 연구에 준용하였기 때문이었다.

Fig. 9의 위상각 스펙트럼 신호를 살펴볼 때, 마이크로폰은 32~35kHz까지의 주파수 대역까지 양호한 성능을 보이고 있고, 위상각 스펙트럼으로부터 계산한 표면파 위상속도도 신뢰성 있게 결정되어짐을 알 수 있다. 여기서 마이크로폰의 권장 주파수대역이 20kHz임에도 불구하고 더 높은 주파수대역까지 양호한 성능을 보인 것은 두 개의 마이크로폰의 특성이 동일하여 각 마이크로폰으로 측정한 위상각의 차이가 신뢰성 있게 결정될 수 있었기 때문이다. 위상각 차이를 측정하는 측면에 있어서 가속도계와 마이크로폰의 성능을 비교하였을 때, 마이크로폰으로 측정한 위상차 스펙트럼이 일정한 패턴으로 측정되고 있어서 균질한 매질에 대한 대표적인 경향을 보여준다고 할 수 있다. 또한 표면파 위상속도 경향을 살펴보면, 마이크로폰으로 측정한 경우 전체 주파수대역에서 2,200m/sec로 거의 일정하게 측정된 반면, 가속도계의 경우는 2,000~2,500m/sec의 범위에서 기복이 있는 것으로 나타났다. 이러한 특성은 내부에

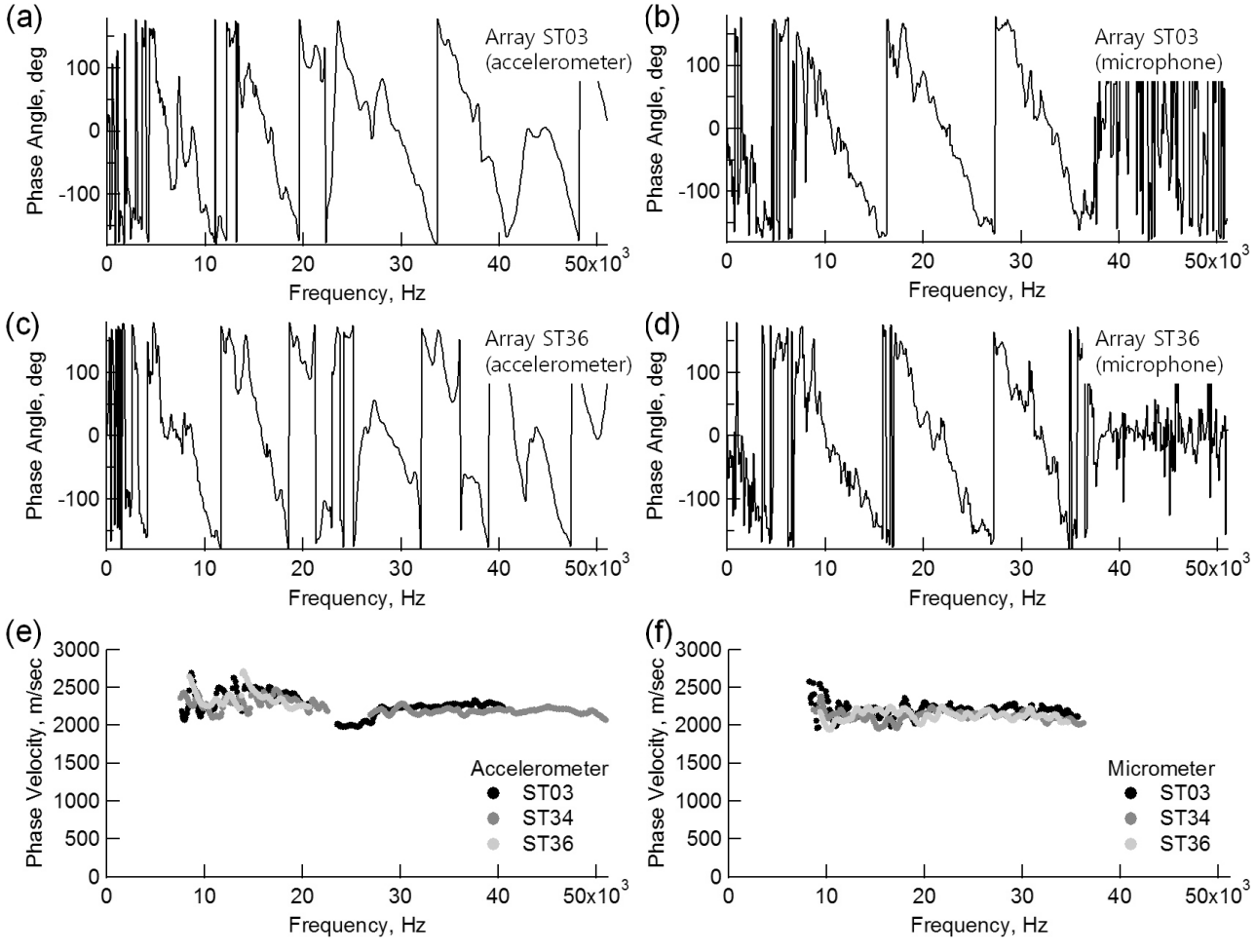

Fig. 9. Comparison of surface-wave measurements using accelerometers and microphones at an erosion control dam: (a) and (c) phase-difference spectra by accelerometers, (b) and (d) phase-difference spectra microphones, (e) and (f) phase-velocity dispersion curves by accelerometers, and microphone

공극이 존재하는 콘크리트 구조체에 대하여 유한요소해석으로 모사를 했을 때에도 동일하게 관찰되는 현상이다(Bukhari, 2013). 표면에 밀착되어 있는 가속도계의 경우, 내부의 이상체로 인하여 탄성파의 복잡한 굴절 반사 현상에 의한 더 많이 교란된 신호를 측정하게 되지만, 콘크리트 표면에서 떨어져 있는 마이크로폰의 경우 구조체 내부의 이상체로부터 기인하는 복잡한 굴절반사 교란으로부터 비교적 자유롭기 때문이라고 할 수 있다. 즉 지반이나 콘크리트 표면에 밀착되어 있는 가속도계로는 P파, S파 등에 의해 교란된 표면파를 측정하지만, 마이크로폰은 현저하게 줄어든 P파의 간섭(공기중 P파 속도가 1/10 수준으로 감소함), S파의 배제(공기매질에서 S파는 전파되지 못함) 등으로 체적파의 간섭이 줄어든 표면파를 측정하게 된다. 따라서 마이크로폰으로 측정한 신호에는 접촉식 센서로 측정한 신호의 경우보다 체적파의 간섭이 상대적으로 낮은 수준으로 포함되어 있다. 이러한 측면에서 표면파 측정을 위한 마이크로폰의 활용도 신뢰성이 있음을 확인할 수 있다.

5.3 고속전철 노반의 다짐지반에 대한 표면파 시험

표면파 시험의 센서로서 마이크로폰의 성능을 확인하기 위한 시험을 토사지반에서도 수행하여 보았다. 앞 절에서의 표면파 시험은 콘크리트 구조물에 대한 적용을 목적으로 51.2kHz까지의 고주파 대역을 중심으로 마이크로폰의 성능을 평가하였고, 본 절에서는 토사지반을 대상으로 1.6kHz 까지의 저주파 대역에 마이크로폰의 성능을 평가하였다. 본 실험에 사용된 발진원과 센서의 시험구성은 5.2절의 경우와 동일하게 설정하였으나, 마이크로폰의 센서간격과 발진원-센서 간격은 0.3m로 설정하였다. Fig. 10과 11의 표면파 시험을 수행한 지반은 최대입경 300mm의 암괴를 성토한 고속전철 성토체로서, 심각한 비균질성을 보이는 지반구조물로 표면파 시험으로는 매우 난해한 시험체라고 할 수 있다. Fig. 10에는 속도계와 마이크로폰 센서의 시간영역 신호, 파워스펙트럼 등을 비교하고 있는데, 절대크기에는 차이가 있지만 전체적인 경향과 주파수 성분 등은 거의 유사하게 측정되었다. 한편 두 채널의 시간영역 신호로부터 결정한 위상차 스펙트럼을 속도계와 마이크로폰 센서에 대해 비교해 보면 Fig. 11에 도시한 바와 같이 주파수 400Hz 이하에서는 거의 동일하지만, 400Hz 이상에서는 마이크로폰으로 측정한 위상차 스펙트럼이 속도계로 측정한 위상차 스펙트럼보다 더 양질의 패턴을 보여주고 있다. 또한 속도계의 위상차 스펙트럼을 마이크로폰 자료를 근거로 신중하게 분석하여 위상속도를 계산해 보았을 때, 두 센서에 대한 위상속도는 거의 유사하게 결정되지만 400Hz 이상의 고주파 영역에서는 속도계 자료가 부분적으로 누락되어 있음을 알 수 있다. 이러한 속도계에 의한 측정에서의 문제점은 400Hz 이상의 주파수에서 예민하지 않은 속도계(본 연구에서 사용한 속도계 Sercel사의 L-22)의 특징 때문이라고 할 수 있다. 따라서 측정주파수 대역에 적합한 속도계를 선택적으로 사용하지 않는 이상, 마이크로폰 센서가 표면파 신호의 측정에서 더 고품질로

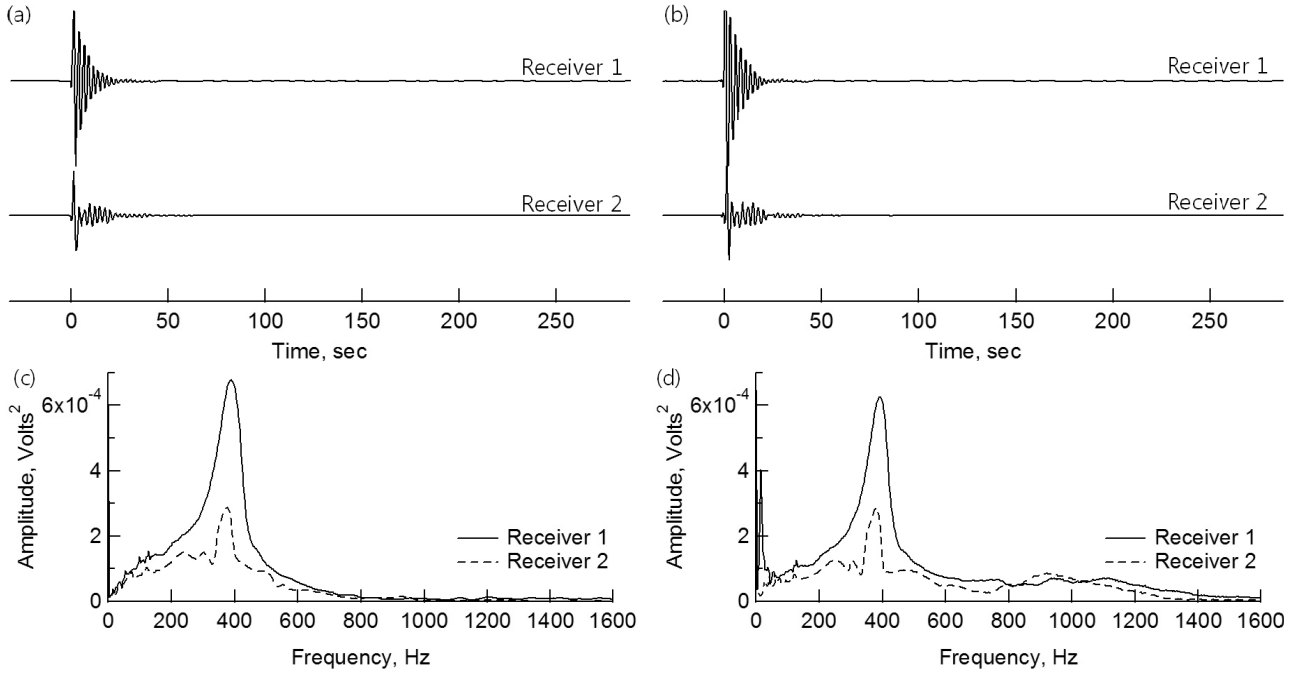

Fig. 10. Time traces and power spectra of surface waves measured by (a), (c) accelerometers, (b), (d) microphones at compacted track base of high speed railway; Measurements at array P04.5

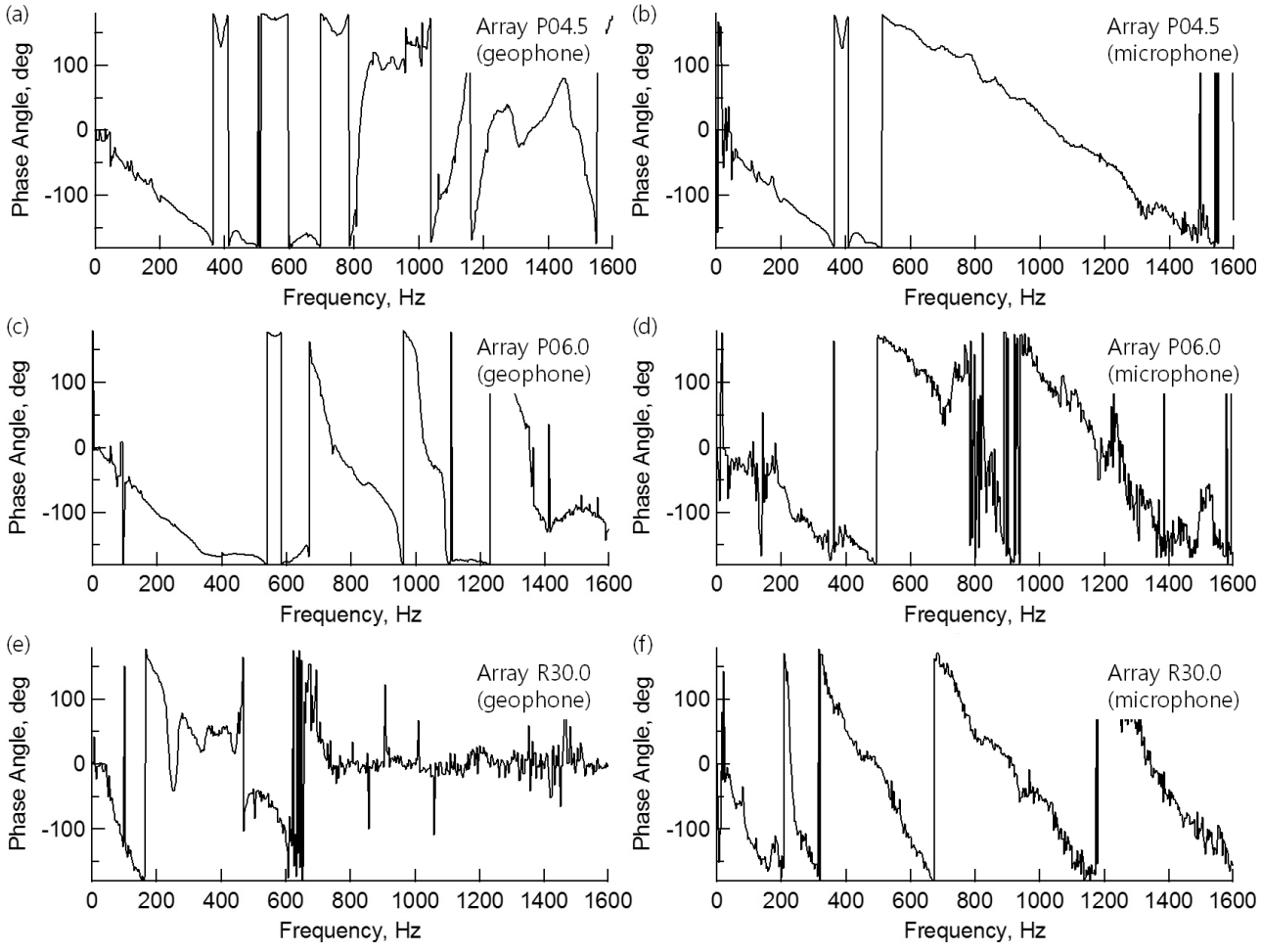

Fig. 11. Comparison of surface-wave measurements using accelerometers and microphones at compacted track base of high speed railway for: (a), (c), (e) geophones and (b), (d), (f) microphones; Receiver spacings = 0.3m for arrays of P04.5 and P06.0, receiver spacing=0.75m for array R30.0

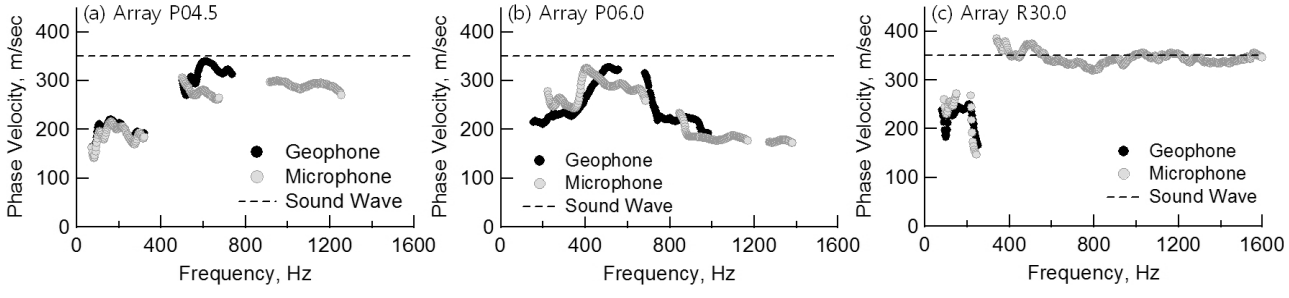

Fig. 12. Phase velocity dispersion curves determined by geophones and microphones at measurement arrays (a) P04.5 (b) P06.0 and (c) R30.0

측정할 수 있고 결과적으로 위상차 스펙트럼의 해석도 더 용이함을 확인할 수 있다.

그러나 마이크로폰의 신호분석에 있어서 심각한 문제점이 존재하는데, 이는 공기매질을 통해 직접적으로 전달되는 음파의 간섭이다. Fig. 11(f)의 위상차 스펙트럼을 살펴보면 약 300Hz 이상의 주파수 영역에서 고품질의 명확하고 일정한 패턴을 볼 수 있다. 이 패턴은 Fig. 12(c)의 위상속도 약 350m/sec에 해당하는 것으로서 바로 음파의 속도이다. 이 경우는 감지기간 거리가 75cm로

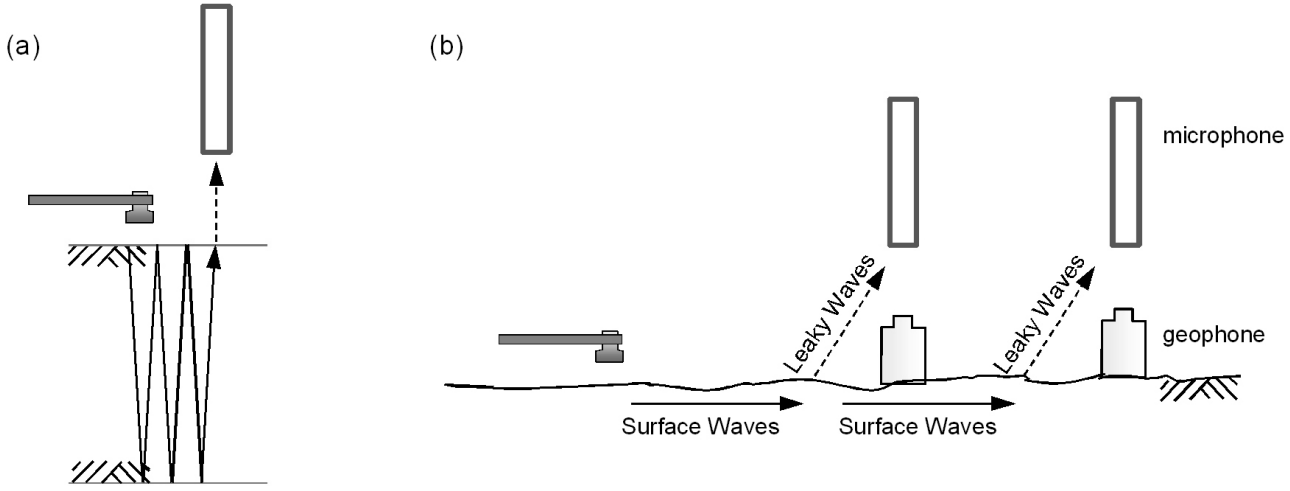

Fig. 13. Expected path of seismic waves and leaky surface waves in (a) resonance tests and (b) surface-wave tests

다른 측점보다 멀어서 지반을 통해 전파되는 표면파의 에너지가 상대적으로 너무 작아졌기 때문에, 직접전달 음파의 신호가 마이크로폰에 지배적으로 기록되었다고 판단된다. 특히 지반매질의 표면파 속도가 음파속도와 유사한 물성을 가지고 있을 때, 마이크로폰의 사용에 있어서 특히 차음장치의 사용, 짧은 거리의 감지기간 거리의 선택, 신중한 자료 분석 등의 노력이 필요하다고 할 수 있다.

5.4 탄성파 시험에서 마이크로폰 센서의 역할

실험에 의한 영향인자 연구와 마이크로폰의 현장적용 연구 결과를 정리하면, 측정구조체의 내부건전도 상태에 따라 차이가 있지만, 마이크로폰 센서로 인한 측정결과는 접촉식 센서를 사용하여 측정한 결과와 유사하거나 경우에 따라서는 더 양호한 결과를 도출하는 것으로 확인되었다. 이는 최근 Bukhari (2013)가 균질매질과 이상체 포함 매질 등 두 가지 매질에 대하여 각각 유한요소해석으로 수행한 공진시험, 표면파시험의 결과에서도 공히 확인되는 결과이기도 하다. 즉, 구조체 내부에 공극이나 균열 등과 같은 이상체가 존재하는 경우, 체적파의 다중반사 및 굴절현상이 표면파의 전파에 교란을 초래하여, 측정된 표면파 신호의 품질이 떨어지게 되고 평가된 표면파속도도 왜곡되는 현상이 발생하게 된다.

Fig. 13(a)를 참고하여 보면, 공진 시험의 경우 시험체 매질 내에서 형성된 탄성파는 공기매질을 거쳐서 공기매질의 압축파 형태로 마이크로폰에 전달되게 된다. 이 때 매질내의 비구속 압축파가 공기매질로 전달되면서 동일한 비구속 압축파인 P-파로 전달되기 때문에, 모드변환이나 분산현상이 발생하지 않게 되고 결과적으로 공기 매질로 전달된 비구속 압축파의 공진 주파수에도 변화가 없게 된다. 한편 표면파의 경우는 Fig. 13(b)에 도시한 바와 같이, 표면파 에너지는 발진원 타격지점에서 시작하여 시험체 매질의 표면을 따라 전파하다가 굴절되어 공기매질을 통과하여 마이크로폰 센서에 도달하게 된다. 시험체 매질의 표면을 떠나 공기매질로 전달될 때부터 탄성파는 더 이상 일반 표면파가 아니라 누출 표면파(leaky surface wave)가 된다. 누출표면파의 전파속도는 일반 표면파와 다를 수 있지만, 표면파 에너지가 시험체의 표면을 이탈하는 지점부터 마이크로폰 센서에 이르는 누출표면파의 경로가 SASW 시험의 두 센서에 대해 동일하기 때문에, 두 센서로 측정하게 되는 표면파의 전파속도 계산에 있어서는 누출표면파의 경로는 서로 상쇄되게 된다. 결과적으로 두 개의 마이크로폰을 사용하여 표면파 속도를 측정하는 측면에 있어서는 누출 표면파가 주는 영향은 전혀 없게 되고 오직 시험체 매질의 표면파 속도에만 영향을 받게 된다. 따라서 접촉식 센서를 사용하든 비접촉식 센서를 사용하든 관계없이 두 개의 센서를 사용하는 SASW 시험에 있어서 측정되는 표면파 속도는 결과적으로 동일한 값으로 측정되게 된다.

6. 결 론

다짐지반과 콘크리트 구조물에서 탄성파 시험의 실용성을 확보하기 위한 이동식 시험장비 개발의 일환으로 비접촉식 센서인 마이크로폰의 활용성을 연구하였다. 본 연구를 통하여 획득한 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 실험에 의한 영향인자 연구와 현장적용 연구에 의하면, 다짐지반과 콘크리트 구조물에 대한 탄성파 시험에 있어서 일반적인 음성용 마이크로폰이 기존의 속도계와 가속도계를 대체할 수 있을 정도로 신뢰성이 있음을 확인하였다.

(2) 콘크리트 구조물에 대한 마이크로폰 센서의 영향인자 연구에 의하면, 발진원 이격거리의 경우 공진시험에서는 5~10cm,

표면파 시험에서는 20cm로 설정하는 것이 효과적이었고, 마이크로폰 설치높이의 경우 3.5~5cm, 마이크로폰 센서를 위한 발진원 종류는 약 0.3~0.7kg 무게의 소형 금속해머를 사용하는 것이 효과적이었다. 또한 환경소음 및 직접전달 음파를 소거하기 위한 차음장치는 필수적으로 요구되었다.

(3) 표면파속도 330~370m/sec 범위의 단단한 매질에 대해 표면파 시험을 수행할 때 특별히 유의할 것은 측정되는 신호가 매질을 통과한 표면파 신호인지 공기매질을 타고 직접 전파되는 직접전달 음파인지를 확인하고, 직접전달 음파를 표면파 신호로 오인하지 않도록 하여야 한다. 이는 특히 감지지간 간격이 30cm 이상일 때는 매질을 통해 전파되는 표면파 신호의 크기가 급격히 떨어지기 때문에, 직접전달 음파를 측정할 가능성이 매우 크기 때문이다.

(4) 콘크리트 매질이나 다짐 지반에 대한 SASW 시험에서는 접촉식 또는 비접촉식이든 센서의 표면접촉 여부에 관계없이 실질적으로 동일한 위상속도를 측정할 수 있었다. 이는 SASW 시험의 경우 매질표면에서 마이크로폰에 도달하는 누출 표면파의 경로길이가 각각의 마이크로폰에 대해 동일하여 서로 상쇄되기 때문에, 결과적으로 측정되는 표면파의 속도는 접촉식 센서로 측정하는 표면파 속도와 동일하게 되기 때문이다.

(5) 특히 콘크리트 구조물에서의 SASW 시험의 경우, 밀착되어 있는 가속도계로는 P파, S파 등에 의해 교란된 표면파를 측정하지만, 마이크로폰은 현저하게 줄어든 P파의 간섭(공기중 P파 속도가 1/10 수준으로 감소함), S파의 배제(공기매질에서 S파는 전파되지 못함) 등으로 체적파의 간섭이 줄어든 표면파를 측정하게 된다. 따라서 마이크로폰으로 측정한 신호에는 접촉식 센서로 측정한 신호의 경우보다 체적파의 간섭이 상대적으로 낮은 수준으로 포함되어 있게 되고, 이러한 결과를 현장실험과 유한요소해석으로부터 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단이 지원하는 2012년도 "증강현실을 활용하는 스마트 다짐관리 기술의 개발" 기초연구 사업으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

References

Bay, J. A., Stokoe, K. H., II, and Jackson, J. D. (1995). "Deve-lopment and preliminary investigation of a rolling dynamic deflectometer." *Transportation Research Record 1473*, Transportation Research Board (TRB), Washington, D.C., pp. 43-54.

Ramli, B. (2013). *Accelerated resonance test based on non-contact sensors for nondestructive assessment of structural integrity of plate-like structures,* MSc Thesis, Chung-Ang University.

Bueno, J. L., Stokoe, K. H. II, Allen, J. J. and Kalinski, M. E. (1999). "Evaluation of constructing increased single-lift thicknesses of unbound aggregate bases: Case Study in Georgia." *In Trans- portation Research Record 1673*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 95-102.

Dziewonski, A., Bloch. S. and Landisman, M. (1969). "A technique for analysis of transient seismic signals." *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol. 59, No. 1, pp. 427-444.

Ewing, W. M. and Jardetzky, W. S. (1957). *Elastic waves in layered media,* McGraw-Hill Book Companay, Inc.

Joh, S.-H. (1996). *Advances in interpretation and analysis techniques for Spectral-Analysis-of-Surface-Waves (SASW) method,* Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin.

Joh, S.-H., Cho, M.-R., Kang, T.-H., Kwon, S. A. and Nam, J. H. (2008). "Pavement integrity scanner to characterize modulus contrast between near-surface and deeper material in concrete pavements." *In Transportation Research Record 852,* TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 39-48.

Joh, S.-H., Jang, D.W., Kang, T.-H., Lee, I.-H. (2005). "Evaluation of shear stiffness structure for geological segments by CAP-SASW Method." *Journal of Korean Geotechnical Society,* Vol. 21, No. 4, pp. 71-81.

Joh, S.-H., Kang, T.-H., Kwon, S. A. and Moon, C.-W. (2006). "Accelerated stiffness profiling of aggregate bases and subgrades for quality assessment of field compaction." *In Transportation Research Record 2070,* TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 22-31.

Larson, G. D., Martin, J. S. and Scott, W. R., Jr. (2005). "Detection of buried landmines using seismic waves and microphones." In d*etection and remediation technologies for mines and minelike targets X*, Edited by Harmon, R. S., Broach, J. T., Holloway, J. H., Jr., Proc. of SPIE Vol. 5794, SPIE, Bellington, WA.

Norinah, A. R. (2011). *Surface wave technique for non-flat geotechnical site characterization*, MSc Thesis, Chung-Ang University.

Rix, G. J. and Stokoe, K. H. II. (1989). "Stiffness profiling of pavement of subgrades." *In Transportation Research Record 1235*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1989, pp. 1-9.

Ryden, N., Lowe, M. J. S., Cawley, P. (2006). "Multichannel microphone array for non-contact NDT of concrete slabs." *Proc. of the 6th Int. Symp. on NDT in Civil Engineering*, Ed by I. Al-Qadi and G. Washer, 14-18, Saint Louis, Missouri, United States, pp. 325-331.

Ryden, N., Lowe, M. J. S. and Cawley, P. (2009). "Non-contact surface wave testing of pavements using a rolling microphone array." *Proceedings of NDTCE'09 Non-destructive testing in civil engineering*, Nantes, France.13.

Sansalone, M. and Carino, N. J. (1986). *Impact-echo: A method for flaw detection in concrete using transient stress waves,* Rep. No. NBSIR86-3452, National Bureau of Standards, Gaithersburg, Md.

Stokoe, K. H., II, Wright, S. G., Bay, J. A. and Roesset, J. M. (1994). "Characterization of geotechnical sites by SASW method." *Geophysical Characteristics of Sites*, ISSMFE, Technical Committee 10 for XIII ICSMFE, International Science Publishers, New York, pp. 15-25.

Terrell, R. G., Cox, B. R., Stokoe, K. H., II, Allen, J. J. and Lewis, D. (2003). "Field evaluation of the stiffness of unbound aggregate base layers in inverted flexible pavements." *In Transportation Research Record 1837*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2003, pp. 50-60.

Viktorov, I. A. (1967). *Rayleigh and lamb waves,* Plenum, New York, 1967.

Zhu, J. (2005). *Non-contact NDT of concrete structures using air-coupled sensors*. PhD Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign.

Zhu, J. and Popovics, J. S. (2005). "Non-contact imaging for surface-opening cracks in concrete with air-coupled sensors." *Materials and Structures*, Vol. 38, pp. 801-806.

Zhu, J. and Popovics, J. S. (2006). "Air-coupled impact-echo method for NDT of concrete." *AIP Conference Proceedings*, p. 820.