

## f-k MUSIC법에 기초한 인공지진결면파의 위상속도분산영상추출

문성철, 정송수

지진공학에서 지표층의 가로파속도구조는 주어진 지점에서의 지진운동증폭을 평가하는 중요한 요소이다. 인공지진원천과 지진계배열관측을 리용하는 결면파탐측법은 1980년대부터 얕은 지표층의 가로파속도구조를 추정하기 위한 효과적인 도구로 리용되어왔다. 이 방법은 야외관측자료로부터 지진결면파(레일레이파 혹은 라브파)의 위상속도분산곡선을 추출하는 과정과 그것을 거꾸풀이하여 최량적인 지층가로파속도구조모형을 얻는 과정으로 구성된다.

다통로인공지진기록으로부터 결면파모드들의 위상속도분산곡선들을 효과적으로 추출하기 위한 연구[3]들이 진행되었다. 지금까지 알려진 위상속도분산곡선의 추출법으로는 위상밀림법(Park법)[1], 고분해능선형라돈변환(LRT)에 기초한 방법[2], f-k MUSIC법[4] 및 성김재구성기술을 리용한 고분해능추출법[6] 등을 들수 있다.

본문에서는 인공지진결면파의 위상속도분산추출에서 고분해능수법으로 알려진 f-k MUSIC법의 적용과 f-k MUSIC법의 모드분해능을 보다 개선하기 위한 방법론을 논의한다.

### 1. f-k MUSIC법과 그 적용결과들

#### 1) f-k MUSIC법의 원리

f-k MUSIC법은 다중신호분류법의 변종으로서 위상속도분산추출에서 모드분해능이 매우 높은것으로 하여 최근에 많이 응용되고있다. f-k MUSIC법은 다중신호원천들의 방위분포를 얻기 위하여 연구된 MUSIC(Multiple Signal Classification)알고리즘[5]을 기초로 하고있다. 여기서는 신호와 잡음이 비상관적이라는 가정 밑에서 관측신호공분산행렬의 고유값들을 해석하여 신호부분공간과 잡음부분공간을 갈라낸다.

배열관측으로 얻어진  $M \times 1$  관측벡터로  $y = Ax$ 로부터  $M \times M$  공분산행렬  $R$ 를 다음과 같이 구할수 있다.

$$R = \overline{yy^*} = \overline{Axx^*A^*} + \overline{nn^*} \quad (1)$$

여기서  $x$ ,  $A$ 는 원천신호와 관측행렬이고  $n$ 은 소음벡터르이다.

공분산행렬의  $M$ 개 고유값들을 분석하여 입사파신호에 대응하는  $D$ 개의 고유값들과  $L(L=M-D)$ 개의 소음에 대응하는 고유값들을 분리한다.

선행연구[5]에서는 소음에 대응하는 고유벡터르들이 관측행렬  $A$ 의 열들에 의해 생성되는 신호공간에 직교한다는것을 처음으로 밝혔다.

만일  $E_L$ 이  $L$ 개의 소음고유값벡터르들을 열벡터르로 가지는  $M \times L$ 행렬이며 어떤 입사신호모드벡터르  $a(v)$ 로부터 그 소음부분공간까지의 유클리드거리가  $d^2 = a(v)^* E_L E_L^* a(v)$ 라면

속도  $v$ 의 함수로서의  $a(v)$  연속체를 따르는  $1/d^2$ 에 의해 속도에 관한 어떤 가상스펙트르를 얻는다. 이 스펙트르의 봉우리에 대응하는 파속도  $v$ 가 바로 구하려는 결면파신호모드의 위상속도로 된다.

신호대역의 매개 주파수들에 대하여 얻은 이러한 가상스펙트르들을 주파수-속도평면우에 투영함으로써 어떤 2차원결면파위상속도분산영상을 얻을수 있다.

이것이 일반적으로 리용되는 f-k MUSIC법의 원리이다.

## 2) f-k MUSIC법에 의한 분석결과

먼저 레일레이파의 기저모드와 하나의 고차모드만을 포함하는 29회선 인공지진결면파배열관측모의기록을 분석하였다.

인공지진결면파배열관측모의기록과 출력스펙트르는 그림 1과 같다.

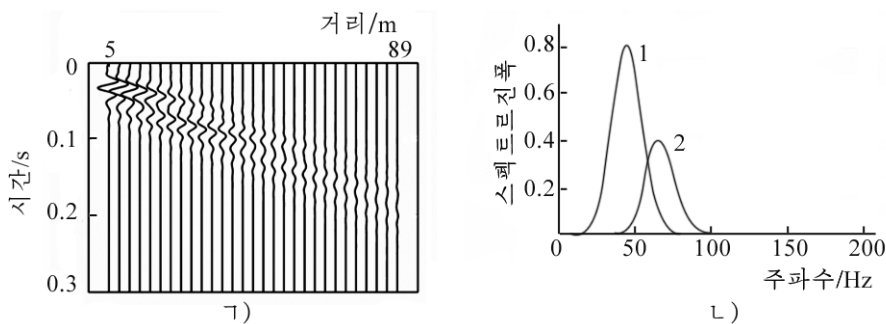


그림 1. 인공지진결면파배열관측모의기록(ㄱ)과 출력스펙트르(ㄴ)

1은 기저모드, 2는 고차모드

자료처리과정은 다음과 같다.

① 매 회선기록들을 그것들의 진폭의 2제곱평균값들을 리용하여 규격화한 다음 푸리에변환에 의해 주파수영역으로 변환한다.

② 매 주파수에서 관측벡토르  $y$ 로부터 관측공분산행렬을 얻는다.

③ 관측공분산행렬로부터 앞에서 서술한 자료처리원리를 리용하여 매개 주파수에 대한 파속도의 함수로서의 가상스펙트르를 계산한다.

④ 전체 주파수값들에 대하여 평가된 가상스펙트르들을 배열하여 위상속도분산영상을 얻는다.

모의기록으로부터 f-k MUSIC법에 의해 추출된 위상속도분산영상은 그림 2와 같다.

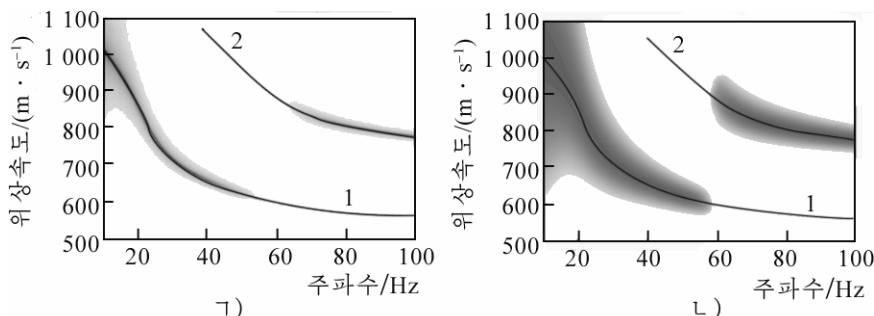


그림 2. f-k MUSIC법에 의해 추출된 위상속도분산영상

ㄱ) f-k MUSIC법, ㄴ) Park법

1, 2는 각각 기저모드와 고차모드의 이론위상속도분산곡선들

그림 2에서 보는바와 같이 f-k MUSIC법으로 얻은 분산영상은 Park법으로 얻은 분산영상보다 훨씬 좁은 봉우리폭을 보여준다. 두 수법의 결과들은 50-70Hz 주파수대역을 제외한 다른 부분들에서 매개 모드들의 봉우리들이 자기의 리론위상속도분산곡선들과 잘 일치된다. 그러나 두 방법은 50-70Hz대역에서 어느 한 모드의 진폭이 다른 모드보다 작을 때 그것들을 갈라내지는 못하며 우세한 모드만을 표시한다.

이 현상은 실지 관측된 인공충격결면파기록의 분석결과에서도 볼수 있다.

지진계직선배렬을 리용하여 얻은 인공충격결면파 29회선기록과 첫 회선기록의 푸리에스펙트르는 그림 3과 같다.

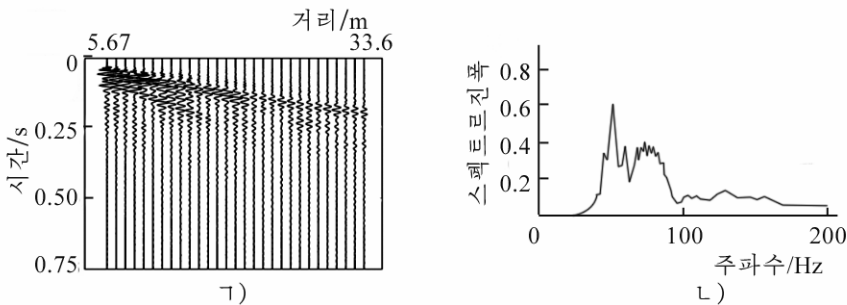


그림 3. 29통로 지진계직선배렬의 인공충격결면파기록(ㄱ)과 첫 회선기록의 스펙트르(ㄴ)

f-k MUSIC법에 의한 실지 관측된 인공충격결면파기록의 분석결과는 그림 4와 같다.

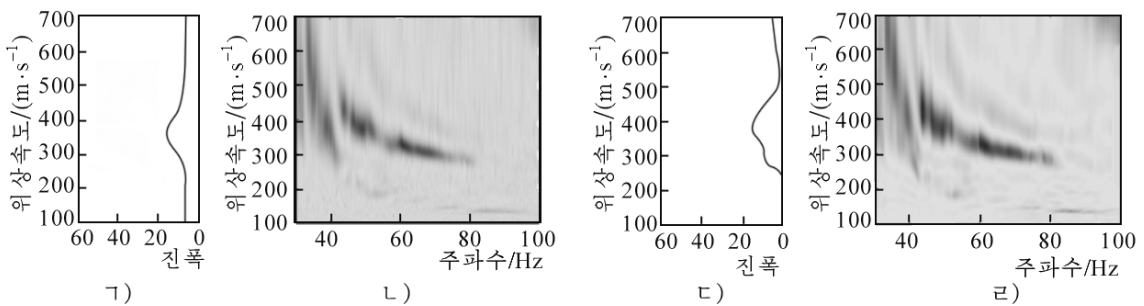


그림 4. f-k MUSIC법에 의한 실지 관측된 인공충격결면파기록의 분석결과

ㄱ), ㄴ)는 f-k MUSIC법에 의한 신호스펙트르(40Hz)와 위상속도분산영상,

ㄷ), ㄹ)는 Park법에 의한 신호스펙트르(40Hz)와 위상속도분산영상

그림 4에서 보는바와 같이 f-k MUSIC법을 적용하여 얻은 위상속도분산영상의 봉우리폭은 상대적으로 작다. 그러나 f-k MUSIC법에서는 Park법에 의해 얻은 위상속도분산영상이 보여주는 신호를 다 반영하지 못한다.

Park법에서는 40Hz에서 2개 모드가 존재한다는것이 스펙트르에 반영되지만 f-k MUSIC법에서는 1개 모드만이 나타났다.

주파수에서 류사한 크기의 진폭들을 가지며 위상속도차가 크지 않은 두 결면파모드는 공간적으로 간섭효과를 나타낼수 있다. 즉 이러한 간섭효과가 존재할 때 고분해능수법으로 알려진 f-k MUSIC법의 분해능이 낮아진다는것을 알수 있다.

## 2. f-k MUSIC법의 분해능개선

우리는 f-k MUSIC법의 성능을 개선하기 위하여 공분산행렬의 평활화수법을 적용하였다.

결면파모드들사이의 호상상관성과 기록에 포함된 체적파반사 및 굴절파와 같은 간섭성소음들은 f-k MUSIC법의 관측공분산행렬에서 부극대들로 나타난다. 즉 식 (1)의 공분산행렬의 원소  $R_{lm}$  들은 모드들사이의 간섭으로 하여 호상상관성분들을 포함하게 된다.

$$R_{lm} = y_l y_m^* = \sum_j |x_j|^2 e^{i\omega(d_m - d_l)/v_j} + \sum_j \sum_{k(j \neq k)} x_j x_k^* e^{i\omega(d_m/v_k - d_l/v_j)} + \eta \delta_{lm} \quad (2)$$

여기서 두번째 마디가 바로 모드들사이의 호상상관항이다.

f-k MUSIC법의 성능개선결과는 그림 5와 같다.

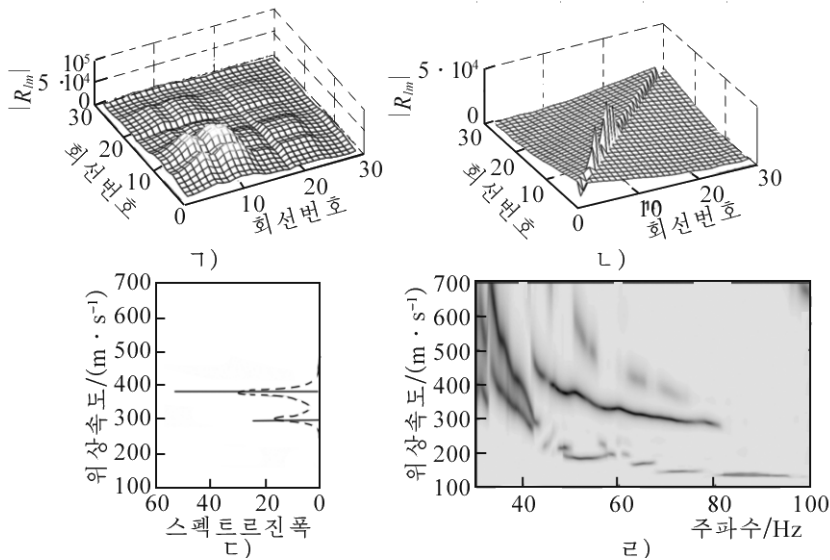


그림 5. f-k MUSIC법의 성능개선결과

ㄱ) 관측공분산행렬, ㄴ) 평활화결과, ㄷ) 평활화된 공분산행렬로부터 얻어낸 40Hz에서의 가상스펙트럼, ㄹ) 개선된 위상속도분산영상  
 실선은 성검신호재구성법으로 얻은 고분해능스펙트럼

그림 5의 ㄱ)에서 보는바와 같이 주파수  $f = 40\text{Hz}$  일 때 실제신호의 공분산행렬원소들의 절대값그래프에서는 주대각선에 대칭되게 분포된 호상상관에 의한 부차적인 봉우리들이 나타난다.

호상상관을 반영하는 부차적인 봉우리들은 평활화하여 진폭을 낮춤으로써 그 영향을 감소시킬 수 있다.

우리는 신호공분산행렬의 대칭성과 신호특성을 보존하기 위하여 주대각선으로부터 같은 거리에 있는 행렬원소들의 평균화를 진행하였다. 이러한 행렬원소들은 서로 같은 거리에 있는 관측점쌍들에 대응된다. ( $\Delta d_{lm} = d_m - d_l = \text{일정}$ ) 이러한 평활화된 관측신호공분산행렬로부터 얻어낸 개선된 고분해능의 가상스펙트럼에서는 명확히 2개 모드가 존재한다는 것을 알 수 있다. 이것은 최근에 연구된 보다 높은 성능을 가진 성검신호재구성법[6]의 결과(그림 5의 ㄷ)에서 실선침형봉우리)와 일치한다.

## 맺 는 말

개선된 f-k MUSIC법은 선행수법들에 비해 높은 분해능으로 인공지진결면파에 포함된 신호모드들의 위상속도분산곡선들을 얻을수 있게 한다. 이러한 모드위상속도분산곡선들을 리용하면 인공결면파를 리용하는 지하지층구조탐측의 정밀도를 보다 높일수 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] C. B. Park et al.; 68<sup>th</sup> Annual Meeting, SEG, Expanded Abstract, 1377, 1998.
- [2] K. Iranpour et al.; EAGE 64<sup>th</sup> Conference & Exhibition, 171, 2002.
- [3] L. V. Socco et al.; Geophysics, **75**, 5, A83, 2010.
- [4] Y. Luo et al.; Geophys. J. Int., **179**, 254, 2009.
- [5] R. Schmidt; IEEE Transactions on Antennas and Propagation, **34**, 276, 1986.
- [6] S. Mun et al.; Geophys. J. Int., **203**, 2, 181, 2015.

주제105(2016)년 11월 5일 원고접수

## **Extraction of Phase Velocity Dispersion Images Seismic Surface-Wave based on f-k MUSIC Method**

*Mun Song Chol, Jong Song Su*

The accurate estimation of dispersion curves is a key issue for ensuring the high quality in geophysical surface-wave exploration. We present the study on extraction of the surface-wave dispersion images using f-k MUSIC method and on refinement of this high-resolution approach.

Key words: f-k MUSIC method, surface-wave dispersion