

Passive Method MASW 방법을 이용한 경산시 도심구간에서의 전단파 속도 분석

이홍규¹ · 김우혁² · 장승익^{*2} · 이석규²

¹두산건설주식회사 토목설계팀

²(주)한라엔지니어링 기술연구소

The Shear Wave Velocity Analysis using Passive Method MASW in the Center of the Metropolis, Gyeongsan

Hong-Gyu Lee¹, Woo-Hyuk Kim², Seung-Ik Jang^{*2}, and Seog-Kyu Lee²

¹Doosan Construction & Engineering Co., Ltd. Department of Civil Engineering Team

²Halla Engineering Co., Ltd. Institute of Technology

표면파탐사 방법 중 능동형 다중채널 표면파탐사(active method MASW) 방법은 발진원의 저주파 에너지 부족, 전체 축선 길이의 부족 등의 요인으로 인하여 측정가능 심도가 강성이 약한 풍화토 지층까지로 제한됨으로서 대상 심도까지의 전단파 속도 주상도를 제공하는데 어려움이 있다. 이러한 단점을 극복하고자 신기술로서 제안된 수동형 다중채널 표면파탐사(passive method MASW) 방법을 대구 지하철 과업현장인 경산시 정평동 도심구간에 적용하고 분석을 수행하였다. 상시 미진동을 이용하는 수동형 다중채널 표면파탐사 방법은 파원의 차이에 따른 방향성 보정을 적용함으로써 분해능이 향상 되었고, 능동형 다중채널 표면파탐사 자료를 동일축선(동일배열) 상에서 간단한 병행수행 방법으로 획득할 수 있으며, 각각의 분산 스펙트럼 자료를 통합하여 분산곡선을 획득함으로써 가탐심도의 증대뿐 만 아니라 천부 해상도까지 높일 수 있는 장점이 있다. 이번 경산 도심구간에서는 수동형 다중채널 표면파탐사 방법의 현장 적용에 앞서 최적의 자료취득 변수들을 선정하기 위하여 2 m, 4 m, 6 m 수신기 간격 자료에 대한 분산 스펙트럼 분석을 수행하였고, 선정된 변수들을 적용함으로써 신뢰할 수 있는 전단파 속도 주상도를 작성할 수 있었다.

주요어 : 능동형 다중채널 표면파탐사, 수동형 다중채널 표면파탐사, 분산 스펙트럼 통합, 자료취득 변수

Active method MASW(Multi channel Analysis of Surface Waves), which is one of the surface wave exploration methods, has the difficulties to supply enough shear wave velocity log, caused by short spread length and lack of low frequency energy. To make up this defect, the passive method MASW survey is taken and analysed in Daegu subway construction site, Jungpyung-dong Gyeongsan city. The passive method MASW using the microtremor, improve the quality of the overtone record by applying the azimuth correction caused offline sources. And combining with active overtone record which is acquired by same geometry has the benefits of improve shallow depth resolution and extend possible investigation depth. To take the optimized acquisition parameters, the 2 m, 4 m, and 6 m geophone spacing is tested. And 2 m spacing overtone image could make the reliable shear wave velocity log.

Key words : active method MASW, passive method MASW, combining overtone record, acquisition parameter

서 론

신뢰성 있는 내진설계를 수행하기 위해서는 기반암 상부 지반의 동적 물성치를 정확히 획득하는 것이 중요하며, 내진설계와 관련된 지반의 동적 물성치에는 전단

파 속도 주상도, 정규화전단탄성계수, 감쇠비, 액상화계수 등이 있다. 다양한 현장 및 실내시험을 통해 이러한 내진설계관련 변수들을 획득하고 있으며, 전단파 속도 주상도를 도출하기 위해 다운홀(Downhole), Suspension-PS Logging, MASW(Multi channel Analysis of Surface

*Corresponding author: geologging@korea.com

Waves) 시험 등과 같은 현장 탄성과 탐사가 흔히 사용되고 있다(김동수의, 2005). MASW와 같은 표면파탐사 방법은 비파괴, 비관입적인 지반조사 방법으로 다른 물리탐사 방법과 비교하여 잡음에 강하고 지표면에서 지반의 강성구조를 신속하게 평가할 수 있으며, 지표면이 포장되어 있는 지역, 생활소음이 강한 도심구간에 대하여 합리적인 대안으로 제시되고 있다. 1980년대 초반에 지표 근처의 전단파 속도 단면을 만들기 위한 SASW 분석법(Nazarian et al., 1983)이 처음 소개되었으며, 토목공학 분야에서 종파 속도와 함께 포아송비를 구하는데 사용되어 왔다. Park et al.(1999)은 SASW 방법의 약점을 극복하기 위해 다중채널 방식을 이용한 표면파 분석법(MASW)을 개발하였다. 이 방법은 자료획득 속도가 빠르고 전체적인 자료의 정확성이 높으며, 자료처리과정도 비교적 간단하다. 이 방법은 레일리파의 분산에 있어 다른 고차모드나 실체파들로부터 기본모드를 쉽게 구분할 수 있으며, SASW 방법에서 나타나는 공간적 알리아싱을 피할 수 있다는 장점이 있다(조수제, 김기영, 2004). 그러나 현장에서 적용되고 있는 MASW탐사 방법은 해머와 plate를 이용하여 근거리에서 인위적인 발진원을 사용하기 때문에 발진원의 저주파 에너지 부족, 전체측선 길이의 부족 등의 요인으로 인하여 측정 가능 심도가 강성이 약한 풍화토 지층까지로 제한됨으로서 대상 심도까지의 전단파 속도 추상도를 제공하는데 어려움이 있다. 이러한 단점을 극복하고자 신기술로서 제안된 수동형 다중채널 표면파탐사(Park et al., 2004) 방법을 대구 지하철 과업현장인 경산시 정평동 도심구간에 적용하고 분석을 수행하였다.

일반지질

조사지역은 경상북도 경산시 정평동 부근으로 광역지질은 중생대 백악기 경상누층군에 해당하는 퇴적암(반야월층, 자인층)이 최고기의 기반암으로 분포하고 후기에 관입된 화산암류(주산 안산암질 암류) 및 제4기 충적층으로 구분된다(원종관 외, 1971).

반야월층은 조사지역 서측의 대구시가지 일원을 중심으로 분포하며 주로 담녹색 셰일 및 이암으로 구성되어 비교적 압상이 균질한 경향을 보인다(층리: N75E 주향, 20SE 경사). 자인층은 조사지역에서 충적층 하부에 기반암으로 분포하며 남서측 일부와 동측부 산지에 광범위하게 발달하고 주로 암회색~흑색 셰일로 구성되며 조사지역의 남서측 화산암류와의 경계부 일원은 접촉면질로

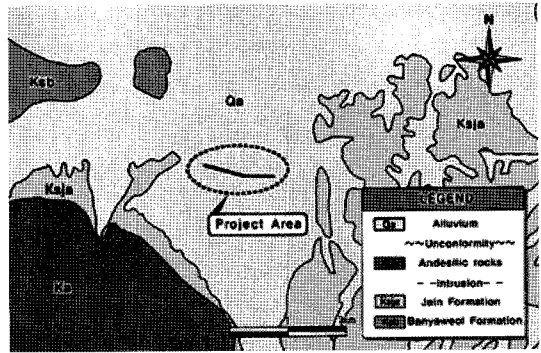


Fig. 1. Geologic map of the survey area. Qa: alluvium, Ksja: Jain Formation, Ksb: Banyaweol Formation, Ka: Jusan andesitic rocks.

인해 혼펠스화 경향을 보인다(층리: N30~60W 주향, 10~15 SW 경사). 조사지역과 근접하거나 교차하는 단층은 없으며, 과업구간 남서방향으로 약 7 km 정도 이격되어 가창단층(N80W 방향, 연장 12 km)이 위치하고 동측방향으로 약 6 km정도 이격되어 적제단층(N2W 방향, 연장 3 km)이 위치하고 있다. 탐사 적용구간에서는 암회색 셰일로 구성된 자인층이 기반암으로 발달하며 그 상부에 제4기 충적층이 부정합으로 피복 되어 있다. 단층대의 저층은 인지되지 않으며, 층리경사 10~15 SW 내외의 판상구조 경향을 보인다.

배경이론

수동형 다중채널 표면파 탐사는 파도, 바람, 지진과 같은 자연 진동과 차량, 공사진동 등 인위적 진동이 합

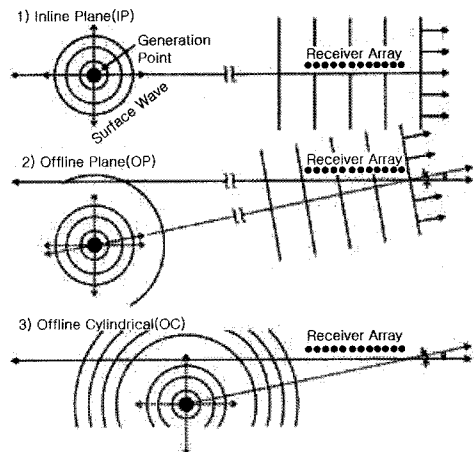


Fig. 2. Three different types of possible wave propagation with a roadside surface wave method.

깨 내포되어 지반에 간헐적 또는 지속적으로 발생하는 상시 미진동을 수동적으로 측정함으로써 주로 저주파의 전파 속도를 분석하는 표면파 분석법의 일종이다. 이 기법은 Aki(1957)에 의해 이론적인 기반이 마련되고 Louie(2001), Park and Miller(2006) 등에 의해 현장에 적용된 물리탐사법이다. 기존의 능동형 다중채널 표면파 탐사 방법은 현장에서 획득한 시간-공간($t-x$) 영역 자료를 1차원 푸리에변환을 통하여 주파수-공간($f-x$) 영역으로 변환한 후, 이를 위상이동 및 중첩(Phase shift and stack) 과정을 거쳐 위상속도와 주파수($c-\omega$)의 함수로 표현된 분산곡선으로 작성하고, 반복적 역산과정을 통하여 전단파 속도 단면을 얻는 방법이다. 신기술로 제안된 수동형 다중채널 표면파탐사 방법의 배경이론은 기존의 능동형 다중채널 표면파탐사와 동일하게 레일리파의 위상속도를 이용하지만, 능동형과는 달리 지반 내에 존재하는 상시 미진동을 측정하고 분석하여 레일리파의 위상속도 분산곡선을 결정하는 것이 특징이다. 기존의 상시 미진동을 이용한 표면파탐사 방법 중 하나인 ReMi 방법과는 달리 수동형 다중채널 표면파탐사 방법은 파원의 차이에 따른 방향성 보정 단계를 적용함으로써 자료의 해상도를 향상 시켰고, 능동형 자료를 동일축선(동일 배열) 상에서 간단한 병행수행 방법으로 획득하여 각각의 분산 스펙트럼 자료를 통합하여 분산곡선을 작성함으로써 가탐심도 증대는 물론 천부 해상도까지 높일 수 있는 장점이 있다. 분산 스펙트럼 자료 통합의 의미는 동일축선 상에서 획득된 능동형 자료와 수동형 자료의 통합을 의미하며 천부 해상도 향상 및 가탐심도의 증대라는 장점만을 취할 수 있는 능동형 및 수동형 다중채널 표면파탐사를 실현할 수 있게 한다.

상시 미진동을 이용하는 탐사법은 선형축선에 대해서 offline에서 발생한 파원이 실제 속도보다 빠른 겉보기 속도로 나타나기 때문에 파의 전달 형태에 대하여 반드시 고려해야만 한다. 파의 전달에는 탐사축선의 일직선 상에서 전달되는 형태(inline plane; IP), 탐사축선의 일직선이 아닌 측면에서 전달되는 형태(offline plane; OP), 그리고 일직선이 아닌 측면에서 전달되면서 원통형의 파면을 형성하는 형태(offline cylindrical; OC)의 3가지 형태가 존재할 수 있다. 도로와 평행하게 설치된 수신기에서 얻어지는 현장 자료는 여러 파원들이 OP와 OC 형태를 보이게 된다(Fig. 2). Park and Miller(2006)는 2 m 간격의 24개 수신기를 선형으로 설정하고 10 m 이격된 offline 다중 파원에 대한 합성자료를 도출하였다. 주파수 대역은 5~100 Hz, 위상속도는 500 m/s를

적용하였다. 합성자료에 대하여 IP, OP, OC의 형태를 가정된 각각의 분산 스펙트럼 자료를 작성하였으며 비교분석을 통하여 OP와 OC 형태의 파원을 가정한 분산 스펙트럼 자료가 IP 형태의 파원을 가정한 경우보다 분해능이 향상됨을 검증하였다. 수동형 다중채널 표면파탐사 방법은 이러한 알고리즘을 적용하여 분산 스펙트럼 자료를 작성하게 된다.

자료획득

도심구간에서 지층의 전단파 속도 구조를 분석하기 위하여 수동형 다중채널 표면파탐사 방법을 적용하였다. 수동형 다중채널 표면파탐사 방법은 수신기 배열방법에 따라 passive remote MASW와 passive roadside MASW 방법으로 나눌 수 있다. Passive remote MASW 탐사는 2차원적인 수신기 배열을 사용하는 것으로서 그 형태는 원형, 십자형, 사각형, 삼각형과 불규칙한 형태 모두를 포함한다. 이러한 배열방법은 지반에 대한 가장 정확한 평가가 가능하지만 수신기 설치를 위해서 넓은 공간이 필요한 단점이 있으며, 타원형과 직사각형과 같은 비대칭적인 형태의 배열은 특정 방향에서 들어오는 표면파에 대해 편향되는 경향이 있으므로 추천되지 않는다. Passive roadside MASW 탐사는 1차원적인 수신기 배열을 사용하는 것으로서 기존의 선형 수신기 배열법을 의미하며, 도심구간에 적용 시 공간적인 제약은 받지 않는 장점이 있다(Fig. 3). 발전원은 도심지 내에서 이동 차량의 진동, 공사장 진동 등 사람들의 활동으로 인하여 발생하는 진동을 이용하게 되므로 별도의 인위적인 파원이 필요하지 않다.

현장자료 획득에 앞서 우선 수행된 예비조사에서는 선형 수신기 배열법(Fig. 3)을 적용하여 2 m, 4 m, 6 m 수신기 간격에 대하여 자료를 획득하였다. 각각의 수신기 간격에서 동일하게 수동형 다중채널 표면파탐사 자료는 1 ms간격으로 16 sec동안 필터를 사용하지 않고 총 10회 기록하였으며, 능동형 자료는 5 kg 해머를 rubber plate에 수직 타격하여 1 ms간격으로 총 16 sec동안 필터를 사용하지 않고 기록한 후 자료처리 시 초기

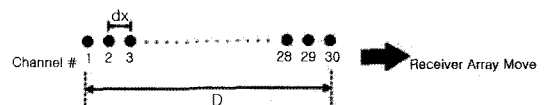


Fig. 3. A schematic field layout for the passive method MASW.

1000 ms 자료만을 사용하였다. 기록계는 ABEM MK-6, 수신기는 4.5 Hz, 24 채널을 사용하였다. 예비조사자료 분석을 통하여 최종 자료취득 변수들을 선정하고 전단파 속도 단면 작성을 위한 현장자료를 획득하였다. 수동형 다중채널 표면파탐사 자료는 수신기 간격 2 m, 24채널을 측선에 대하여, 2 ms간격으로 32 sec동안 필터를 사용하지 않고 총 5회 기록하였으며, 능동형 자료는 5 kg 해머를 rubber plate에 수직 타격하여 2 ms간격으로 총 32 sec동안 필터를 사용하지 않고 기록한 후 자료처리 시 초기 1000 ms 자료만을 사용하였다.

자료처리

기록된 수동형 다중채널 표면파탐사 자료와 능동형 다중채널 표면파탐사 자료는 상업용 소프트웨어인 Surfseis2를 이용하여 처리하였다. 수동형과 능동형 방법으로 얻어진 자료는 분산 스펙트럼 분석에서 주파수와 위상속도 등 각 변수의 범위를 결정하여 최종적으로 분산곡선(dispersion curve)을 얻는다. 분산곡선의 생성은 결국 정확한 전단파 속도(shear wave velocity) 추상을 얻기 위한 가장 중요한 단계의 하나이다. 분산곡선은 일반적으로 위상속도(phase velocity) 대 주파수(frequency)

또는 파장(wavelength)의 관계로 표현되며, 위상속도(phase velocity)는 각각의 수신기에서 수신된 신호에 대한 위상각 차이를 측정하여 계산한다. 실험을 통해 얻어진 실험분산곡선과 초기모델에 의한 이론적 분산곡선을 결정하고 비교하여 실험분산곡선과 이론분산곡선이 일치하도록 역산을 수행한다. 역산 과정 중 RMS 오차가 지정되어진 RMS_{min} (default 5.0) 이하로 떨어지거나 그렇지 않은 경우 최대반복횟수(I_{max})로 지정된 횟수만큼 반복역산을 수행한다. 여기서 사용되어진 이론적 분산곡선은 각층의 물성치가 명확히 정의 되어져야만 하며 이러한 물성치는 전단파 속도, 각 층의 두께, 포아송비, 그리고 각 층에 대한 단위중량이다. 이중 역산과정에서 사용되는 변수는 층의 두께와 전단파 속도이며, 포아송비와 단위중량은 사전정보 또는 합리적인 가정에 의해 결정된다. 초기 전단파 속도 모델은 일반적으로 입력된 분산곡선의 위상속도로부터 계산되어지며, 가파심도는 분산곡선에서 얻어진 최장의 표면파 파장으로부터 결정된다(Xia et al., 1999). 역산을 수행하기 위한 초기모델에서 속도 범위는 default 값을 사용하여, 하부로 갈수록 속도가 증가하는 10개 층으로 구성하였으며, 비선형 최소자승법으로 역산을 반복 수행하여 전단파 속도 추상을 얻었다.

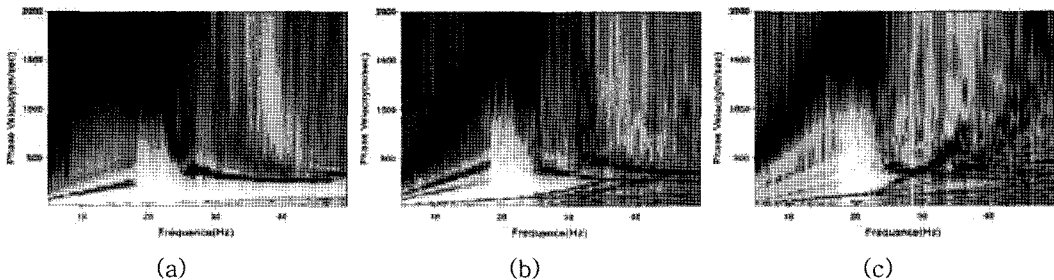


Fig. 4. Overtone images processed from the record by using (a) Receiver spacing 2 m, (b) Receiver spacing 4m, and (c) Receiver spacing 6 m.

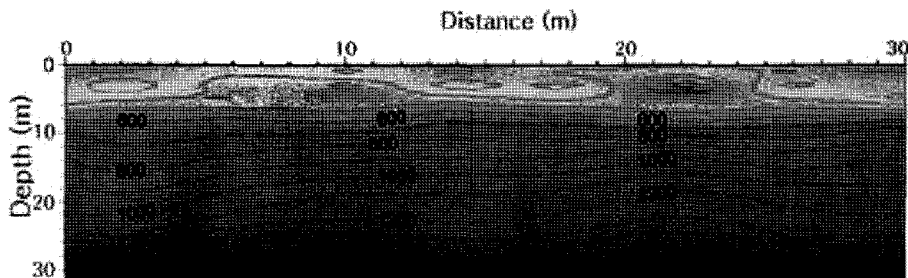


Fig. 5. Shear wave velocity obtained from the dispersion curves of Rayleigh waves.

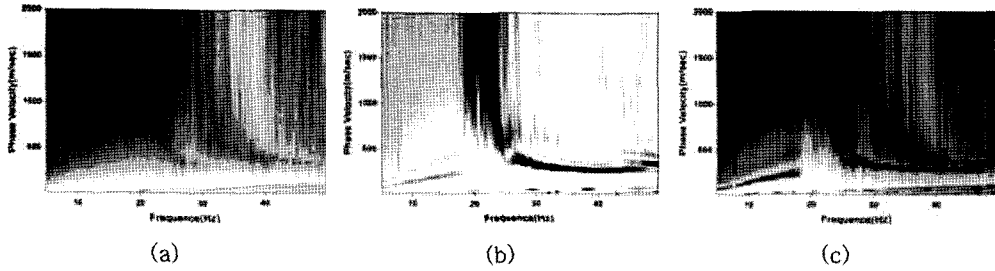


Fig. 6. Overtone images of Multi channel Analysis of Surface Waves using (a) passive method, (b) active method, and (c) active + passive method.

자료해석

최적 자료취득 변수들을 선정하기 위해 동일지점에서 수신기 간격을 달리하여 자료를 획득하고, 각각의 자료에 대하여 분산 스펙트럼 분석을 수행하였다. 분산 스펙트럼 자료의 통합 분석을 수행한 결과 2m 간격자료는 상대적으로 넓은 주파수 대역에서 고에너지 분포를 보이며 분산곡선 추출이 용이한 신뢰도 높은 분해능을 보여준다 (Fig. 4a). 반면 4m, 6m 간격자료는 상대적으로 넓은 수신기 간격과 긴 수신기 전개로 인해 저주파 고속도의 에너지가 강할 것으로 예상하였으나 저주파 대역에서 에너지가 약하고, 공간적 알리아싱으로 인해 자료의 연결성이 떨어졌다(Fig. 4b, 4c). 최종적으로 수신기 간격을 2m로 설정하고, 측정간격을 4m로 하여 자료를 획득하고 분석함으로써 대상 심도를 포함하면서도 천부해상도를 높인 신뢰할 수 있는 Vs 단면을 작성할 수 있었다(Fig. 5).

Fig. 6은 경산시 도심구간에서 2m 수신기 간격으로 수행된 수동형 다중채널 표면파탐사 자료와 능동형 다중채널 표면파탐사 자료를 분석해 얻은 분산 스펙트럼 자료들이다. Fig. 6a는 능동형 자료의 분산 스펙트럼 자료로서 상시 미진동을 과원으로 하는 표면파탐사의 단점인 고주파 영역의 에너지 부족현상이 나타나고 있으며 이러한 결과는 천부 매질의 전단파 속도 평가의 신뢰성을 떨어뜨린다. Fig. 6c는 능동형과 수동형 각각의 분산 스펙트럼 자료를 하나로 통합한 능동형 및 수동형 자료이다. 고주파 대역의 에너지가 강한 능동형 자료 (Fig. 6b)를 통합하여 단일 수동형 자료의 단점인 고주파 영역의 에너지 부족 현상을 극복함으로써 신뢰성 있는 분산곡선을 도출할 수 있었다.

토의 및 결론

경상북도 경산시 정평동 도심구간에서 기존의 능동형

다중채널 표면파탐사 방법의 가탐심도 한계를 극복하고자 신기술로서 제안된 수동형 다중채널 표면파탐사 방법을 적용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

전단파 속도 단면을 분석한 결과 풍화토 지층으로 생각되는 속도 400 m/s 이하의 층이 평균 4m의 두께로 분포하며, 풍화대로 생각되는 600 m/s 이하의 층이 평균 8m까지 분포한다. 터널설계를 위한 시추조사 단면자료에서는 매립 및 층적층이 4m, 연암층이 대략 9m로 분포하며, 단층대의 저층은 인지되지 않았고, 층리경사가 10~15 SW 내외의 판상구조로 확인된 것을 감안한다면 이번 전단파 속도 단면은 신뢰할 만한 것으로 평가된다.

수동형 다중채널 표면파탐사 방법을 적용하는데 있어 능동형 자료를 동시에 획득하는 것은 동일추진(동일배열)을 사용하기 때문에 현장성이 뛰어나고, 수동형과 능동형 각각의 분산 스펙트럼 자료를 통합한 능동형 및 수동형 분산 스펙트럼 자료의 활용은 상시 미진동을 이용하는 수동형 자료의 고주파 영역 에너지 부족 현상을 극복하고 천부 매질의 전단파 속도 평가의 신뢰도를 높일 수 있는 장점이 있다.

예비조사자료 분석결과 상대적으로 긴 수신기 전개로 인해 저주파 고속도대의 에너지가 강할 것으로 예상되었던 4m, 6m 간격 자료보다 2m 간격 자료에서 가장 신뢰할 수 있는 분산곡선을 추출할 수 있었다. 이번 사례를 통해 현장 예비조사를 통한 자료취득 변수들의 선정은 신뢰할 수 있는 분산곡선을 획득하기 위해 반드시 고려되어야 할 과정임을 알 수 있다.

참고 문헌

- 김동수, 김기석, 조성민, 황대진, 황성춘, 2005, Round Robin Test를 통한 지반 동적 물성치 도출기법 비교 연구, 동적물성치 획득을 위한 현장 및 실내 Round Robin Test 결과 발표, 한국지반공학회, P1-4.
원종관, 고중배, 홍승호, 1971, 한국지질도(1:50,000), 경

- 산도폭 및 설명서, 국립지질조사소.
 조수제, 김기영, 2004, SH 굴절과와 표면과탐사를 이용한 통도사 부근 양산단층의 횡파속도분석, 대한지구 물리학회 · 한국물리탐사학회 공동학술대회 초록집, P.114-122.
- Aki, L., 1957, Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, Bulletin of the Earthquake Research Institute, 35, 415-456
- Louie, John N. (2001) Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays, Bull. Seismol. Soc. Amer., 91, 347-364.
- Nazarian, S, Stokoe, K.H, and Hudson, W.R., 1983, Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems: Transport. Res. Record, 930, p.38-45.
- Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J., 1999b, Multichannel analysis of surface waves: Geophysics, 64, p.800-808.
- Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J., and Ivanov, J., 2004, Imaging dispersion curves of passive surface waves: SEG Expanded Abstracts: Soc. Explor. Geophys., (NSG 1.6), Proceedings in CD ROM.
- Park, C. B. and Miller, R. D., 2006, Roadside passive MASW, Proc. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, Seattle, WA, pp.1116-1127.
- Xia, J., Miller, R.D., and Park, C.B., 1999, Configuration of near surface shear wave velocity by inverting surface wave: proceedings of the symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems' 99, p.95-104.

2007년 7월 19일 원고접수, 2007년 9월 5일 게재승인

이홍규

두산건설주식회사 토목설계팀
 135-010, 서울시 강남구 논현동 105-7 두산빌딩
 Tel:02-510-3114
 Fax:02-510-3466
 Email:hglee@doosan.com

김우혁

(주)한라엔지니어링 기술연구소
 431-070, 경기도 안양시 동안구 평촌동 126-1
 두산벤처 411호
 Tel:031-478-3612
 Fax:031-478-5526
 Email:woohkim@chol.com

장승익

(주)한라엔지니어링 기술연구소
 431-070, 경기도 안양시 동안구 평촌동 126-1
 두산벤처 411호
 Tel:031-478-3612
 Fax:031-478-5526
 Email:geologging@korea.com

이석규

(주)한라엔지니어링 지반설계부
 431-070, 경기도 안양시 동안구 평촌동 126-1
 두산벤처 411호
 Tel:031-478-3612
 Fax:031-478-5526
 Email:sekulee@yahoo.co.kr