

## 인공지능자료로부터 레일레이결면파모드감쇠 결수추정을 위한 한가지 방법

문 성 철

인공지능자료에 포함된 결면파들도 지표지층에 대한 가치있는 정보를 얻는데 이용될 수 있다. 실험으로 결면파의 위상속도 및 진폭감쇠정보의 추출과 역풀이를 통하여 그 지점의 지표층에 대한 모형을 추정할 수 있다.

최근에 연구이용되고있는 현대적신호처리수법들에 기초한 고분해능방법들에는 부분공간해석에 기초한 f-k MUSIC법[2]과 성검신호표현 및 재구성기술에 기초한 수법[5]들이 있다. 반면에 결면파의 감쇠특성추출과 역풀이에 관한 연구는 상대적으로 적다.

일반적으로 분산성매질에서 레일레이파의 전파에 의한 고유진폭감쇠를 표시하는 감쇠결수  $\alpha$ 는 진원으로부터 각이한 거리에 수신기들을 배열하여 측정한 수직방향립자변위들의 공간적분포를 분석하여 결정할 수 있다.[1, 3, 4] 간섭적인 모드들의 감쇠결수들을 얻어내기 위한 방도의 하나는 중첩된 모드들을 사전처리하여 분리해내는것이다.[6] 그러나 근거리마다 결면파자료의 경우에는 모드들을 분해하는 그자체가 힘들다.

결면파의 감쇠결수자료가 추정되면 그로부터 지표층의 감쇠비구조모형과 같은 공학적 파라미터들을 전통적인 추공법들에 비해 손쉽게 효과적으로 얻어낼 수 있다. 성검신호표현 및 재구성기술은 신호처리의 흥미있는 수법의 하나로서 최근년간 지구물리학분야에서도 대지진에서의 파열과정에서 진원위치결정[7], 레일레이파분산영상화[5] 등을 비롯한 많은 연구들에 효과적으로 적용되었다.

논문에서는 근거리마다 다통로인공지능자료로부터 레일레이파모드감쇠결수들의 추정을 위하여 제안된 성검신호재구성기술에 기초한 한가지 수법에 대하여 고찰하였다.

### 1. 성검신호재구성에 기초한 감쇠추정방법

어떤 신호  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ 이 기껏해서  $S$ 개의 ( $S \ll N$ ) 령아닌 원소들을 포함할 때 그 신호는 성글다(S-sparse)고 말한다. 변환령역에서(푸리에, 웨블레트 및 카버레터토대와 같은) 성검성이 역시 고려될 수 있다. 즉 신호는 그 변환결수들의 대부분이 령이거나 령에 가까우면 성긴것으로 볼 수 있다.

신호처리에서 성검성을 적용하여 관측방정식을 푸는 과정은 이 방정식의 확장, 신호에 대한 성검성가정을 주고 가정된 성검신호를 최량추정하는 재구성단계들을 포함한다.

제안된 감쇠추정틀거리에서는 인공지능결면파의 모드분해를 위한 첫번째 단계와 그 모드감쇠결수들을 추정하는 두번째 단계에서 서로 다른 성검재구성과정들을 차례로 적용한다. 이러한 과정을 29회선 레일레이파모의관측자료(그림 1의 1))에 대한 해석을 통하여 보여준다.

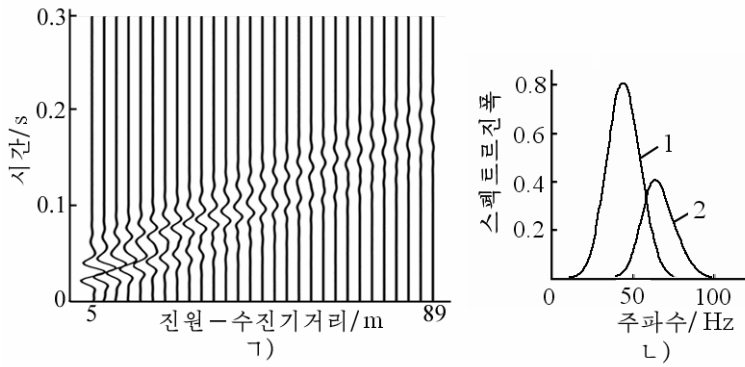


그림 1. 29회선 레일레이파모드의 관측자료 (a)와 두 구성모드들의 주파수에 따르는 진폭 (b))

2개의 모드들을 포함하는 모의자료는 표의 지표층지반모형으로부터 계산하였다.(그림 1의 b))

표. 지표층지반모형

층	두께/m	$v_s/(m \cdot s^{-1})$	$v_p/(m \cdot s^{-1})$	$\rho/(kg \cdot m^{-3})$	$Q_s$	$Q_p$
1	5	600	1 100	2 000	10	10
2	10	800	1 500	2 000	8	15
반공간	$\infty$	1 200	2 200	2 000	25	30

단계 1. 모드분리 이 단계에서는 성김재구성에 따라 중첩된 레일레이파모드[5]들을 분리하고 그 위상속도들을 평가한다. 먼저 자료에서 매 회선진폭에 대하여 결면파의 기하학적퍼짐으로 인한 진폭감쇠를 보정한 다음 푸리에변환을 거쳐 주파수영역으로 변환한다.

그다음 위상정보의 추정에 미치는 진폭변화의 영향을 최소화하기 위하여 주어진 주파수에서의 진원-수진기거리에 따르는 스펙트르진폭그래프에 대하여 진폭감쇠의 사전보정을 진행한다. 여기서는 예비적으로 설정한 어떤 감쇠결수  $\alpha_p$ 를 포함하는 보정항  $e^{\alpha_p r_i}$ 을 진원으로부터 거리  $r_i$ 만큼 떨어진 매  $i$ 번째 회선에서의 스펙트르진폭에 곱해준다. 이와 같은 감쇠보정후 관측벡터로  $y$ 는 다음과 같이 표시할수 있다.

$$y = A \cdot x + n \quad (1)$$

여기서  $y = [y_1, y_2, \dots, y_M]^T$ 는 측정벡터이고  $x = [x_1, x_2, \dots, x_J]^T$ 는  $J$ 개 모드성분들로 구성되는 원천신호벡터이다.  $n$ 은  $M \times 1$ 소음벡터이며  $A$ 는 원천신호모드들의 전파과정에서의 위상지연항들로 구성된  $M \times J$ 관측행렬이다.

이 방정식을 풀기 위하여 파동속도에 관한 신호의 성김표현 및 신호재구성과정을 다음과 같이 적용한다. 즉 2개의 미지모드를 포함하는 관측방정식은 알려진 위상속도들을 가지는 파인된 수  $N$ 개의 후보모드들을 설정함으로써 확장된다.

다음 확장된 방정식을 만족하는 무수히 많은 신호  $\tilde{x}$ 들 가운데서 물리적으로 의미있는 신호  $\hat{x}(x \in C^N)$ 를 추정하기 위하여 위상속도에 관한 신호의 성김성을 가정하며 다음의 식과 같은 성김최량화에 의해 재구성할수 있다.

$$\hat{x} = \arg \min \|y - A\tilde{x}\|_2^2 + \lambda \|\tilde{x}\|_1 \quad (2)$$

여기서  $\hat{x}$ 는 추정된 원천신호벡터이며  $\tilde{x}$ 는 모든 가능한 추정량들을 의미한다.

$N=1500$  개의 위상속도값들에 대하여 추정된 신호의 성분진폭들은 그림 2와 같다. 그림 2에서 성긴 진폭봉우리들은 주어진 주파수에서 이 신호에 포함된 2개 모드의 존재

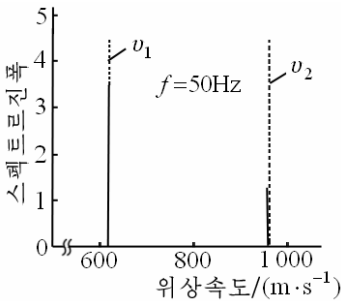


그림 2. 위상속도에 따르는 신호의 성분진폭

와 그것들의 위상속도들을 보여준다. 이론적인 레일레이파 모드위상속도값들을 표시하는 점선들은 신호봉우리위치들과 잘 일치한다. ( $v_1 = 619.4\text{m/s}$ ,  $v_2 = 963.3\text{m/s}$ )

단계 2. 모드감쇠결수들의 추정 지구매질과 같은 흡수적인 매질에 대해서는 식 (1)의 관측방정식의 관측행렬에 매질에서의 에너지흡수로 인한 파동진폭의 감쇠를 표시하는 추가적인 파라메터인 감쇠결수가 더 포함된다.(기하학적퍼짐에 의한 감쇠가 보정된 후) 비록 성김신호재구성에 기초한 수법[5]이 높은 분해능을 가지지만 이 경우에 결합되어있는 레일레이파모드위상속도들과 진폭감쇠결수들을

을 동시에 추정하기에는 불충분하다는것을 알수 있다. 이로부터 제안된 수법에서는 첫번째 단계에서 추정된 최량적인 모드위상속도값들을 관측행렬에 포함시키고 미지의 감쇠결수들을 추정하는 방식을 적용한다.

레일레이파신호  $\mathbf{x}_\alpha$ 가 2개의 모드들을 가지고있는 경우에 관측벡터  $\mathbf{y}_\alpha$ 는 전파과정에 시간지연되고 감쇠된 이 모드들의 중첩으로서  $\mathbf{y}_\alpha = \mathbf{A}_\alpha \mathbf{x}_\alpha + \mathbf{n}$ 과 같이 표시할수 있다. 즉

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-\alpha_1 r_1 - i\omega r_1 / c_1} & e^{-\alpha_2 r_1 - i\omega r_1 / c_2} \\ \cdots & \cdots \\ e^{-\alpha_1 r_M - i\omega r_M / c_1} & e^{-\alpha_2 r_M - i\omega r_M / c_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_M \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서  $\omega$ 는 각주파수,  $r_m (m=1, \dots, M)$ 은  $m$ 번째 회선의 진원거리이며  $c_1$ 과  $c_2$ 는 1단계에서 추정된 두 모드의 위상속도들이다.

관측행렬에 미지의 감쇠결수  $\alpha_1$ 과  $\alpha_2$ 를 포함하는 이 방정식을 풀기 위하여 여기서 또 다른 신호의 성김표현 및 재구성과정을 도입한다. 신호의 성김성은 감쇠결수파라메터에 관하여 주었다. 즉 먼저 가능한 감쇠결수값범위에서 취한 충분히 많은  $K (K \gg M)$  후보감쇠결수들  $\{\alpha'_1, \alpha'_2, \dots, \alpha'_K\}$ 를 설정한다. 다음 식 (3)을  $K$ 개의 후보감쇠결수들을 리용하여 확장한다. 이때 매개 모드에 대하여 서로 다른 감쇠결수로 감쇠하는  $K$ 개의 경우들을 생각한다. 이로부터 2개의 모드들을 추정하는 조건에 대하여 관측행렬  $\mathbf{A}_\alpha$ 의 차원수는  $M \times 2K$ 로, 대응하는 신호  $\mathbf{x}_\alpha$ 의 차원수는  $2K$ 로 확장된다. 즉

$$\mathbf{A}_\alpha = \begin{bmatrix} e^{-\alpha'_1 r_1 - i\omega r_1 / c_1} & \dots & e^{-\alpha'_K r_1 - i\omega r_1 / c_1} & e^{-\alpha'_1 r_1 - i\omega r_1 / c_2} & \dots & e^{-\alpha'_K r_1 - i\omega r_1 / c_2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ e^{-\alpha'_1 r_M - i\omega r_M / c_1} & \dots & e^{-\alpha'_K r_M - i\omega r_M / c_1} & e^{-\alpha'_1 r_M - i\omega r_M / c_2} & \dots & e^{-\alpha'_K r_M - i\omega r_M / c_2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{x}_\alpha = [x_1, x_2, \dots, x_K, x_{K+1}, \dots, x_{2K}]^T \quad (5)$$

측정값은 이 조건에서 마치  $2K$ 개의 신호성분들의 중첩처럼 생각할수 있다.

확장된 관측방정식의 무수히 많은 풀이가운데서 물리적으로 의미있는 하나의 풀이백

토르가 존재한다. 그 벡토르는 2개 모드가 포함된 경우 첫  $K$ 개의 성분들중에서 하나의 우세한 성분을 가지고 다음 나머지  $K$ 개 성분들중에서 또 다른 하나의 우세한 성분을 가진다.

이러한 성김신호벡토르는 성김성이 부여된 최량화를 통하여 얻어질수 있다.

성김최량화는 식 (2)와 유사하게 실제 감쇠된 측정벡토르  $\mathbf{y}$ 와 추정벡토르  $\mathbf{y}_\alpha = \mathbf{A}_\alpha \mathbf{x}_\alpha$  사이의 오차노름을 최소화한다. 즉

$$\hat{\mathbf{x}}_\alpha = \arg \min \|\mathbf{y} - \mathbf{A}_\alpha \tilde{\mathbf{x}}_\alpha\|_2^2 + \lambda_\alpha \|\tilde{\mathbf{x}}_\alpha\|_1 \quad (6)$$

여기서  $\lambda_\alpha$ 는 신호벡토르의 성김성을 조정하는 실수값을 가진 파라메터이다.

$f=50\text{Hz}$ 에서 추정된 감쇠결수에 따르는 신호의 성분진폭들은 그림 3과 같다. 이 결과를 얻기 위해  $0 \sim 0.06(1/m)$ 의 감쇠결수범위에서 등간격표본화에 의해  $K=121$ 개의 후보감쇠결수들을 설정하였다. 첫 단계에서 추정된 2개 모드의 위상속도값들은 관측행렬 식 (4)에 포함되었다. 이 관측행렬을 포함하는 관측방정식에 대하여  $2K$ 개의 복소수선분들을 가지는 신호벡토르  $\hat{\mathbf{x}}_\alpha$ 가 관측자료로부터 재구성되었다. 성김조정파라메터는  $\lambda_\alpha=0.5$ 로 주었다.

그림 3에서 추정된 신호벡토르의 첫  $K$ 개 성분들과 나머지  $K$ 개 성분들의 진폭곡선들을  $K$ 개의 감쇠결수들에 따라 같은 그래프에 표시하였다. 2개의 수직점선은 이론적인 모드 감쇠결수들을 보여주며 이것들은 추정된 신호벡토르의 봉우리위치들과 잘 일치된다.

이와 같은 방식으로 전체 주파수에 대하여 얻은 모드감쇠결수들과 이론감쇠결수곡선들은 그림 4와 같다.

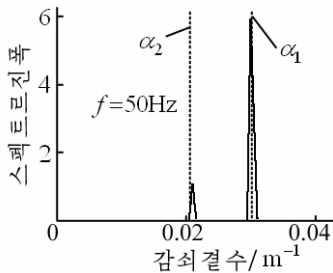


그림 3. 감쇠결수에 따르는  
신호의 성분진폭

점선들은 이론적인 모드감쇠결수들을 표시  
( $\alpha_1=0.0302$ ,  $\alpha_2=0.0206$ )

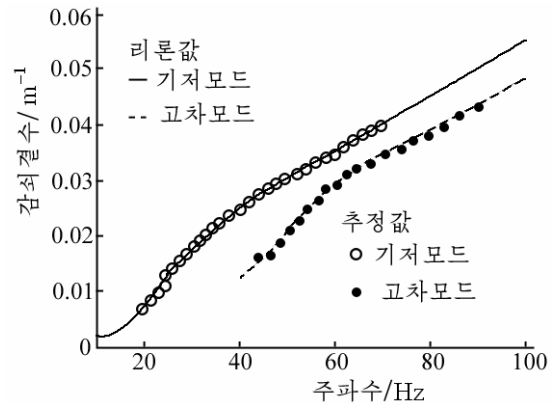


그림 4. 모의자료로부터 추정된  
모드감쇠결수들과 이론감쇠결수곡선

이와 같이 모의분석결과와는 제안된 수법에 의해 두번의 성김최량화과정을 통하여 하나의 인공지능배열관측자료로부터 레일레이파모드위상속도와 감쇠결수들을 추정할수 있다는것을 보여준다.

## 2. 실제관측자료의 분석결과

제안된 수법의 성능을 보여주기 위하여 여기서는 선행연구[5]에서 리용된 SURFBAR-2 시험장자료를 다시 분석하였다. 이 자료는 144개의 40Hz수직성분지진검파기들을 리용하여

기록한것이다. 표본화시간간격은  $20.833\mu s$  이며 기록시간은  $0.75s$ 이다. 144회선 선형배렬기록으로부터 선택한 29회선들에 대하여 기하학적퍼짐에 의한 감쇠를 보정한 실제야외충격지진기록은 그림 5와 같다. 이때 진원으로부터 가장 가까운 수감부까지의 거리는  $5.67m$ 이다.

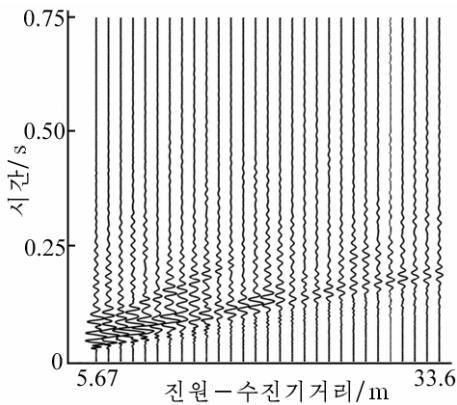


그림 5. 실제야외충격지진기록

제안된 수법을 적용하여 전체 주파수대역에서 얻은 위상속도분산영상과 감쇠결수곡선들은 그림 6과 같다.

그림에는 추정된 모드감쇠결수들중에서 정(+)의 감쇠결수들만 그려졌는데 그것들은 그림 6의 7)의 위상속도분산영상에서 1, 2 및 3으로 표시한 봉우리 부분들에 대응되며 같은 번호를 붙이였다. 그중에서

가장 우세한 에너지를 가지는 2로 표시한 곡선이 기저모드레일레이파의 감쇠를 보여준다고 볼수 있다. 번호 1을 붙인 모드는 낮은 위상속도와 높은 감쇠로 특징지어진다. 이로부터 이것이 진원으로부터 직접 도달하는 체적파를 반영한것이라고 볼수 있다.

한편 3은 고차레일레이모드로 볼수 있다.

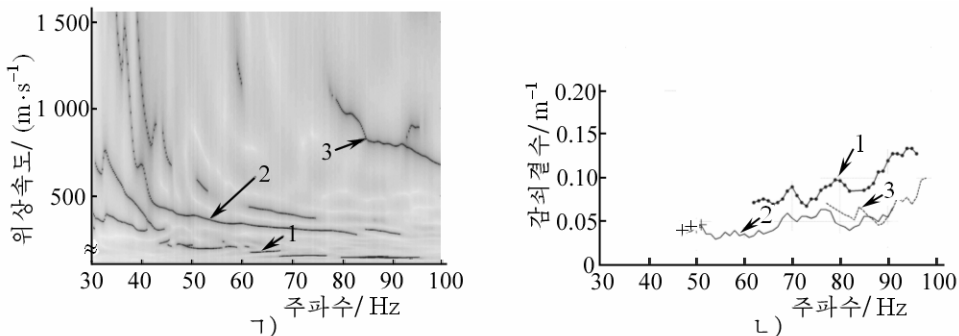


그림 6. 전체 주파수대역에서 얻은 위상속도분산영상(7)과 감쇠결수곡선(L))

1-3은 분산영상의 개별적곡선들과 대응하는 감쇠곡선들을 표시하며

선행방법[4]으로 추가적으로 얻은 감쇠결수들은 +로 표시함

그림 6의 L)에  $47-51Hz$ 의 주파수구간에서 +로 표시한 자료들은 선행방법인 f-k MUSIC알고리즘에 의하여 얻은 감쇠결수들이다.

이 값들은 제안된 수법으로 추정된 감쇠곡선 2에 대응하는 값들과 잘 일치한다.

## 맺는 말

충격원천을 리용하여 기록한 근거리지진파마당은 간접적인 레일레이파모드들과 높은 간접적소음의 중첩으로 인한 복잡성으로 특징지어진다. 2개의 성감최량화과정들을 포함하는 제안된 수법에 의하여 하나의 근거리마당지진배렬관측자료로부터 레일레이파모드들을 분리하여 모드감쇠결수들과 위상속도들을 추출할수 있다.

모의 및 실제기록분석과 선행수법과의 비교결과는 제안된 수법이 아주 효과적이라는 것을 보여준다.

## 참 고 문 헌

- [1] S. Foti; Geotechnique, 53, 455, 2003.
- [2] K. Iranpour et al.; EAGE 64<sup>th</sup> Conference & Exhibition, Italy, 171~174, 2002.
- [3] C. G. Lai et al.; Georgia Institute of Technology, Atlanta, 55~68, 1998.
- [4] A. S. Misbah et al.; Geophysics, 79, 3, EN25-EN38, 2014.
- [5] S. Mun et al.; Geophysical Journal International, 203, 2, 818, 2015.
- [6] M. D. Werning et al.; EAGE 75<sup>th</sup> Conference & Exhibition, Th-01-02, 2013.
- [7] H. Yao et al.; Geophysical Research Letters, 38, 20, L20310, 2011.

주체107(2018)년 3월 5일 원고접수

## **An Approach for Estimation of Rayleigh-Wave Modal Attenuations from Seismic Data**

*Mun Song Chol*

This paper presents an approach proposed for estimation of Rayleigh-wave modal attenuation coefficients from near-field multichannel seismic data, on the basis of the sparse signal reconstruction techniques. The approach includes a mode-resolving procedure based on a sparse signal reconstruction at the first step and the subsequent procedure for estimation of the modal attenuations in the second step that uses another sparse signal reconstruction. Results from synthetic and real-field data show the high performance of overcoming noise and the adverse near-field effects.

Key words: Rayleigh-wave, attenuation coefficient, sparse signal reconstruction