

표면파 역산에 의한 2차원 s파 속도구조와 해상도 단면

Two dimensional s wave velocity structure and resolution by inversion of surface waves

정 희 옥

군산대학교 해양시스템공학과

서 론

천부지반의 s파 속도 구조는 내진 설계 등에 필요한 중요한 지반조사 요소이다. 지반 탐사 시 아주 쉽게 발생하는 표면파(Rayleigh wave)는 지반의 S파 속도 구조에 따라 분산곡선이 결정된다. 이러한 표면파의 분산성질을 역산하여 지반의 S파 속도구조를 구하려는 연구가 1990년대 활발히 진행되어왔다.

표면파를 역산하여 지반의 S파 속도 구조를 구하는 방법은 다른 탄성과 탐사법에 비하여 자료 획득과정이 비교적 용이하고, 또한 자료처리도 복잡하지 않아 현장에서 쉽게 지반의 S파 구조를 확인할 수 있는 장점이 아주 크다 할 수 있다. 그러나 지반의 S파 속도구조와 표면파의 분산곡선과의 관계는 선형이지도 않고 유일하지도 않다. 그러므로 표면파 역산에 의한 s파 구조를 구하는 방법이 data fitting에 그칠 경우 자료의 해석에 커다란 오류를 범할 위험이 크다 하겠다. 본 연구는 단순한 data fitting에 의한 표면파 역산의 오류를 일반화된 역산이론의 측면에서 지적하고 이를 극복하기 위한 방법을 제시하고자한다.

연구방법

표면파 분산곡선의 역산 방법

표면파의 분산곡선을 이용하여 지반의 S파 속도구조를 구하기 위해서는

1) 표면파 자료 획득

수진기, source, shot offset, sampling interval, record length 결정

2) 표면파 분산 곡선 획득

다중 channel의 pattern 인식 방법으로 안정적이고 신뢰도가 높은 분산곡선 획득

3) 분산곡선의 역산

역산 kernel의 역행렬의 trace를 확인, 의미있는 model의 layer 수를 결정하고, fundamental mode와 higher mode data의 독립성과 중요성을 결정하여 역산을 수행한다

4) 역산결과의 해석

Resolution matrix를 이용하여 s파 속도 단면과 resolution 단면을 구한다.

연구지역

탐사지역은 오래 전에 매립되어 지표부근은 다짐으로 굳어졌으나 지표 1-2m하부에는 아직 연약한 벨과 퇴적층이 존재하는 금강하구 부근이다. 수신기 간격 0.25m, shot offset 33m이다. 수신기는 4.5 hz이고 24channel 탐사기를 이용하였다. 위와 같은 spread를 연속적으로 설치하여 6개의 shot gather를 획득하였다.

결 과

분산곡선을 구하는 방법에는 인접한 수신기의 자료를 FFT 처리하여 위상 차를 구하여 분산속도를 구하는 방법과 multichannel의 자료를 모두 이용하여 각각의 주파수에 대한 위상속도의 에너지 maxima를 추적하여 위상속도를 구하는 방법이 있다. 이 방법으로 구한 위상속도는 multichannel survey line 하부의 평균적인 분산곡선이 된다. FFT방법(그림 1)과 multi channel pattern 인식방법을 사용하여 구한 분산곡선이 그림 1에 나타나 있다.

그림 1은 24개의 수신기를 고정시키고 shot offset을 변화시키면서 25개의 shot gather 자료를 이용하여 구한 위상속도이다. 이때 인접한 수신기의 신호를 fft처리하여 수신기간의 거리와 두 수신간의 위상 차를 이용하여 각 주파수에 대한 위상속도를 구하였다. 이때 1개의 shot gather만을 이용할 경우 fft에 의한 mode jump 때문에 신뢰도 높은 위상속도를 구하기 어렵다. 그러므로 25개의 shot gather를 이용하여 모든 인접한 수신기 사이의 위상속도를 구하여 모든 값을 동시에 나타내면 위상속도의 전체적인 양상을 파악할 수 있다. 또한 한 주파수에 대한 위상속도의 평균값을 구하여 이를 분산곡선으로 사용할 수 있다. 그러나 그림에서 보는 바와 같이 저주파 역에서의 위상속도의 scattering에 크고 또한 higher mode가 나타나는 주파수 부근에서도 신뢰도가 높은 위상속도를 자동화된 프로그램으로 구하기 어렵다. 그러나 이 방법은 1개의 shot gather로 탐사 측선 하부의 s파 단면을 구할 수 있다는 장점을 제공한다.

그림 2-1과 2-2에는 multichannel 자료를 이용하여 획득한 분산곡선이 나타나 있다. 이때 각각의 주파수에 대하여 일정한 위상속도 범위를 정하고 각 주파수의 파(단일 주파수)가 정해진 위상속도로 전파할 때 탄성과 신호와 중첩하여 만들어지는 24개의 신호를 모두 합하여 에너지 세기를 구한다. 각각의 주파수에 대하여 에너지의 peak가 나타나는 위상속도를 찾아낸다. 각 각의 주파수에 대한 에너지 peak가 나타나는 위상속도의 관계가 분산곡선이 된다. 이 방법으로 구한 분산곡선은 shot gather 하부의 평균적인 s파 속도를 나타낸다.

S파 속도단면을 구하기 위한 분산곡선의 역산은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$d_i = \sum_{j=0}^m G_{ij} m_j \quad (i=1, \dots, n), j=1, \dots, m)$$

m: finite number of model parameter

d: finite number of data

여기서 d_i 는 표면파 분산곡선 값이고, m 은 충상화 한 지층의 s파 속도이다. G_{ij} 는 s파 속도

와 분산곡선을 연관시키는 kernel이다. 이 역산은 n개의 분산곡선자료를 가지고 m개의 s파 속도를 추정하는 과정이다. 위의 식을 간단히 표시하면

$d=Gm$ 으로 나타낼 수 있고 일반화된 역산과정은

$$G^{-1}G=G^{-1}Gm$$

$$m=G^{-1}d$$

으로 G의 역행렬을 찾는 과정이다.

G는 singular value decomposition에 의해

$G=U \Lambda \hat{V}$ 로 분해된다. 여기서 V는 model space를 span하는 vector로 이루어지고, U는 data space를 span하는 vector로 이루어진다. 이때, $U_0=0$, $V_0=0$ 이면,

$G^{-1}G=I$ 이고, 역산에 의해 구해진 해는 유일하다. 그러나, U_0, V_0 가 존재하면 역산에 의해 구해진 해는

$m_p = V_p \hat{V}_p^{-1} m$ 이 되고 $V_p \hat{V}_p^{-1}$ 를 resolution matrix라고 하고, 이 matrix의 trace 값은 model 층의 독립된 정도를 나타낸다. 이것은 역산에 의해 구해진 해가 실제 지층의 s파 속도 값의 weighted average임을 나타낸다. 또한 $U_p \hat{U}_p^{-1}$ 는 data의 독립성을 나타내며 fundamental mode와 higher mode의 독립성과 중요성을 판단할 수 있는 근거를 제공한다. resolution matrix와 data의 독립성과 중요성을 고려하며 구한 해상도 단면과 s파 속도단면이 그림 3-1과 3-2에 나타나 있다.

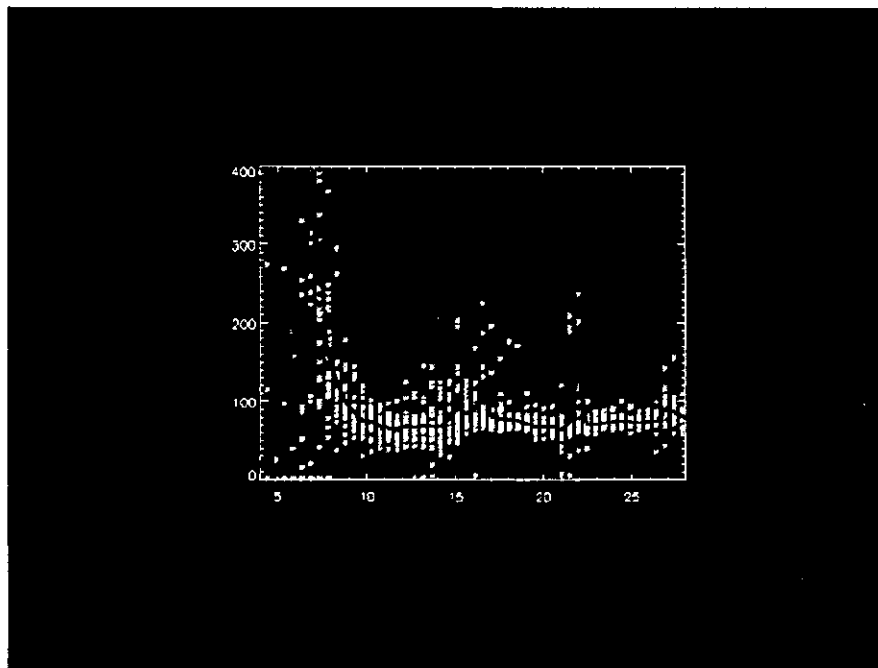


그림 1 fft에 의한 phase velocity. 수평축은 frequency, 수직축은 phase velocity.

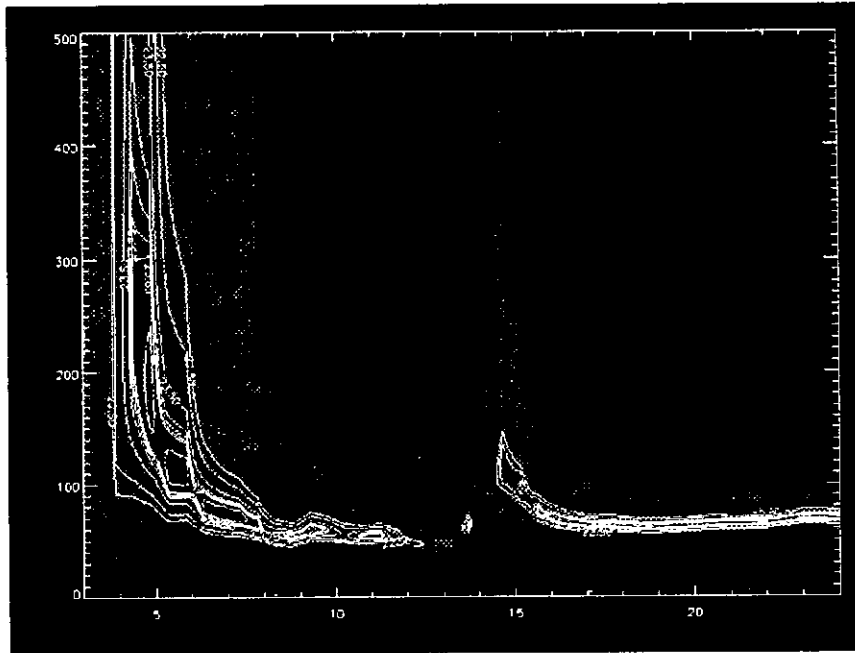


그림 2-1 multichannel data를 이용하여 얻은 분산곡선, fundamental
과 higher mode의 구분이 확실하다. 흰 선은 에너지의 iso value를
연결한 것이다.

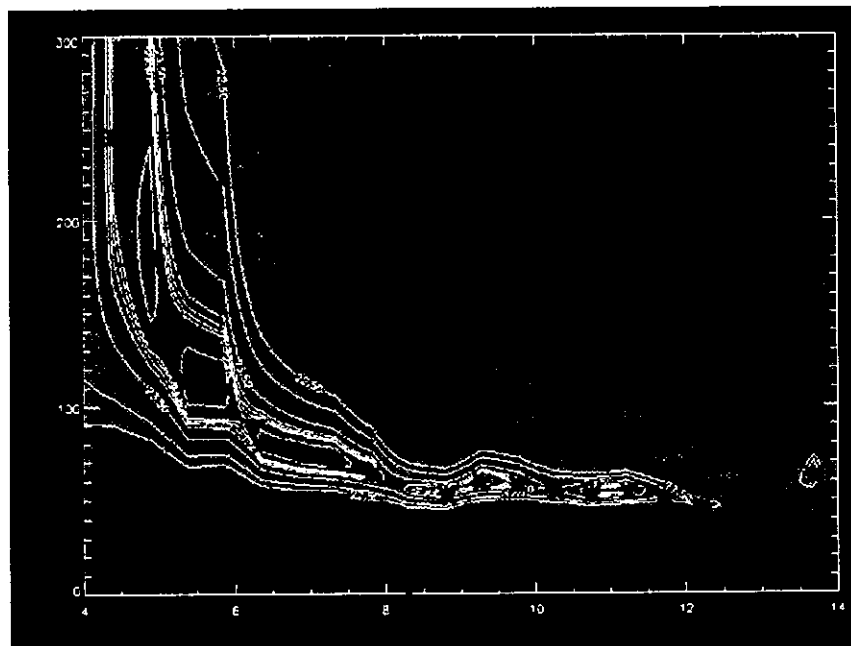


그림 2-2. 그림 2-1을 확대한 그림. 각각의 주파수에서 에너지 peak
인 위상속도를 찾아내어 *로 나타내었음. 자동화된 프로그램으로 신
속하고 신뢰도 높은 분산곡선값을 구할 수 있음.

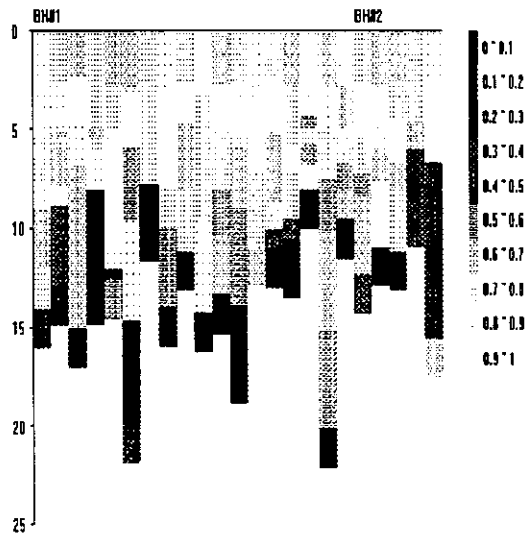


그림 3-1. 해상도 단면.

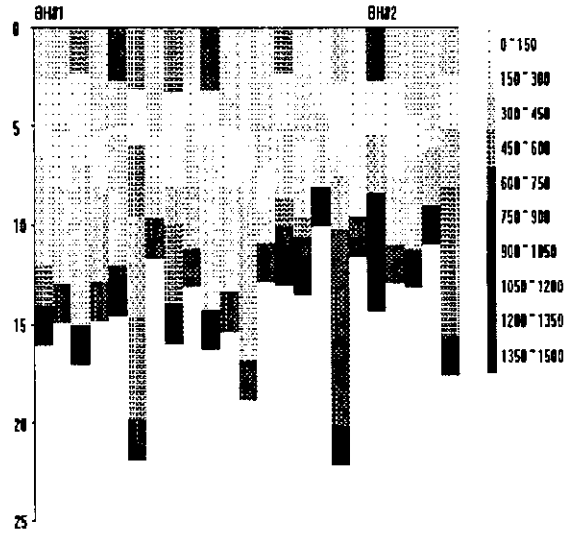


그림 3-2. s와 속도 단면.