

## 수중 주파수영역표면파기법의 역해석 과정에서 적용되는 과도해석기법

이병식

공주대학교 토목환경공학과

### 요 약

수중 SASW 실험에서 얻은 표면파의 실험분산곡선으로부터 지반의 강성을 추정하기 위한 역해석 과정에서 적용할 수 있는 과도해석기법인 모드해석법(2차원 해석법)과 변위해석법(3차원 해석법)의 적용성을 평가하였다. 그 결과 지반의 강성이 깊이에 따라 점진적으로 증가하고 지반 강성이 비교적 낮아 그 압축파 속도가 물의 압축파 속도보다 느린 경우에 대해서는 고유치 해석법을 적용할 수 있었다. 그러나 지반의 강성이 크거나 깊이에 따른 지반강성의 변화가 역전되는 경우에는 고차모드의 영향이나 고유치가 복소수가 되는 등의 문제가 발생하게 되므로 고유치 해석법으로 적절한 이론분산곡선을 얻을 수 없는 경우가 많고, 이 경우에는 변위해석법을 적용하여야 한다는 결론을 얻었다. 한편 수중 SASW 현장실험으로부터 얻은 결과를 제안된 변위해석법을 이용하여 분석한 결과 지반의 강성주상을 적절하게 추정할 수 있어 수중 SASW 실험의 현장 적용성을 확인할 수 있었다.

**주요어:** 수중 SASW 실험, 수중 표면파, 이론적 분산곡선, 역산기법

**Byung Sik Lee, 2000, Theoretical Modeling of Surface Wave Propagation for SASW Testing Method. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 3, n. 4, p. 251-260**

**ABSTRACT:** Applicabilities of two numerical methods, the 2-dimensional and the 3-dimensional method, are evaluated to inverse test results obtained from the underwater SASW (Spectral-Analysis-of-Surface-Waves) method. As a result of this study, it has been found that the 2-dimensional method can be supposed to be applicable for the cases where stiffness of soil layer increases gradually with depth, and the stiffness is relatively low. For the other cases, however, it has been concluded that the 3-dimensional method needs to be applied to determine realistic theoretical dispersion curves. An example is also shown that in situ soil profile underwater is estimated from experimental dispersion curves using the 3-dimensional method. As a result, it can be concluded that the underwater SASW method can be effectively applied to explore the underwater soil condition.

**Key words:** underwater SASW test, underwater surface wave, theoretical dispersion curve, inversion

(Byung Sik Lee, Assistant Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Kongju National University, 314-701, E-mail: blee@kongju.ac.kr)

### 1. 서 론

SASW(Spectral-Analysis-of-Surface-Waves) 실험 방법은 지반의 강성도를 효과적으로 조사하기 위하여 개발된 비파괴, 비관입 시험방법이다. SASW 실험에서는 지표면에 진동을 가하여 표면파를 발

생시키고, 전파되는 표면파에 의한 지진동을 진동원으로부터 어느 정도 떨어진 거리의 두 점에서 측정함으로써 주파수에 따른 전단파 속도변화(분산곡선)를 결정하고 이 결과로부터 지반의 강성을 추정한다. 이 실험법은 지반공학과 관련한 다양한 조건의 육상 지반조사 및 도로포장 등에 대

한 강성도의 조사에 있어서 많은 경험이 축적되어 그 실용성이 이미 충분히 검증된 바 있다(Stokoe *et al.*, 1989). 또한 이 실험법을 해저지반의 조사에 까지 확장하여 적용하고자 하는 연구(Luke, 1994; Lee, 1996)가 수행된 바 있다.

SASW 실험결과로부터 지반부지의 깊이에 따른 강성변화를 추정하기 위해서는 정해석(forward modeling)이나 역해석(inversion) 과정을 거치게 된다. 이 과정에서는 깊이에 따른 전단파 속도의 변화를 나타내는 지반주상으로 구성된 시스템을 가정하고, 가정된 시스템에 대해서 이론적으로 구한 표면파의 분산곡선이 실험에서 구한 분산곡선과 일치할 때까지 지반주상을 변화시키면서 해석과정을 반복 수행함으로써 지반주상을 추정한다. 따라서 실험 결과분석의 신뢰도나 계산과정의 효율성을 위해서는 층이 진 지반에서 파동의 전달을 효율적으로 해석할 수 있는 해석기법의 적용이 필수적이다.

층이진 지반에 대한 파동전파문제는 여러 연구자들에 의해 연구되어 왔다. 본 논문에서는 현재 SASW 시험법에서 적용되고 있는 파동해석법 중에서도 수중 SASW 시험법의 개발을 위해 수행된 해석적 연구(Lee, 1996) 결과에 관하여 논하고자 한다.

## 2. 모드 해석법(2차원 해석법)

### 2.1. 시스템의 고유방정식

외력이나 지진하중에 의해 층이 진 지반에서 발생하는 동적응답은 파동전파문제를 해석하여 구할 수 있다. 층이 진 지반에 대한 파동문제의 행렬해석법은 Thomson(1950)과 Haskel(1953)에 의해서 최초로 정립되었으며, 일반적으로 전달행렬법(transfer matrix method)이라 칭한다. 이 방법에서 전달행렬은 각 탄성매질층의 상부면과 하부면에서 인접한 탄성매질층의 상부 혹은 하부면과 맞닿은 힘과 변위의 연속성을 고려하여 구성된다. 지반의 동적 응답은 표면이나 굳은 바닥지반에서 발생하는 하중이나 진동을 각층의 전달행렬의 행렬해석을 통해서 점진적으로 구할 수 있다.

각 층의 응답을 점진적인 방법으로 구할 수밖에

없는 전달행렬법의 단점을 보완할 수 있는 해석법으로 Kausel과 Roesset (1981)은 강도행렬법을 제안하였다. 이 방법에서는 동적강도행렬을 이용하여 층 사이의 접촉면에 작용하는 힘을 같은 위치에서의 변위와 연관하여 표현하고, 시스템의 각 노드에서의 강도를 고려하여 층이 진 시스템의 전체강도행렬을 구성한다. 이렇게 구성된 전체 강도행렬로부터 시스템의 고유방정식을 얻고, 이 고유방정식의 해를 구해 진동에 대한 층이 진 지반의 고유 모드를 결정한다.

층이 진 지반을 통해 전파되는 표면파의 이론 분산곡선은 고유모드로부터 결정된다. 이 방법에 의해 구한 이론분산곡선은 통상적으로 2차원 해석 분산곡선으로 불린다. 지수함수를 포함하는 고유방정식의 해를 해석적으로 구하기는 어렵고, 일반적으로 수치해석방법을 이용하여 구한다. 이 중간단한 방법은 분할법(Hamming, 1973)으로, 이 방법에서는 편의상 예상되는 위상속도 범위를 가정하고 위상속도를 작은 값으로부터 큰 값으로 변화시키면서 행렬값의 부호가 바뀌는 위상속도를 찾는다. 이와 같은 초기 탐색과정에서 부호가 변하는 위상속도 주변을 세부적으로 분할하면서 위상속도를 찾아나가고 속도의 변화가 지정된 한계범위 내에 있는 경우에 이 속도를 해로 한다. 이러한 방법으로 해를 전체 주파수 범위에 걸쳐서 찾아나간다.

### 2.2. 모드해석법의 적용예

대표적인 가상시스템에 대한 고유방정식으로부터 시스템의 고유치를 구해 이론분산곡선을 구하는 예를 보이기로 한다. 얻어진 이론분산곡선으로부터 시스템에서 발생할 수 있는 표면파의 종류를 분석한다. 또한, 고유치를 이용하여 이론분산곡선을 얻는 방법에서 당면하는 문제점들에 대해서 알아본다.

해석대상 가상시스템들은 Fig. 1에 보인 바와 같다. Fig. 1에서 시스템 1과 2는 2개의 층으로 구성되어 있고, 시스템 1은 층의 강성이 깊이에 따라 증가하는 반면에, 시스템 2의 경우에는 반무한체의 강성이 상부층의 강성보다 작은 경우를 다룬다.

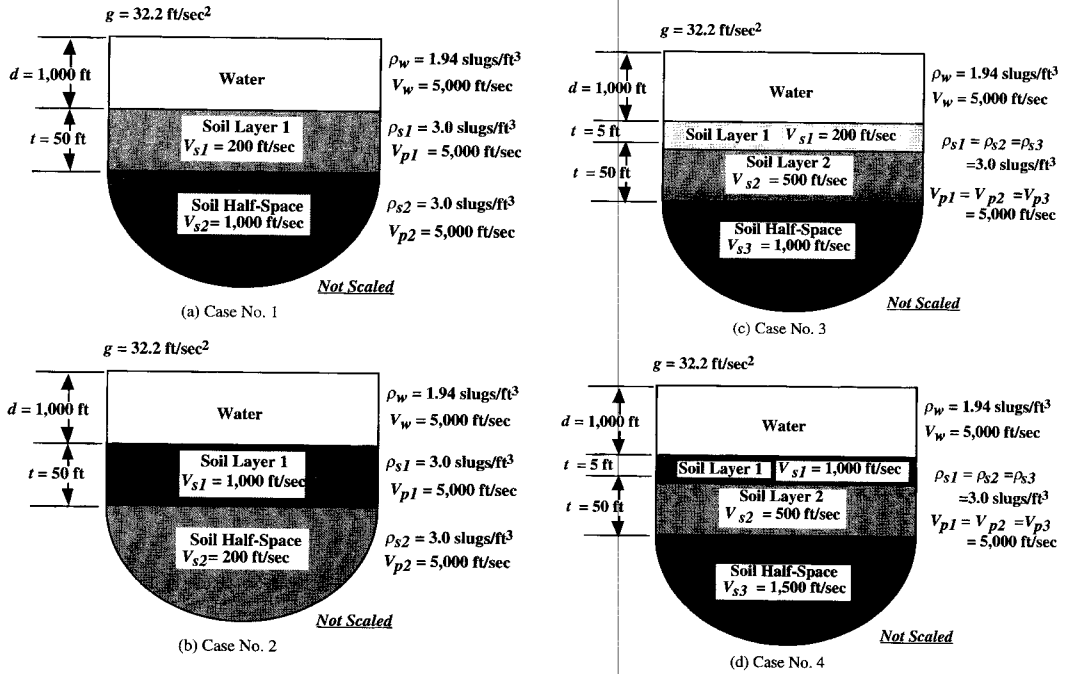


Fig. 1. Example Soil-Water Systems

한편, 시스템 3과 4는 3 개의 층으로 구성되어 있는 경우들로서 시스템 1과 2에서 얻는 결과를 확장하여 분석하기 위해 선택되었다. 이 중 시스템 3에서는 각 층의 강성이 깊이에 따라 증가한다. 그러나 시스템 4의 경우는 중간층의 강성이 가장 작아 강성이 깊이에 따라 감소되는 영역이 있는 경우를 다룬다.

위의 모든 경우에 대해서 지반층은 수심 1000 ft의 물로 덮여 있다. 흙은 물로 완전히 포화된 것으로 가정한다. 따라서 흙의 압축파 속도는 물의 압축파 속도(5000 ft/sec)와 동일한 것으로 가정하였다. 이 경우에 흙의 포아송 비는 0.5에 가깝다. 물과 흙의 밀도는 각각 3.0과 1.94 slug/ft<sup>3</sup>으로 보았으며, 중력가속도는 32.2 ft/sec<sup>2</sup>이다.

이들 시스템에 대해서 2차원 해를 이용하여 구한 분산곡선을 Fig. 2에 보였다. 그림의 결과에서 Airy 파와 1차 모드에 상응하는 Scholte 파가 표시되어 있다. 1차 모드 Scholte파는 임의의 주파수 혹은 파장에 대해서 Airy파를 제외하고 가장

낮은 위상속도에 상응하는 파동으로 정의할 수 있다. Airy파는 Scholte파보다 상대적으로 매우 느린 속도로 전달되는 파동이다. 이 파는 강도행렬의 구성에서 중력에 의한 영향을 고려하였기 때문에 얻어지는 해이며, 다른 파동과 잘 구분되어 결과 분석에서 크게 문제가 되지 않는다는. 이들 해에 상응하는 분산곡선과 더불어서 Fig. 2의 결과에는 고차모드에 해당하는 분산곡선을 함께 나타내고 있다.

이들 고차모드들은 지층간의 상대강성 때문에 발생한다. Fig. 2에서 볼 수 있는 바와 같이 시스템 1과 2의 경우에는 파장이 약 6 ft 보다 짧은 파에 대해서, 시스템 3과 4의 경우에는 파장이 약 0.6 ft 보다 짧은 파에 대해서는 고차모드가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이는 파장이 짧은 경우에는 파의 근입깊이가 상대적으로 얇아 입자의 진동이 표면층에 국한되어 나타나고, 따라서 시스템이 상부층으로만 구성되는 반무한체로 고려되었기 때문이다. 이러한 현상은 수치해석 상의 문

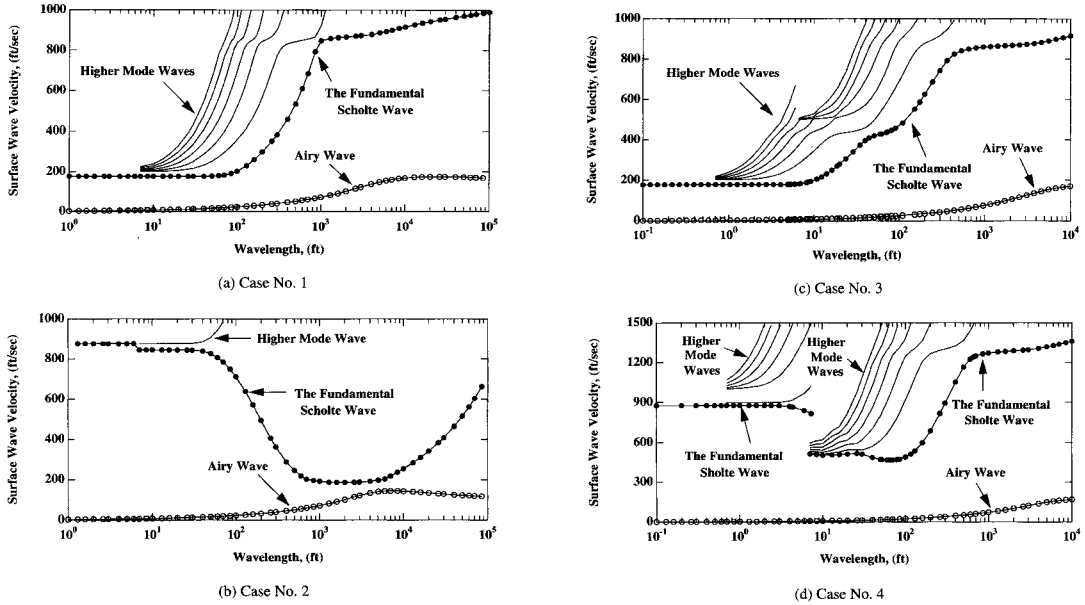


Fig. 2. Theoretical Dispersion Curves of Surface Wave for Example Systems Obtained Using the 2-Dimensional Method.

제로 나타나며 이러한 반무한체로의 가정은 물리적으로 타당하다. 시스템 1, 3, 4에 대해서는 그림에 보인 분산곡선 외에도 고차모드에 해당하는 분산곡선들이 더 많이 구해지지만 7개의 모드에 대한 분산곡선만 나타냈다. 그러나 시스템 2에 대해서는 3개 모드만 구해져 이에 대한 분산곡선만 보이고 있다. 이 경우에는 고유방정식의 행렬식이 복소수가 되어 해를 구하는 수치해석 상의 문제가 있다.

1차 모드에 대한 Scholte 파와 고차모드에 대한 파동은 표면파와 동일한 성질을 가지며 물과 지반의 접촉면을 따라 전파된다. Scholte 파는 물과 지반의 접촉면으로부터 상하 방향으로 지수함수적으로 빠르게 감쇄된다. Airy 파는 물의 표면을 따라 전파되며 공기와 물의 접촉면에서 중력의 작용으로 전파되는 파동이다. Airy 파는 수심이 매우 얇거나, 지반의 강성이 매우 작은 특별한 경우들을 제외하고는 표면파 실험에서 크게 중요하지 않은 파동이다. 중력이 고려되었으므로 Scholte 파의 위상속도는 지반의 최대 전단파 속도까지 증가된다. 위상각속도가 전단파 속도보다 커질 정

도의 긴 파장을 가지는 파동은 표면파가 아니며 응력파로서 진동원으로부터 멀어질수록 매우 빠르게 감쇄되는 성질을 가지고 있다.

### 2.3. 모드 해석법의 적용성

시스템의 고유치를 구하는 과정에서 고유방정식의 행렬요소 내에 지수함수 지수의 크기가 매우 커지면 컴퓨터를 이용한 수치해석 과정에서 문제가 발생한다. 이러한 문제는 반무한체 시스템을 제외하고는 항상 발생한다. 또한, Fig. 1에 보인 시스템 2와 4의 경우에는 행렬식이 복소수가 되는 문제가 발생한다. 한편 층이 진 지반에 대한 분산곡선에서 명백하게 발생하는 고차모드에 해당하는 파동의 영향을 어떻게 고려할 것인가에 대한 문제가 있다.

2차원 해석에서 또 하나의 문제는 행렬식내의 요소가 복소수가 되는 경우이다. 이러한 경우에 수치해석과정에서 문제가 발생하고, 통상적으로 허수부를 0으로 가정하여 고유방정식의 고유치를 구하는 방법이 사용되고 있다.

층이 진 지반에 대해서는 고차모드에 해당하는

파동이 존재한다는 것이 명백하지만 2차원 해석에서는 이들의 영향을 평가할 수 없다. Sedighi-Manesh(1991), Cucunski · Woods(1992), Tokimatsu et al.(1992)의 연구에서 고차모드가 분산곡선에 심각하게 영향을 미치는 경우들을 보인 바 있다. 고차모드의 영향을 고려하기 위한 방법으로 파동에너지를 고려하여 평가하는 방법이나 뒤에 설명할 축대칭 3차원 변위해석법을 적용하는 방법을 고려할 수 있다.

지금까지의 논의에 근거하여 이론분산곡선을 구하기 위한 고유치 해석방법에는 다음과 같은 문제점들이 내재되어 있음을 알 수 있다.

(1) 지반의 강성도가 깊이에 따라 감소하는 경우 분산곡선이 지반강성의 감소를 반영하는 파장의 범위에서는 고유치를 구하기 위해 사용되는 행렬식이 복소수가 된다. 이 때 복소수의 고유치를 구하기는 매우 어렵고 복소수 해에 상응하는 파동 또한 의미가 없다.

(2) 지반이 층이 진 경우 고차 모드에 상응하는 표면파가 발생하고 고유치 해석법으로는 각각의 고유치에 상응하는 표면파의 영향을 적절히 고려하지 못한다. 특히 지반의 강성도가 깊이에 따라 감소하는 경우 여러 가지 고유치에 상응하는 표면파의 영향이 복합적으로 작용하고 고유치해석법 만으로는 이 영향을 고려할 수 없으므로 1차 고유치에 의해 결정되는 이론분산곡선은 실제 시험결과와 매우 상이하여 실제로 이용이 불가능할 가능성이 크다.

### 3. 변위 해석법(3차원 해석법)

#### 3.1. 변위해와 Fast Field 기법

고유치 해석방법의 문제점인 표면파 전파에 대한 고차모드의 영향을 모두 고려할 뿐만 아니라 시험에서 사용된 감지기의 위치를 고려하여 더욱 실제에 가깝도록 수중 SASW 시험의 이론분산곡선을 구할 수 있는 방법으로 변위해 해석법을 적용할 수 있다. 이 방법을 통상적으로 3차원 해석법으로 칭하기도 한다.

3차원 해석법에서는 원통형 좌표계에서 주파수-공간 영역에서 진동하중에 대한 시스템의 동적거

동을 조화변위를 구하고 이 결과에 근거하여 분산곡선을 결정하는 방법이다. 원통형 좌표계에서 공간영역의 조화변위는 진동수 영역에서의 조화운동 변위에 대한 역 Hankel 변환으로 표현된다. 역 Hankel 변환을 위한 알고리즘은 여러 가지 방법이 있지만, 물론 덮여있는 시스템에 잘 적용되는 방법은 Fast Field Technique으로 알려져 있고 이 논문에서도 이 방법을 사용하기로 한다.

원통형 좌표계에서 운동방정식으로부터 유도된 파동방정식을 방사방향으로는 원통형 함수( $C_\mu$ )로, 원주방향으로는 Fourier 급수로 분할하면 변위 해는 다음 식과 같은 역 Hankel 변환으로 표현된다.

$$U(r, \theta, z, \omega) = \sum_{\mu=0}^{\infty} D_\mu \int_{k=0}^{\infty} k C_\mu \bar{U}_\mu(k, \mu, z, \omega) dk \quad (1)$$

여기서  $k$ 와  $\mu$ 는 각각 파동수와 Fourier 지수이다.

SASW 시험법을 간단하게 모사하기 위해 원형면에 수직으로 작용하는 분포 조화하중에 대해서 위 식을 다시 정리하여 주파수 영역에서 지표면에 발생하는 변위로 나타내면, 다음 식과 같다.

$$u_r(r, \omega) = qr \int_0^{\infty} \bar{u}_r(k, \omega) J_1(kR) J_1(kr) dk \quad (2)$$

$$u_z(r, \omega) = qr \int_0^{\infty} \bar{u}_z(k, \omega) J_1(kR) J_0(kr) dk \quad (3)$$

위 식들로 표현되는 변위를 구하기 위해서는 다음과 같은 과정을 거쳐야 한다.

- (1) 시스템에 대한 전체강도행렬을 조합한다.
- (2) 주어진 주파수에서 각 파동수에 대한 단위 조화하중에 대한 변위를 구한다.
- (3) 위 식으로 나타나는 적분을 풀어 주어진 주파수에서 공간영역에서의 변위를 구한다.
- (4) 다른 주파수에 대해서 위의 과정을 되풀이한다.

층의 수가 많아지면 식 2과 3의 적분을 해석적으로 풀어 정해를 구하기는 매우 어렵다. 따라서, 적분과정을 수치해석적으로 수행하는 방법이 사

용되고 있다.

이를 위해서 Fast Field 기법이라 불리는 수치 적분방법(Marsh *et al.*, 1961; DiNapoli *et al.*, 1980; Schmidt, 1985)을 역 Hankel 변환의 적분을 위해 적용할 수 있다. 이 방법에서는 Hankel 변환 적분식에 들어 있는 Bessel 함수를 Hankel 함수의 항으로 변환하고 유입, 유출되는 파동으로 분할하여 표현한다. Hankel 함수는 큰 급수에 대해서는 수렴식으로 표현할 수 있어, 결과적으로 Hankel 변환적분이 Fourier 변환과 유사하게 되고, 고속 Fourier 변환에서 적용되는 알고리즘을 이용하여 매우 빠른 속도로 계산할 수 있게 된다.

3.2. 3차원 해를 이용한 분산곡선 결정

3차원 해를 이용하여 Fig. 1의 2가지 예제 시스템에 대한 이론분산곡선을 관심이 있는 과정(주파수)의 영역에 대해서 "간편법" 과 "대체법"

(Lee, 1996)으로 구해보면 각각 Fig. 3과 Fig. 4와 같다. 여기서 간편법이란 위상속도를 구함에 있어서 감지기의 위치를 L과 2L, 2L과 4L, 4L 과 8L에 있는 것으로 가정하는 방법이다. 이 과정은 컴퓨터 프로그램에서 자동으로 수행되므로 사용자가 별도의 자료를 입력할 필요가 없다. 반면에 대체법에서는 사용자가 감지기의 위치를 직접 입력한다. 이 방법을 사용하면 실험에서 사용된 감지기의 위치를 고려한 이론 분산곡선을 구할 수 있다.

본 논문에서 다른 대표적인 예제 시스템과 더불어서 여러 가지 조건의 물-지반 시스템에 대해서 3차원 해석방법을 적용하여 적용성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 지반의 강성도가 증가하는 경우 고차모드의 영향은 거의 없고 따라서 감지기의 위치에 상관없이 1차 모드에 상응하는 일정한 분산곡선이 얻

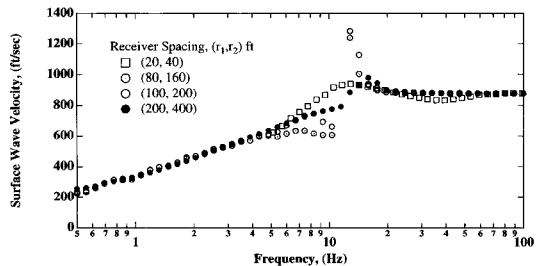
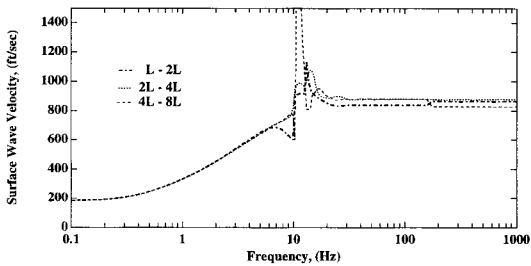


Fig. 3. Theoretical Dispersion Curves of Surface Wave for the Example System (Case No. 1) Obtained Using the 3-Dimensional Method.

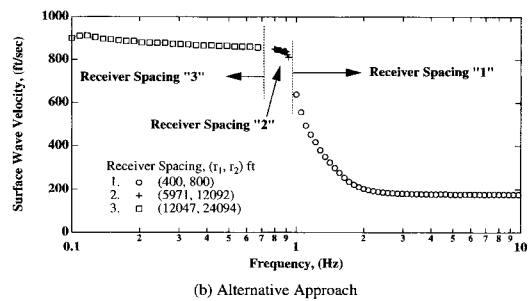
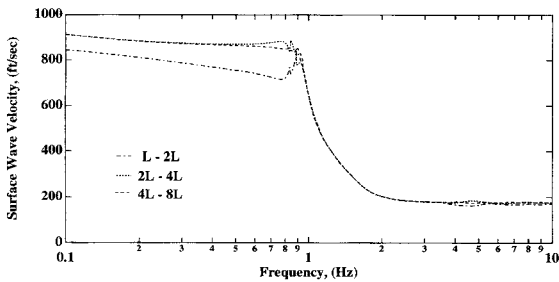


Fig. 4. Theoretical Dispersion Curves of Surface Wave for the Example System (Case No. 2) Obtained Using the 3-Dimensional Method.

어진다.

2) 지반의 강성도가 깊이에 따라 감소하는 경우 감소하는 강성도를 반영하는 파장의 범위에서 고차모드의 영향이 크게 나타난다. 이러한 범위에서 고유치 해석법에 의해 결정되는 분산곡선은 신뢰할 수 없다.

3) 개발된 새로운 3-D 해석방법을 이용한 수중 지반 시스템에서 전파되는 표면파의 이론분산곡선을 계산하기 위해 소요되는 시간은 대체로 적절하며 더 복잡한 지층구조를 가진 시스템 해석의 경우에도 경제적이고 신뢰성 있는 해를 제공할 수 있는 해석기법이라는 것이 밝혀졌다.

4) 3-D 해석법에서는 감지기의 설치위치를 모사할 수 있어 시험의 결과를 더욱 현실적으로 분석할 수 있다는 장점이 있다.

#### 4. 이론 분산곡선 해석방법의 적용 예

이태리의 베니스 항구 근해에서 실시된 수중 SASW 실험결과(Luke, 1994)에 대해서 앞서 설명한 해석방법들을 적용하여 실험결과를 실제로 분석하여 본다. 실험이 수행된 해안지반은 가는 모래와 실트가 혼합된 상태로 70 m 이상 덮여 있는 상태로서 수심은 5 m이다. 표면파의 데이

터 수신은 jack-up platform에서 실시되었고 공진주파수 1 Hz를 가지는 수직 일방향 감지기를 잠수부가 해저면에 설치하였다. 비교적 좁은 감지기 간격에서는 잠수부가 망치로 해저면을 타격하여 10 ~ 150 Hz의 표면파를 발생하였다. 3 ~ 20 Hz 정도의 긴 파장을 가지는 표면파를 발생시키기 위해서는 700 kg의 콘크리트 파일햄머가 사용되었다. 여러 가지 감지기의 간격(1, 2, 4, 8, 15, 30, 50 m)에 대해 얻은 표면파의 분산곡선을 Fig. 5에 보였다

개발된 3-D 해석방법으로 감지기의 위치를 고려하지 않는 조건에서의 정해석을 실시하여 최종적으로 얻은 지층의 강성도 분포는 Fig. 6과 같다. 같은 그림에는 SASW 시험결과와 신뢰도를 평가하기 위해 같은 지역에서 실시된 SCPT 시험(동적 콘관입시험) 결과로부터 추정된 지층의 강성도 분포를 함께 나타냈다. Fig. 6에 보인 강성도 분포를 가진 지반에 대해 고유치 해석방법과 3-D 해석방법으로 구한 표면파의 이론 분산곡선을 시험 분산곡선과 함께 Fig. 7에 비교하였다.

위에서 보인 결과들을 고려하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 지층의 강성도가 깊이에 따라 증가하는 범위를 반영하는 파장영역에서는 고유치 해석법에

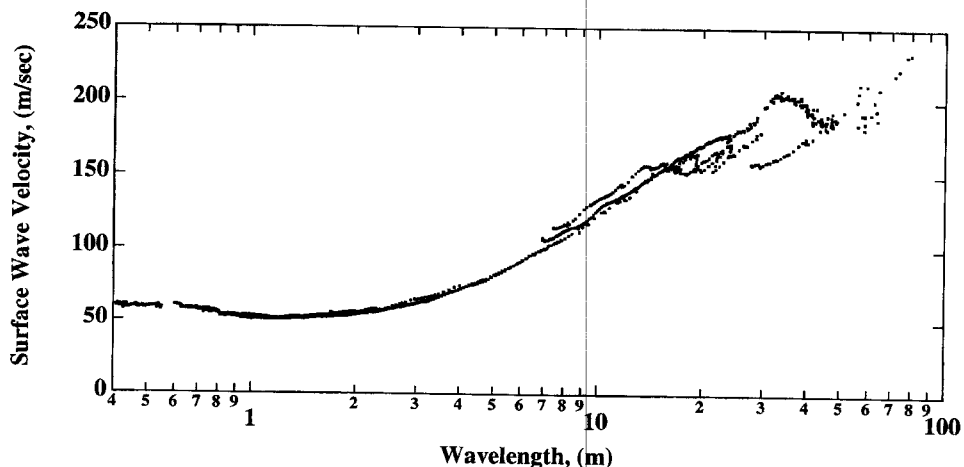


Fig. 5. Dispersion Curve of Surface Wave obtained from the underwater SASW test for a Geotechnical Site in the Venice Harbor.

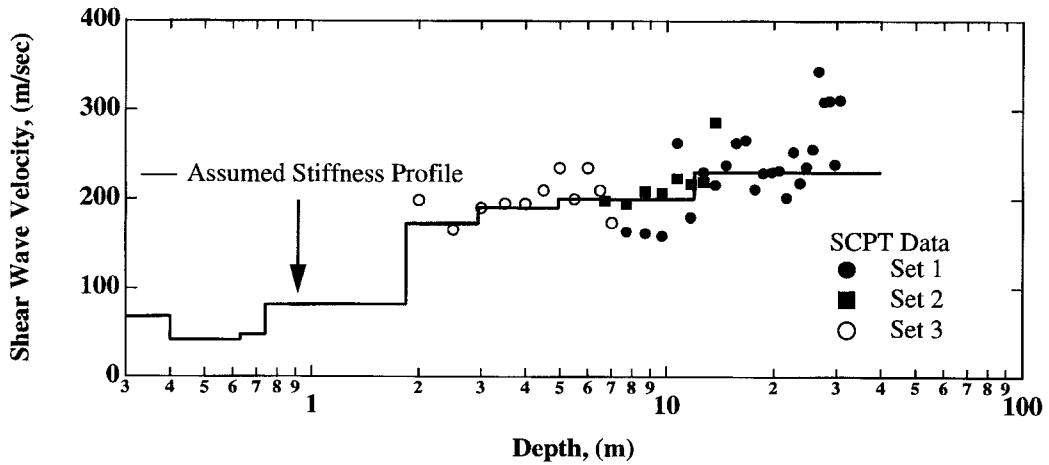


Fig. 6. Assumed Soil Stiffness profile for a Geotechnical Site in the Venice Harbor.

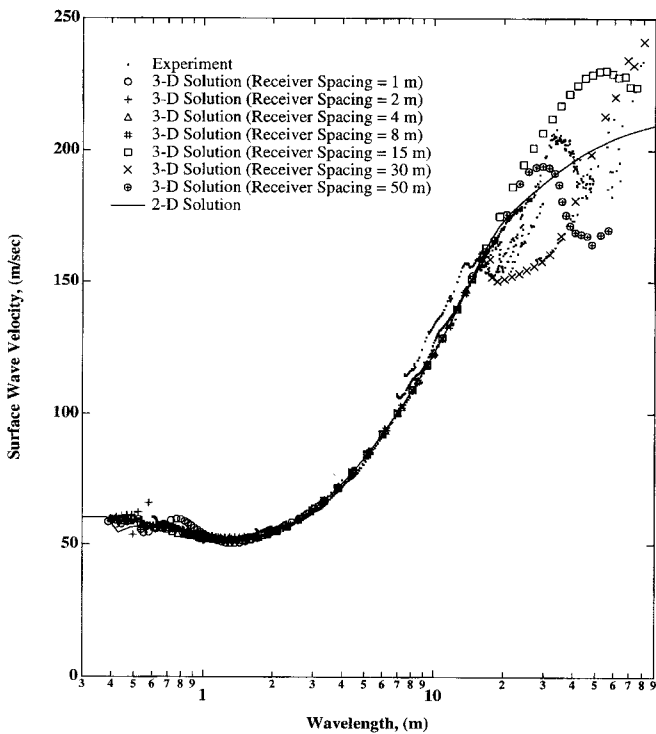


Fig. 7. Comparison of Experimental and Theoretical Dispersion Curves obtained Using the 2-Dimensional and the 3-Dimensional Method with the Assumed Stiffness Profile.

의해 구한 이론 분산곡선이 시험분산곡선과 일치한다. 그러나 해저면 가까운 깊이에서 지반의 강도가 감소하는 지층의 특성을 나타내는 파장영역

과 파장이 상당히 길어서 표면파의 속도가 감지기의 설치위치에 따라 변하는 것으로 보이는 파장영역에서는 고유치 해석법으로는 적절한 이론



분산곡선을 결정할 수 없다.

(2) 짧은 파장영역에서 지층의 표면파 속도 감소를 반영하는 시험분산곡선에 대한 유사한 이론 분산곡선은 3-D 해석방법으로 적절히 구해진다. 또한 파장이 긴 영역에서 감지기의 설치 위치에 따른 시험분산곡선의 변화가 3-D 해석법에 의한 이론분산곡선에서 반영되고 있다. 감지기의 간격에 따른 분산곡선의 분산은 시험당시에는 지반의 불균질 혹은 수평방향으로의 강도변화 등이 원인인 것으로 간주하였으나 3-D 해석방법에 의한 결과 이러한 변화의 주원인이 감지기의 설치간격 변화 때문인 것으로 의견이 모아졌다.

(3) 그림 7의 결과에서 볼 수 있듯이 SASW 시험 결과는 SCPT 시험으로부터 얻은 결과와 유사한 결과를 얻어 수중 SASW 시험이 적절한 신뢰도를 보이는 것으로 판단되었다. 그러나 깊이가 30m 이상 되는 곳에서의 전단파 속도는 SCPT 시험결과 보다 작게 나타났으며 그 이유는 3-D 해석 시 감지기의 설치 간격을 고려한 정해석이 실시되지 않았기 때문으로 생각된다. 따라서 시험결과 분석치 신뢰도를 향상하기 위해서는 다소 복잡한 정해석 과정이 되더라도 감지기의 간격을 고려한 정해석을 실시하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

주파수영역 표면파 시험법(SASW)의 역해석 과정에서 필수적으로 적용되어야 하는 이론분산곡선의 해석방법에 관해서 설명하였다. 지반의 강성이 깊이에 따라 점진적으로 증가되는 육상지반시스템의 경우에는 이론적으로 상대적으로 난해하지 않은 고유치 해석법으로 적절한 분산곡선을 얻을 수 있다. 그러나 이러한 지반조건일지라도 수중지반일 경우에 지반의 강성이 커서 그 압축파 속도가 물의 압축파 속도보다 큰 조건에서는 많은 고차모드가 발생하고 이들이 시험결과에 영향을 미치게 되므로 고차모드의 영향을 모두 고려하는 3차원 해석법의 적용이 요구된다. 한편, 지반의 강성이 임의 깊이에서 깊이에 따라 역전되는 경우에도 고차모드의 영향이나, 고유치가 복소수가 되는 등의 문제가 발생하므로 고유치 해석법으로는 적

절한 분산곡선을 얻을 수 없는 경우가 많다.

현재까지 적용한 해석방법에서는 지반의 층을 수평으로 가정하였으므로 향후 지반조건이 수평 방향으로 균질하지 않은 경우에 대한 경제적인 해석방법의 개발이 요구된다.

## 참고문헌

- Ewing, M. W., W. Jardetzky, and F. Press, 1957, "Elastic Waves in Layered Media", McGraw Hill, New York
- DiNapoli, F. R. and R. L. Deavenport, 1980, "Theoretical and Numerical Green's Function Field Solution in a Plane Multilayered Medium", Journal of Acoustic Society of America, Vol. 67, No. 1, pp.92-105
- Gucunski, N. and R. D. Woods, 1992, Numerical Simulation of the SASW Test, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 11, pp. 213-227.
- Hamming, R. W., 1973, Numerical Methods for Scientists and Engineers, 2nd Edition, McGraw-Hill Inc., N.Y.
- Haskel, N. A., 1953, "The Dispersion of Surface Waves on Multilayered Media", Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 43, No. 1, pp. 17-34
- Kausel, E. and J. M. Roesset, 1981, "Stiffness Matrices for Layered Soils", Bulletin of Seismological Society of America, Vol 71, No. 6, pp. 1743-1761
- Lee, Byungsik, 1996, "Analytical Studies of Surface Wave Propagation along the Seafloor for Application to Underwater SASW Testing", Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin.
- Luke, B. A., 1994, "In Situ Measurement of Stiffness Profiles in the Seafloor Using the Spectral-Analysis-of-Surface-Waves(SASW) Method", Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin.
- Marsh, H. W., M. Schulkin, and S. G. Kneale, 1961, "Scattering of Underwater Sound by the Sea Surface", Journal of Acoustic Society of America, Vol. 33, No. 3, pp. 333-340
- Schmidt, H., 1983, "Modeling of Pulse Propagation in Layered Media using a New Fast Field Program", Proceeding of NATO Advanced Research Workshop on Hybrid Formulation of Wave Propagation and Scattering, IAFE, Castel Gandolfo (Romè), Italy, August 30 - September 3, 1983
- Sedighi-Manesh, M., 1991, "Theoretical Investigation of the Spectral-Analysis-of-Surface-Wave (SASW) Technique for Application Offshore", Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin.
- Stokoe, K. H., II, G. J. Rix, and S. Nazarian, 1989, "In Situ Seismic Testing with Surface Waves", Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de

- Janeiro, Brazil, Vol. 1, Balkema, Rotterdam, pp. 331-334
- Tokimatsu, K., S. Tamura and H. Kojima, 1992, Effects of Multiple Modes on Rayleigh Wave Dispersion Characteristics, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 118, No.10, ASCE
- Thomson, W.T., 1950, "Transmission of Elastic Waves through a Stratified Solid Medium", Journal of Applied Physics, Vol. 21

---

2000년 10월 4일 원고접수

2000년 12월 20일 원고채택