

신뢰성 있는 분산곡선의 결정을 위한 수동표면파 측정 및 분석기법의 제안

A Recommendation of the Technique for Measurement and Analysis of Passive Surface Waves for a Reliable Dispersion Curve

윤 성 수¹ Yoon, Sung-Soo

Abstract

Conventional active surface wave measurements performed using a transient or continuous source are often limited in the maximum depth of penetration due to the difficulty of generating low-frequency energy with reasonably portable sources. This limitation may inhibit accurate seismic site response calculations because of the inability to define deeper subsurface structure. By measuring surface wave generated by passive sources including microtremors and cultural noise, it is possible to overcome this problem and develop soil stiffness profiles to much larger depth. Reliability of dispersion estimates from the passive surface wave measurements is critical to present reliable shear wave velocity profiles and can be improved by the measurements and analyses of passive surface waves based on correct understanding of systematic errors included in passive dispersion data. In this study, the systematic errors caused by poor wavenumber resolution and energy leakage into sidelobes in passive tests are mainly explored. Recommendations for reliable passive surface wave measurements and dispersion estimates are presented and illustrated at a site in San Jose, California, U.S.

요 지

해머나 중추 등의 순간가진원이나 진동기 등의 연속가진원을 사용하는 주동표면파기법에서는 저주파대역에서 충분한 에너지를 갖는 표면파를 얻기 어렵기 때문에, 종종 발생된 표면파의 가탐심도가 충분하지 못한 한계에 부딪힌다. 일반적인 가진원 장비로 발생하는 이러한 주동표면파의 한계는 심층지반구조를 파악할 수 없게 함으로써 지반의 정확한 지진응답해석을 어렵게 한다. 반면에 상시미동이나 주변잡음 등과 같은 수동가진원에 의해 발생된 수동표면파를 이용하면 저주파대역에서 충분한 에너지를 갖는 표면파를 얻을 수 있기 때문에 이러한 주동표면파의 단점을 극복하고 심층지반까지의 전단파속도 추상을 얻을 수 있다. 수동표면파의 측정자료로부터 계산된 수동분산값의 신뢰도를 향상시키는 것은 보다 정확한 전단파속도 추상을 얻기 위해 필수적이며, 수동분산값의 신뢰도를 향상시키기 위해선 수동분산값에 포함되는 계통오차에 대한 올바른 이해를 바탕으로 한 수동표면파의 측정과 분석이 필요하다. 본 논문에서는 수동표면파 시험에 있어 계통오차를 발생시키는 부족한 파수해상도와 측면로브를 통한 에너지누수에 관한 연구를 수행하고 신뢰성 있는 분산곡선 결정을 위한 수동표면파의 측정 및 분석기법을 제안한다. 제안된 기법을 적용한 일련의 수동표면파시험이 미국 캘리포니아주 산호세의 한 현장에서 수행되었다.

Keywords : Dispersion curve, Frequency-wavenumber analysis, Passive source, Seismic receiver array, Surface wave method

¹ 정회원, 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Institute of Construction Technology, Samsung Corporation, ss72.yoon@samsung.com)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

Jones(1958)에 의해 지반공학분야에 처음 소개된 이후로 표면파를 이용한 현장시험법은 비파괴적인 특성에 힘입어 미소변형율($<10^{-3}\%$)에서의 지반의 동역학적 물성치를 구하기 위해 활발히 사용 되어 왔다. 감쇠특성 파악을 위한 연구(Rix와 Spang, 1995; Rix 등, 2000; Yoon, 2005)도 있어 왔지만, 표면파기법은 주로 매질의 강성 특성을 파악하기 위해 사용되어 아스팔트 포장 구조체의 층상구조 및 건전도 평가, 터널 콘크리트 라이닝 및 배면 지반의 건전도 평가, 폐기물 매립지의 지반조사, 발파지반개량의 평가 등의 분야에 적용 되었다. 최근에는 내진해석이나 지진응답해석의 중요성이 증대되면서 해석을 위한 중요 입력변수인 미소변형률에서의 지반의 동역학적 물성치 파악을 위해 표면파기법의 활용이 증가하였다.

표면파시험의 활용범위를 정하는데 있어 현장에서 이용 가능한 가진원의 주파수특성은 매우 중요하다. 내진해석이나 지진응답해석을 위한 표면파시험의 경우 기반암 심도까지의 특성파악이 요구되기 때문에 해당 심도까지 도달할 수 있는 저주파대역의 표면파를 발생시키는 가진원을 확보하는 것이 필요하다. 만약 30~100+ m 심도까지의 전단파속도 주상도가 목적이라면 일반적으로 1~4Hz 정도의 주파수대역에서의 표면파가 요구된다(Stokoe 등, 2006).

표면파기법에 사용되는 가진원은 표면파를 발생시키는 방법에 따라 주동가진원과 수동가진원으로 분류된다. 주동가진원은 해머, 중추, 전기진동기 등과 같이 원하는 지점에 위치시켜 지표에 수직방향으로 충격을 가해 표면파를 발생시키는 가진원을 일컫는다. 주동가진원에 의해 발생된 주동표면파는 파의 진행방향을 미리 알 수 있기 때문에, 1차원배열의 수신기로 측정하여 그 위상속도를 산정할 수 있다. 일반적으로 사용되는 해머, 중추, 전기진동기 등의 주동가진원은 운반과 이용이 쉬운 장점이 있는 반면 4Hz 이하의 저주파대역의 표면파를 발생시키기 어렵고, 발생된 표면파의 에너지 전달을 위해 가진원으로부터 수신기배열을 근접해 위치시켜야 하기 때문에 체적파의 간섭이 주원인인 근접장효과(near-field effect)를 고려해야 하는 단점이 존재한다. 근접장효과란 순수한 표면파의 측정과 분석이라는 표면파시험의 기본가정이 가진원에서 가까운 근접장(near-field) 내에서는 체적파의 간섭 등의 이유로 위반되기 때문에

발생하는 현상을 말한다. 저주파대역의 부족한 에너지와 근접장효과는 모두 심층부까지 통과하는 긴 파장의 표면파를 얻기 어렵게 만든다.

최근에는 이러한 주동가진원의 단점을 극복하기 위해 다양한 형태의 진동트럭(T-Rex, Liquidator, Thumper, Vibroseis 등)이 주동가진원으로 개발되어 저주파대역(1~4Hz)의 표면파를 발생시키는 데 성공하였다(Stokoe 등, 2006). 그림 1은 개발된 진동트럭들 중 가장 낮은 주파수인 1Hz의 표면파 발생이 가능한 대용량 진동트럭인 Liquidator의 모습이다. Stokoe 등(2006)은 Liquidator를 이용하여 미국 네바다 사막의 암석 현장인 Yucca Mountain에서 수행된 표면파시험으로부터 300~459m 심도의 전단파속도 주상도를 성공적으로 도출하였다.

최근에 개발된 진동트럭이 일반적인 주동가진원의 단점을 극복하고 저주파대역에서의 주동표면파를 발생시키는 것이 입증 되었지만, 정부의 지원으로 장비를 제작, 운용하는 텍사스 주립대의 경우를 제외하면 장비의 제작, 운용에 따른 비용과 대용량 장비 수용이 가능한 현장여건 등을 감안하면 진동트럭의 사용은 여전히 제한적이다. 따라서, 일반적인 주동가진원으로 기반암 심도까지의 표면파시험을 수행하기 어려운 경우, 현장에서 활용할 수 있는 기반암 심도까지 도달할 수 있는 저주파대역(1~4Hz)의 표면파를 발생시키는 가진원의 확보가 필요하다.

국내에서도 불도저나 유압해머장비 등의 중장비를 이용하여 저주파대역의 주동표면파를 발생시켜 70~85m 심도의 전단파속도 주상도를 도출하였다(건설기술연구원, 1997; 현대건설(주) 기술연구소, 1998). 불도저나 유압해머장비 등의 중장비의 사용은 일반적인 주동가진원인 해머나 중추 등으로 도달하기 어려운 심도를 통과하는 표면파를 발생시키는데 효과적이긴 하지만, 현장



그림 1. 대용량 진동트럭(Liquidator)(Stokoe 등, 2006)

의 여건이 허락하는 범위에서만 그 사용이 가능하며, 근접장효과를 고려하면 100m 이상의 심도에 도달하기에는 부족한 것으로 여겨진다.

수동가진원은 상시미동이나 도심지 주변잡음, 도로에서의 교통흐름 등과 같이 주변에 존재하면서 표면파를 발생시키는 형태의 가진원을 일컫는다. 수동가진원에 의해 발생된 수동표면파는 저주파대역에서 풍부한 에너지를 가지며, 수신기배열에서 충분히 먼 곳으로부터 오는 특성 때문에 근접장효과에 대한 고려 없이 긴 파장의 표면파를 그대로 사용할 수 있어 주동표면파로부터 심층부 지반정보를 얻지 못하는 경우 효과적으로 사용될 수 있다. 주동표면파와 다르게 파의 진행방향을 미리 알 수 없기 때문에 수동표면파의 측정을 위해선 2차원의 수신기배열이 필요하다. 지반조건과 수동가진원의 특성에 따라 다르기는 하지만, 일반적으로 1~10Hz 정도의 주파수 대역에서 수동표면파가 측정되는 것으로 알려져 있다(Yoon과 Rix, 2004). 수동가진원을 이용하여 표면파시험을 성공적으로 수행하기 위해선 주변에 존재하는 수동표면파의 에너지가 표면파시험에 쓰일 수 있을 만큼 충분해야 하고, 수동표면파의 측정을 위한 2차원 수신기배열이 가능하도록 충분한 평면공간이 확보되어야 한다.

성공적인 수동표면파측정에 필요한 조건들이 충족되면, 일단 수동표면파시험은 수행이 가능하다. 하지만 2차원적인 수신기배열이 요구되기 때문에 배열을 위해 확보된 공간의 크기, 사용된 수신기의 개수 등 주어진 조건에 의해 선택된 수신기배열의 배열특성에 의해 측정결과가 달라질 수 있다. 따라서 배열특성이 미치는 영향에 대한 정확한 이해를 바탕으로 한 수동표면파의 측정과 분석이 이뤄져야 신뢰성 있는 결과를 얻음으로써 수동표면파시험의 장점을 십분 활용할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 2차원배열의 배열특성과 관련한 수동표면파시험의 분산값 산정에 있어 발생하는 계통오차를 살펴보고, 향상된 수동표면파의 측정과 신뢰성 높은 분산곡선의 결정을 위해 배열특성의 개선과 심각한 계통오차를 포함하는 분산값을 제거하는 방법을 제안한다. 제안된 방법은 미국 캘리포니아주 산호세의 한 현장에서 실시한 수동표면파시험에 적용되어 검증이 이뤄졌다.

2. 표면파기법(Surface Wave Method)

2.1 표면파기법의 개요

표면파는 매질을 통과할 때, 파장에 따라 심도가 다른 매질을 통해 흐르게 된다. 이때 표면파는 매질의 심도에 따른 특성을 전달 하게 되는데 이를 표면파의 분산특성이라 한다. 표면파의 분산특성은 그림 2에 도식화 되어 있다. 짧은 파장의 고주파 표면파의 경우 천층부 매질의 특성을 샘플링하게 되고(그림 2(b)), 긴 파장의 저주파 표면파는 매질의 좀 더 깊은 심도까지의 특성을 샘플링하게 된다(그림 2(c)). 따라서, 측정된 표면파의 주파수에 따른 위상속도는 매질의 심도에 따른 특성을 보여주는 자료가 된다(그림 2(d)).

표면파기법은 대상지반에 전달되는 표면파의 분산특성을 이용하여 지층의 구조 및 물성치 평가를 위한 비파괴 지반조사방법으로서, 1) 매질을 통과하는 일정 주파수(혹은 파장)대역에서의 표면파를 일정 배열의 수신기들로 측정하는 현장시험, 2) 현장시험에서 측정된 자료로부터 표면파의 주파수(혹은 파장)와 위상속도의 관계를 구하는 분산곡선 결정, 그리고 3) 분산곡선으로부터 전단파속도 추상도를 구하는 역산의 세 단계로 이루어진다.

초기에 정상상태(steady-state) 가진원과 경험적인 역산방법을 사용하던 표면파기법(Jones, 1958)은 1980년대 초 컴퓨터의 비약적인 발전과 더불어 측정신호의 푸리에 변환과 이론적인 역산 알고리즘의 적용 등에 힘입어 SASW(Spectral Analysis of Surface Waves) 기법(Heisey 등, 1982; Nazarian과 Stokoe, 1986)으로 발전하였고, 최근에는 다중 수신기를 활용한 표면파시험(Tokimatsu,

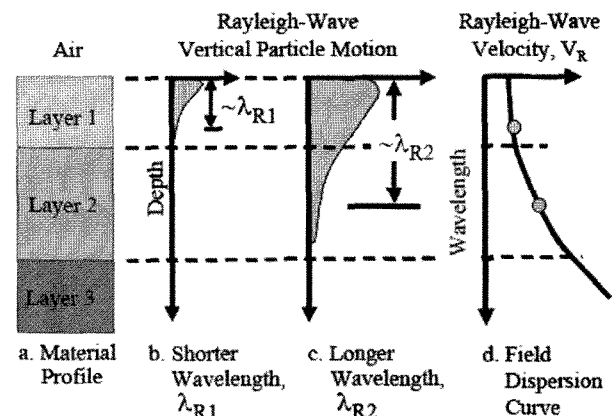


그림 2. 표면파의 분산특성(Stokoe 등, 2004)

1995; Park 등, 1999; Zywicki, 1999)이 가능해져 시간-주파수 기법(time-frequency method)이나 주파수-파수 기법(frequency-wavenumber method) 등의 고급 신호처리 기법이 적용되어 보다 신뢰성 있는 지반의 동역학적 물성치를 얻을 수 있게 되었다. 또한, 최근에는 측정된 지반진동을 하모닉 웨이브릿 변환을 사용하여 분석하는 HWAW(Harmonic Wavelet Analysis of Wave)가 개발되어 기존의 SASW와 같은 2개의 수신기를 사용하면서 실험구성과 신호처리방법에 차이를 두어 향상된 결과를 얻을 수 있게 되었다(박형춘과 김동수, 2004a; 박형춘과 김동수, 2004b).

이러한 표면파기법의 발전들 중 다중 수신기의 활용은 이용 가능한 공간상에서 측정된 정보를 증가시켜 정보의 분석을 통한 결과의 신뢰도를 높일 수 있는 가능성을 제공했을 뿐만 아니라, 수신기들의 이차원적인 배열을 가능하게 함으로써 수동표면파의 활용을 가능하게 하였다. 본 논문에서는 2차원 수신기배열과 2차원 주파수-파수 기법을 이용하여 수동표면파시험이 가능한 배열기반 표면파기법(Zywicki, 1999; Rix 등, 2002; Yoon, 2005)을 이용하여 연구를 수행하였다.

2.2 배열기반 표면파기법(Array-Based Surface Wave Method)

배열기반 표면파기법은 다중 수신기를 활용이 가능해진 90년대 중반 이후 지반공학분야에 활발하게 적용된 표면파기법들 중 하나로 1) 표면파시험을 통한 전단파감쇠비 추정의 결정(Rix와 Spang, 1995), 2) 표면파 위상속도와 감쇠의 동시 역산(Lai, 1998), 3) 표면파시험에서의 최신 신호처리기법의 적용 연구(Zywicki, 1999), 4) 배열기반 표면파기법에서의 근접장효과 규명, 주동+수동분산곡선인 통합분산곡선의 결정, 주파수-파수 분석을 통한 표면파 감쇠비 측정(Yoon, 2005)의 연구들을 통해 발전해 왔다.

배열기반 표면파기법 역시 다른 표면파기법과 마찬가지로 현장측정, 분산곡선 결정, 역산의 세 단계로 이루어진다. 이 가운데 분산곡선의 결정은 현장시험자료의 직접 분석을 통해 이뤄지기 때문에, 결정된 분산곡선은 그 자체로 지반의 특성을 평가할 수 있는 지표가 될 수 있으며 다음 단계인 역산과정의 입력 값으로 쓰이기 때문에 그 중요성이 매우 크다고 할 수 있다. 본 논문에서 사용된 배열기반 표면파기법의 분산곡선 결정과정을

이해하기 위해서는 측정된 시간이력정보로부터 분산곡선을 결정하는 주파수-파수 분석법의 일종인 *frequency domain beamforming*(Lacoss 등, 1969; Tokimatsu, 1995; Rix 등, 2002) 방법과 다중 수신기들의 배열특성을 보여주는 *array smoothing function*(ASF)을 알아야 한다. 2.2.1절과 2.2.2절에서는 frequency domain beamforming 방법과 ASF에 대해 간략하게 정리하였다.

2.2.1 Frequency Domain Beamforming 방법

Frequency domain beamforming 방법은 다중 수신기로 현장에서 측정된 정보를 시간영역에서 푸리에 변환한 후에 beamforming이라는 방법을 사용하여 다시 공간영역에서 푸리에 변환시켜 구한 주파수-파수 스펙트럼에서의 최고치를 수신기배열을 통과하는 지배 표면파(dominant Rayleigh wave)에 의한 것으로 보고 해석하는 방법이다.

현장에서 $\mathbf{x}_m = (x_m, y_m)$ 에 위치한 m 번째 수신기($m = 1, \dots, M$)로 측정된 시간이력을 $s_m(t)$ 라 하자. $\mathbf{S}(f_0) = [S_1(f_0), \dots, S_M(f_0)]^T$ 는 주파수 f_0 에서의 수신기 각각에서의 시간이력의 푸리에 변환으로 이뤄진 열벡터를 나타낸다. Steering 벡터를 식 (1)과 같이 정의하자.

$$\mathbf{e}(\mathbf{k}) = [\exp(-ik \cdot \mathbf{x}_1), \dots, \exp(-ik \cdot \mathbf{x}_M)]^T \quad (1)$$

여기서, $\mathbf{k} = (k_x, k_y)$ 는 파수 벡터이고 T는 벡터의 전치(transpose)를 나타낸다. 만약 측정신호에 대각선행렬인 $\mathbf{W} = \text{diag}[w_1, \dots, w_M]$ 에 의해 가중치가 주어진다면, *steered response power*는 다음으로 주어진다(Johnson과 Dudgeon, 1993).

$$P(\mathbf{k}, f_0) = \mathbf{e}^H \mathbf{W} \mathbf{S} \mathbf{S}^H \mathbf{W}^H \mathbf{e} = \mathbf{e}^H \mathbf{R} \mathbf{W} \mathbf{e} \quad (2)$$

여기서, H는 Hermitian 전치벡터를 나타내고 R은 다음의 식으로 표현되는 공간스펙트럼 행렬을 나타낸다.

$$\mathbf{R}(f_0) = \mathbf{S} \mathbf{S}^H = \begin{bmatrix} G_{11}(f_0) & G_{12}(f_0) & \dots & G_{1M}(f_0) \\ G_{21}(f_0) & G_{22}(f_0) & \dots & G_{2M}(f_0) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{M1}(f_0) & G_{M2}(f_0) & \dots & G_{MM}(f_0) \end{bmatrix} \quad (3)$$

식 (2)에 나타난 공간스펙트럼 행렬의 각 원은 두 수신기간의 *cross-power* 스펙트럼을 나타낸다.

주파수 f_0 에서 *steered response power* 스펙트럼상의 최대치는 수신기 배열을 통과하는 지배모드 표면파의

파수와 관계가 있으며, 표면파의 위상속도는 다음의 식 (4)에 의해 결정된다.

$$V_R(f_0) = \frac{2\pi f_0}{|k_{peak}|} \quad (4)$$

최대치 파수인 k_{peak} 의 경우 수동표면파시험에서는 벡터, 주동표면파시험에서는 스칼라에 해당하는 값을 가진다.

2.2.2 Array Smoothing Function(ASF)

다중 수신기를 사용한 표면파기법의 경우, 신뢰성 있는 분산곡선의 결정을 위해서는 공간샘플링의 기능을 수행하는 수신기들의 배열특성을 이해하는 것이 필요하다. 특히, 1차원 수신기배열이 필요한 주동표면파기법과 비교했을 때, 2차원 수신기배열이 요구되는 수동표면파기법에서 배열특성이 표면파의 측정과 분석에 미치는 영향이 더욱 크기 때문에 수신기들의 배열특성을 이해하는 것은 더욱 중요하다고 할 수 있다.

수신기들의 배열특성은 수신기배열의 공간푸리에변환(spatial Fourier transformation)인 ASF(Johnson과 Dudgeon, 1993)를 통해 파악할 수 있다. 그림 3은 수신기간 간격 1m인 10개의 수신기로 이뤄진 등간격 선형배열의 ASF를 보여준다. 그림 3에 나타난 것처럼 ASF는 다음의 3가지 로브(lobe)들로 이뤄져 있다(Johnson과 Dudgeon, 1993): (1) 중심로브(mainlobe: 파수 0인 지점에 최대진폭을 갖는 봉우리 부분), (2) 여러 개의 측면로브(sidelobe: 파수 0이 아닌 지점에서 최대진폭보다 작은 진폭을 갖는 봉우리 부분들), 그리고 (3) 격자로브(grating lobe: 파수 0이 아닌 지점에 반복적으로 나타나는 중심로브와 같은 크

기의 진폭을 갖는 봉우리 부분들).

두 가지 중요한 배열특성인 파수해상도와 공간위신호(spatial aliasing)는 각각 최대수신기측정거리로 결정되는 중심로브의 넓이와 최소수신기간 거리로 결정되는 격자로브의 위치와 관련이 있다. 두 가지 배열특성과 더불어 또 한 가지 중요한 배열특성이 측면로브의 높이와 그 위치와 관련이 있다. 측면로브의 높이는 낮을수록 바람직하데, 측면로브의 높이가 높다면 그를 통한 에너지누수로 인해 파수스펙트럼상에 가최고치를 만들어 잘못 계산된 분산값이 생겨 날 수 있기 때문이다. 가최고치가 생겨나는 위치는 에너지누수를 발생시키는 측면로브의 위치와 관련이 있다.

3. 수동표면파시험에서의 계통오차

수동표면파시험에서 발생할 수 있는 계통오차는 무한 공간영역의 무한 개의 지점에서 샘플링이 불가능함으로 인해 발생하는 공간샘플링의 한계에서 비롯하며, 이는 실제 신호와 공간영역에서 측정된 신호 사이에 차이가 발생하는 것을 의미한다. 측정에 사용된 유한개의 수신기들로 이뤄진 수신기배열의 이러한 한계는 측정된 신호로부터 분산값 산정을 위해 전파된 파의 특정 주파수에서의 파수를 결정하는 능력에 영향을 미친다. 수동표면파시험에서 발생할 수 있는 계통오차는 주로 다음의 두 가지 공간샘플링의 한계에 기인하여 발생한다: (1) 부족한 파수해상도, (2) ASF의 측면로브를 통한 에너지누수. 이 두 가지 원인에 대해 각각 3.1절과 3.2절에서 자세히 설명하고자 한다.

3.1 부족한 파수해상도

Long(1964)은 어느 한 주파수에서 동일한 속도의 두 개의 파가 서로 다른 방향으로부터 전달되는 경우 측정된 위상속도는 실제 위상속도보다 작을 수 있음을 지적하였다. 측정된 수동표면파의 자료를 주파수-파수 방법으로 분석하는 경우, 2차원 파수영역상 서로 근접해 존재하는 여러 개의 파들의 존재는 사용된 수신기배열의 부족한 파수해상도에 의해 분리되지 못하여 잘못 측정된 파수로부터 왜곡된 위상속도를 이끌 수 있다. 이때 근접한 파들이 동일 속도를 갖는 경우에는 계산된 위상속도가 실제 값보다 작게 나타난다.

그림 4는 2차원 파수영역상에 위치한 동일한 속도의

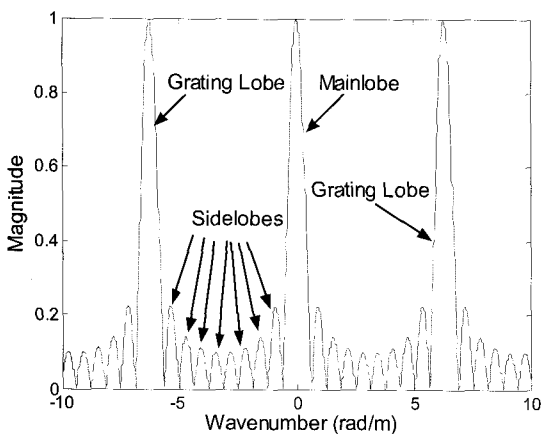


그림 3. ASF에서의 로브의 종류

서로 다른 진행방향을 가지는 두 개의 평면파를 보여 주고 있다. 점 A와 B는 어느 한 주파수에서 2차원 파수 영역상 나타나는 두 파의 실제 위치를 나타낸다. 두 파의 위상속도가 같기 때문에, 점 A와 B의 원점 O로부터의 거리인 파수벡터의 절대값이 서로 같으며, 따라서 점 A와 B는 동일원상에 놓이게 된다. 만약 사용된 수신기 배열의 파수해상도가 두 파를 분리할 수 있을 정도로 높지 않다면, 사용된 수신기 배열은 분리된 점 A와 B 각각이 아닌 두 점의 중간에 병합된 점 C에 위치한 파로 인식하는 오류를 범하게 된다.

이렇게 측정된 점 C에 대응하는 파수(즉, 그림 4에서 점 C의 원점으로부터의 거리)는 실제 파수(즉, 그림 4에서 점 A와 B의 원점으로부터의 거리)에 비해 작은 값을 가지며, 따라서 측정된 위상속도는 실제 위상속도보다 크게 얻어진다. 이때 부족한 파수해상도로 인해 생긴 오차는 두 파의 진행방향 사이의 각인 α (그림 4)의 함수로 나타낼 수 있다. 주파수를 f 라고 할 때, 점 C에 대응하는 파수로부터 구한 외견상 위상속도(apparent phase velocity)와 실제 위상속도의 비는 다음의 식 (5)처럼 계산될 수 있다:

$$\frac{V_{app}}{V_{true}} = \frac{2\pi f / k_{app}}{2\pi f / k_{true}} = \frac{k_{true}}{k_{app}} = \frac{1}{\cos(\frac{\alpha}{2})} = \sec(\frac{\alpha}{2}) \quad (5)$$

여기서, V_{app} = 외견상 위상속도이며, V_{true} = 실제 위상속도이며, k_{app} = 외견상 파수이며, k_{true} = 실제 파수이다.

그림 4에 나타난 두 파의 위상속도는 수신기 배열에 의해 결정되는 파수해상도가 두 파를 파수영역에서 분리할 수 있을 정도로 충분히 높은 경우에만 정확히 계산

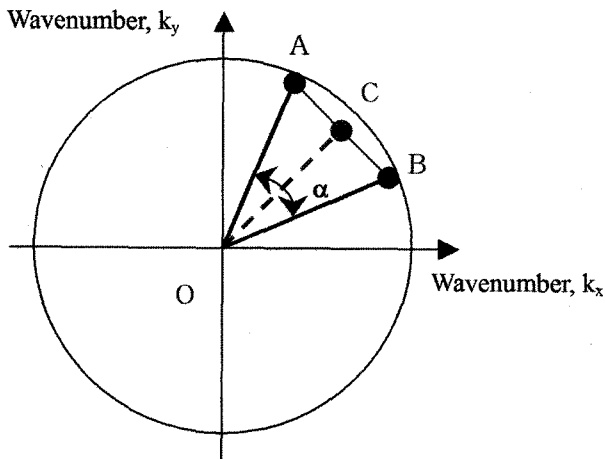


그림 4. 부족한 파수해상도의 영향

될 수 있다. Yoon(2005)에 의하면 근접한 두 파의 분리 가능여부는 주어진 수신기 배열의 파수해상도에 대한 파수영역상 두 파간의 상대적인 거리에 의해 결정된다. 따라서, 분리가능한 두 파간의 파수영역상 최소거리를 가늠하기 위해선 사용된 수신기 배열의 파수해상도를 구해야 한다. 중심로브 넓이의 절반에 해당하는 파수해상도는 선형배열과 원형배열인 경우 각각 식 (6)과 (7)에서와 같이 구해질 수 있다(Johnson과 Dudgeon, 1993):

$$\Delta k_{linear} = \frac{2\pi}{D} \quad (6)$$

$$\Delta k_{circular} = \frac{1.22\pi}{R} \quad (7)$$

여기서, D 는 선형배열의 길이이며, R 은 원형배열의 반경이다.

주파수 5Hz에서 동일한 200m/sec의 위상속도와 42°의 α 를 가지고 서로 다른 방향으로 진행하는 두 개의 단위진폭 파를 가정하자. 그림 5는 이 가상의 두 개의 파를 30m 반경의 원형으로 원주상 등간격 배열된 16개의 수신기들로 측정된 파수스펙트럼을 보여준다(그림에서 +는 실제 두 파의 위치를 나타내고 Δ 은 측정된 파의 위치를 나타낸다). 그림에 나타난 것처럼 두 파는 사용된 수신기 배열의 부족한 파수해상도로 인해 분리되어 측정되지 못하고 병합된 하나의 파로 인식되었다. 그 결과 실제보다 더 작은 파수와 더 큰 위상속도가 얻어지게 된다.

3.2 측면로브를 통한 에너지누수

부족한 파수해상도와 더불어 측면로브를 통한 에너지

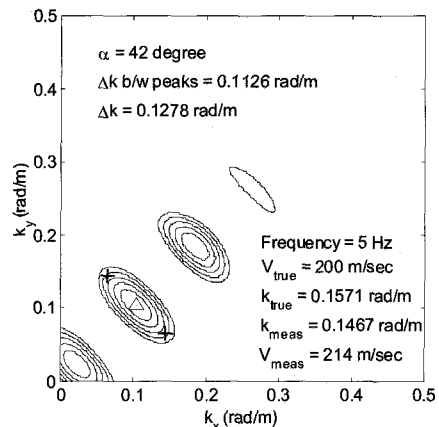


그림 5. 부족한 파수해상도로 인해 병합되어 측정된 파

지누수도 왜곡된 파수 측정을 초래하는 원인이 될 수 있다. 공간샘플링의 한계를 극복한 완벽한 공간샘플링(perfect spatial sampling)을 했다고 가정할 경우, ASF는 원점상의 impulse 형태가 된다. 즉, 서로 근접한 어떤 형태의 파들도 분리할 수 있는 파수해상도와, 측면로브가 존재하지 않기 때문에 에너지누수도 없는 완벽한 ASF를 얻을 수 있는 것이다. 그러나 현실적으로는 공간샘플링의 한계가 존재하는 공간샘플링만이 가능하기 때문에, 사용된 수신기배열의 ASF는 여러 개의 측면로브를 가지게 된다. 이러한 측면로브의 존재로 인해 어떤 주파수에서 여러 개의 파가 존재하는 경우, 측면로브를 통해 누수된 에너지가 중첩되어 파수스펙트럼상에 왜곡된 최고치가 만들어 질 수 있다. 이는 왜곡된 위상속도의 측정으로 이어지는데, 일반적으로 지배적인 단파(single wave)로 구성된 파장(wavefield)을 다루는 주동표면파 시험에서 보다 여러 개의 파로 구성된 파장(wavefield)을 다루는 수동표면파 시험에서 측면로브를 통한 에너지누수를 더욱 주의 깊게 다뤄야 할 필요가 있다.

그림 6은 측면로브를 통한 에너지누수 때문에 잘못 측정된 파의 예를 보여준다. 5Hz의 주파수에서 200m/s의 동일한 속도로 87°의 α 를 가지고 서로 다른 방향으로 진행하는 두 개의 단위 진폭 파를 가정하자. 그림 6은 이 두 개의 파를 30m 반경의 원형으로 원주상 등간격 배열된 16개의 수신기들로 측정한 파수스펙트럼을 보여준다(그림에서 +는 실제 두 파의 위치를 나타내고 Δ 는 측정된 파의 위치를 나타낸다). 그림에 나타난 것처럼 주어진 수신기배열의 파수해상도가 두 파를 구분할 수 있을 정도로 충분히 작음에도 불구하고 측면로브를 통한 에너지누수로 인해 왜곡된 파수가 측정되었고, 결국 왜곡된 위상속도가 얻어지게 되었다.

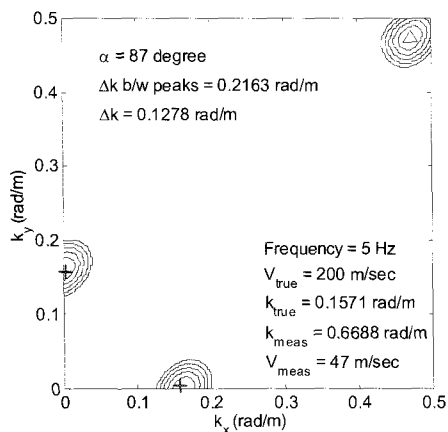


그림 6. 측면로브를 통한 에너지누수로 인해 잘못 측정된 파

현장에서 많이 사용되는 16개 이상의 수신기로 이뤄진 원형배열의 경우 에너지누수를 심각하게 발생시키는 측면로브와 중심로브간의 거리가 측정되는 파수에 비해 상당히 크기 때문에 측면로브를 통한 에너지누수로 왜곡된 파수는 실제 파수와 크게 다른 값을 가지게 된다. 따라서, 이렇게 왜곡되어 측정된 파수의 경우 일반적인 경향의 파수들과의 비교를 통해 쉽게 구별할 수 있다. 또한 파수스펙트럼상에 존재하는 파들의 에너지의 크기가 다른 경우, 서로 다른 파들의 에너지의 차이가 증가함에 따라 측면로브를 통한 에너지누수가 미치는 영향이 상대적으로 감소한다고 보고 되었다(Yoon, 2005).

4. 개선된 수동표면파 측정 및 분석기법의 제안

3절에서 살펴본 것처럼 부족한 파수해상도와 측면로브를 통한 에너지누수의 문제는 제대로 다루지지 않는다면 왜곡된 분산값을 제공하는 원인이 될 수 있다. 이렇게 발생한 수동표면파 분산값의 오차는 1) 수동표면파 측정에 사용되는 수신기배열의 배열특성을 개선하거나, 2) 수동표면파 시험에서 얻어진 분산값에 대한 면밀한 분석을 통해서 줄일 수 있다. 4절에서는 수동표면파 시험에서 발생하는 계통오차를 최소화시키기 위한 두 가지 방법에 대해 제안하고자 한다.

4.1 배열특성 개선

표면파의 측정에 있어 수신기배열 선택의 중요성은 SASW 시험을 수행할 때 몇 가지 수신기배열로 다양한 가진원으로 발생된 표면파를 측정하여 넓은 영역의 주파수 범위에 해당하는 분산곡선을 도출하는 과정에서도 알 수 있다. 다중 수신기를 사용하여 주동표면파 시험을 수행하는 경우 수신기간 거리가 일정한 배열보다는 수신기간 거리를 다르게 배치하는 배열이 향상된 파수해상도와 공간위신평 기준을 만들 수 있어 유리하다고 보고되었다(Zywicki, 1999). 비용이나 시간의 제약으로 인해 제한적인 개수의 수신기만을 현장에서 사용할 수 있기 때문에 2차원 수신기배열이 요구되는 수동표면파 시험에서 수신기배열의 선택은 더욱 중요한 사항이다. Zywicki(1999)는 다양한 형태의 2차원 수신기배열로 측정한 수동표면파 현장시험의 결과와 배열특성의 이론적 검토결과를 토대로 원주상에 동일간격으로 배열된

원형 수신기배열을 다음의 이유로 추천하였다: 1) 일정한 방향각 해상도를 가지기 때문에 방향성을 가지지 않고, 2) ASF의 대칭성으로 인해 큰 측면로브를 만나기 전에 최대값을 가지는 파수를 확인할 수 있는 확률이 크며(즉, 측면로브의 영향이 상대적으로 크지 않으며), 3) 해상도 특성이 다른 배열에 비해 우수하다.

알려진 것처럼 표면파시험의 측정결과는 측정에 사용된 수신기의 배열특성에 영향을 받으며, 이러한 배열특성을 결정짓는 수신기의 개수나 수신기의 배치 등은 장비, 시험공간, 그리고 시험시간 등의 현장조건에 의해 제한된다. 따라서, 이러한 현장조건들을 고려하여 최선의 배열특성을 확보할 수 있도록 최적화된 배열로 수신기를 배치하는 작업이 요구된다. 본 논문에서는 수동표면파의 측정을 위한 여러가지 2차원 수신기배열들 중 원형배열만이 사용되었고, 본 절에서는 원형 수신기배열의 배열특성과 현장에서 수동표면파 측정을 위한 최선의 수신기배열을 결정하는 과정에 대해서 다루고자 한다.

원형배열의 파수해상도는 단순히 배열의 크기만 키움으로써 향상시킬 수 있다. 하지만 수동표면파 측정에서 배열의 크기는 종종 몇 가지 현장여건들에 의해 제한된다: 첫째, 수신기의 개수가 일정한 경우 배열의 크기를 키우는 것은 파수해상도를 향상시킬 수는 있지만, 수신기간 거리를 멀어지게 하기 때문에 측면로브를 통한 에너지누수를 더 심각하게 할 수 있다. 그림 7은 반경 30m, 40m, 그리고 50m의 원주상에 등간격으로 배열된 16개 수신기들로 이뤄진 배열의 ASF 들을 보여준다. 그림에서 등고선은 크기를 정규화 시켜 0.5~1.0의 크기만을 나타내었으며, 사용된 ASF의 대칭성을 감안하여 양(positive)의 파수축에 대한 값만을 도시 하였다. 그림

7에 보이는 바와 같이 원점에 위치한 중심로브의 넓이는 배열의 크기가 커짐에 따라 줄어들며, 그 결과로 파수해상도는 향상된다. 하지만 수신기 수를 유지한 상태에서 배열의 크기만을 증가시킨 결과, 높이가 큰 측면로브가 많아짐으로써 이를 통한 에너지누수는 더욱 심각해진다. 둘째, 충분한 파수해상도를 얻기 위해 확보해야 하는 크기의 2차원 배열은 종종 충분한 크기의 평면을 확보할 수 없는 현장여건상 불가능할 수 있다. 특히, 도심지 현장의 경우 공간적인 제약이 더욱 심하기 때문에 종종 부족한 파수해상도를 가지는 수신기배열을 가지고 시험해야만 한다. 수신기의 수와 배열의 크기를 동시에 늘려주는 것이 에너지누수를 제어하면서 향상된 파수해상도를 얻을 수 있는 최선의 방법이 될 수 있지만 현실적으로는 어렵다고 할 수 있다.

수신기배열의 ASF를 비교하는 것은 각각의 배열특성을 파악하는 과정은 될 수 있지만 현장여건에 맞는 최선의 수신기배열을 선택하기 위한 방법이 되기에는 충분하지 않다. 현장에 존재하는 수동표면파의 특성에 따라 필요한 파수해상도와 측면로브를 통한 에너지누수의 허용정도가 달라지기 때문이다. 예를 들면 30m 반경의 수신기배열로 현장에 존재하는 저주파대역의 표면파의 파수를 구분해 낼 수 있다면, 굳이 그 이상의 크기를 갖는 수신기배열을 사용할 필요가 없는 것이다.

일반적으로 저주파대역의 표면파는 매우 작은 파수를 갖게 된다. 이런 저주파대역의 파들을 주로 다루는 수동표면파시험의 경우 적합한 파수해상도를 얻기 위해서는 상당히 큰 2차원 배열이 필요하다. Yoon(2005)은 미국 남동부지역에서 행한 수동표면파시험 분석 결과로부터 0.02rad/m 정도로 작은 파수를 가지는 파를 정확도 높게 측정하기 위해선 원형배열을 이용하는 경우

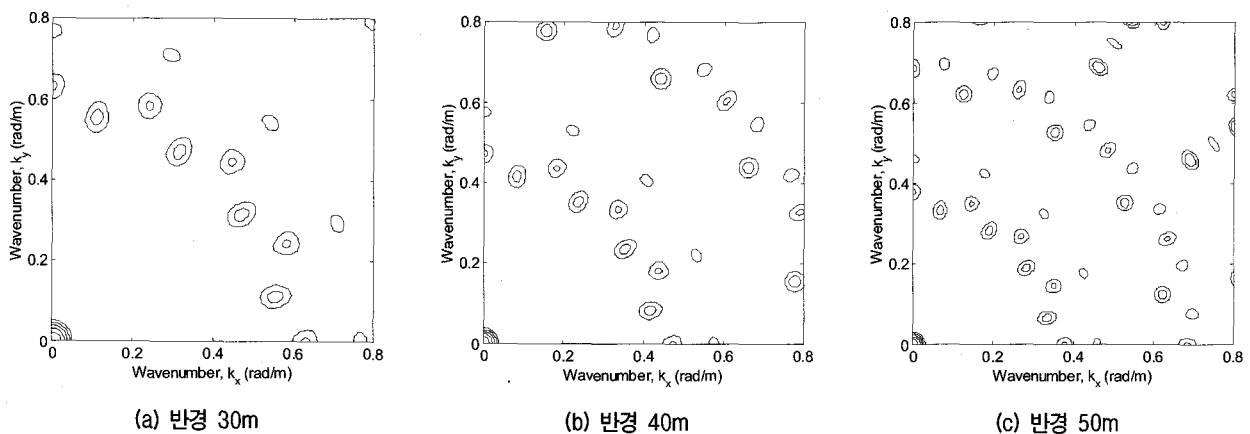


그림 7. 크기가 다른 원형배열의 ASF 비교

대략 30m 이상의 반경을 가지는 수신기배열이 필요한 것으로 보고하였다. 이 제안 값은 다분히 경험적이며 지반조건이나 현장여건에 따라서는 적합하지 않을 수 있지만, 대략의 지반조건만을 인지하고 수동표면파시험을 수행하는 경우에 수신기배열의 기본값으로 유용하게 사용될 수 있으리라 여겨진다.

수신기배열의 기본값을 인지한 상태에서 가용한 장비와 현장여건을 고려하여 최선의 수신기배열을 선택하기 위한 방법으로 2개 이상 다른 반경을 가지는 수신기배열로 시험하여 분산곡선을 비교하는 작업을 수행할 것을 권한다. 이는 파수해상도로 인한 오차의 정도와 측면로브를 통한 에너지누수 정도를 가늠하는 방법이 될 수 있으며, 파수해상도와 측면로브의 에너지누수 정도는 트레이드오프(trade-off)의 관계이기 때문에 서로 다른 반경의 배열로 측정된 수동표면파를 이용한 수동분산곡선은 상호보완적으로 사용될 수 있다.

도심지 현장과 같이 원형배열이 가능한 넓은 공간의 확보가 어려운 경우, 수직 교차하는 두 개의 선형배열을 이용한 L 형이나 십자가배열, 혹은 측정 후에도 진행방향을 파악할 수 없어 어느 정도의 오차를 감안하고 사용하는 1차원 배열(Park과 Miller, 2006)이 수동표면파 측정을 위해 선택적으로 이용될 수 있다. 이 경우도 원형배열인 경우와 마찬가지로 각각의 수신기배열이 가지는 배열특성을 파악하고 최선의 수신기배열을 선정하여 시험을 수행, 결과를 도출하는 것이 필요할 것이다.

4.2 수동분산값 정련과정(Refining Process)

수신기배열을 최적화 시키는 방법은 현장여건에 의해 다분히 제한적이기 때문에 수동표면파시험의 계통 오차는 완벽하게 제거되지 못하고 분산곡선에 반영된다. 이러한 공간샘플링의 한계로 인한 오차가 분산곡선에 포함되는 것을 최소화 시키기 위해서는 수신기배열을 최적화 시키는 방법과 더불어 수동표면파시험으로부터 얻어진 분산곡선에 대한 면밀한 분석이 요구된다.

Yoon(2005)은 파의 전달특성에 따른 세가지 대표 지반조건(1. 깊이 방향으로 지반강성이 단순 증가하는 지반, 2. 견고한 층이 연약한 층 사이에 존재하는 지반, 그리고 3. 연약한 층이 견고한 층 사이에 존재하는 지반)에서의 표면파시험을 모사한 수치해석결과들로부터 분산곡선들을 구하였다. 여기서 구해진 분산곡선들로부터, 대략 10~15Hz 이하의 저주파대역에서는 지반조건

과 관계없이 표면파의 기본모드(fundamental mode)가 지배적임을 보고하였다. 수동표면파시험이 대부분 10Hz 이하의 저주파대역에서의 분산곡선에 초점을 맞추고 있기 때문에, 모드간 이동으로 인해 튀는 값이 발생하기 보다는 하나의 모드에서 부드럽게 이어지는 분산곡선이 얻어질 것이다. 따라서, 분산곡선의 일반적인 경향에서 크게 벗어난 분산값이 존재한다면, 부족한 파수해상도나 측면로브를 통한 에너지누수에 의한 오차를 포함하고 있다고 의심해 볼 수 있다.

오차를 포함한 분산값을 최종적인 분산곡선에 포함시키지 않기 위해서는 수동표면파의 진행방향을 주의 깊게 볼 필요가 있다. 일정 주파수 대역에서 감지되는 수동표면파의 특성상 어떤 수동표면파가 지배적이라면 이는 어느 특정 주파수에서만이라고 보기 어려우며, 측정된 지배 수동표면파의 진행방향은 일정 주파수대역에서 어느 정도 일정할 것으로 기대된다. 따라서, 부족한 파수해상도나 측면로브를 통한 에너지누수에 의한 오차를 포함하는 경우 일반적인 경향에서 벗어나는 분산값이 얻어질 것이며, 파의 진행방향을 살펴보면 분산곡선상 주변에 위치하면서 그러한 오차를 포함하지 않는 경우의 파의 진행방향과 다를 것이다.

앞서 언급한 두 가지 사항은 심각한 오차를 포함하는 분산값을 분산곡선의 결정시 배제시킬 수 있는 유용한 방법이라 사료된다. 본 논문에서는 이 방법을 신뢰성 있는 수동분산곡선 결정을 위한 수동분산값의 정련과정이라고 명명하였다.

그림 8은 미국의 캘리포니아주 산호세의 한 현장에서 수행된 수동표면파시험으로부터 수동분산곡선을 결정하는 과정에 적용된 수동분산값 정련과정의 예를 보여

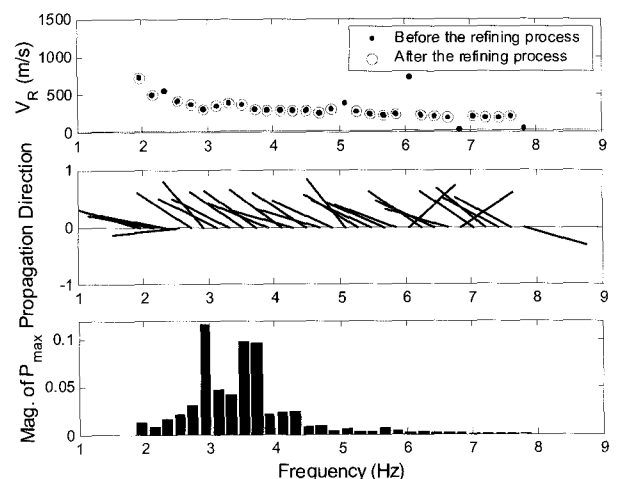


그림 8. 수동분산값 정련과정의 예

준다. 그림 8에 예시된 것처럼 정련과정을 위해 표면파 (Rayleigh 파)의 위상속도, 파의 진행방향, 그리고 P_{max} (steered response power: 스펙트럼상의 최대값)를 주파수의 함수로 표시하였다. 수동분산값 정련과정은 측정된 수동표면파로부터 구한 수동분산값을 검토하는 것으로 시작한다. 만약 특정 분산값이 분산곡선의 일반적인 경향에서 크게 벗어나 있으면, 해당 주파수에서의 파 진행방향을 주변 주파수에서의 파 진행방향과 비교한다. 분산값이 일반적인 경향에서 크게 벗어나 있으면서 해당 주파수에서의 파 진행방향이 주변에서의 파 진행방향과 다르다면 해당 분산값에는 부족한 파수해상도 또는 측면로브를 통한 에너지누수에 의한 오차를 포함하고 있을 가능성이 크다고 할 수 있다. 이러한 분산값들은 최종 분산곡선에는 포함시키지 않는 것이 신뢰성 있는 수동분산곡선의 도출을 위해 바람직한 것으로 여겨진다. 수동분산값의 정련과정은 최종적으로 P_{max} 의 확인을 통해 측정된 수동표면파의 주파수대역을 파악하여 분산곡선의 주파수대역을 결정하는 것으로 마무리 된다. 수동분산값 정련과정과는 별도로, 공간위신호 기준은 측정에 이용된 수신기배열에 의해 결정된 측정 가능한 최대 파수와 관련된다. 그림 8의 분산곡선 그래프에서 분산곡선 아래의 실선은 공간위신호 기준을 나타내며, 실선 아래로는 분산값이 존재할 수 없게 된다.

5. 제안된 수동표면파 측정 및 분석기법의 현장 적용

지금까지 살펴본 것처럼 수동표면파시험으로부터 신뢰성 있는 분산곡선을 결정하기 위해서는 최적화된 수신기배열과 수동분산값 정련과정을 통한 수동표면파의 측정과 분석이 필요하다. 본 논문에서 제안된 개선된 수동표면파 측정과 분석방법은 2003년 7월 8일 미국 캘리포니아주 산호세에 위치한 Williams street park에서 행한 수동표면파시험에 적용되었다.

5.1 현장시험 개요

Williams street park 현장(그림 9)은 서경 121.8667°, 북위 37.3333°에 위치하여, 주변에 있는 280번 고속도로, 산호세 다운타운, 태평양, 그리고 샌프란시스코만 등의 수동가진원을 활용한다면 성공적인 수동표면파시험을 수행할 수 있을 것으로 기대되는 곳이다. 현장에는

넓은 평면이 존재하고 있어, 성공적인 수동표면파 측정을 위한 큰 직경의 원형 수신기배열의 사용이 가능했다.

현장지반은 대략 9m 깊이까지의 모래/자갈층, 9~18m에 존재하는 실트질 점토층, 그리고 18~50m에 존재하는 모래/자갈층으로 이뤄져 있다. 18~50m의 모래/자갈층 아래로는 점토, 실트, 모래, 자갈질의 견고한 층적층이 존재한다. 자갈층의 경우 주변 산들에 존재하는 Franciscan 기반암에서 분리된 사암, 화산 현무암, 그리고 붉은 규질암(chert) 등으로 이뤄져 있다(Hanson 등, 2002).

수동표면파 측정을 위해 16 채널의 VXI data acquisition unit이 사용되었다. 고유진동수 1Hz의 Kinometrics SS-1 Ranger와 Mark Products L4-C 지오폰이 수신기로 사용되었다. 배열특성의 영향을 확인하기 위해 30m, 40m, 그리고 50m 반경인 원의 원주상 등간격으로 16개의 수신기를 배열하여, 각 반경마다 3번씩 총 9번의 수동표면파

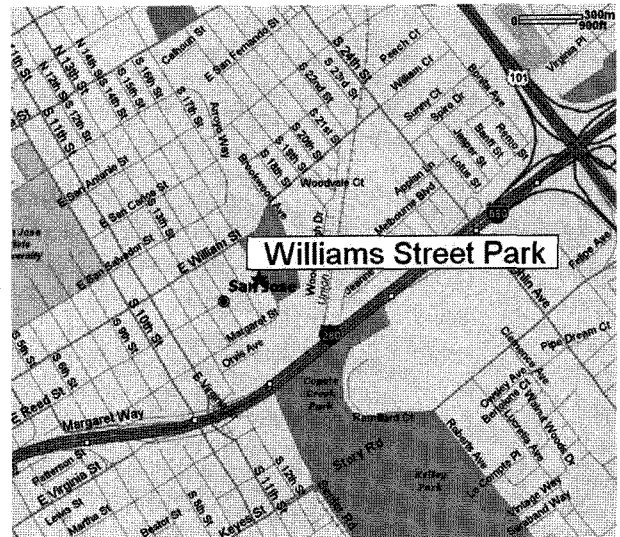


그림 9. Williams street park 현장의 위치

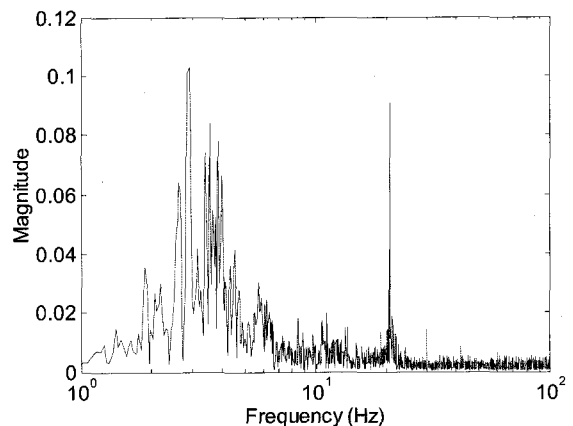


그림 10. 측정된 수동표면파의 주파수특성

시험이 수행되었다. 매 시험마다 320Hz의 샘플링 주파수로 256초 동안 측정하였고, 평균합산(ensemble average)을 위해 2^{16} 의 시간영역 기록을 16개의 블록으로 나누었다.

각 수신기에 기록된 시간이력은 주파수-파수 분석을 통해 표면파의 분산값을 계산하는데 사용되었다. 신뢰성 있는 수동표면파 분산값의 산정을 위해선 측정된 수동표면파의 주파수분석을 통해 풍부한 에너지를 가지는 주파수 대역을 파악하는 작업이 필요하다. 그림 10은 Williams street park 현장에서 한 수신기에 측정된 수동표면파의 주파수특성을 보여준다. 상대적으로 큰 에너지가 대략 2~8Hz 정도의 주파수대역에 집중돼 있는 것을 알 수 있다. 따라서 해당 주파수대역에서 수동표면파 분산곡선이 얻어질 것으로 기대된다.

5.2 개선된 배열특성의 적용 효과

그림 11은 Williams street park 현장에서 3 가지 반경의 원형배열을 이용하여 수행한 수동표면파시험으로부터 구한 분산곡선들을 보여준다. 그림 11에 나타난 각 반경에

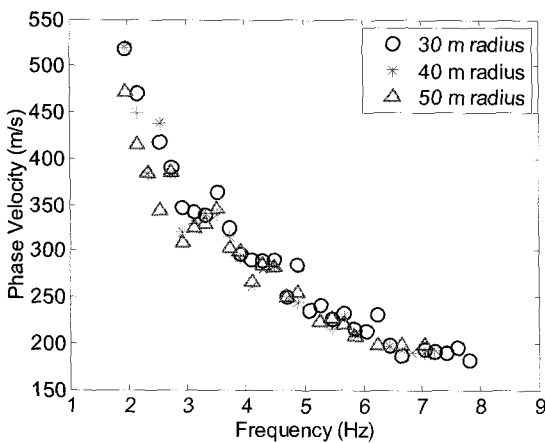


그림 11. Williams street park 현장의 수동분산곡선

해당하는 분산곡선은 각 반경에서 3번의 측정을 통해 구한 수동분산곡선을 평균하여 구한 것이다. 평균하기 전 각각의 분산곡선을 결정하기 위해 4.2절에서 제안한 수동분산값 정련과정이 적용되었다. 수신기배열의 크기에 따른 수동분산곡선의 차이는 먼저 원형배열의 크기가 증가함에 따라 분산곡선의 최대 주파수가 8Hz에서 7Hz로 낮아진 데서 확인할 수 있다. 이는 배열크기 증가에 따라 수신기간 거리가 증가하여 더욱 엄격해진 공간위신호 제약과 더욱 심각해진 측면로브를 통한 에너지누수에 따른 결과이다. 원형배열의 크기에 따른 저주파대역에서의 분산값의 차이가 크지 않은 걸로 볼 때, 배열크기의 증가에 따른 파수해상도의 증가가 분산값 산정에 미치는 영향은 본 현장에서는 크지 않았던 것으로 여겨진다.

5.3 수동분산값 정련과정의 적용 효과

그림 12는 Williams street park 현장에서 30m, 40m, 그리고 50m의 반경을 갖는 원형배열을 가지고 실시한 수동표면파시험으로부터 분산곡선을 결정하기 위한 수동분산값 정련과정을 보여준다. 그림에 나타난 것처럼 반경이 커질수록 수신기간 거리가 멀어지기 때문에 발생하는 측면로브를 통한 에너지누수와 공간위신호 발생 증가로 인해 5~8Hz에서 오차를 포함한 분산값을 더 많이 발견하였다. 저주파대역인 2~5Hz의 경우 수신기 배열의 크기에 관계없이 오차를 포함한 분산값이 거의 발견되지 않았다. 수동분산값 정련과정을 통해 부드러운 수동분산곡선을 얻어 줄 수 있음을 알 수 있다.

5.4 수동표면파시험과 주동표면파시험 결과의 비교

수동표면파시험은 현장에서 사용이 가능한 주동가진

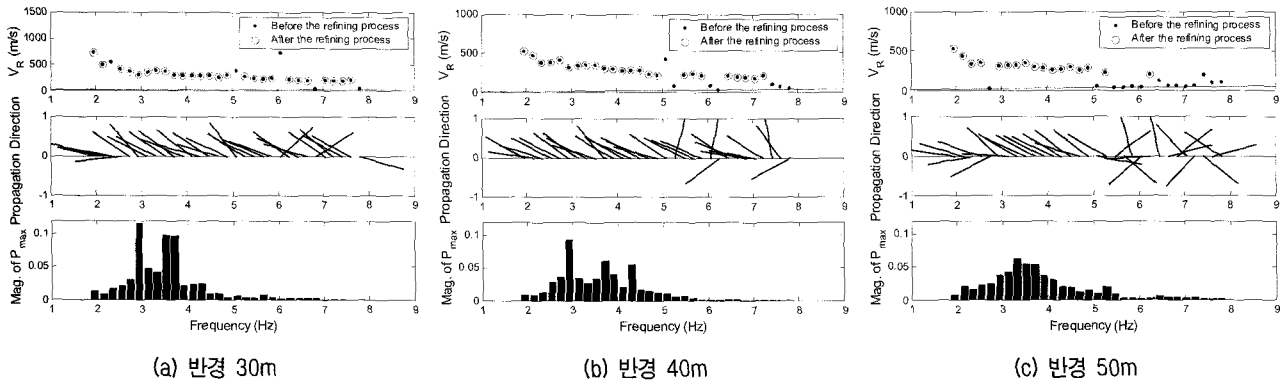
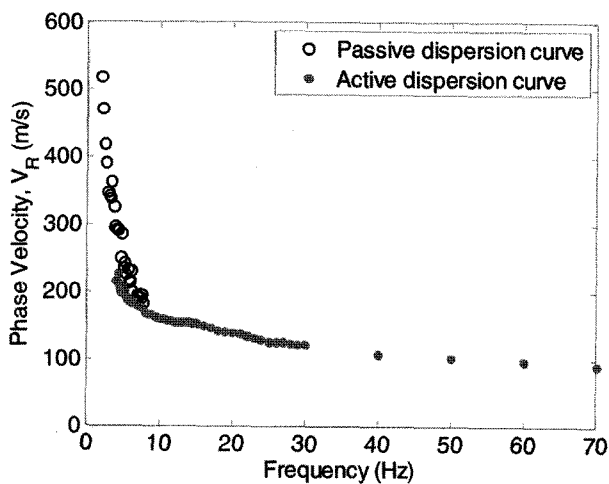


그림 12. 수동분산값 정련과정의 현장적용

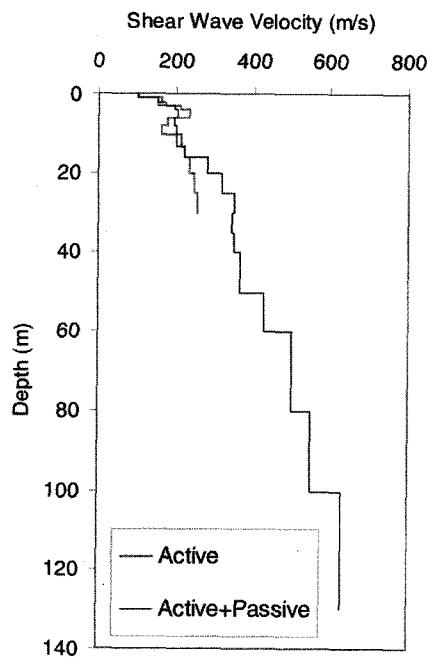
원으로 원하는 심도까지 도달 가능한 저주파대역에서의 주동표면파의 발생이 어려운 경우에 사용을 고려해 볼 수 있는 방법으로 수동가진원이 풍부하고 수신기배열에 적합한 공간이 확보되어야 그 수행이 가능하다. 수동표면파시험은 단독으로 수행되어 수동분산곡선으로부터 전단파속도 주상도를 도출해 내기도 하지만, 수동표면파의 특성상 10Hz 이하에서 주로 발생하기 때문에 천층부 지반의 세밀한 분석을 동반해야 하는 목적이란 면 적합하지 않다. 따라서, 현장에서는 우선적으로 주동표면파시험이 수행되며, 심부의 지반정보가 필요한 현장이라면 추가적으로 수동표면파가 수행되어 주동분산곡

선과 수동분산곡선을 합친 통합분산곡선으로부터 천층부 지반에 대한 해상도를 유지하면서 원하는 심도까지의 전단파속도 주상도를 구하는 방법이 사용된다(Yoon과 Rix, 2004). 주동표면파시험과 수동표면파시험을 동시에 수행하는 것은 결과의 비교를 통해 주동표면파시험과 수동표면파시험에서 각각 발생하는 오차에 대해 검증할 수 있는 기회를 제공하기도 한다.

그림 13(a), (b)는 Williams street park 현장의 동일지점에서 행해진 주동표면파시험과 수동표면파시험으로부터 얻어진 주동분산곡선과 수동분산곡선, 그리고 이 분산곡선들을 이용하여 얻어진 전단파속도 주상도의 비교를 보여준다. 수동표면파시험은 30m 반경의 16개 수신기로 이뤄진 원형수신기배열을 이용하여 수행되었고, 주동표면파시험은 가진원으로부터 2.4~33.5m 거리에 불규칙하게 선형 배열된 15개의 수신기를 이용하여 수행되었다. 그림에 나타난 것처럼 수동분산곡선으로부터 2~4Hz에서의 분산곡선을 추가로 얻을 수 있어 수동분산곡선이 더해진 경우 전단파속도 주상도의 최대심도는 130m로 주동분산곡선만을 사용하였을 때 얻어진 30m의 최대심도와 비교했을 때, 30~130m의 월등히 많은 지반정보를 추가적으로 제공하고 있다. 그림 13(a)에 나타난 주동분산곡선과 수동분산곡선의 차이와 그림 13(b)에 나타난 깊이 30m까지의 두 전단파속도 주상도의 차이는 주로 주동표면파시험에서의 근접장효과에 기인한 것으로 보고되었다(Yoon, 2005).



(a) 분산곡선 비교



(b) 전단파속도 주상도 비교

그림 13. 표면파기법의 종류에 따른 분산곡선과 전단파속도 주상도의 비교

6. 결론

본 논문에서는 저주파대역의 분산곡선을 얻기 위한 방법으로 수동가진원의 사용이 제안되었고, 수동가진원을 사용하여 얻어진 수동분산곡선의 신뢰성을 향상시키기 위해 수동표면파시험에서 발생할 수 있는 계통오차에 대한 연구가 수행되었다. 이러한 계통오차는 부족한 파수해상도와 측면로브를 통한 에너지누수로 인해 생겨나며, 이를 줄여 주기 위한 측정 및 분석방법의 개선을 위한 연구가 이루어 졌고, 다음의 결론을 얻을 수 있었다:

- (1) 수동표면파시험에서 발생하는 부족한 파수해상도나 측면로브를 통한 에너지누수로 인한 오차를 최소화하려면 현장조건에 맞게 사용된 수신기배열의 배열특성을 파악하고 최적화하여 수동표면파를 측

정하는 것이 필요하다. 수신기배열의 배열특성은 ASF를 확인함으로써 파악할 수 있지만 현장 여건에 맞는 최선의 수신기배열을 선택하기 위한 방법이 되기에는 충분하지 않다. 현장에서는 2 가지 이상의 크기의 수신기배열을 사용하여 얻어진 분산곡선의 비교를 통해 파수해상도로 인한 오차의 정도와 측면로브를 통한 에너지누수로 인한 오차의 정도를 가늠하여 수동분산곡선을 작성하는 방법이 효과적일 것으로 여겨진다.

- (2) 수신기배열을 최적화 시키는 방법은 현장여건에 종속적인 제한적인 방법이기 때문에 수동표면파시험의 계통오차는 여전히 남아 산정된 분산곡선에 반영된다. 제안된 수동분산값 정련과정은 수동표면파시험의 계통오차의 원인과 저주파대역(10Hz 이하) 분산곡선의 특성에 대한 이해를 바탕으로, 수동표면파의 측정으로 얻어진 분산곡선을 면밀히 분석하여 계통오차가 포함된 분산값을 제거하여 최종적으로 신뢰성 있는 수동분산곡선을 결정하는 방법이다. 제안된 수동분산값 정련과정은 수동표면파시험의 심각한 계통오차를 포함하는 분산값을 최종 분산곡선에 포함시키지 않도록 제거하는데 효과적이다.
- (3) 일반적으로 수동표면파시험에서 측면로브를 통한 에너지누수는 실제 값과 큰 차이를 갖는 왜곡된 파수값을 제공한다. 이렇듯 왜곡된 파수값으로 인해 잘못 계산된 분산값은 실제 분산값과의 큰 차이로 인해 구별이 용이하며, 본 논문에서 제안된 수동분산값 정련과정을 통해 제거될 수 있다.
- (4) Williams street park 현장에서 수행된 수동표면파시험에 제안된 최선의 수신기배열 선택을 위한 방법과 수동분산값 정련과정이 성공적으로 적용되었다. Williams street park 현장에서 행해진 주동 및 수동표면파시험 결과의 비교에서 알 수 있듯이, 저주파대역의 수동가진원의 사용은 주동가진원만 이용한 경우와 비교해 표면파를 이용한 가탐심도를 획기적으로 증가시켰다.

참 고 문 헌

1. 박형춘, 김동수 (2004a), "HWAW(Harmonic Wavelet Analysis of Wave) 방법을 이용한 새로운 탄성파 지반조사기법의 개발(I)-분산곡선의 결정", *대한토목학회논문집*, 제 24권, 제 2C호, pp.105-115.
2. 박형춘, 김동수 (2004b), "HWAW(Harmonic Wavelet Analysis of Wave) 방법을 이용한 새로운 탄성파 지반조사기법의 개발(II)-시험 구성 및 역산과정", *대한토목학회논문집*, 제 24권, 제 2C호, pp.117-124.
3. 한국건설기술연구원 (1997), *SASW 기법을 이용한 지반강성구조의 평가에 관한 연구*, 현대건설(주) 기술연구소, pp.46-61.
4. 현대건설(주) 기술연구소 (1998), *표면파를 이용한 지반조사 기술 개발*, 현대건설(주) 기술연구소, pp.77-103.
5. Hanson, R. T., Newhouse, M. W., Wentworth, C. M., Williams, C. F., Noce, T. E., and Bennett, M. J. (2002), *Santa Clara valley water district multi-aquifer monitoring-well site, Coyote Creek outdoor classroom, San Jose, California*, Open-File Report 02-369, USGS.
6. Heisey, J. S., Stokoe, K. H., and Meyer, A. H. (1982), "Moduli of pavement system from spectral analysis of surface waves", *Transportation Research Record 852*, TRB, National Research Council, pp. 22-31.
7. Johnson, D. H., and Dudgeon, D. E. (1993), *Array signal processing: concept and techniques*, PTR Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.
8. Jones, R. B. (1958), "In-situ measurement of the dynamic properties of soil by vibration methods", *Geotechnique*, Vol.8, No.1, pp.1-21.
9. Lacoss, R. T., Kelly, E. J., and Toksoz, M. N. (1969), "Estimation of seismic noise structure using arrays", *Geophysics*, Vol.34, pp. 21-38.
10. Lai, C. G. (1998), *Simultaneous inversion of Rayleigh phase velocity and attenuation for near-surface site characterization*, Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, 370p.
11. Long, L. T. (1964), *A study of short-period microseisms*, MS Thesis, New Mexico Institute of Mining and Technology, 54p.
12. Nazarian, S., and Stokoe, K. H. (1986), "Use of surface waves in pavement evaluation", *Transportation Research Record 1070*, TRB, National Research Council, pp.132-144.
13. Park, C. B., Miller, R. D., and Xia, J. (1999), "Multichannel analysis of surface waves", *Geophysics*, 64, 691-700.
14. 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.
15. Rix, G. J. and Spang, A. W. (1995), "Measurement of in situ damping ratio using surface waves", *Proc. of the 1st Int. Conf. on Earthquake Geotech. Eng.*, Balkema, Rotterdam, pp.345-350.
16. Rix, G. J., Lai, C. G., and Spang, W. Jr. (2000), "In situ measurement of damping ratio using surface waves", *J. Geotech. and Geoenv. Eng.*, ASCE, Vol.126, No.5, pp.472-480.
17. Rix, G. J., Hebel, G. L., and Orozco, M. C. (2002), "Near-surface V_s profiling in the New Madrid Seismic Zone using surface wave methods", *Seismological Research Letters*, Vol.73, No.3, pp.380-392.
18. Stokoe, K. H., II, Rosenblad, B. L., Wong, I. G., Bay, J. A., Thomas, P. A. and Silva, W. J. (2004), "Deep V_s profiling along the top of Yucca mountain using a Vibroseis source and surface waves", *13th World Conf. on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada.
19. Stokoe, K. H., II, Cox, B. R., Lin, Y., Jung, M. J., Menq, F., Bay, J. A., Rosenblad, B., and Wong, I. (2006), "Use of Intermediate to large vibrators as surface wave sources to evaluate V_s profiles for earthquake studies", *Proc. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Seattle, WA, pp.1241-1258.
20. Tokimatsu, K. (1995), "Geotechnical site characterization using

surface waves”, *Proc. the 1st Int. Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, IS-Tokyo '95, Tokyo, November 14-16, Balkema, Rotterdam, pp.1333-1368.

21. Yoon, S. (2005), *Array-base measurements of surface wave dispersion and attenuation using frequency-wavenumber analysis*, Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, 235p.
22. Yoon, S., and Rix, G. J. (2004), “Combined active-passive surface

wave measurements for near-surface site characterization”, *Proc. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Denver, CO, pp.1156-1164.

23. Zywicki, D. J. (1999), *Advanced signal processing methods applied to engineering analysis of seismic surface waves*, Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, 228p.

(접수일자 2006. 8. 11, 심사완료일 2007. 1. 24)