

## 천부 불균질대에 의한 레일리파 전파 및 분산특성 고찰

이상민<sup>1\*</sup> · 박권규<sup>2</sup> · 변중무<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한양대학교 지구환경시스템공학과

<sup>2</sup>한국지질자원연구원

### A Numerical Study on the Effect of Near Surface Inhomogeneity on Rayleigh Wave Propagation and Dispersion

Sangmin Lee<sup>1\*</sup>, Kwon Gyu Park<sup>2</sup> and Joongmoo Byun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Geoenvironmental System Engineering, Hanyang University

<sup>2</sup>Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

**요 약:** 소규모 천부 불균질대가 레일리파의 전파 및 분산특성에 미치는 영향에 대해 알아보기 위해 반무한 균질 매질과 2층 층서구조상의 소규모 천부 불균질대를 상정하고 이 불균질대의 심도, 규모 등을 변화시키면서 레일리파의 전파양상과 분산특성에 대해 고찰하였다. 불균질대의 크기가 최소파장을 기준으로 한파장 이상의 경우 레일리파의 분산 현상이 확인되었으며 이러한 현상은 불균질대의 크기가 클수록 커지며 심도가 깊어질수록 작아지고 심도와 수직적 크기변화보다는 수평적 크기변화에 더 민감한 것을 확인하였다. 분산으로 인한 위상속도의 변화 양상은 불균질대의 크기가 일정정도 이하일 경우에는 탄성과 기록상에서는 확인하기 어려우나 분산된 레일리파의 반사 및 투과 이벤트와 그로 인한 진폭변화를 통해 불균질대 존재 여부를 확인하는 지시자로 사용될 수 있을 것으로 판단되며 이런 결과는 소규모 불균질대나 공동탐지를 위한 현장탐사나 새로운 해석방법 개발에 있어 한 지침을 제공할 것으로 기대된다.

**주요어:** 레일리파, 천부 불균질대, 탄성과 모델링

**Abstract:** The effect of small-scale near surface inhomogeneity on Rayleigh wave propagation and dispersion has been investigated in this study using two-dimensional FEM elastic modeling. Various inhomogeneity models with a variety of geometrical shape and embedment depth which exist in homogeneous half-space and two-layered media are considered. Results show that any near surface inhomogeneity greater than one wavelength in terms of minimum wavelength of Rayleigh wave shows dispersion characteristics. Such dispersion effect become stronger as the dimensions of the inhomogeneity increase. The effect of horizontal dimension is more dominant factor governing the dispersion characteristics than vertical dimension. However, the dispersion effect can not be identifiable in seismogram if the horizontal dimension is not wide enough. Nonetheless, even in this case, the existence of inhomogeneity can be inferred by the reflection or transmission event of Rayleigh wave. The results can be expected to provide insights on the behavior of Rayleigh wave which may be helpful for designating field work or new processing scheme to detect near surface inhomogeneity by surface wave method.

**Keywords:** Rayleigh wave, inhomogeneity, elastic modeling

## 서 론

표면파 탐사법은 지반이나 구조물의 표면에서 표면파를 측정하여 하부의 S파 속도를 측정하는 탐사법으로 1980년대 초에 Nazarian *et al.* (1983)에 의해 SASW (Spectral Analysis of

Surface Waves)로 소개되었다. 표면파 탐사법은 도로 기층 및 성토층의 다짐, 연약지반의 개량평가, 포장 구조체의 포장 및 도로기층의 건전도 검사 등 다양하게 활용되고 있다(Stokoe *et al.*, 1994). 최근에는 지하공동 등과 같은 천부 소규모 불균질대의 탐지에 대한 관심이 증대됨에 따라 분해능 및 적용성 고찰을 위한 연구가 활발히 수행되고 있다(Gucunski *et al.*, 1996; Park *et al.*, 1999; 박권규, 2004).

Gucunski *et al.* (1996)은 유한요소 2차원 모델링을 이용하여 균질한 토질내에 약 40배의 S파 속도차이가 있는 콘크리트나 공기로 채워진 공동 등의 속도 불균질대가 존재할 경우에

2006년 1월 19일 접수; 2006년 5월 1일 채택

\*Corresponding author

E-mail: sang\_min78@hanmail.net

Address: Dept. of Geoenvironmental System Engineering,  
Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Seongdong-gu,  
Seoul, 133-791, Korea

대한 SASW 시험자료를 모사함으로써 불균질대의 크기, 심도 등이 레일리파의 분산특성에 미치는 영향을 고찰한 바 있다. Park *et al.* (1999)과 박권규(2004)는 표면파 탐사자료(MASW: Multichannel Analysis of Surface Wave)의 분산곡선 해석 및 역산, 그리고 스윕자료로 변환된 자료에 대한 등보정 후 중합 방법을 이용하여 S파 속도 및 중합단면을 영상화하여 지하공동의 탐지 가능성을 고찰한 바 있다.

그러나 이러한 노력들에도 불구하고 천부 소규모 불균질대 탐지를 위한 표면파 탐사의 적용성 향상을 위해서는 속도 불균질대의 크기나 심도, 레일리파의 주파수 특성, 표면파 탐사 방법별 특성 등을 고려한 보다 다각적인 접근에 의한 고찰이 필요하며 본 연구에서는 표면파를 이용한 속도 불균질대 탐지의 분해능 고찰의 일환으로 유한요소법을 이용한 2차원 탄성파 수치모델링을 통해 Gucunski *et al.* (1996)와는 달리 반무한 균질매질내에서만뿐만 아니라 2층 층서구조내에서의 소규모 천부 불균질대가 레일리파의 전파 양상 및 분산특성에 미치는 영향에 대해 고찰하고 또한 송신파형의 최대주파수와 불균질대의 속도를 고려한 최소파장의 단위로서 불균질대의 규모와 심도를 변화시키면서 레일리파의 전파 및 분산특성에 대해 고찰하고자 한다.

### 파동방정식 및 안정조건

3차원 직교좌표계에서 균질, 등방성 매질에 대한 파동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$(\lambda + 2\mu)\nabla(\nabla \cdot \mathbf{U}) - \mu\nabla \times \nabla \times \mathbf{U} - \rho \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

여기서  $\mathbf{U}=[u, v, w]$ 는 각각  $x, y, z$  방향의 변위를 나타내는 벡터이며,  $\rho, \lambda, \mu$ 는 각각 매질의 밀도, Lamé 상수 및 전단계수(rigidity)이다.

3차원으로 표현된 식 (1)을 전개한 후,  $y$  방향의 변화를 무시하면, 2개의  $x, z$  방향의 변위, 즉 P파와 SV파의 거동이 결합된 식을 얻을 수 있다(Kelly *et al.*, 1976).

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu)\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z}\right) + \mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z}\right) \quad (2a)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu)\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) + \mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z}\right) \quad (2b)$$

식 (2)에 진원항을 포함하여 정리하면 다음과 같은 2차원 파동방정식을 얻을 수 있으며,

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \alpha^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \beta^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + (\alpha^2 - \beta^2) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} + f_1(t) \quad (3a)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \beta^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \alpha^2 \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + (\alpha^2 - \beta^2) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} + f_2(t) \quad (3b)$$

여기서  $\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$ ,  $\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$ 이며, 각각 매질내에서의 P파와 S파의 속도이다.

탄성과 파동방정식을 유한 요소법을 이용하여 풀 경우, 격자점의 변위는 임의의 2차원 요소에 대하여 선형 내삽 함수를 이용하여 표현할 수 있으며 변분법을 이용하여 식 (3)의 파동방정식을 전개하여 다음과 같은 시간 영역 유한 요소 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{U}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (4)$$

여기서  $\mathbf{M}$ 은 질량행렬(mass matrix),  $\mathbf{K}$ 는 강성행렬(stiffness matrix),  $\mathbf{F}$ 는 송신원 벡터(source vector)를 나타낸다.

식 (4)를 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ddot{\mathbf{U}}(t) = \mathbf{M}^{-1}(-\mathbf{K}\mathbf{U}(t) + \mathbf{F}(t)) \quad (5)$$

좌변의 시간에 대한 2차 미분항을 다음과 같은 중앙 유한 차분식을 이용하여 정리하면

$$\ddot{\mathbf{U}}(t) = \frac{\mathbf{U}(t + \Delta t) - 2\mathbf{U}(t) + \mathbf{U}(t - \Delta t)}{\Delta t^2} \quad (6)$$

이며 이식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{U}(t + \Delta t) = 2\mathbf{U}(t) - \mathbf{U}(t - \Delta t) + \Delta t^2 \mathbf{M}^{-1}(-\mathbf{K}\mathbf{U}(t) + \mathbf{F}(t)) \quad (7)$$

시간영역에서의 해는 식 (7)을 이용하여 시간 적분을 수행함으로써 구할 수 있다. 본 연구에서는 사각형 요소를 사용하여 질량행렬 및 강성행렬을 구하였는데 이때 유한요소법을 사용할 경우 질량행렬은 일관(consistent)행렬로 나타난다. 그러나 본 연구에서는 컴퓨터 기억용량 및 계산시간의 효율성과 편이를 고려하여 대각행렬형의 Lumped 질량행렬을 사용하여 해를 구하였다(Belytschko and Mullen, 1978).

식 (7)의 시간 적분 시 오차의 누적으로 발산이 일어날 수 있으며 해의 안정을 유지하기 위해 매질의 물성, 격자 간격 및 시간 적분시의 시간간격 등을 고려해 주어야한다. 탄성과 파동방정식의 경우 유한 요소법의 안정 조건은 Lumped 질량 행렬을 사용할 때 다음과 같으나(Marfurt, 1984),

$$p = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x} = 1 \quad (8)$$

이 조건은 정사각형 요소에 대한 파동방정식의 안정조건이므로 본 연구에서 사용한 경우와는 정확히 부합되지 않으므로 본 연구에서는 이보다 충분히 작은  $p = 0.7$ 을 설정하여 수치해의 발산을 최대한 억제하고자 하였다.

또한 파동방정식의 수치모델링에서는 주파수와 격자의 간격에 따라 파의 위상속도 및 군속도가 변하게 되므로 분산관계를 고려해 주어야한다. Lumped 질량행렬을 사용한 시간영역 파동방정식의 경우, 위상속도의 오차를 1% 이내로 유지하기

위해서는 파장당 격자수  $G = \lambda_{\min}/\Delta$ 는 13이상이다(신창수 외, 1993). 따라서 본 연구에서는 파장당 격자수를 15로 두어 격자에 의한 파의 분산을 최대한 배제하고자 하였다.

경계조건으로는 좌우 및 하부에서 반사되는 파형을 없애주기 위하여 투과경계조건(Reynolds, 1978)을 주어 파형이 경계를 통과하도록 설정해 주었다.

### 모형실험 및 결과검토

#### 수치모델링의 타당성 검증

우선 수치모델링의 타당성을 검증하기 위해 균질 반무한매질의 모델을 사용하여 이론해가 존재하는 램의 문제(Lamb's problem)를 풀어 비교해 보았다.

매질의 크기는 2,000 m × 1,000 m이며 밀도는 2.5 g/cm<sup>3</sup>, 속도는 P파 속도가 1,000 m/s, S파 속도가 600 m/s로 이때의 포아송비는 0.218이다.

수신기는 10 m 지점부터 1,990 m 지점까지 10 m의 간격으로 199개를 설치하였고 진원은 최대 주파수가 60 Hz인 가우시안 1차 미분함수를 사용하였으며, 이로부터 얻은 진원의 파형을 모델의 중간지점인 1,000 m 지점의 지표에 수직방향으로 가하였다.

Fig. 1은 지표를 따라 설치한 199개의 수신기에서 1.8초 동안 얻은 수직, 수평 변위의 합성 탄성과 기록이다. 기록에 나타나 있듯이 P파 및 S파 직접파와 S파에 비해 약간 낮은 속도로 지표를 따라 전파하는 레일리파를 확인할 수 있다.

또한 레일리파는 분산없이 전파하는 것을 알 수 있으며 P파에 비해 거리에 따른 감쇠가 거의 없이 전파하는 양상을 확인할 수 있는데 이는 균질매질내에서 원통형 파면을 이루며 분산없이 전파하는 레일리파의 이론적인 전파양상과 동일하다.

Fig. 2는 1초 후의 모델 내부에서의 탄성과 전파양상을 나타낸 스냅사진(snapshot)이며 (a)는 수직, (b)는 수평변위를 각각 나타낸다. 1,000 m/s의 속도로 전파하는 P파와 600 m/s의 S파, 지표를 따라 전파하는 높은 진폭의 레일리파 그리고 지표에 의해 S파에서 P파로 전이되는 P-S파를 확인할 수 있으며 이는 Fig. 3에 나타나 있는 Pilant (1979)에 의한 램의 문제에 대한 이론적 파면도와 일치한다.

Fig. 2의 스냅사진을 분석하면 P파의 경우 지표를 따라 전파하는 수직방향 변위와 진원의 수직하부에서의 수평방향 변위가 나타나지 않으며, S파의 경우는 진원의 수직하부에서의 수직방향 변위와 수평방향 변위가 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 이 또한 Pilant가 이론적으로 보인 것과 동일하다.

#### 균질매질내의 소규모 불균질대의 영향

Fig. 4는 반무한 균질매질내의 불균질대가 존재하는 모델이며 불균질대에 의한 레일리파의 전파 및 분산특성에 대해 알

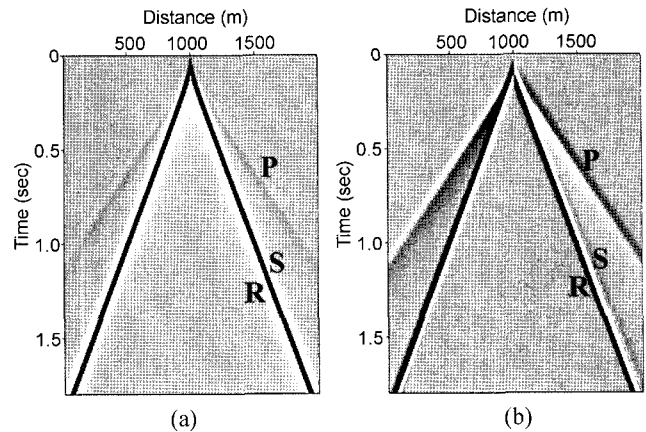


Fig. 1. The synthetic seismograms for homogeneous half-space model: (a) is for vertical displacement and (b) is for horizontal displacement, respectively. Seismograms are obtained at 199 receivers mounted on the surface from 10 m and 1,990 m. Total recording time is 1.8 sec.

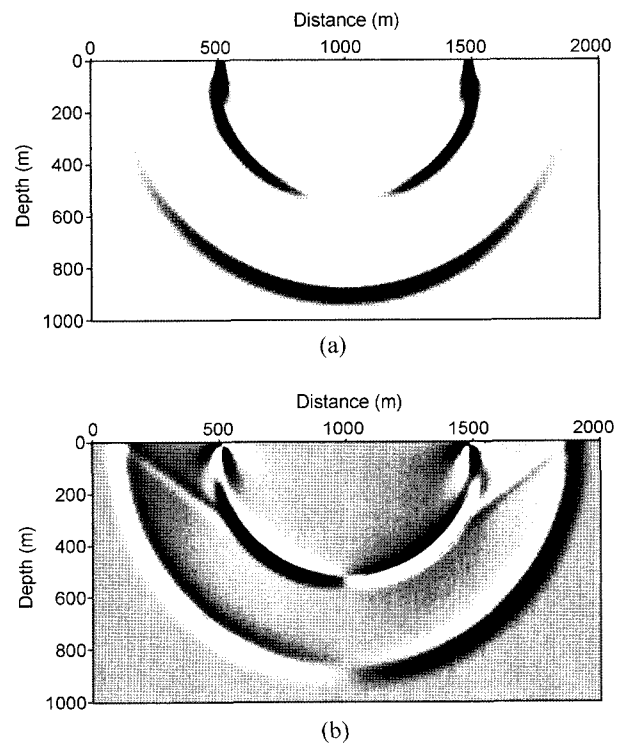


Fig. 2. Snapshots of wavefronts propagating homogeneous half-space model at 1.0sec: (a) vertical displacement and (b) horizontal displacement.

아보기 위하여 불균질대의 크기와 심도는 본 연구에서 사용한 송신파형의 주파수와 S파 속도를 고려하여 레일리파의 최소파장( $\lambda = 7.5$  m)을 기준으로 변화시켰다.

음원은 최대 주파수가 60 Hz인 가우시안 1차 미분함수를 사용하여 500 m 지점에 수직방향으로 가하였으며 수신기는 300 m 지점부터 700 m 지점까지 총 401개를 설치하였다.

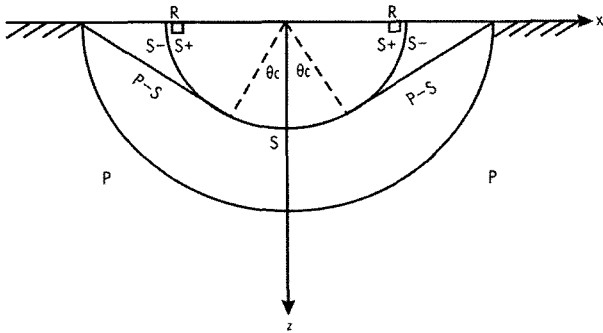


Fig. 3. Wavefronts for the Lamb's problem drawn by Pilant (1979). Snapshots of wavefronts in Fig. 2 are well corresponding to these wavefronts for the lamb's problem.

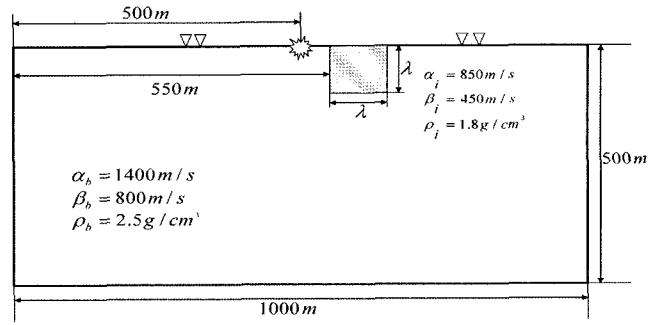
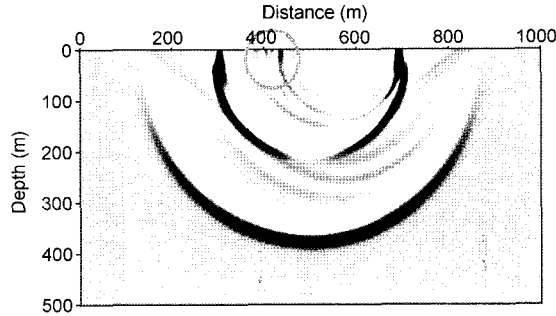
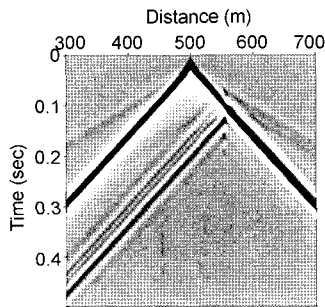
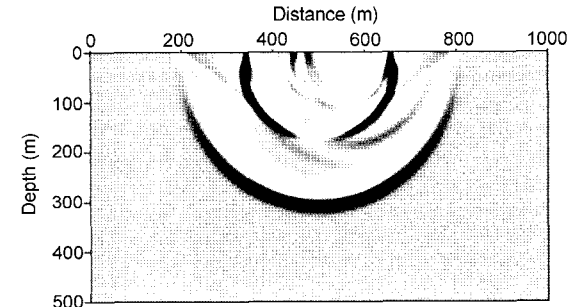
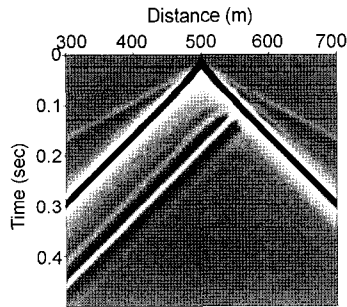


Fig. 4. Homogeneous half-space model with small-size inhomogeneity at earth surface.



(a)



(b)

Fig. 5. The synthetic seismograms and snapshots for the homogeneous half-space model with an inhomogeneity at (a) earth surface and (b) depth of  $\lambda$ .

**Case I: 불균질대의 심도변화에 따른 영향**

Case I에서는 불균질대의 크기를  $\lambda \times \lambda$ 의 크기로 고정시키고 지표로부터 한파장 단위로 심도를 변화시켜가며 고찰해 보았다.

Fig. 5는 각각 불균질대의 위치가 지표와 한파장 아래의 심도에 위치할 때의 합성탄성파기록과 0.3초(a), 0.25초(b)의 스냅사진이다.

P, S 및 레일리 직접파와 더불어 음원으로부터 가까운 경계에서의 반사이벤트, 음원으로부터 먼 경계로부터의 반사파 및 투과파 등을 확인할 수 있다. 여기서 주목할 만한 점은 반사된 레일리파들이 레일리 직접파와는 다른 파장을 보인다는 점이

다. 이는 레일리 직접파가 불균질대를 지나는 과정에서 분산이 일어남을 의미한다. 즉 이 짧은 파장의 레일리 반사파(원으로 표시된 부분)들은 천부 불균질대내에서의 분산의 영향으로 발생한 것으로서 불균질대의 양단에서 반사되어 균질매질내 레일리파 속도로 역전파하는 것으로 해석된다. 이러한 분산된 레일리파의 영향은 위상중첩으로 확연히 구분되지는 않으나 투과파 부분에서도 확인됨을 알 수 있다.

Fig. 5의 탄성파 기록상에서는 불균질대의 규모가 너무 작아 스냅사진에서 확인되는 분산에 의한 위상속도변화를 확인하기는 힘들다. 따라서 이런 경우 분산곡선 해석을 통해서도 분산 곡선상의 주목할 만한 변화를 관측하기는 어려울 것으로 기대

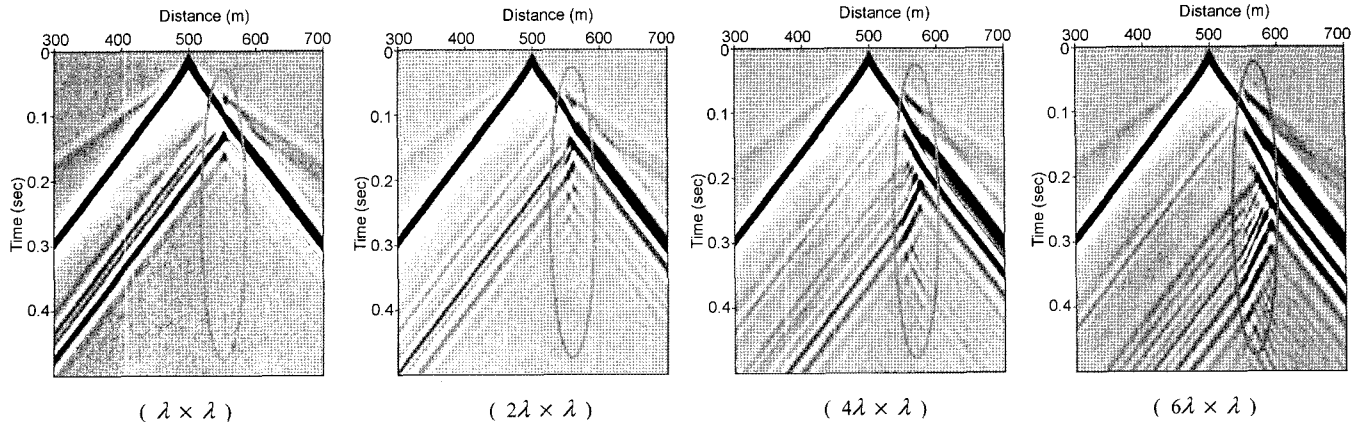


Fig. 6. The synthetic seismograms of vertical displacement for the homogeneous half-space models with an horizontally elongated inhomogeneity at surface.

된다. 한파장 아래의 깊이에서 불균질대가 위치한 경우(Fig. 5(b))에서도 역시 레일리파의 분산현상이 확인되나 Fig. 5(a)에 보인 불균질대가 지표에 존재하는 경우와는 반사와 투과되는 레일리파의 파장의 차이가 남을 확인할 수 있다. 이는 불균질대가 한파장 아래 깊이에 존재하기 때문에 불균질대의 영향이 지표에 존재할 때보다 긴 파장 성분의 영향을 받게 되기 때문이다.

**Case II. 불균질대의 수평적 변화에 따른 영향**

불균질대의 수직크기는  $\lambda$ 로 고정시키고 수평적인 크기를 최소파장의 단위로  $\lambda$ ,  $2\lambda$ ,  $4\lambda$ ,  $6\lambda$ 로 변화시킨 스냅사진을 보면, 불균질대의 수평적인 크기가 커짐에 따라 음원에서 먼 경계로부터 반사된 레일리파와 음원에서 가까운 경계에서 반사된 레일리파의 구분이 점차 명확해 짐을 볼 수 있다. 또한  $\lambda \times \lambda$ 인 경우에는 위상중첩으로 인해 구분이 불명확했던 분산된 투과파의 확인이 가능해짐을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 Fig. 6에 나타난 각 모델에 대한 수직변위 탄성과 기록에서도 확인된다. 특히 불균질대에서 분산되어 투과된 파들의 구분이 불균질대의 크기가 커짐에 따라 확연해 짐을 확인할 수 있다. 또한 주목할 만한 점은 탄성과 기록에서  $\lambda \times \lambda$ 크기를 갖는 불균질대의 모델에서는 불균질대의 규모가 너무 작아 불균질대 주변에서의 위상속도의 변화를 직접 확인하기 힘들으나 수평적인 크기가 최소파장에 대해 2파장 이상인 경우 레일리파의 분산에 의한 위상속도의 차이(Fig. 6의 원으로 표시된 부분)를 확인할 수 있다.

본 연구에서는 불균질대의 S파속도와 송신파형의 최대주파수를 고려하여 최소파장(7.5 m)으로 불균질대의 크기를 변화시켰으나 송신파형의 주주파수(25 Hz)에 대한 파장으로 계산을 하게 되면 대략 한파장은 약 18 m가 된다. 따라서  $2\lambda \times \lambda$  크기부터 탄성과 기록상에서 위상속도의 차이에 기반한 분산특성의 확인이 가능하다고 가정하면 주주파수를 기준할 때는 약 한파장 이상의 크기일 경우부터 불균질대에 의한 분산현상을

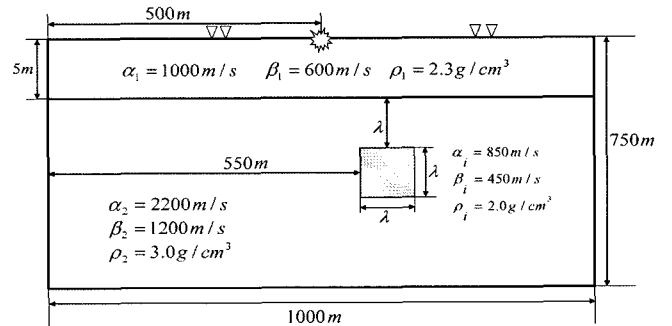


Fig. 7. A two-layered earth model with an inhomogeneity buried beneath the weathered layer.

탄성과 기록상에서 확인할 수 있을 것으로 판단된다.

다만 이런 경우에도 일반적인 SASW나 MASW기법의 분산 해석 과정에서 이 불균질대를 분해해 낼수 있는냐는 문제는 분산해석을 위한 수진기 간격 혹은 수진기 전개길이에 따라 달라질 수 있을 것으로 판단된다.

불균질대의 수평적인 크기변화와 수직적인 심도변화를 동시에 주어 모델링을 한 결과 불균질대의 심도가 깊어질수록 탄성과 기록상에서 위상속도 변화의 관측을 위해서는 불균질대의 수평적 규모가 커져야하며, 이는 결국 불균질대의 심도가 깊어질수록 불균질대의 수평 분해능이 떨어짐을 의미한다.

**Case III. 불균질대의 수직적 변화에 따른 영향**

불균질대의 크기를 수직적으로 수평방향의 변화에서와 동일한 길이만큼 변화시킨 경우 수평방향으로 변화시킨 모델에 비해 분산효과도 상대적으로 적음을 알 수 있는데 이는 레일리파의 분산특성은 불균질대의 수직적 크기보다 수평적 크기에 민감함을 의미한다.

**2층구조 모델에서의 불균질대의 영향**

Fig. 7은 지표부근에 표토층이 존재하는 2층 층서구조내의

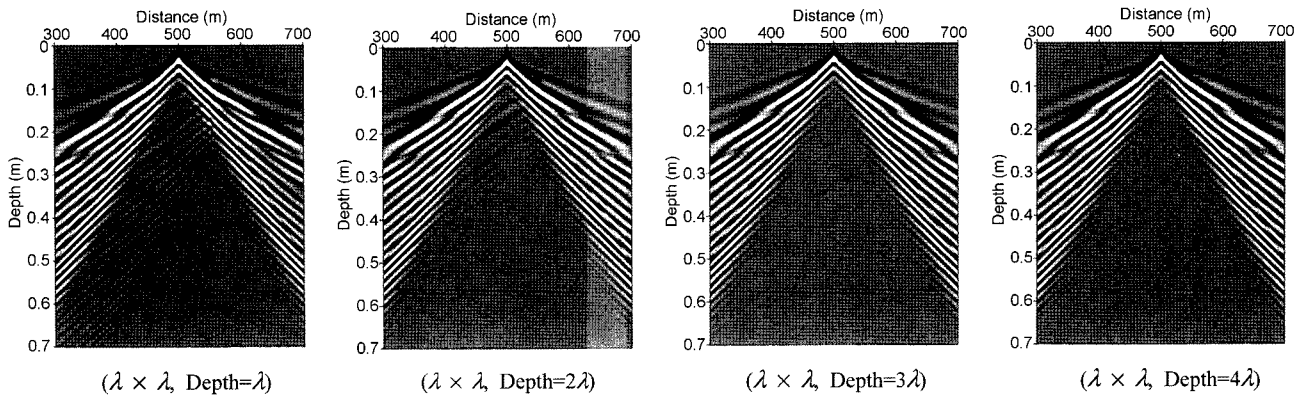


Fig. 8. The synthetic seismograms of vertical displacement for the two-layered model with inhomogeneity.

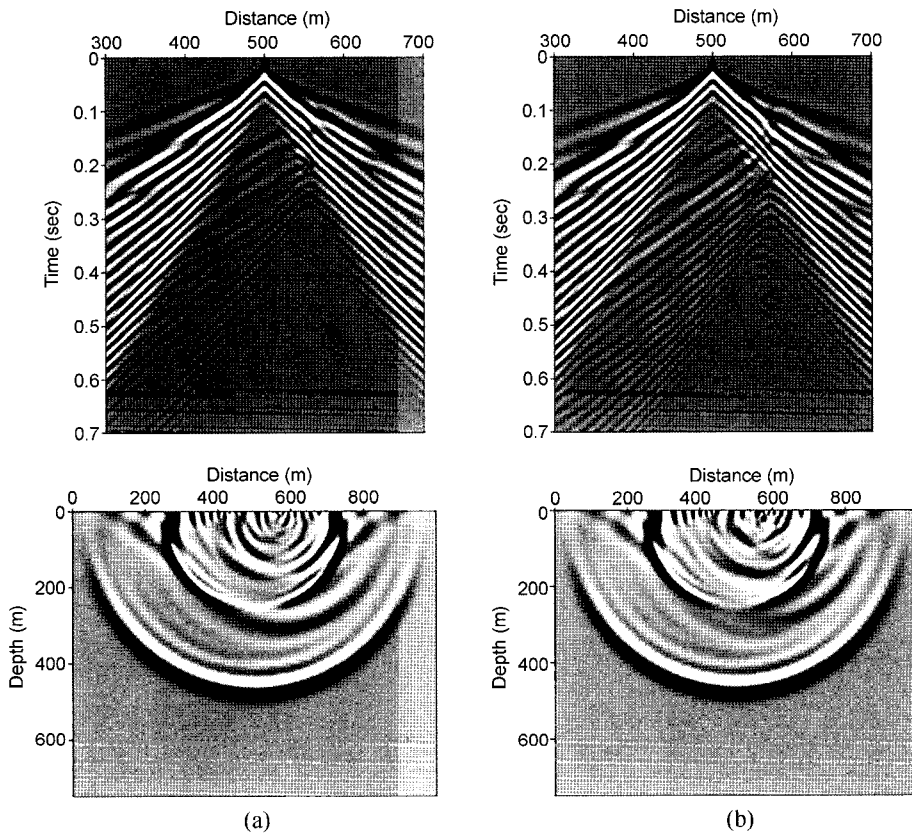


Fig. 9. Seismograms and snapshots of wavefront of vertical displacement at 0.25 sec for the two-layered model with horizontally elongated. Inhomogeneity at depth of  $\lambda$ . Inhomogeneity size is (a)  $2\lambda \times \lambda$  and (b)  $4\lambda \times \lambda$ .

불균질대가 존재한다고 가정한 모델이며 불균질대에 의한 레일리파의 전파 및 분산특성에 대해 알아보기 위하여 불균질대의 크기와 심도는 본 연구에서 사용한 송신파형의 주파수와 S 파 속도를 고려하여 레일리파의 최소파장(7.5 m)을 기준으로 변화시켰다. 또한 경계조건으로는 앞선 모델의 경우와 마찬가지로 투과 경계조건을 주어 경계에서 반사되어 나타나는 파의 영향을 최소화시켰다.

**Case I. 불균질대의 심도별 영향**

Fig. 8은 심도를 최소파장을 기준으로 한 파장씩 변화시키면서 얻은 합성 탄성파기록들이다. 지표에서 두 파장 이내의 심도에 위치한 불균질대에서는 분산된 레일리파가 불균질대에 의한 반사와 투과이벤트를 발생시키나 그 이하의 심도에서는 불균질대의 영향이 나타나지 않음을 알 수 있다.

**Case II. 불균질대의 수평적 변화에 따른 영향**

불균질대의 수평적 크기가 커짐에 따라 2λ일 때와 4λ일 때 모두 불균질대에 의한 분산현상이 나타남을 확인할 수 있다.

분산된 레일리파의 영향은 불균질대의 양단경계에서 반사되면서 나타나는 반사이벤트로 확인되며 2개의 모델에서 모두 확인할 수 있으나 균질매질에서와 마찬가지로 불균질대의 수평적 크기가  $2\lambda$  이하의 모델에서는 탄성과 기록에서 투과이벤트를 확인할 수 없으며 또한 불균질대에 의한 레일리파의 분산 현상 역시 확인할 수 없다.

## 결 론

지하공동과 같은 소규모 천부 불균질대가 레일리파의 전파 양상과 분산특성에 미치는 영향을 고찰하기 위해 불균질대의 크기, 형상 및 심도를 레일리파의 최소파장에 대해 정규화된 단위로 변화시켜 가며 수행한 수치모델링 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 불균질 매질의 규모가 최소파장을 기준으로  $\lambda \times \lambda$  이상일 경우 분산현상이 일어남을 확인할 수 있었다. 이러한 분산 현상은 불균질대의 수평적 혹은 수직적 크기가 커질수록 크게 나타나며 분산특성은 수직적 크기보다는 수평적 크기에 민감함을 확인할 수 있었다.

2. 불균질대의 크기가 일정정도 이하일 경우 이러한 분산 현상은 탄성과 기록상에서 뚜렷한 위상속도 변화양상으로 반영되지 않음을 확인하였다. 하지만 이런 경우에도 분산된 레일리 파들의 반사 및 투과이벤트와 그로인한 진폭변화는 확인할 수 있었으며 이로부터 반사, 투과이벤트의 존재와 진폭변화 양상은 불균질대 존재의 한 지시자가 될 수 있음을 확인하였다.

이상의 결과를 종합할 때 탐사에 사용하는 입력충신원의 주 파수를 고려하여 불균질대나 공동탐지가 이루어진다면 보다 효율적인 탐사가 이루어질 수 있을 것이며 앞으로 이와 같은 모델링을 통해 불균질대나 공동의 물성차, 오프셋 등에 따른 분산특성에 대한 변화양상에 대해 좀 더 고찰하여 해석이 수행된다면 천부 소규모 불균질대와 공동 탐지에 있어 좋은 현장 탐사 지침으로 활용될 수 있으리라 판단된다.

## 참고문헌

- 박권규, 2004, 지하공동 탐지를 위한 표면파탐사 기법의 적용성 고찰, 지반침하 조사, 설계, 시공에 관한 심포지엄, 한국지질자원연구원.
- 신창수 외, 1993, 수치모형 프로그램에 의한 인공탄성과 합성 및 완전파형 역산 연구, 한국자원연구소.
- Belytschko, T., and Mullen, R., 1978, *On Dispersive Properties of Finite Element Solutions, in Modern problems in elastic wave propagation*, Miklowitz and Achenback Eds., John Wiley and Sons, Znc, 67-82.
- Gucunski, N., Ganji, V., and Maher, M., 1996, Effects of obstacles on Rayleigh wave dispersion obtained from the SASW test, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **15**, 223-231.
- Kelly, K. R., Ward, R. W., Treitel, S., and Alford, R. M., 1976, Synthetic seismogram, A finite-difference approach, *Geophysics*, **41**, 2-27.
- Marfurt, K. J., 1984, Accuracy of finite difference and finite-element modeling of the scalar and elastic wave equations, *Geophysics*, **49**, 533-549.
- Nazarian, S., Stokoe, K. H. II, and Hudson, W. R., 1983, Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thickness of pavement system, *Transport. Res. Record*, **930**, 38-45.
- Park, C. B., Miller, R. D., and Xia, J., 1999, Detection of near-surface voids using surface waves, *SAGEEP*, Oakland, Calif., 281-286.
- Pilant, W. L., 1979, *Elastic waves in the earth*, Elsevier Scientific, 103-127.
- Reynold, A., 1978, Boundary conditions for the numerical solution of wave propagation problems, *Geophysics*, **43**, 1099-1110.
- Stokoe, K. H. II, Wright, G. W., James, A. B., and Jose, M. R., 1994, Characterization of geotechnical sites by SASW method, in Woods, R. D., Ed., *Geophysical characterization of sites*, Oxford Publ.