

SASW 실험 분산곡선의 자동화 계산을 위한 주파수-파수 기법

Frequency-Wave Number Method for the Automated Calculation of the Phase Velocities from the SASW Measurements

조 성 호*¹ Joh, Sung-Ho

강 태 호*² Kang, Tae-Ho

Abstract

In the evaluation of the subgrade stiffness structure by the SASW method, the calculation of the phase velocities is the important task controlling the reliability of the result. The interpretation of the phase spectrum should precede the phase-velocity calculation in the current practice of the SASW method. The difficulty involved in the interpretation prohibited the SASW method from being spread over to the industry. This study proposed a new method called the frequency-wave number technique, which is based on the frequency-wave number relationship of the surface wave in the multi-layered system. The frequency-wave number technique eliminates the expertise in the interpretation of the phase spectrum, automates the phase-velocity calculation and expedites the determination of the phase-velocity dispersion curve. To verify the validity of the proposed frequency-wave number method, the transfer function determined from the numerical simulation of the SASW measurements was used for the calculation of the automatic calculation of the phase velocities and compared with the phase velocities by WinSASW employing the phase-unwrapping method. Also, the proposed method was applied to the real SASW measurements performed at ○○ area in GyeongGi-Do to see how the proposed method works with the real measurements.

요 지

SASW 실험으로 지반의 전단강성 구조를 구하는 해석과정에 있어서 위상속도의 계산은 SASW 실험의 신뢰도를 좌우하는 매우 중요한 단계이다. 기존의 SASW 자료 분석기법 중 위상속도의 계산은 전문가적 경험을 이용한 위상 각 스펙트럼의 분석이 선행되어야 하는데, 위상각 스펙트럼 분석 과정의 난해성은 SASW 기법의 일반화에 장애가 되어 왔었다. 본 연구에서는 SASW 기법에 적용가능하고, 위상속도 계산에 전문가적 경험을 배제할 수 있으며, 자동화함으로써 효율성을 제고할 수 있는 위상속도 계산 기법을 제안하였다. 본 연구에서 제안한 기법은 다층구조 지반에서의 표면파의 주파수-파수 특성을 이용하였으며, 그 개념에 기초하여 주파수-파수 기법(Frequency-Wave Number Technique)이라고 하였다. 본 연구에서 제안한 기법의 신뢰성을 검증하기 위하여, SASW 수치실험을 수행하였다. 그리고 SASW 수치실험에 의해 구한 이론 전달함수로부터 위상속도를 계산하여, 위상각전개법으로 구한 위상속도와 비교 검토하였다. 또한, 경기도 ○○ 지구에서 수행한 SASW 실험자료에 대해 본 연구에서 제안한 기법을 적용하여 현장적용성 및 실용성을 확인하였다.

Keywords : Dispersion curve, Frequency-wave number plot, Phase velocity, SASW method, Surface wave

*1 정회원, 중앙대학교 건설대학 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., College of Construction Engrg., Chungang Univ., shjoh@cau.ac.kr)

*2 정회원, 중앙대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engrg., Chungang Univ.)

1. 서론

흙과 암석의 동적 특성은 지반내진해석, 진동영향 평가 및 대책방안 설계, 지반 구조물의 설계 등에 매우 중요한 설계정수이다. 특히 현장에서 직접 지반의 동적 특성을 구하기 위한 현장지반 조사는 최근 그 중요성이 매우 부각되고 있다. 지반내진해석의 경우 지반의 강성 구조는 지반 진동의 증폭특성에 직접적으로 영향을 주기 때문에, 현장에서 직접 최대전단탄성계수를 신뢰성 있게 구하는 것은 매우 중요한 문제가 되고 있다.

현장에서 지반의 최대전단탄성계수를 구하기 위한 현장실험으로는 시추공을 이용하는 다운홀 시험, 크로스홀 시험, SPS 검층(Suspension PS Logging) 등이 있으나, 시추공이 필요하다는 단점으로 인하여 지표면에서 비파괴적, 비관입적으로 수행되는 표면파 시험이 자주 활용되고 있다. 지표면을 따라 전파되는 표면파를 주로 활용하여 지반의 전단강성 구조를 파악하는 대표적 표면파 시험으로는 SASW 실험이 있으며, SASW 실험의 신뢰성과 실용성에 관해서는 이미 많은 연구자들에 의해 입증되어 널리 활용되고 있다. SASW 실험은 1982년 처음으로 개발되었으나, 이후 약 10년 이상동안 동면기를 가졌고 1990년 후반기 이후에 본격적으로 많은 연구가 진행되어 현재는 전세계적으로 대표적 지반전단강성 조사법으로 인지되고 있다.

SASW 실험이 개발 초기에 널리 일반화되지 못하였던 것은 SASW 실험 자료해석 과정에 필요했던 전문가적 경험 때문이었다. SASW 실험자료해석은 크로스파워스펙트럼의 위상각 스펙트럼에 대한 분석을 필요로 하는데, 다른 실험과는 달리 난이하고 복잡한 분석이 필수적인 과정으로 포함되어 있다. Joh(1996)는 이러한 위상각 스펙트럼 분석과정에 있어서 객관성 확보와 신호 대 잡음비 향상을 위해 IRF(Impulse-Response Filtration) 기법을 제안하기도 하였으나, 위상각 스펙트럼 분석과정을 완전히 배제하지는 못하였다.

위상각 스펙트럼의 분석이란 결국 위상속도를 계산하기 위한 선행과정으로서 기존 SASW 기법의 해석과정에서는 피할 수 없는 과정 중의 하나이다. 한편, 몇몇 연구자들은 위상속도를 계산하기 위하여 위상각 스펙트럼을 회피하는 시도를 하였다. Matthews, Hope and Cayton(1996) 등은 4 개 이상의 감진기에서 측정된 평균 위상각을 구하여 위상속도를 계산하였고, Al-Hunaidi (1994)는 다중필터기법으로 추출한 신호의 상호상관함

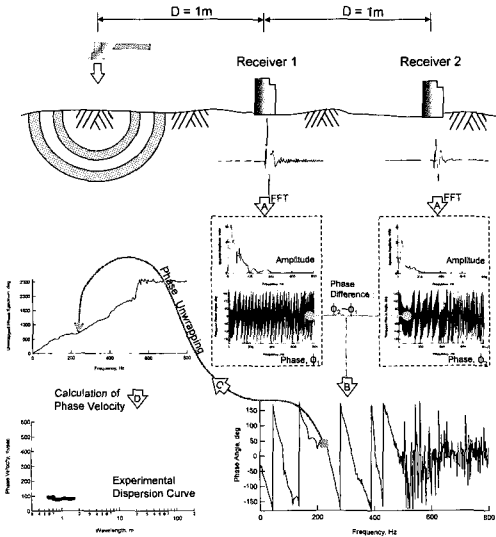
수를 이용하여 위상속도를 계산하였으며, Latif, *et al.* (1999) 등은 균속도를 적분하여 위상속도를 구하였고, Gabriels, Snider and Nolet(1987) 등은 256개 감진기 시간영역 신호를 주파수-파수영역 신호로 변환하여 위상속도를 구하였다. 최근 박형준(2001)은 하모닉 웨이브릿 변환을 이용하여 추출한 해석신호(analytical signal)의 위상각이 전파되는 시간을 이용하여 위상속도를 결정하였다.

그러나, 이러한 방법들도 장점과 더불어 각기 단점을 가지고 있으며 SASW 기법에 적용되는데 한계성이 존재한다. 따라서, 본 연구에서는 SASW 기법에 적용가능하고, 위상속도 계산에 전문가적 경험을 배제할 수 있으며 자동화함으로써 효율성을 제고할 수 있는 위상속도 계산 기법을 제안하였다. 본 연구에서 제안한 기법은 다층구조 지반에서의 표면파의 주파수-파수 특성을 이용하였으며, 그 개념에 기초하여 주파수-파수 기법(Frequency-Wave Number Technique)이라고 하였다. 본 연구에서 제안한 기법의 신뢰성을 검증하기 위하여, FIT7(1997)으로 SASW 수치실험을 수행하였다. 그리고 SASW 수치실험으로부터 구한 이론 전달함수를 이용하여 위상속도를 계산하고 위상각 전개법을 사용하는 WinSASW 2.0.3(Joh, 2002)에 의한 위상속도와 비교 검토하였다. 또한, 경기도 ○○ 지구에서 수행한 SASW 실험자료에 대해 본 연구에서 제안한 기법을 적용하여 현장적용성 및 실용성을 확인하였다.

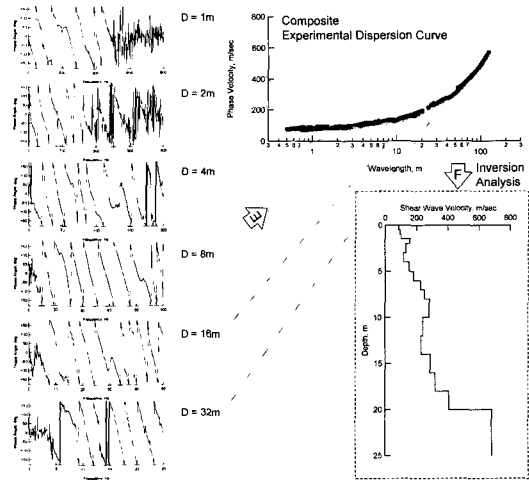
2. SASW 기법

2.1 SASW 기법의 개요

SASW(Spectral-Analysis-of-Surface-Waves) 기법은 지반이나 구조물에 대하여 전단 강성의 깊이별 변화를 추정하기 위하여 비파괴적으로 수행하는 현장 실험법이다. SASW 실험에서는 기본적으로 지표면이나 구조물의 표면에서 물리적인 충격이나 진동을 가하여 응력파를 발생시킨다. 그리고, 충격이나 진동에 의해서 발생한 응력파는 지반이나 구조물의 매체를 통하여 사방으로 전파되어 나가는데, 진동원에서 일정 거리만큼 떨어진 지표면에 설치한 진동 감진기에 의해 지반이나 구조물의 진동을 측정하게 된다. 이렇게 지표면에서 응력파를 발생시키고 일정 위치만큼 떨어진 곳에서 진동에 의한 지반의 진동을 측정하여 하부지반의 지층구조와 깊이에



(a) 실험분산곡선의 결정



(b) 역산해석에 의한 S-파 속도 주상도의 결정

그림 1. SASW 기법의 실험구성과 자료분석·해석과정

다른 S-파 속도분포를 구하는 것이 SASW 실험이라고 할 수 있다. 그림 1에 기본적인 SASW 실험방법과 자료 분석 및 해석과정이 설명되어 있다. 탄성파의 발생과 두 지점에서 측정, 측정된 시간영역 신호의 푸리에 변환, 전달함수의 계산, 위상각 스펙트럼의 분석과 위상속도의 계산, 실험분산곡선의 결정, 역산해석 등의 과정에 의해 최종적으로 지반의 전단파 주상도를 구하게 된다.

2.2 위상속도의 계산

SASW 실험과 같은 표면파 실험에 의해서 지반의 전단강성 구조를 알기 위해서는 표면파의 위상속도(phase velocity) 또는 군속도(group velocity)의 정보가 필요하다. 위상속도와 군속도는 식 (1)과 (2)로 표현되어 되기 때문에, 두 정보는 동일한 정보라고 할 수 있다. 따라서, 지반의 전단강성 구조 파악을 위해서는 위상속도 또는 군속도 중 한가지 정보만 필요하지만, 실제적으로 군속도보다 위상속도의 측정이 보다 안정적이기 때문에, 대부분의 경우 위상속도를 선호하는 편이다.

$$V = \frac{\omega}{k} \quad (1)$$

$$U = \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad (2)$$

여기서, V 는 위상속도, U 는 군속도, ω 는 각주파수, k 는 파수(wave number)이다.

본 절에서는 SASW 실험과 같은 표면파의 실험을 통하여 위상속도를 측정하는 방법을 간략히 소개하고 각각의 장단점을 살펴보고, 본 연구에서 의도한 위상속도 자동화 계산을 위한 연구의 필요성을 살펴보고자 한다.

2.2.1 위상각 전개법(Phase-Unwrapping Method)

위상각 전개법은 1960년대 지구물리학 분야에서 표면파의 위상속도를 측정하기 위하여 사용했던 이측점법(two-station method)에서 도입되었던 방법이다. 두 개의 감진기로 측정한 표면파의 시간이력에 대해 푸리에 변환을 적용하여 구한 전달함수는 복소수가 된다. 전달함수의 위상각을 ϕ 라고 하면, 위상속도는 식 3에 의해서 구할 수 있다.

$$V = f \cdot \frac{d}{\phi/360^\circ} \quad (3)$$

여기서, f 는 주파수, d 는 두 감지기 간격이다. 복소수인 전달함수의 위상각을 구하기 위해서는 전개(unwrapping) 과정이 필요한데, 측정된 탄성파에 모드전환(mode conversion)이 발생하는 경우 위상각의 전개과정이 난이하고 모호하게 되어, 전문가적 경험이 필요한 경우가 있다. 이 점이 위상각 전개법 적용의 어려운 점이라고 할 수 있다. 위상각 전개과정의 난이함을 완화하고 계산된 위상속도의 품질을 향상시키기 위한 IRF 기법(Joh, 1997)이 제안되었으나, 위상각 전개에 필요한 위상각 스펙트럼 분석과정을 완전히 배제시키는 못하였다.

2.2.2 군속도 적분법(Group-Velocity Integration Method)

위상속도와 군속도는 식 (1)과 (2)의 관계에서 살펴볼 수 있듯이, 상호 미분-적분 관계이다. 따라서, 이에 착안하여 파수-각주파수 관계곡선으로부터 적분을 통하여 위상속도를 구할 수 있는 방법이다. Latif *et al.*(1999) 등은 식 4와 같은 군속도-위상속도 관계식을 이용하였지만 강태호·조성호(2003)은 식 (2)를 이용하여 군속도에서 위상속도를 구하는 방법을 제안하였다. 식 (2)는 식 (5)와 같이 유한차분식으로 표현되고, 식 (6)과 (7)의 행렬식을 이용하여 파수를 구할 수 있게 된다. 따라서, 식 (7)로부터 구한 파수와 이미 알고 있는 각주파수를 이용하여 식 (1)에 의해 위상속도의 계산이 가능하다.

$$U = V + \omega \frac{\partial V}{\partial \omega} \quad (4)$$

$$U_i = \frac{\omega_{i+1} - \omega_{i-1}}{k_{i+1} - k_{i-1}} \quad \text{또는} \quad \omega_{i+1} - \omega_{i-1} = -U_i k_{i-1} + U_i k_{i+1} \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} \omega_3 - \omega_1 \\ \omega_4 - \omega_2 \\ \dots \\ \omega_n - \omega_{n-2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -U_2 & 0 & U_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -U_3 & 0 & U_3 & 0 & 0 \\ & & \dots & & & \\ 0 & 0 & 0 & U_{n-1} & 0 & U_{n-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ \vdots \\ k_{n-1} \\ k_n \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$W = UK \quad \text{또는} \quad K = (U^T U)^{-1} U^T W \quad (7)$$

군속도 적분법의 신뢰도는 군속도의 결정에 지배적으로 좌우되기 때문에, 군속도를 매우 안정적으로 구할 수 있는 기법이 필요하다. 또한, 측정된 탄성파에 모드 전환이 존재하는 경우, 군속도 적분법으로는 이를 반영하여 정확한 위상속도를 계산하는데 문제점이 있어서, 군속도 적분법은 모드전환이 발생되지 않는 경우에만 적용하는 것이 바람직하다.

2.2.3 CSW 기법의 평균위상각법(Average Phase Angle Method by the CSW Method)

표면파를 측정하는 비파괴 탄성파 기법 중의 하나인 CSW 기법(continuous surface-wave method)은 4개 이상의 감진기를 설치하고 측정범위 내의 매질에 대해 평균 위상각을 측정하는 기법이다. CSW 기법에서 측정하는 탄성파의 위상각은 대체적으로 360° 범위 내에서 측정되지만, 감진기 간격이나 지반 조건에 따라 위상각이 360°를 초과하는 경우가 발생한다. 이러한 경우에는 파수복원 기법(wave-number restoration technique; 조성호, 2003)과 같은 방법에 의해 위상각을 보정해야 하는 문제점이 있다. 또한, CSW 기법으로 결정된 위상속도는 SASW 실험과

같이 특정 감진기에 의해 측정된 것이 아니고 일련의 감진기 군에 의해 구해진 평균치이기 때문에, 평균위상각을 이용하는 역산해석 기법이 별도로 도입될 필요가 있다.

본 절에서 소개된 방법 이외에도 256개 시간영역신호를 주파수-파수 영역으로 변환하여 위상속도를 구하는 주파수-파수 변환법(Gabriels *et al.*, 1987), 다중필터기법을 이용하여 추출한 신호의 상관함수를 이용하는 다중필터/상호상관함수법(Al-Hunaidi, 1996), 해석신호의 위상각 전파법(박형춘, 2001) 등 다수의 방법이 존재하지만 각각 장단점이 존재하여 SASW 실험자료 해석에 신뢰성 있게 활용되기에는 다소 문제점이 존재하는 것으로 지적되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 기존의 위상속도 방법을 보완하고 전문가적 경험을 배제함으로써, SASW 기법의 일반화에 일조를 할 수 있는 위상속도 자동계산 기법을 제안하였고, 3장에 본 연구에서 제안한 방법을 자세히 설명하였다.

3. 위상속도 자동화 계산을 위한 주파수-파수 기법

3.1 개요

파동의 위상속도는 특정 주파수의 파동이 전파되는 속도를 의미하는 것으로, 지반강성 구조를 평가하는데 있어서 중요한 정보로 활용되는 지반특성이다. 현재까지 파동의 위상속도를 계산하고자 하는 많은 연구가 진행되었으며, 2장에서 기술한 바와 같은 위상각 전개법, 군속도 적분법, 평균 위상각법, 다중필터/상호상관함수법 등이 제안되어 있다.

본 연구에서는 기존 이론과 달리 기본 개념에 입각하여 위상속도를 계산하고자 하였으며, 주파수-파수 기법(Frequency-Wave Number Method)이라는 방법으로 제

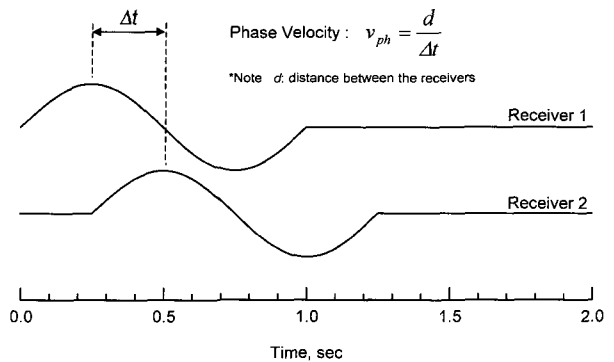


그림 2. 위상속도의 기본개념

안하였다. 파동 위상속도 계산의 기본 개념은 그림 2에 도시한 바와 같이 특정주파수의 파동이 일정거리를 전파하는데 소요되는 시간을 측정하여 구하는 것이다. SASW 실험시 측정하는 여러 주파수 성분의 신호에 대해 그림 2와 같은 방법에 의해 전파속도를 계산하여 모으면, 위상속도 분산곡선을 구할 수 있게 된다.

3.2 주파수-파수 기법 알고리즘

분산곡선의 계산에서 전문가의 경험을 배제하고 신뢰성을 제고하기 위한 주파수-파수 기법의 알고리즘은 그림 3에 도시한 바와 같다. 위상속도의 계산은 모두 10 단계의 과정을 통하여 계산되지만, 크게는 거보 스펙트럼(Gabor spectrum)의 결정, 적절한 주파수-파수 관계(f-k plot)의 선택 등 두 단위로 나누어진다. 첫 번째 단위인 거보 스펙트럼의 결정은 SASW 실험으로 측정된 전달함수(transfer function)로부터 시간영역 신호 h_1 , h_2 를 추정하여 구할 수 있다. SASW 실험시 직접 측정된 실제 시간영역 신호를 사용하지 않고 전달함수로부터 추정된 신호를 사용하는 것은 앙상블 평균기법을 적용하여 신호의 품질을 향상하고자 하기 때문이다.

본 연구에서 제안한 주파수-파수 기법을 설명하기 위

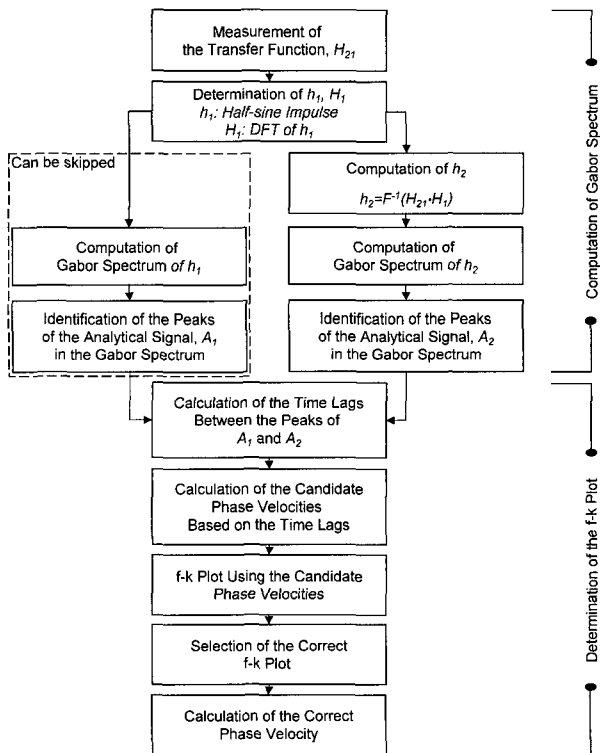


그림 3. SASW 실험으로부터 위상속도 자동화 계산을 위한 주파수-파수 기법의 알고리즘

하여 SASW 실험의 수치모사로 구한 전달함수를 사용하였다. 본 연구에서 수행한 SASW 수치실험은 FIT7 (Joh, 1997)을 이용한 것으로, 두께 1 m, 전단파 속도 5000 m/sec의 층과 그 하부에 전단파 속도 500 m/sec의 반무한 층으로 구성된 2층 구조에 대해 수행되었다. 탄성파 가진원과 감진기는 16 m 간격으로 일반 SASW 실험구성에 따라 설치되었다. 그 결과 그림 4와 같은 전달함수를 구하였으며, 그림 4에는 위상 스펙트럼과 진폭 스펙트럼을 제시하였다. 그림 4의 위상각 스펙트럼을 살펴보면 주파수 150 Hz를 경계로 하여 모드전환이 발생하고 있는 것을 확인할 수 있는데, 이는 전문적 경험이 부족한 경우 SASW 실험 자료 해석시 오류를 범할 수 있는 대표적인 고난이도의 위상각 스펙트럼이라고 할 수 있다.

그림 4의 전달함수로부터 거보스펙트럼을 구하기 위하여 우선적으로 첫 번째 감진기에서 측정된 시간영역

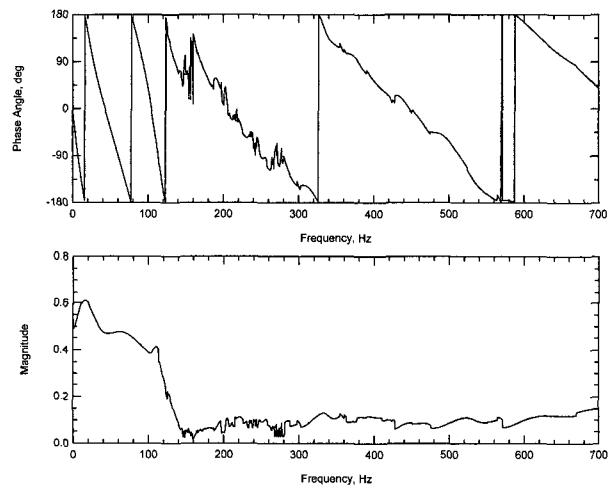


그림 4. 포장구조체에 대하여 SASW 수치실험으로 결정된 전달함수의 위상각 스펙트럼과 진폭 스펙트럼

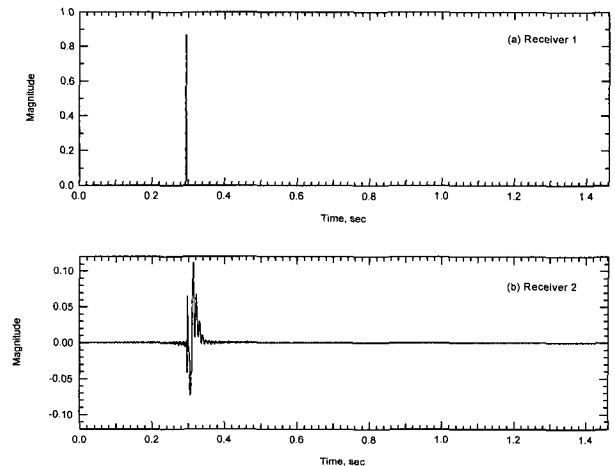
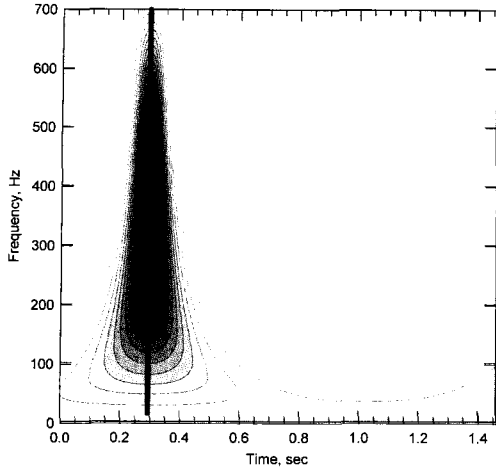
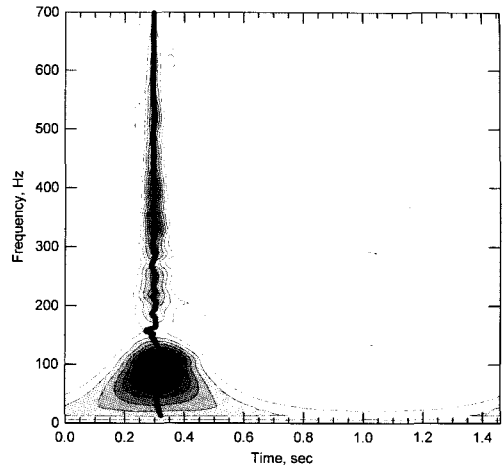


그림 5. 두 감진기에서의 시간영역 변위신호와 선형스펙트럼



(a) 첫 번째 감진기 신호



(b) 두 번째 감진기 신호

그림 6. 두 감진기의 변위 신호에 대한 거보스펙트럼

변위신호인 h_1 을 그림 5(a)와 같이 가정하였다. 그리고, 식 (1)에 의하여 h_1 과 그림 4의 전달함수를 이용하여 두 번째 감진기 신호인 h_2 를 구하였고, 그림 5(b)에 도시하였다.

$$h_2 = F^{-1}(H_{21} \cdot H_1) \quad (8)$$

여기서, F^{-1} 은 푸리에 역변환이고, H_{21} 은 전달함수, H_1 은 시간영역 신호 h_1 의 푸리에 변환이다. 시간영역 변위신호 h_1, h_2 에 대해 Dziewonski(1969)가 제안한 다중필터기법을 적용하였고, 그 결과 그림 6과 같이 거보스펙트럼을 구할 수 있었다. 거보스펙트럼 내에 함께 표시된 굵은 곡선은 거보스펙트럼의 능선을 따라 이은 선으로 파군(wave group)의 중심이 된다.

본 논문에서는 알고리즘의 설명 목적으로 첫 번째 감진기 신호에 대한 거보스펙트럼과 파군 중심곡선을 구하였지만, 실제로는 구할 필요가 없다. 그림 6(a)를 참고해 보면, 파군 중심곡선은 모두 0.2939초의 값을 가지고 있는데, 이는 그림 5(a)의 첫 번째 신호 h_1 을 거의 델타 함수와 같이 정하고 델타함수의 시작을 0.2939초로 설정하였기 때문이다. 따라서, 실제 주파수-파수 기법의 구현에 있어서는 두 번째 감진기 신호에 대한 거보스펙트럼만 구하면 된다.

이제 거보스펙트럼이 구해지면, 두 감진기에서의 개별 주파수에 대한 선형스펙트럼을 비교하여 그림 2의 개념에 기초한 위상속도를 계산할 수 있다. 주파수 100 Hz의 경우를 예를 들어 설명하면 그림 7과 같다. 그림 7에는 그림 6의 거보스펙트럼 중에서 주파수 100 Hz에

해당되는 선형스펙트럼을 도시하였고, 이로부터 파동전파시간을 결정하는 개념을 설명하였다.

첫 번째 감진기의 중심 능선이 두 번째 감진기 위치에 도달했을 때도 능선이 되어야 하지만, 두 번째 감진기 위치까지 전파되면서 그 상대적인 크기는 달라질 수 있기 때문에, 두 번째 선형스펙트럼 중에서 상위 20개의 능선을 찾아서 각각의 시간차이를 구한다. 즉, 첫 번째 감진기에서의 최고 능선과 두 번째 감진기에서의 상위 20개 능선과의 시간차이를 100 Hz 파동의 전파시간이라고 하여 전파속도인 위상속도를 계산할 수 있다. 그리고, 식 (9)에 의해서 주파수와 위상속도로부터 파수를 계산하고, 이를 도시하면 그림 8과 같이 된다.

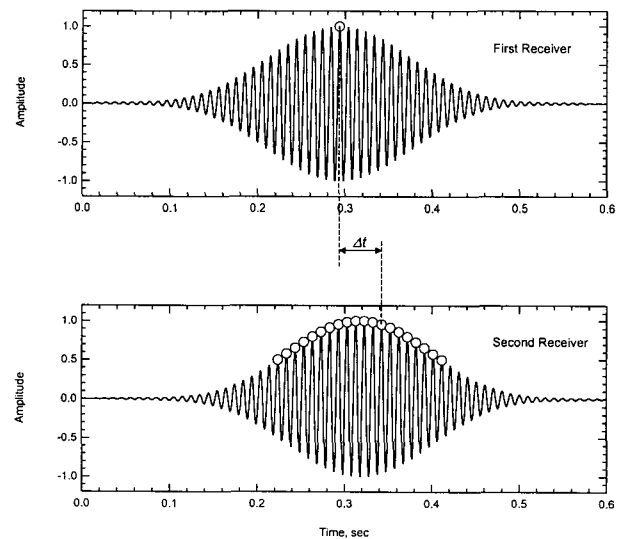
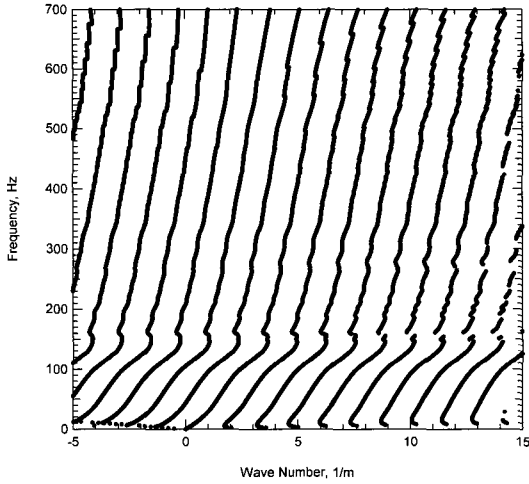
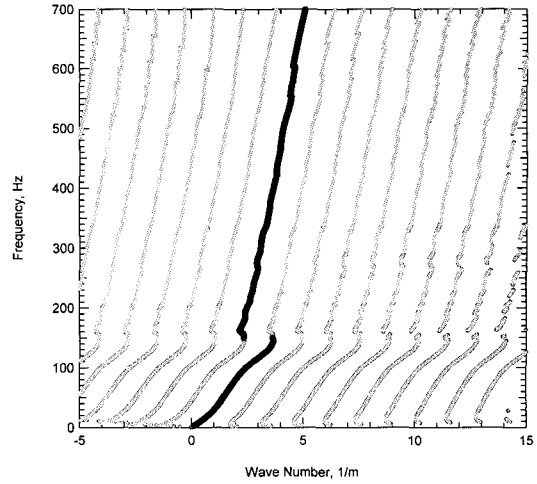


그림 7. 두 감진기 신호의 거보스펙트럼 중 개별 주파수에 대한 진폭스펙트럼 능선의 시간차로부터 파동 전파시간의 결정



(a) 후보 $f-k$ 관계 곡선



(b) 최종 $f-k$ 관계곡선

그림 8. 두 감진기 신호의 진폭스펙트럼 능선의 시간차로부터 구한 $f-k$ 관계곡선

$$k = \frac{2\pi f}{V} \quad (9)$$

여기서, k 는 파수 (wavenumber), f 는 주파수, V 는 위상 속도이다. 일반적으로 주파수와 파수와의 관계를 도시한 것을 $f-k$ 도표라고 하는데, 본 논문에서는 그림 8(a)에 도시된 여러 곡선을 후보 $f-k$ 도표라고 하였다. 이는 그림 8(a)의 여러 곡선 중에서 정확하게 지반특성을 나타내는 관계곡선은 오직 하나만 존재하기 때문이다.

일단 그림 8(a)의 후보 $f-k$ 관계곡선이 결정되면, 이로부터 적절한 과정을 거쳐서 해당 지반에 적합한 최종 $f-k$ 관계곡선을 결정할 수 있다. 최종 $f-k$ 관계곡선 결정을 위한 과정은 다음 절에서 상세하게 설명하였다.

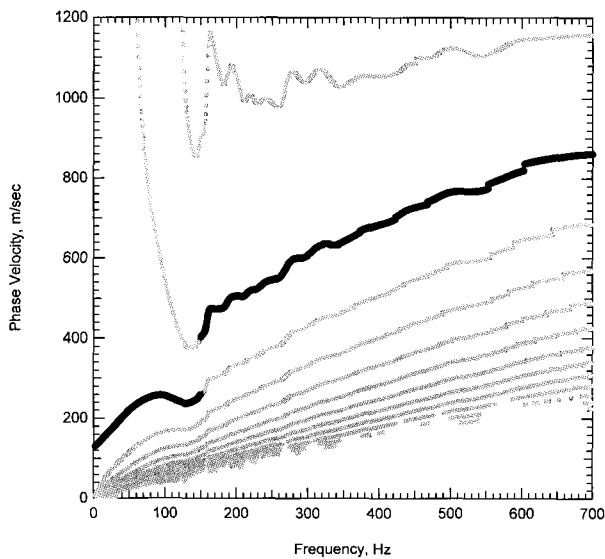


그림 9. 최종 $f-k$ 관계곡선으로부터 결정된 최종 위상속도 분산곡선

최종적으로 결정된 $f-k$ 관계곡선은 그림 8(b)에 도시한 바와 같이, 여러 후보 곡선 가운데 짙은 선으로 표시되어 있다. 최종 $f-k$ 곡선은 식 (10)에 의해서 최종 위상속도 분산곡선의 형태로 변환될 수 있으며, 그림 9에 도시한 바와 같다. 그림 9에는 최종 $f-k$ 곡선 뿐만 아니라 후보 $f-k$ 곡선에 대해서도 참고로 상응하는 위상속도 분산곡선도 함께 도시되어 있다.

$$V = \frac{2\pi f}{k} \quad (10)$$

3.3 후보 $f-k$ 도표에서 최종 $f-k$ 도표 선정을 위한 알고리즘

본 연구에서 제안한 위상속도 계산의 자동화 과정은 두 감진기 신호의 진폭스펙트럼 능선의 시간차를 구하고 그로부터 여러 개의 후보 $f-k$ 관계곡선을 구하도록 되어 있다. 이렇게 구한 후보 $f-k$ 관계곡선에서 해당 지반의 특성을 나타내는 최종 $f-k$ 곡선을 결정하는 과정은 다음과 같다.

우선 그림 6(b)의 거보스펙트럼에서 각 주파수에 상응하는 최대 진폭을 찾고, 이를 주파수에 대하여 나타내면 그림 10(a)의 최대진폭스펙트럼이 된다. 파동의 파군이란 비슷한 주파수의 파동이 하나의 무리를 이루어서 전파되는 것으로, 동일 파군에 속하는 인접 주파수의 진폭은 서로 유사하며 연속적이라고 할 수 있다. 따라서, 이러한 특성을 참고로 할 때, 파군의 경계점은 최대진폭스펙트럼이 국부최소점(local minimum)으로 떨어지게 되는 부분이라고 할 수 있다. 그림 10(b)에는 최대진폭스펙

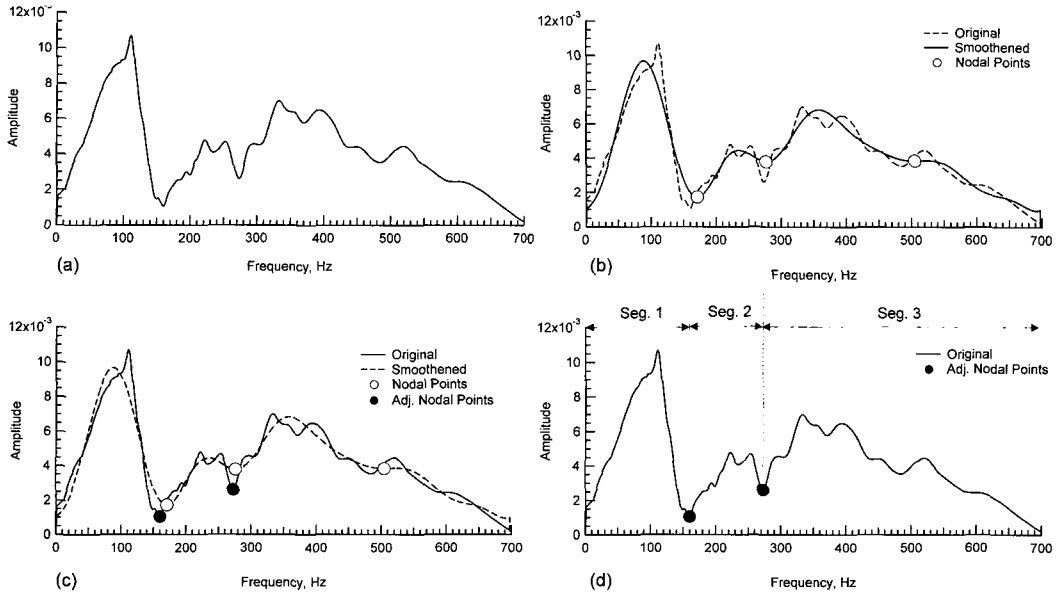


그림 10. 거보스펙트럼에서 파군을 분리하는 알고리즘

트럼의 국부최소점을 찾기 위하여 최대진폭스펙트럼의 평활화된 곡선을 구하였고, 평활화된 곡선의 국부최소점을 찾았다. 그리고, 그림 10(c)에서는 평활화된 곡선의 국부최소점을 이용하여 원래의 최대진폭스펙트럼 곡선의 국부최소점을 결정하였다. 그림 10(d)에는 이와 같은 알고리즘으로 결정한 최대진폭스펙트럼 곡선의 파군 경계점과 이로부터 분리된 파군을 도시하고 있다.

그림 11은 앞의 과정에 의하여 분리된 파군을 구획(segment) 1, 2, 3로 표시하고 있다. 첫 번째 구획의 경우 최종 $f-k$ 곡선은 이론적으로 반드시 원점을 통과하여야 하므로, 여러 후보 $f-k$ 곡선 중에서 원점을 통과하는 곡선을 선정하면, 이 곡선이 바로 최종 $f-k$ 곡선으로 결정된다. 그러나, 기타 구획의 경우는 다소 복잡한 과정을 거쳐서 최종 $f-k$ 곡선을 선정하게 된다. 만약, 구획간 모드 전환이 발생하지 않는다면, 구획 1에서 결정된 최종 $f-k$ 곡선의 연장을 찾아서 이를 최종 $f-k$ 곡선이라고 하면 되지만, 기본모드에서 고차모드로의 모드 전환이 발생하는 경우는 문제가 있다. 따라서, 구획 1을 제외한 기타 구역에서는 보다 객관적인 결정 방법으로 파동의 군속도를 비교하여 최종 $f-k$ 곡선을 결정한다. 그림 12에는 그림 6(b)의 거보스펙트럼에서 결정한 파군의 전파시간과 그림 8의 후보 $f-k$ 곡선으로부터 추정된 파군의 전파시간을 비교하고 있다. 그림 11에는 구획 2와 3의 경우 여러 후보 $f-k$ 곡선으로부터 추정된 파군의 전파시간과 그림 6의 거보스펙트럼으로부터 결정한 파군 전파시간과의 RMS 오차를 구하여 표시하고 있다. 이

중 가장 작은 RMS 오차를 주는 것이 가장 적합한 $f-k$ 곡선이므로, 이로부터 최종 $f-k$ 곡선을 결정할 수 있다.

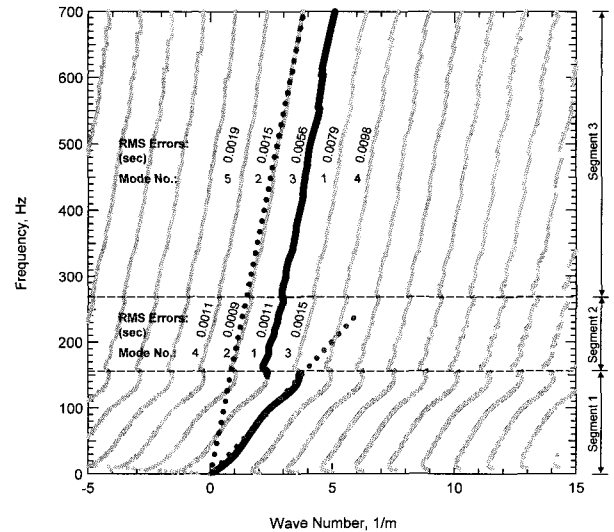


그림 11. 후보 $f-k$ 관계곡선으로부터 최종 $f-k$ 관계곡선을 결정하기 위한 알고리즘

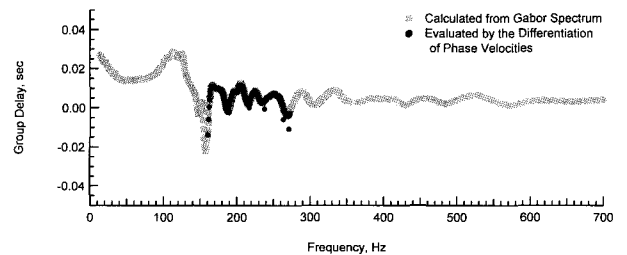


그림 12. 그림 6(b)의 거보스펙트럼에서 결정한 파군의 전파시간과 그림 8의 후보 $f-k$ 곡선으로부터 추정된 파군의 전파시간과의 비교

$f-k$ 곡선으로부터 파군의 전파시간의 계산은 식 (11)에 의해서 수행되었다.

$$t_g = \frac{d}{2\pi} \cdot \frac{\Delta k}{\Delta f} \quad (11)$$

여기서, t_g 는 파군의 전파시간이고, d 는 감진기간 거리이다.

한편 이와 더불어 최종 $f-k$ 곡선 결정에 파수의 경계 조건을 적용할 필요가 있다. 그림 11에 점선으로 표시된 두 개의 직선이 있는데, 파수의 상한 경계와 하한 경계이다. 파수의 상한경계로는 합리적인 파수는 구획 1의 최종 $f-k$ 곡선 연장선보다 좌측에 있어야 한다는 것이고, 하한 경계로는 합리적인 파수는 원점을 통과하는 $f-k$ 곡선의 연장선 우측에 존재해야 한다는 것이다. 이러한 상한경계와 하한경계의 조건은 전단파 속도 주상도와 상응하는 위상속도 분산곡선의 관계로부터 추론가능한 것이며 보다 자세한 논의는 강태호 · 조성호(2003)에 소개되어 있다. 이와 같은 과정에 의해 최종적으로 결정된 최종 $f-k$ 곡선은 그림 11의 굵은 선으로 표시된 곡선이 된다.

3.4 주파수-파수 기법의 검증

본 연구에서 제안한 위상속도 자동화 계산을 위한 주파수-파수 기법의 검증을 위해서 기존의 방법과 결과를 비교하였다. 기존의 SASW 실험에서는 위상각전개법으

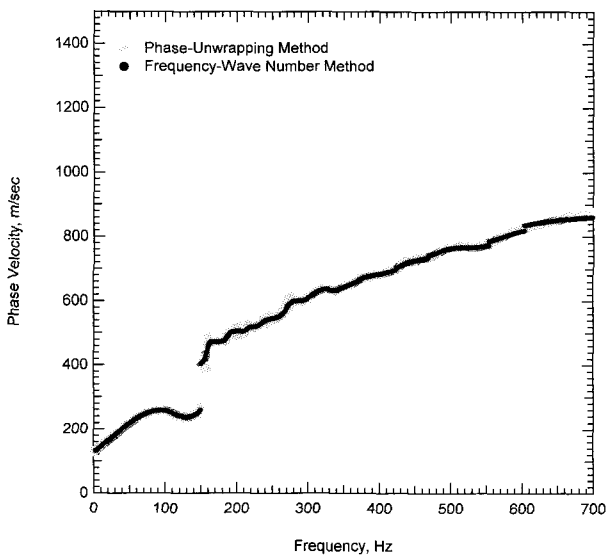


그림 13. 위상각 전개법으로 구한 위상속도와 주파수-파수 기법으로 구한 위상속도의 비교

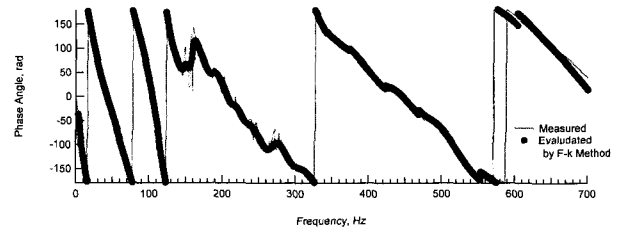


그림 14. 수치실험으로 측정된 위상스펙트럼(그림 4)과 주파수-파수 기법의 위상속도(그림 13)로부터 역추정한 위상스펙트럼의 비교

로 위상속도를 구하는데, 모드 변환이 발생하는 곳에서는 전문가적 경험에 의존하여 개별적인 보정이 가해져야 한다. 그림 4에 도시되어 있는 SASW 수치실험결과인 위상각 스펙트럼으로부터 위상각전개법을 사용하는 WinSASW(Joh, 2002)를 이용하여 계산한 위상속도를 그림 13에 도시하였다. 또한, 그림 17에 본 연구에서 제안한 주파수-파수 기법으로 구한 위상속도를 같은 그림에 비교 도시하였는데, 두 방법에 의한 위상속도는 거의 일치함을 보이고 있다.

한편, 주파수-파수 기법으로 구한 위상속도로부터 역으로 추정된 비전개 위상각 스펙트럼(wrapped phase spectrum)을 SASW 수치실험결과인 그림 3의 위상각 스펙트럼과도 비교를 하였다. 그림 13의 비교에서 알 수 있듯이, 주파수-파수 기법으로 추정된 위상각 스펙트럼이 수치실험결과와 매우 유사하게 일치함을 알 수 있다.

그림 13과 14의 비교를 통하여서 확인할 수 있는 것은 모드 변환이 없는 1~150 Hz 구간과 모든 변환이 발생한 150 Hz 이상의 구간에서 모두 본 연구에서 제안한 주파수-파수 기법이 신뢰성 있게 위상속도를 계산함을 확인할 수 있다. 따라서, 모드 변환에 대한 전문가적 경험을 개별적으로 고려하는 고난이도의 자료해석 과정이 없이도, 주파수-파수 기법에 의하면 자동으로 위상속도를 계산할 수 있음을 확인하였다.

4. 주파수-파수 기법의 현장적용

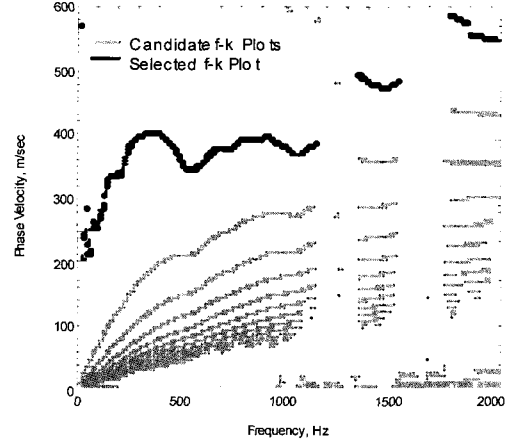
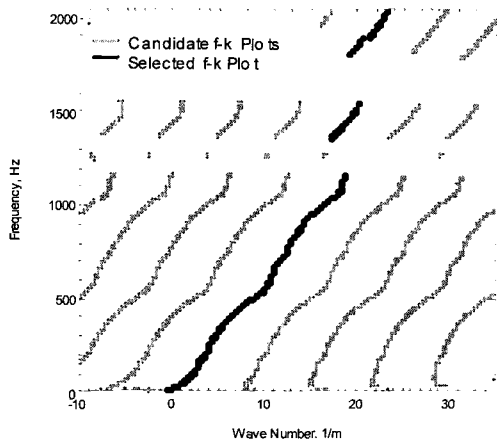
SASW 실험으로부터 위상속도를 자동계산하기 위한 주파수-파수 기법의 알고리즘을 설명하기 위해서 3절에서는 SASW 수치실험 결과를 이용하였다. 본 절에서는 실제 지반에서 측정된 SASW 실험자료를 활용하여 본 고에서 제안한 주파수-파수 기법의 적용성과 신뢰성을 평가하였다.

본 절에서 활용하고자 하는 SASW 실험은 경기도 ○

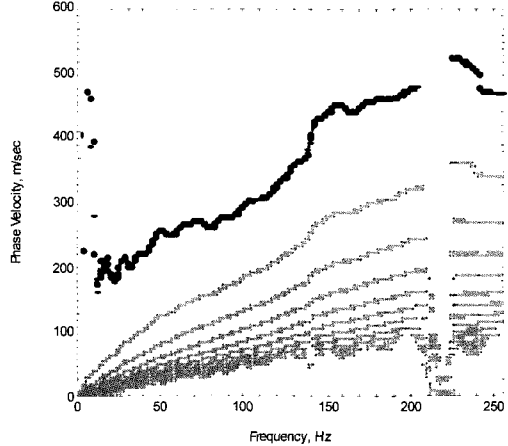
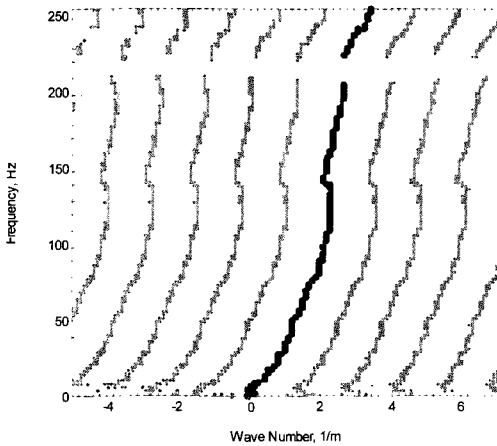
○ 지구의 농로에서 수행되었다. SASW 실험이 수행된 농로는 일반 농기계 및 차량이 다닐 수 있도록 표층이 잘 다져진 상태이었고, 그 하부는 일반 자연지반이 위치하고 있는 구조이었다. SASW 실험에 사용된 감진기간 간격은 1, 5, 10, 20, 30 m 등이었다. 감진기간 간격이

10 m 미만인 경우는 일반 중량 해머를 사용하여 탄성파를 발진하였고, 10 m 이상인 경우는 불도저의 반복 진동을 탄성파 에너지원으로 사용하였다.

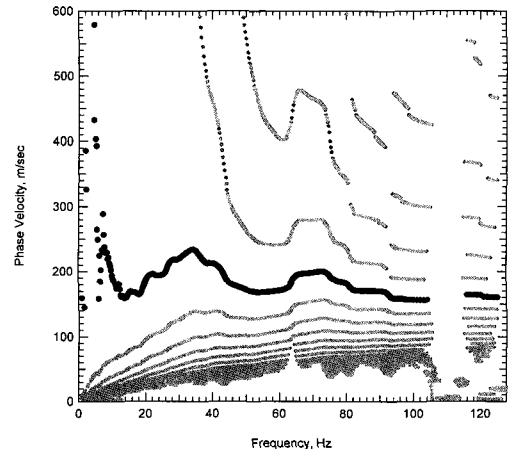
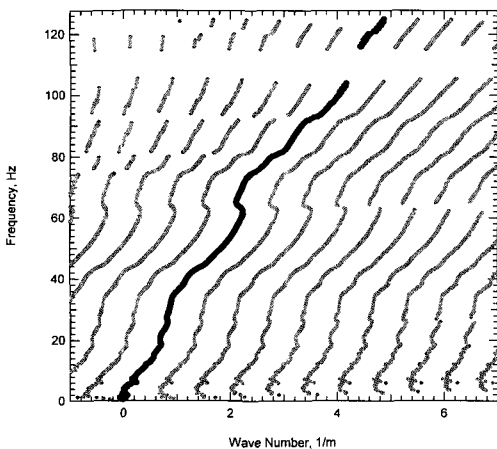
각 감진기간 간격에 대한 측정자료에 대해 본 연구에서 제안한 주파수-파수 기법을 적용하였으며, 그림 15에



(a) 감진기간 거리 = 1.0 m

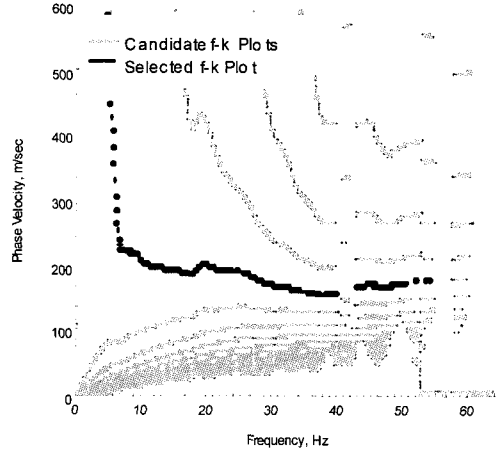
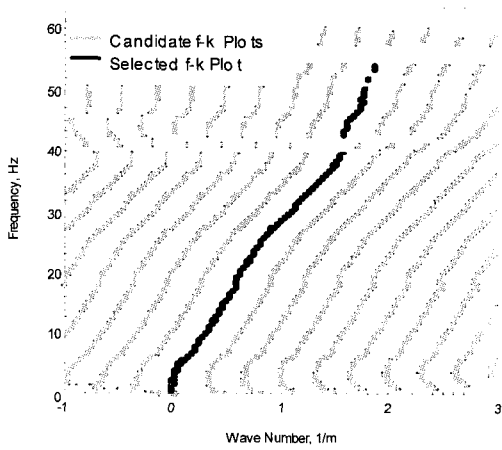


(b) 감진기간 거리 = 5.0 m

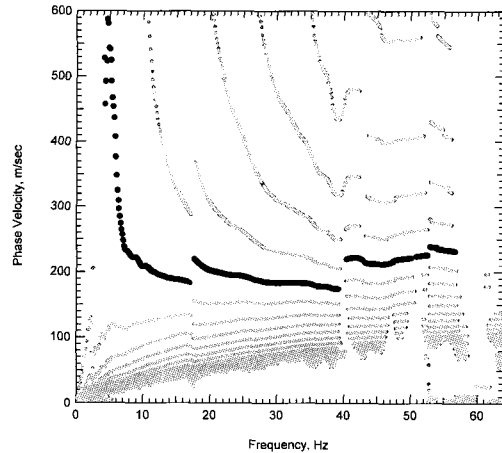
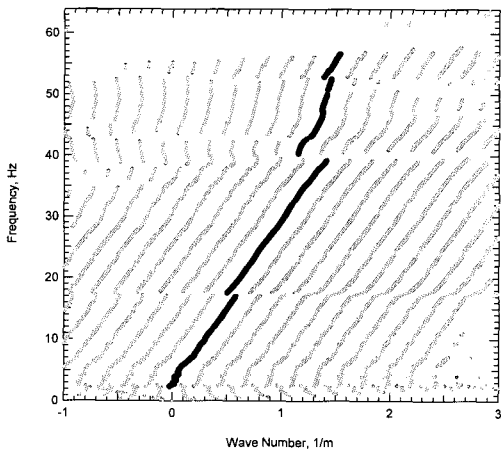


(c) 감진기간 거리 = 10.0 m

그림 15. 경기도 ○○ 지역에서 수행된 SASW 실험에 대하여 주파수-파수 기법으로 결정된 $f-k$ 곡선과 위상속도 분산곡선



(d) 감지기간 거리 = 20.0 m



(e) 감지기간 거리 = 30.0 m

그림 15. 경기도 ○○ 지역에서 수행된 SASW 실험에 대하여 주파수-파수 기법으로 결정된 $f-k$ 곡선과 위상속도 분산곡선 (계속)

그 결과를 제시하였다. 그림 15에는 후보 $f-k$ 곡선과 최종 $f-k$ 곡선, 그로부터 결정된 위상속도 분산곡선 등을 제시하였다. 그림 15의 $f-k$ 곡선을 살펴보면 감지기간 간격이 30 m 인 경우 모드 변환이 발생하고 있음을 알

수 있다. 일반적으로 측정자료에 모드 변환이 발생하면 위상각 스펙트럼에 불연속점이 발생하게 되어 자료분석시 전문가적 경험을 요하게 된다. 그림 16에 도시되어 있는 감지기간 간격 30 m에 대한 위상각 스펙트럼을 살

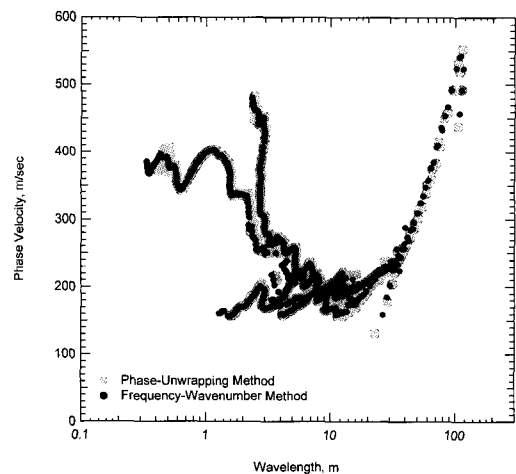
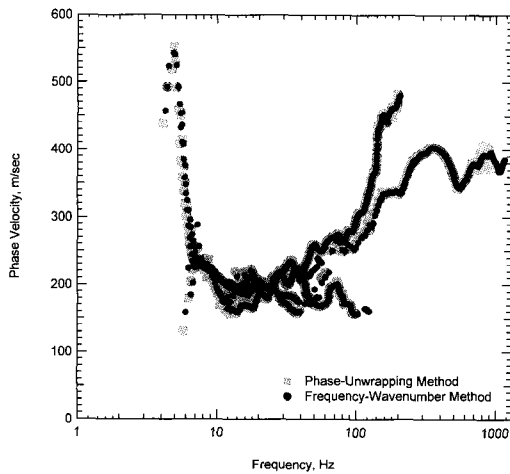


그림 16. 위상각 전개법과 주파수-파수 기법으로 결정된 위상속도의 비교

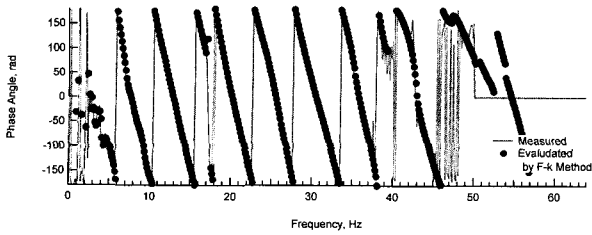


그림 17. 30 m 감지기간 거리로 측정된 위상스펙트럼과 주파수-파수 기법의 위상속도로부터 역추정한 위상스펙트럼의 비교

해보면 실제로 약 17 Hz와 39 Hz의 주파수 부분에서 위상각 스펙트럼의 불연속성을 확인할 수 있다. 이러한 경우 위상각 전개법을 사용하는 경우, 직접적으로 그 주파수 대역에 대한 위상각 급변을 처리하는 조치를 취하여야 하는데, 이 때 전문가적 경험이 필수적이라고 할 수 있다. 그러나, 주파수-파수 기법을 사용하는 경우, 자동적으로 알고리즘에서 처리가 되기 때문에 사용자의 개인적 견해가 도입될 필요가 없는 장점이 있다. 또한, 그림 16에 비교 도시되어 있는 것처럼, 주파수-파수 기법으로 결정한 위상속도를 위상각 스펙트럼으로 변환하였을 때, 이 또한 실제 측정된 위상각 스펙트럼과 잘 일치함을 알 수 있다.

그림 16에는 그림 15에서 결정된 최종 $f-k$ 곡선으로 구한 위상속도 분산곡선을 주파수 영역과 파장의 영역에서 취합하여 하나의 그래프에 표현하였으며, 기존의 SASW 실험자료해석 방법인 위상각 전개법으로 구한 위상속도 분산곡선과 비교하였다. 그림 16에서 살펴볼 수 있듯이 본 연구에서 제안한 주파수-파수 기법에 의한 위상속도 분산곡선은 위상각 전개법을 채택하는 WinSASW 2.0.3에 의해서 계산한 위상속도 분산곡선의 거의 일치함을 알 수 있다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 SASW 실험으로 구한 전달함수로부터 위상속도 분산곡선을 자동으로 구하기 위한 알고리즘을 제안하였다. 전달함수는 일차적으로 거보스펙트럼의 형태로 변화되었으며, 거보스펙트럼의 진폭스펙트럼이 전파되는 시간과 주파수-파수 관계의 특성을 활용하여 위상속도를 계산할 수 있었다. 본 연구에서 제안한 주파수-파수 알고리즘은 SASW 수치실험 결과와 실제 현장실험 결과를 이용하여 신뢰성을 검증하였으며, 주파수-파수 기법의 현장 적용성과 실용성을 확인하였다.

참고 문헌

1. 강태호, 조성호 (2003), "다층구조 지반에서 표면파의 주파수-파수 특성", In Preparation.
2. 조성호, 고희승, 강태호 (2003), "연속표면파 실험(CSW)에서 위상속도 분산곡선의 자동화 결정을 위한 파수복원기법", In Review
3. 박형춘 (2001), 하모닉 웨이브릿 변환을 이용한 SASW 시험에서의 위상속도 결정에 관한 연구, 박사학위논문, KAIST.
4. Al-Hunaidi, M. O. (1994), "Analysis of dispersed multi-mode signals of the SASW method using multiple filter/cross-correlation technique", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.13, pp.13-24.
5. Dziejewski, A. M., S. Bloch, S. and Landisman, M. (1969), "A technique for the analysis of transient seismic signals", *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.59, No.1, pp.427-444.
6. Gabriels, P., R. Snider and G. Nolet. (1987), "In situ measurements of shear wave velocity in sediments with higher-mode Rayleigh waves", *Geophysical Prospecting*, Vol.35, pp.187-196.
7. Joh, S. H. (1996), *Advanced in Interpretation and Analysis Techniques for Spectral-Analysis-of-Surface-Waves(SASW) Measurements*, Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin.
8. Joh, S. H. (1997), FIT7, *Software of Surface-Wave Forward Modeling, Inversion and Time-History Generation*, Chung-Ang University.
9. Joh, S. H. (2002), WinSASW 2.0.3, *Software of Data Reduction and Analysis for the SASW Measurements*, Chung-Ang University.
10. Latif R, Aassif EH, Maze G, Moudden A, and Faiz B. (1999), "Determination of the group and phase velocities from time-frequency representation of Wigner-Vill", *NDT&E International*, Vol.32, pp.415-422.
11. MATTHEWS, M.C., HOPE, V.S. and CLAYTON, C.R.I. (1996), "The use of surface waves in the determination of ground stiffness profiles", *Proc. Instn Civ. Engrs Geotech. Engng* 119, April, 84-95.

(접수일자 2003. 6. 30, 심사완료일 2003. 7. 31)