

## 천부지각 2차원 속도구조를 위한 레일리파의 군속도와 위상속도 역산의 비교 연구

이보라<sup>1)</sup>, 정희욱<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>군산대학교 해양과학대학 해양시스템공학과, bora@kunsan.ac.kr

### A Study of the comparison of Inversion of Rayleigh wave Group and Phase Velocities for Regional Near-Surface 2-Dimensional Velocity Structure

Bora Lee<sup>1)</sup>, Heeok Jung<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Ocean System Engineering, Kunsan National University

**요약:** 서해안 조간대에서 24 channel 탐사기로 획득한 표면파 자료의 위상속도와 군속도를 구한다음, 이를 역산하여 그 결과를 비교하였다. 위상속도의 분산곡선은 tau-p stacking 방법에 의하여, 군속도의 분산곡선은 wavelet analysis와 Multiple Filtering Technique의 두가지 방법을 사용하여 구하였다. 위상속도의 오차가 군속도의 오차보다 더 큰 것을 확인하였다. 군속도의 경우, wavelet analysis가 Multiple Filtering Technique 보다 fundamental mode와 higher mode를 구분하는데 더 효과적이었다. 역산결과, 군속도의 fundamental mode와 1st higher mode 를 동시에 사용했을 때, 공간적 해상도가 가장 좋았다. 이연구는 천부 지반의 S파 속도 구조를 구하는데, 군속도의 higher mode를 포함한 군속도 분산곡선을 사용하는 것이 효과적임을 시사한다.

**주요어:** 군속도, 위상속도, 분산곡선, 역산, 해상도, S파 속도구조

**Abstract:** The surface wave data obtained in a tidal flat located in the sw coast of the Korean Peninsula were used to analyse the shear wave velocity structure of the area. First, the phase velocity dispersion curves were obtained by the tau-p stacking method and the group velocity dispersion curves by a wavelet transform method and the Multiple Filtering Technique by Dziewonski. The phase velocity dispersion curves exhibited bigger errors than the group velocity curves. The results showed that the wavelet transform method was more effective in separating the fundamental and the 1st higher mode group velocity curves than the Multiple Filtering Technique. Combined use of the fundamental and the 1st higher mode group velocity dispersion curves in the inversion for the shear wave velocity structure gave better spatial resolution compared when

the fundamental mode group velocity was used alone. This study indicates that the group velocity dispersion curves can be used in the inversion of Rayleigh waves for the shear wave velocity structure, especially effectively with the higher mode group velocity curves together.

**Keywords:** Group velocity, Phase velocity, inversion, wavelet analysis, s-wave velocity, fundamental mode, 1st higher mode.

## 1. 서론

표면파는 에너지가 지표면을 따라 전파하며 탄성과 탐사 시 쉽게 발생되고 주파수에 따라 지하 투과 심도가 달라지는 분산성질이 나타난다. 이 분산곡선을 역산하여 지각의 S파 속도구조를 밝히는 연구가 80년대 이후 계속되어 왔다(Aki and Richard, 1980). 이러한 방법을 천부지각에 이용하여 지반 공학적 사용을 목표로 지하 수십 m까지의 S파 속도를 구하기 위해 표면파의 위상속도를 이용하려는 시도가 1980년대 이후 본격적으로 이루어 졌다(Tokimasu *et al.*, 1992a,b; Luke and Stokoe, 1998). 위상속도를 이용하기 위해서는 multi channel data를 다루어야 하고, 이에 따라 짧은 탐사 측선에 대한 data를 획득하는데 많은 시간과 노력이 요구된다. 또한 지반에 inhomogeneity의 정도에 따라 phase velocity의 분산곡선의 오차가 심해진다. 이에 반해 군속도는 음원과 지진계 사이의 평균 속도 구조에 대한 정보를 1지점의 지진기록으로 얻을 수 있는 장점이 있다. 1960년대 Dziewonski(1969)가 multiple filtering technique를 이용하여 군속도를 구하는 방법을 제시한 후 수많은 연구에 적용되어 왔다. 그러나 천부지반의 표면파의 경우 탄성과 자료의 주파수 영역이 아주 좁은 범위에 국한되고 장주기 지진파와는 달리 5Hz-60Hz의 고주파 영역에 에너지가 집중되어 있어 군속도를 구하는데 어려움이 있다. 그래서 군속도 분산 데이터를 얻기 위해 시간과 주파수 도메인을 동시에 분석할 수 있는 wavelet transform을 이용하려는 시도가 몇몇의 연구자들에 의해 이루어 졌다(Takeshi Yamada and Kiyoshi Yomogida, 1997). Wavelet analysis는 analysis wavelet을 단순히 시간 도메인에서 움직이면서 상관(correlation)에 의해 에너지 스펙트럼을 만드는 동시에 analysis wavelet의 주파수 영역을 변화시키면 시간-주파수-에너지 3차원 스펙트럼을 작성하게 된다. (장용석, 2005)

본 연구의 목적은 24 channel 탄성과 탐사기를 이용하여 얻은 다중채널 신호에서 표면파의 군속도와 위상속도 분산곡선을 구하고 이를 역산하여 천부지각의 2차원 S파 속도 단면도를 구하는 것이다. multiple filtering과 wavelet transform을 이용하여 군속도의 분산곡선을 구한 후 비교하여 군속도 분산곡선을 구하는데 효과적인 방법을 제시한다. 또한 군속도와 위상속도의 역산결과의 공간적 해상도를 분석하여 표면파의 S파 속도구조를 구하는데 신뢰도가 높은 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 연구지역

연구 대상 지역은 전라북도 고창군 해리면 동호리에 위치한 동호어항이다. (Fig. 1) 연구 지역의 동부에는 선운산 산악지형이 분포하나 연구 지역 일대는 해발 30cm이내의 낮은 산지와 평야가 발달해 있다. 연구 지역의 지표는 모래로 다져진 상태였다.

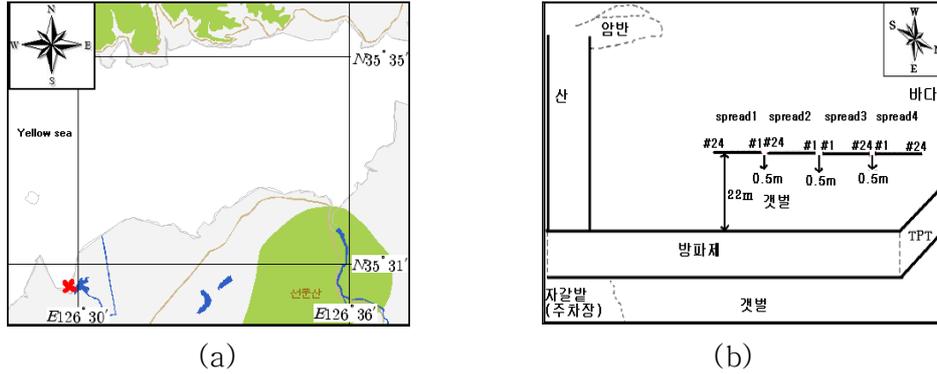


Fig. 1. (a) Map of the experimental site is marked with x. (b) Geophone array of the experiment.

### 3. 연구방법

본 연구에서는 레일리파의 분산곡선을 이용하여 지반의 S파 속도구조를 구하기 위해 (1) 표면파 자료 획득, (2) 군속도와 위상속도의 분산곡선 획득하여 (3) 분산곡선의 역산을 수행하고 (4) 역산 결과의 공간적 해상도와 (5) 탐사측선에 대한 S파 2차원 속도구조를 구하였다.

#### 3.1 표면파 자료 획득

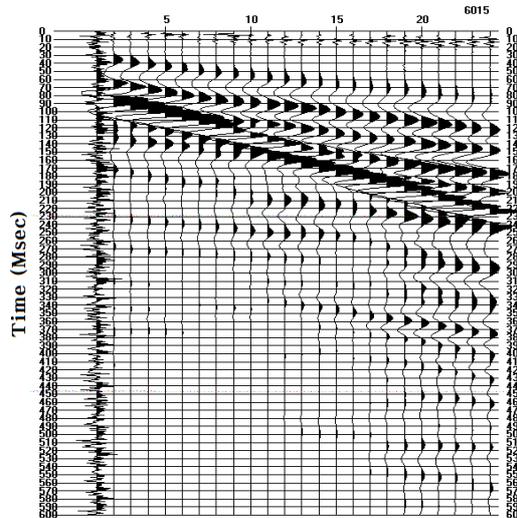


Fig. 2. An example of seismic record section. Rayleigh waves are clearly shown between 50 and 500 milli sec.

표면파 신호를 획득하기 위하여 고유진동수가 10Hz인 수직형 수신기를 사용하였으며 24개의 다중채널 탄성파 탐사기를 이용하였다. 수신기 간격은 0.5m이고 자료는 250 micro seconds간격으로 획득하였다. 음원은 알루미늄판을 Hammer로 타격하여 발생시켰으며 신호가 미약하게 들어올 경우 신호를 강화하기 위하여 5회 Stack하였다.

탐사 측선은 Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 4개의 Spread로 이루어져 있으며 각 Spread의 전후로 shot offset을 5m로 하여 8곳에서 음원을 주었다. Fig. 2는 spread 3의 ch24에서 5m 떨어진 곳에서 음원을 발생시켜 획득한 신호이다. 20  $\mu$ sec 이후에 진폭이 큰 표면파의 신호가 뚜렷하게 나타난다.

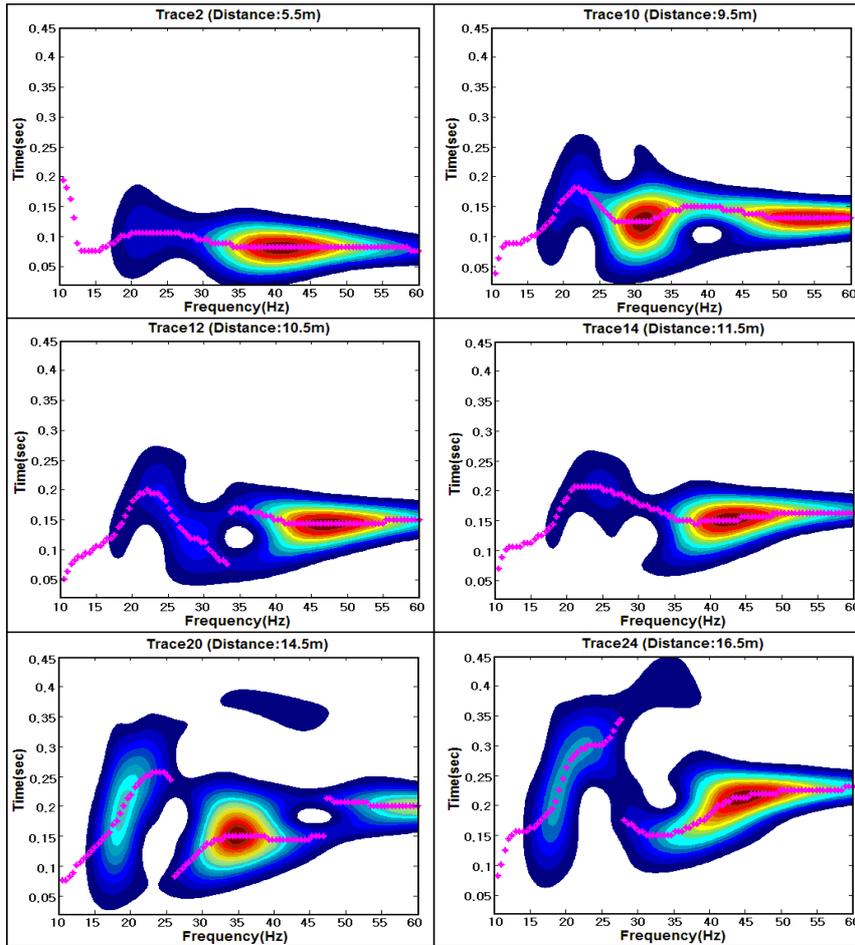


Fig. 3. Energy distribution in the time – frequency domain obtained by the wavelet transform method. Clear separation of the fundamental and the higher mode group velocity curves appears as the source– receiver distance increases.

spread 3의 표면파의 에너지 변화(Fig. 3)를 보면 음원에 가까운 2번째 trace는 fundamental mode만 나타나며 음원에서 멀어질수록 higher mode가 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있다. 20th의 15Hz–25Hz 주파수영역을 fundamental mode, 26Hz–48Hz 주파수 영역을 1st higher mode로 하여 데이터를 분석하였다. 기본적인 자료처리의 과정으로 각 channel의 평균값을 구하여 DC를 제거하고 표면파 이외의 seismic energy를 제거하기 위하여 cosine filtering을 하였다.

### 3.2 위상속도 분산곡선 획득

정희옥(2003)에 위상속도의 분산곡선을 구하는 방법이 기술되어 있듯이 다중채널 탄성과 자료에서 위상속도의 분산곡선을 구하기 위하여 주파수와 위상속도 함수로 에너지 강도를 계산한다. 그 다음 정해진 주파수에 대한 에너지가 최대가 되는 위상속도를 결정한다. 이 때 각 주파수에 대한 일정한 위상속도 범위를 정해주고 각 주파수의 파가 정해진 위상속도  $C = \frac{2\pi f}{k_x}$ 로 전파할 때 모든 채널의 신호를 합하여 에너지 세기를 구한다. 정해진 주파수에 대해 에너지가 최대가 되는 위상속도를 찾는다. 이것이 분산곡선이 된다. 이와 같은 방법으로 획득한 spread 3의 위상속도의 분산곡선(Fig. 4(a))은 10Hz 주파수의 수신기를 이용했으므로 10Hz이상의 주파수 영역에서 분산곡선이 나타나기 시작하며

10Hz부근에서 130m/sec~140m/sec의 위상속도가 29~30Hz에서 55m/sec에서 65m/sec로 감소하는 것을 보인다. 위상속도와 군속도의 분산곡선을 비교해보면 위상속도의 분산 에러가 군속도 보다 크다(Fig. 4(a),(b)).

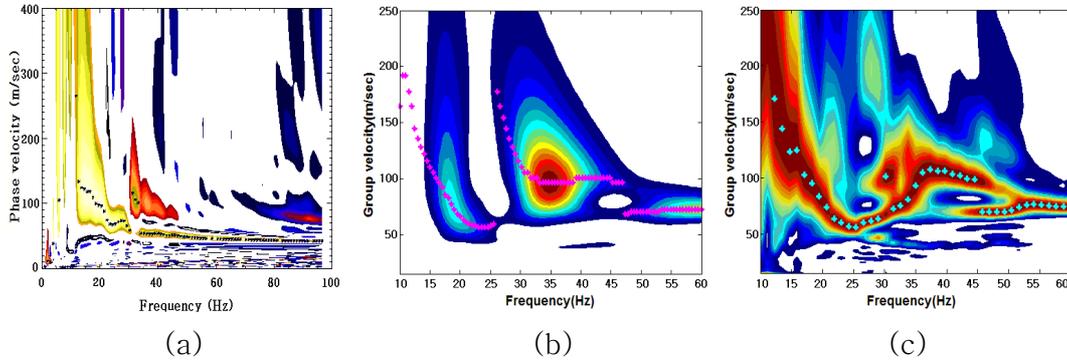


Fig. 4. Dispersion curves of the Rayleigh waves from the spread 3. (a) Phase velocity dispersion. (b) Group velocity dispersion obtained by the wavelet transform method. (c) Group velocity dispersion obtained by the Multiple Filtering Technique.

### 3.3 군속도 분산곡선 획득

장용석(2005)에서 정의한 바와 같이 시계열 자료에 대해 푸리에 변환은 하나의 파라미터 (scale 과 frequency)만 보여주는데 wavelet 변환은 두 가지 파라미터 (scale 또는 frequency)를 보여준다. 시계열 자료  $S(t)$  에 대하여 wavelet 변환은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$S(t) = \sum_j \sum_k x_{j,k} \psi_{j,k}(t) \tag{1}$$

식 (1)에서  $\psi_{j,k}(t)$ 는 주파수  $j$ 에서의 analysis wavelet이고,  $k$ 는 시간, 그리고  $x_{j,k}$ 는 wavelet 계수이다.  $\psi_{j,k}(t)$ 는 basis wavelet 이며 다음과 같이 표현된다.

$$\psi_{j,k}(t) = \sqrt{\frac{2^j}{T}} \psi\left(\frac{2^j}{T} t - k\right) \tag{2}$$

식 (2)에서  $T$ 는 시계열 자료  $S(t)$ 의 총 시간이다.

이 수식에 기초로 wavelet analysis를 이용하여 각각의 주파수의 에너지가 최고치가 되는 시간을 추출한다. 이 데이터를 curve fitting하여 군속도의 분산 곡선을 그릴 수 있다. Wavelet transform method을 이용하여 구한 군속도 분산곡선은 fundamental mode, 1st higher mode가 뚜렷하게 분리된다(Fig. 4(b)). 14Hz에서 25Hz사이의 주파수 영역에서 55m/sec에서 130m/sec사이의 속도 분포를 보이며 이 에너지 영역을 fundamental mode, 25Hz에서 45Hz사이의 에너지를 1st higher mode로 하여 역산을 실시하였다. Multiple Filtering Technique를 이용하여 획득한 군속도의 분산곡선(Fig. 5)은 fundamental mode, 1st higher mode의 분리가 쉽지 않고 Wavelet transform method을 이용하여 획득한 군속도 분산곡선보다 에러가 크다는 것을 알 수 있다(Fig. 4(b), (c)). 그래서 역산을 실시할 때는 에러가 작은 wavelet transform method를 이용하여 구한 군속도 분산곡선을 이용하였다.

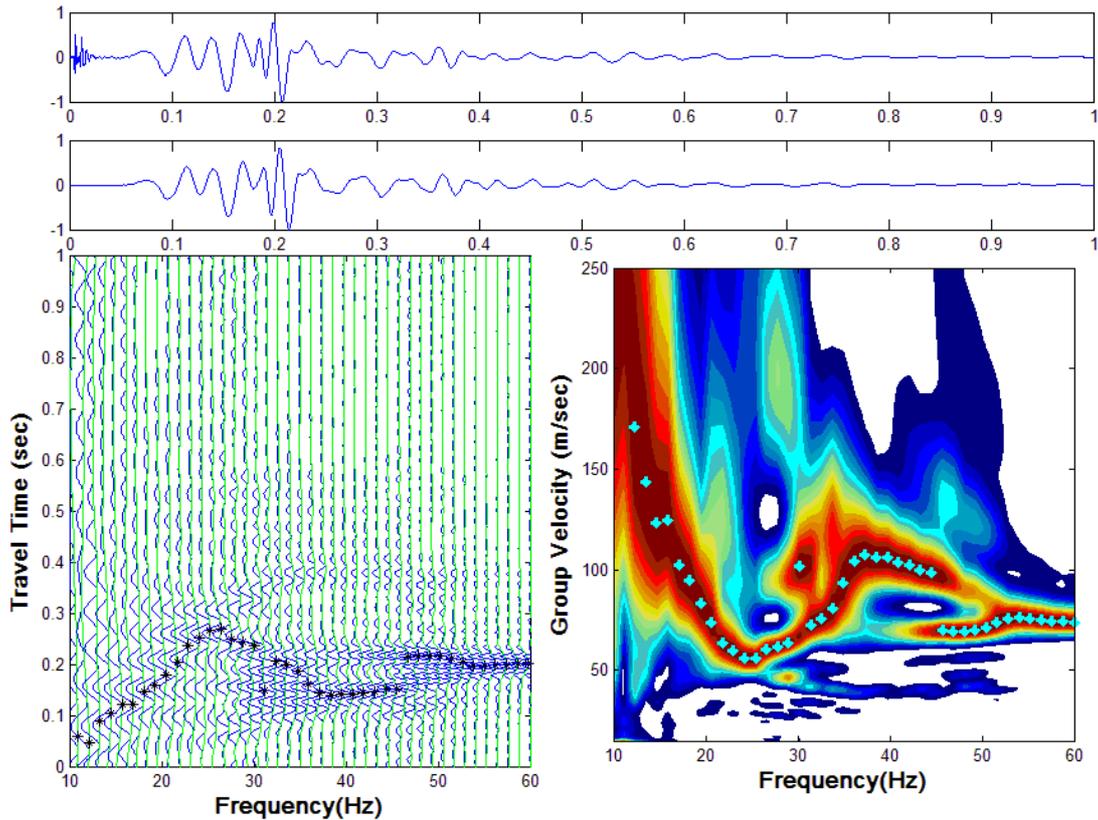


Fig. 5. Group velocity dispersion obtained by the multiple filtering Technique.

### 3.4 분산곡선 역산과 공간적 해상도 비교

역산을 하기 위해 초기 모델을 선정해야한다. 초기 모델 층의 두께는 30cm, 층의 밀도는 1.5gm/cc이고 P파의 속도는 약 2.1m깊이까지 300m/sec, half-space를 포함하여 2.1m에서 6m까지 1500m/sec로 하였다. layer는 half-space 포함하여 총 16개 층으로 하였다. 주파수와 위상속도 관계식( $C = f \cdot \lambda$ )을 이용하여 파장( $\lambda$ )을 구하고 이 파장의 2/3을 각각의 정해진 주파수의 투과 심도로 하였다. 이 심도에서의 초기 속도는 위상속도의 1.2배를 하여 사용하였다. 여기에서  $f$ 는 위상속도 분산곡선에서 정해진 주파수이며,  $C$ 는 앞에서 언급한 방법으로 획득한 위상속도 분산 데이터 값이다.

역산 결과인 S파 속도구조(Fig. 6(a))에서 thin line은 균속도의 fundamental mode만 역산하여 얻은 결과이다. 속도가 조금씩 증가하는 형태를 보여주고 있다. thick line은 균속의 fundamental mode와 1st higher mode를 동시 역산하여 얻은 S파 속도이다. 깊이가 1m, 2.5m에서 저속도층이 나타나며 증가, 감소를 반복하는 구조를 보인다. dashed line은 위상속도의 fundamental mode만을 역산하여 얻은 S파 속도구조이다. 깊이가 0.5m에서 1m사이 저속도층이 나타나며 1m이후로 점점 속도가 증가하는 형태를 가진다. dots는 위상속도의 fundamental mode와 1st higher mode를 동시 역산하여 얻은 속도구조이다. 깊이가 1m에서 저속도층이 존재하며 속도가 증가, 감소를 반복한다. 균속도의 fundamental mode(solid line)만 역산하는 것보다 fundamental과 1st higher mode를 같이 역산(dashed line)할 때 공간적 해상도가 좋다는 것을 확인할 수 있다(Fig. 6(b)). 위상속도 분산곡선의 fundamental mode만 역산한 경우(solid line)가 fundamental과 1st higher mode를 같이 역산(dashed line)한 경우보다 해상도가 좋으

며 위상속도의 해상도보다 군속도의 해상도가 더 좋다(Fig. 6 (b), (c)).

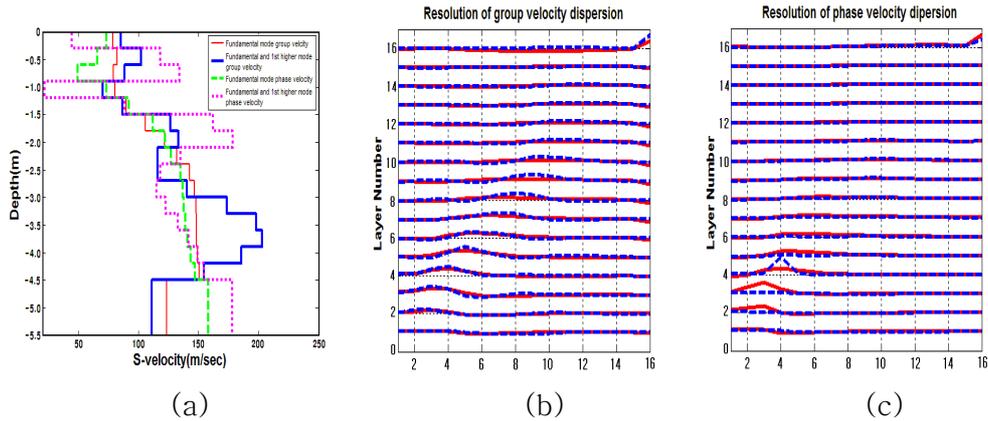


Fig. 6. Inversion results for the spread 3. (a) Shear wave velocity structure obtained from the fundamental and 1st higher mode group velocity curves (thick line), fundamental mode group velocity only (thin line), fundamental and 1st high mode phase velocity curves(dots), and fundamental phase velocity dispersion only(dashed line). (b)Resolution obtained from the fundamental and 1st higher mode group velocity curves (dashed line), fundamental group velocity dispersion only(solid line). (c)Resolution obtained from the fundamental and 1st higher mode group velocity curves (dashed line), fundamental group velocity dispersion only(solid line).

### 3.5 표면파의 입자 운동 에너지

Fig. 7은 Rayleigh wave의 몇 개의 주파수에 대한 입자의 에너지에 관한 그림들이다. (a)는 주파수가 13Hz일 때 fundamental mode의 에너지 분포이다. 심도가 증가할수록 에너지가 감소하는 형태를 보인다. (b)는 주파수가 26Hz일 때 fundamental mode의 에너지 분포이다. 약 2m 깊이까지 에너지가 존재한다. (c)와 (d)는 주파수가 40Hz일 때 각각 fundamental mode와 1st higher mode이다. fundamental mode에서는 0m에서 1.5m사이의 깊이까지 에너지가 존재한다. 1st higher mode경우에는 감소, 증가, 감소하며, 4m이하의 깊이에서는 에너지가 거의 없다. (e),(f),(g)는 주파수 50Hz의 각각 fundamental mode, 1st higher mode, 2nd higher mode에서 입자의 에너지 분포이다. 50Hz의 fundamental mode(e)에서 에너지는 약1.5m 깊이까지 존재한다. 1st higher mode(f)에서는 에너지가 존재하는 깊이가 다른 mode에 비해 아주 짧으며 second higher mode(g)에서는 약 4m깊이까지 에너지가 존재한다. 각각의 주파수의 고차 mode에서 에너지가 최대 4m 깊이까지 존재한다는 것은 S파 속도의 공간적 해상도를 최대 4m깊이까지 신뢰할 수 있다는 것을 의미한다.

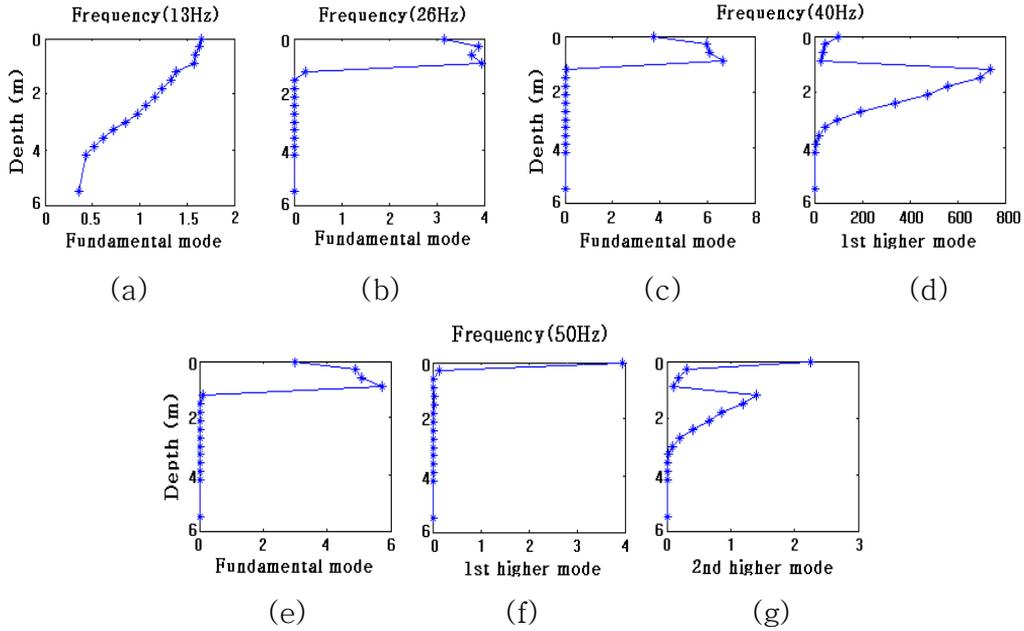


Fig. 7. Energy distribution of the particle motion of Rayleigh wave as a function of depth.

### 3.6 S파 2차원 속도구조

4개의 spread에서 각 spread마다 S파 속도를 6.5m깊이까지 구하여 2차원 S파 속도단면도를 작성하였다(Fig. 8). 그러나 Rayleigh wave의 입자의 에너지 분포(Fig. 7)에서 에너지가 4m깊이까지만 존재한다는 것을 확인했으며, 4m깊이까지 S파 속도의 공간적 해상도를 신뢰할 수 있는 구간이라 할 수 있다.

거리 5m에서 15m사이에서는 깊이에 따라 S파 속도가 증가, 감소하는 구간이 나타나며 15m에서 47.5m사이에서는 1.5m깊이까지 60~80m/sec의 낮은 속도가 분포한다.

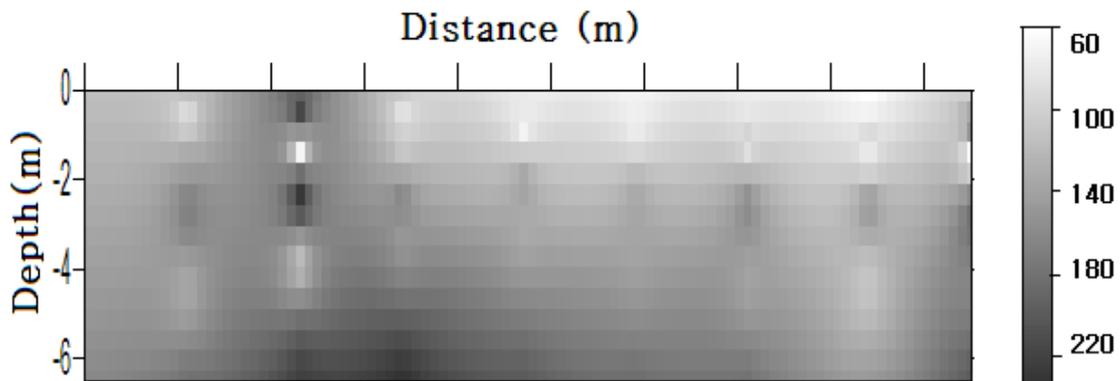


Fig. 8. Two dimensional shear wave velocity structure beneath the survey line. Only the velocity structure above the 4m depth is reliable due to the poor spatial resolution of beneath this depth.

## 5. 결론

본 연구에서는 레일리파를 역산하여 2차원 S파 속도구조를 구하였다. Group velocity와 phase velocity의 역산 결과를 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. Wavelet analysis를 이용하여 group velocity를 구할 수 있다. 특히 higher mode 존재 시 fundamental과 1st higher mode의 분리가 용이하다.
2. Group velocity와 phase velocity의 해상도를 비교하면 group velocity가 보다 나은 해상도를 보인다.
3. group velocity의 경우 fundamental mode만 역산한 경우보다 fundamental mode와 1st higher mode를 같이 역산할 때 resolution이 좋아진다.
4. Rayleigh wave의 eigen function의 2차 모드를 이용할 경우 더 깊은 곳까지의 공간적 해상도를 높게 할 수 있다는 것을 보여준다.
5. 이 연구는 천부지반의 S파 속도구조 연구에서 wavelet analysis를 이용한 group velocity inversion을 이용할 수 있음을 보여준다.
6. Group velocity를 이용하는데 있어 적당한 offset을 사용하여 higher mode를 이용할 경우 좀 더 깊은 곳까지 공간적 해상도를 높일 수 있다.

### 참고문헌

- A. Dziewonski, M. Landisman, and S. Bloch, 1969, A technique for the analysis of transient seismic signals. *Bulletin of the seismological society of America*, v. 59, no. 1, 427-444
- Aki, K. and Richard, P. G., 1980, Quantitative seismology theory and methods, *W. H. freedman and company*, Vol II, 259-333.
- Herrmann. R. B., 1992, *Manual for computer programs in earthquake seismology*, St. Louis University. Missouri.
- Luke, B. A., and Stokoe II, K. H., 1998, Application of SASW method underwater. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124, 523-531.
- 장용석, 2005, 지각규모 굴절과 실험 자료의 단주기 표면파를 이용한 한반도 천부 지각속도 구조에 대한 연구, 이학석사학위논문, 전북대학교
- 정희옥, 2001, 금강 하구 천해성 퇴적층의 연약지반에 관한 연구: 표면파 역산에 의한 S파 속도 구조와 해상도, 한국지구과학회지, v. 22, 179-185.
- 정희옥, 2003, 표면파 탐사 방법을 이용하여 구한 S파 속도와 시추결과의 비교 연구, 한국지구과학회지, v. 24, 549-557.
- 정희옥, 2004, 다중채널 표면파 자료를 이용하여 구한 S파 속도와 감쇠지수 구조: 낙동강 하구의 연약 지반 특성, 한국지구과학회지, v. 25, 774-783.
- (주)地友 엔지니어링, 동호어항 시설공사 지반조사 보고서, 13-27
- 조범준, 2006, 장주기 레일리파를 이용한 남한의 지각 및 상부 맨틀의 속도 구조 연구, 이학석사학위논문, 전북대학교
- Takeshi Yamada and Kiyoshi Yomogida, 1997, Group velocity measurement of surface waves by the wavelet transform, *J. Phys. Earth*, v. 45, 313-329
- Thorne Lay and Terry C. Wallace, 1995, *Modern global seismology*, Academic press, 120-127, 140-147.
- William Menke, 1989, *Geophysical data analysis: Discrete inverse theory*, Academic press, 22-60