

탄성파 토모그래피에 의한 지하구조 영상화

이두성, 한성대학교

서론

탄성파 토모그래피(Seismic tomography)는 지표 또는 시추공 내에서 취득한 탄성파 기록을 사용하여 지하구조 또는 시추공 사이 매질의 구조를 규명하는 정밀 지구물리탐사법으로 석유업계에서 생산유전 지역에서 석유의 부존상태 및 생산활동에 따른 원유의 이동상태를 파악하기 위한 목적으로 개발되었으며 최근에는 지하공동 탐지, 토양 및 지하수 오염상태 파악, 지반보강 효과 검증, 지상 및 지하구조물의 위치선정, 지하 구조물의 지속적인 안정점검 등 토목/환경 분야에 응용이 시도되고 있다.

공대공 탄성파(crosswell seismic) 자료는 고주파수 기록으로 고 분해능 영상을 도출할 수 있다. 공대공 탄성파탐사는 한 개의 시추공 내의 여러 위치의 진원에서 발생한 탄성파를 다른 한개 또는 여러개의 시추공내의 측정점에서 수신기를 사용하여 기록하는 방법이다. 공대공 토모그래피(crosswell tomography)는 공대공 탄성파 자료로부터 시추공사이 매질의 탄성특성을 영상화하는 탐사법으로 파동방정식을 이용한 파동 토모그래피 (wave equation tomography), 산란장을 이용한 회절 토모그래피 (diffraction tomography), 그리고 파동의 초동(first arrival)과 파선추적(ray tracing)을 이용한 주시 토모그래피(traveltime tomography) 법 등이 있다.

파동 토모그래피와 회절 토모그래피는 해상도가 높다는 장점을 가지고 있으나 계산소요시간이 길고 현실적인 모델을 취급하는데 어려움이 있으므로 아직까지 매우 제한된 경우에 한하여 적용되고 있으며 주시 토모그래피가 많이 이용되고 있다. 주시 토모그래피는 파선 이론을 기초로 파의 전파시간과 파선의 경로, 파선이 통과하는 매질의 속도와의 관계를 이용하여 탄성파가 투사된 대상단면의 속도구조를 영상으로 재구성한다.

본 논문에서는 주시 토모그래피법의 분해능과 재구성된 모델의 신뢰도를 높이는 방안을 제시하고, 실제 현장 자료를 사용하여 이들 두 논제에 대하여 설명하고자 한다.

주시 토모그래피 이론

주시 토모그래피는 탄성과 기록의 초동으로부터 매질의 속도를 구하는 방법으로 매질내의 탄성과 전파속도와 파선의 길이, 파동의 走時를 이용하여 지배방정식을 구성하게 된다. 지배 방정식은 (1)식과 같이 표현 할 수 있고

$$t_i = \int s \cdot dl(s) \quad (1)$$

영상화 하고자하는 구간의 매질을 일정한 속도를 갖는 여러개의 요소 (cell)로 구성하면, 다음과 같이 표현된다.

$$t_i = \sum_{j=1}^M l_{ij} s_j \quad (2)$$

여기서 t_i : i 번째 파선의 초동주시 (first arrival)

s_j : j 번째 요소의 역속도 (slowness)

l_{ij} : i 번째 파선이 j 번째 요소를 지나는 파선의 길이 (ray segment) 이다.

식 (2)를 행렬식으로 표현하면 식 (3)과 같다.

$$t = Ls \quad (3)$$

주시 토모그래피는 수학적으로는 행렬역산을 통하여 측정된 초동주시로 구성된 벡터 t 로부터 매질요소의 역속도 s 를 구하는 역산이다. 이 문제를 수학적으로 직접 역산을 하는데는 두가지 문제가 있다. 첫째는 행렬 L 의 요소가 우리가 구하고자하는 역속도 s 의 함수이다. 즉 문제가 비선형이다. 둘째는 대부분의 경우 행렬 L 이 매우크고 행렬 L 의 요소중 많은 부분이 0 이다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 고안된 방법이 반복 역산법이다.

반복역산법

반복역산법은 비선형 문제를 선형화하기 위하여 일단 속도모델을 가정하고 그 모델에 대하여 파선 추적법을 사용하여 파선을 구하고 즉 L 을 정의하고 각 파선의 주시를 계산한다. 이 과정을 행렬식으로 표시하면,

$$t_{cal} = L_0 s_0 \quad (4)$$

이다. 여기서 L_0, s_0 는 가정한 모델의 역속도 벡터 및 파선요소 행렬이며 t_{cal} 은 그때의 각 파선의 초동주시 벡터이다. 계산된 초동주시와 측정된 주시와의 差異 (residual travel time)는 식 (3)과 (4)로부터,

$$\Delta t = t - t_{cal} = Ls - L_0 s_0 \quad (5)$$

으로 표시할 수 있다. 이때 가정한 모델이 실제 매질과 근사하다면 행렬 L 과 L_0 가 비슷하게 되며 식 (5)는 다음과 같이 표현할 수 있으며

$$\Delta t \approx L_0 (s - s_0) = L_0 \Delta s \quad (6),$$

식 (6)에서 Δt 와 L_0 는 계산할 수 있으므로 Δs 를 산출할 수 있고 이 값으로

모델의 역속도를 보정함으로써 가정한 모델 (s_0) 보다 나은 모델 (s_1)을 작성할 수 있다.

$$s_1 = s_0 + \Delta s \quad (7)$$

식 (4)와 (7)의 과정을 반복하여 점진적으로 모델을 보정할 수 있으며 식 (5)의 Δt 가 충분히 작을 때까지 계속하여 모델을 보정함으로써 실측치와 비슷한 주시를 갖는 속도모델을 구할 수 있다.

파선토모그래피의 분해능

파선 토모그래피에서 분해능은 매질이 속도가 서로 다른 여러개의 요소로 구성되었다고 할 때 측정된 파선의 주시를 사용하여 매질을 재구성 할 경우 여러 요소를 별개의 요소로 구별할 수 있는 요소의 크기를 말한다. 요소의 크기가 작은 경우 분해능이 높다고 하며 요소의 크기가 클 경우 분해능이 낮다고 한다. 주시 토모그래피 (traveltime tomography)에서 분해능은 매질을 통과한 탄성파의 파장과 진원과 수신점으로부터 구성요소까지의 거리에 함수로서 다양하게 표시될 수 있다.

탄성파탐사의 수직방향 분해능은 대략 파동의 1/4 파장과 같으며 공대공 탄성파의 수평방향으로의 분해능에 대하여 Williamson(1991)은 주시 토모그래피에 의하여 정의될 수 있는 가장 작은 요소의 크기는 대략 1차 Fresnel 영역의 반경이라고 하였다. 즉

$$r_{\min} = (\lambda)^{1/2} \quad (8)$$

여기서 l 은 전파거리 이고 λ 는 파장이다. 위 식에서 보면 영상화 하고자하는 매질의 특정부분의 분해능은 파장의 함수이며 파장이 작을수록 즉 사용된 탄성파가 고주파수일수록 분해능이 높다는 사실을 알 수 있다.

파장이 무시된 즉 파선 토모그래피의 분해능은 어떻게 정의될까. 이 경우 분해능은 단순히 파선과 구성요소의 기하학적인 관계에 의하여 정의될 것이다. 따라서 분해능은 파선과 구성요소의 기하학적인 관계를 나타내는 행렬 L (식 3 참조)을 분석함으로써 체계적으로 이해할 수 있으며 이는 특이치 분해 (singular value decomposition, SVD)에 의하여 잘 설명된다 (Jackson, 1972) .

파선의 수가 N 이고 모델의 요소 수가 M 인 경우 L 은 $N \times M$ 행렬이며 이를 특이치 분해하면 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$L = UAV \quad (9)$$

여기서 U, V 각각 $N \times N, M \times M$ 행렬이고 Λ 는 고유치 (eigen value)를 요소로 하는 diagonal 행렬이다. 이 경우 행렬 U, V 는 다음과 같은 성질을 갖는다.

$$U^T U = I_N \quad (10)$$

$$V^T V = I_M \quad (11)$$

따라서 행렬 L 의 역행렬 L^{-1} 은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$L^{-1} = V \Lambda^{-1} U^T \quad (12)$$

토모그래피에서 구하고자하는 역속도모델 (s')은 식 (12)의 역행렬을 식(3)에 곱하여 구할 수 있으며

$$s' = L^{-1}t = V \Lambda^{-1} U^T U A V^T s = V V^T s \quad (13)$$

으로 표시할 수 있다. 위식에서 행렬 $R = V V^T$ 라하면, 역산 결과 구하여진 속도모델 s' 와 실제 모델 s 와 관계는

$$s' = R s \quad (14)$$

또는

$$\begin{pmatrix} s'_1 \\ s'_2 \\ \vdots \\ s'_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{1M} \\ R_{21} & R_{22} & \cdots & R_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{M1} & R_{M2} & \cdots & R_{MM} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_M \end{pmatrix} \quad (15)$$

으로 표시된다. 이 식에서 보면 재구성된 영상의 한 요소, 예를 들어 s'_i 는 행렬 R 의 i 번째 row와 실제 모델의 역속도 벡터 s 와 내적 (inner product)으로 표시된다. 즉 재구성된 영상의 한 요소는 그에 해당하는 실제 모델의 요소와 그 인접 요소들의 가중 평균값으로 표시된다. 만일 행렬 R 이 diagonal 행렬이면 재구성된 모델의 요소는 실제 모델의 요소와 같게되며 분해능은 완전하다고 할 수 있으며 행렬이 diagonal을 중심으로 일정 대역에 0이 아닌 요소가 있을 경우 분해능은 그 대역폭에 역비례한다. 따라서 행렬 R 을 분석함으로써 영상에 나타난 속도 이상대의 분해능을 평가할 수 있다.

파선토모그래피의 모델 설정

지하구조 영상화 작업시 유의해야할 사항으로 파선투사에 의하여 도출되는 토모그램은 역산과정에서 설정하는 모델특성에 따라 여러 형태의 영상으로 나타날 수 있다는 사실이다. 역산에 사용되는 모델은 일반적으로 균일한 크기의 격자로 구성하는 경우가 대부분이다. 그러나 위에서 설명한 바와 같은 반복역산법의 解는 실측치 (측정된 파선의 초동)와 가정된 모델에 근거한 이론 주시의 잔차를 최소화하는

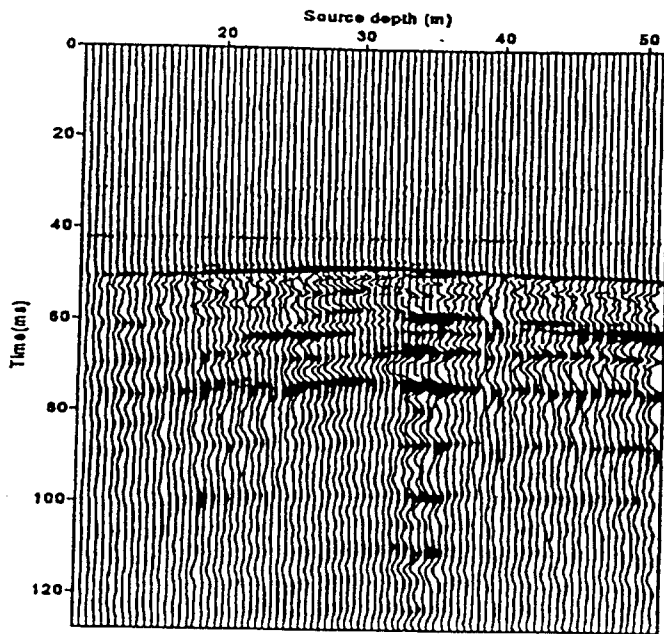


Fig. 1 A Common receiver gather

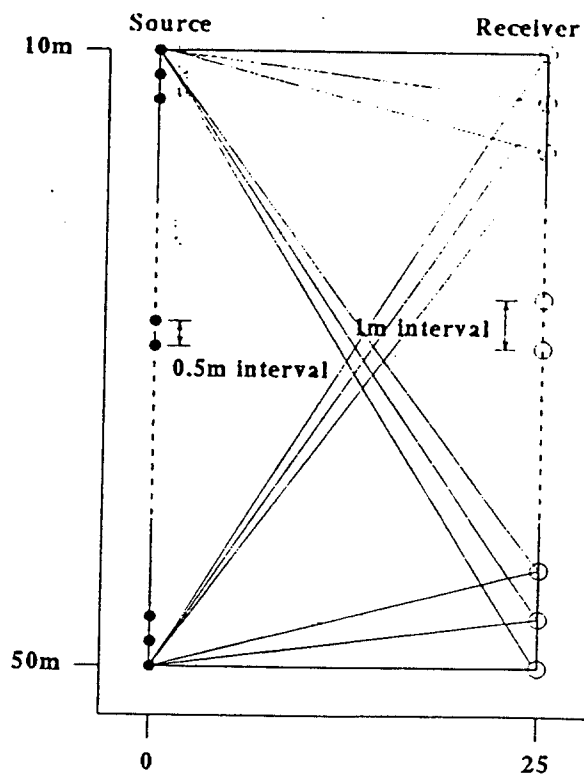


Fig.2 source-receiver geometry

모델로서 잔차의 크기가 동일한 다수의 모델이 가능하다 (nonunique solution). 따라서 도출된 토모그램을 사용하여 지하구조를 해석하려면 다수의 가능한 (잔차가 비슷한) 모델중 실제 지질구조와 비슷한 모델을 선택하여야 한다. 물론 그러기 위해서는 지질구조에 대한 사전정보 (a priori information)가 필요하다. 예컨대 층서구조의 영상을 원하면 여러개의 두께가 얇고 수평방향으로 긴 속도 요소들로 구성된 모델을 사용하여야 할 것이다.

모델특성에 따른 토모그램의 형상을 살피기 위하여 한 공대공 탄성과 자료를 영상화 해보자. 제시된 Fig. 1은 시추공 간격이 대략 25m인 2개의 시추공 사이에서 실시한 공대공 탄성과 자료의 한 기록이다. 진원 및 수신기의 위치는 Fig. 2에 제시한 바와 같이 수신기 간격은 1m이고 진원간격은 0.5m 이다. 파동의 최대 주파수는 대략 1,500Hz 이고 매질의 평균속도는 대략 4000m/s 이다.

Fig. 3, 4, 5, 6은 영역을 두께 1m 그리고 폭이 각각 1m, 3m, 9m, 27m 크기의 균일 격자로 구분하여 영상화한 결과이다. 영상에서 최저속도는 3800m/s (흑색) 이고 최대속도는 4500m/s (백색)이다. 토모그램으로부터 지하구조를 해석시 주의해야 할 사항은 영상에 나타난 잡음 또는 허상(ghost)이다. Fig. 3과 4에서보면 대각선 방향으로 고속도대가 존재하며, 부분적으로 극히 저속도대가 분포하는데 이러한 양상은 대부분 역산과정에서 발생하는 artefacts 일 가능성이 높으며 이러한 영상왜곡 현상은 주로 요소를 통과하는 파선의不在 또는 불충분함에 기인한다. 만일 특정 요소들을 통과하는 파선이 없을 경우 반복역산시 그요소의 속도가 어떻게 변하던 주시잔차에는 영향을 미치지 못하므로 그러한 요소의 역속도는 아무 의미가 없다. 만일 이러한 영상왜곡이 관심대상 영역에 나타날 경우 탐사목적은 달성할 수 없게 된다.

Fig. 5, 6 에는 위에서와 같은 분명한 영상 왜곡현상은 볼 수 없으나 수평방향으로 분해능이 떨어진다. 어떻게 모델을 설정하면 왜곡현상도 줄이고 분해능도 가능한 한 높이는가 하는 과제가 토모그래피에서 매우 중요한 과제이다. 이에 대한 명확한 해답을 제시하기 쉽지 않으나, 다음의 두가지 방안을 제시하고자한다, 첫째는 탄성과 특성 (주파수) 및 매질의 속도를 고려한 분해 가능한 최저 요소의 크기를 산출한다. 예를 들면 여기서 제시한 탐사의 경우 매질을 통과한 파동의 파장은 2.7m. (4000/1500)이다. 따라서 수직방향의 분해능은 1/4파장 즉 0.7m 이며, 수평방향 분해능은 식 (8)로부터 두 개의 시추공 사이에서 대략 8m 이다. 따라서 이 경우

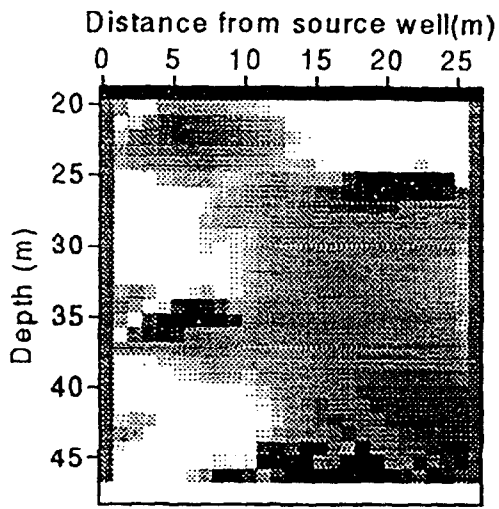


Fig.3 1x1m model

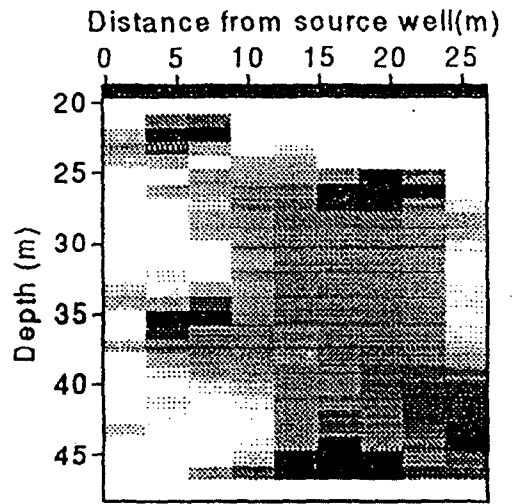


Fig.4 3x1m model

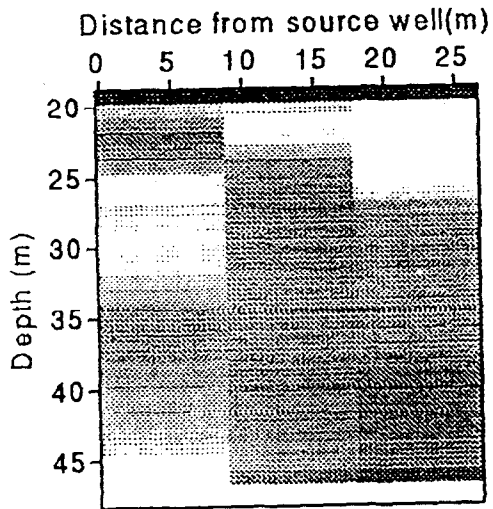


Fig.5 9x1m model

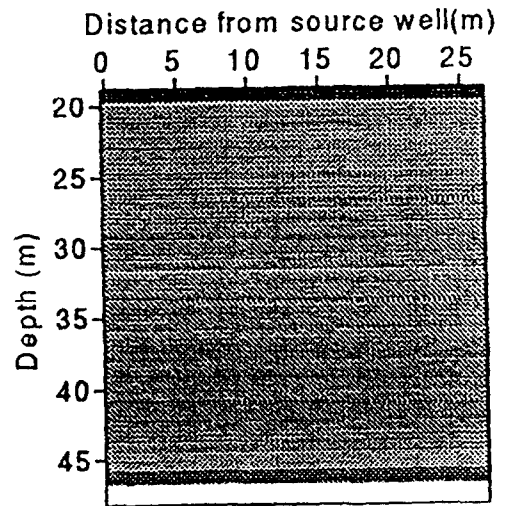


Fig.6 27x1m model

속도요소를 수평방향으로 긴 격자형태를 취하는 것이 바람직하다.

또다른 방법은 자료취득시 진원과 수신점을 적절히 배열하여 관심부분에 가능한 한 많은 파선이 통과하도록 설계하는 방법이 있으나, 이미 자료가 획득된 경우는 파선의 분포가 적은 부분의 속도요소의 크기를 크게 하여 다수의 파선들이 요소를 통과하도록 모델을 설정함으로써 영상왜곡현상을 방지할 수 있다. Fig. 7은 Fig. 4에 2D-median 필터를 적용한 결과이다. 이 방법은 영상에 있는 고주파성분 잡음을 제거하는데 효과적이다. Fig. 7로부터 연구대상 영역이 Fig. 8 과 같이 대략 9 개 블록으로 구성되었다고 추측할 수 있다.

여기서 제시된 기록은 채굴적의 상태를 파악하고 그 충전효과를 검증하기 위하여 실시한 탄성과 탐사자료 이다. 채굴적 구간은 상반 암반의 붕락으로 일부 채워져있고 물로 충전된 상태이며 그 위치는 Fig. 8 우측 하단의 저속도대에 해당한다. 토모그래피 역산에서 모델 설정은 임의로 할 수 있으므로 Fig. 8을 초기모델로 하여 역산을 수행하였으며 이때 채굴적에 해당하는 부분은 다시 1x4.5m 격자로 세분하였다. 역산결과 Fig. 9와 같은 영상을 얻었다. Fig. 3~9에 제시된 영상들은 채굴적 충전공정 이전에 탐사한 자료에 의한 영상들이다.

이 지역에서 확인된 채굴적에 대한 토사 및 시멘트 충전이 실시되었으며 그 뒤에 위에서와 동일한 사양으로 탄성과 자료를 취득하였다. 그 자료를 두가지 입력 모델로 영상화를 시도하였다. 하나는 1x1m 균일 격자모델이고 다른 하나는 9-블럭 모델이다. 1x1m 균일 격자모델을 사용한 역산은 아무 제약 없이 실시하였고, 9-블럭 모델은 Fig. 9에 표시된 영상을 입력모델로 채택하고 역산 과정에서 채굴적에 해당하는 부분을 제외한 타 부분의 속도를 고정시켰다. 그 이유는 우선 채굴적 이외의 부분에서는 속도변화가 예상되지 않기 때문이고 또 채굴적부분의 충전으로 주시의 변동이 예상되는 파선수가 그리 많지 않으며 주시의 차 또한 크지 않기 때문에 역산을 전체 모델에 적용하는 경우 충전에 의한 주시의 감소가 매질의 속도증가에 미친 효과가 역산 수치잡음에 가리기 쉽기 때문이다. 충전효과 (속도증가)를 검토하기 위하여 충전 전후 영상의 차를 영상화 한 결과가 Fig. 11 과 12에 제시하였다. 이 영상에서 속도변화 0 m/s는 흑색으로 200m/s 이상은 백색으로 표시하였다. 예상했던 대로 1x1m 모델을 사용한 경우 수치잡음으로 의미 있는 속도 변화를 볼 수 없으나 블록을 사용한 제한역산의 경우 채굴적부분에서 측정할 만한 속도변화를 볼 수 있다. 따라서 시간에 따른 지반상태의 변화탐지 등 미약한 변화를 측정하기

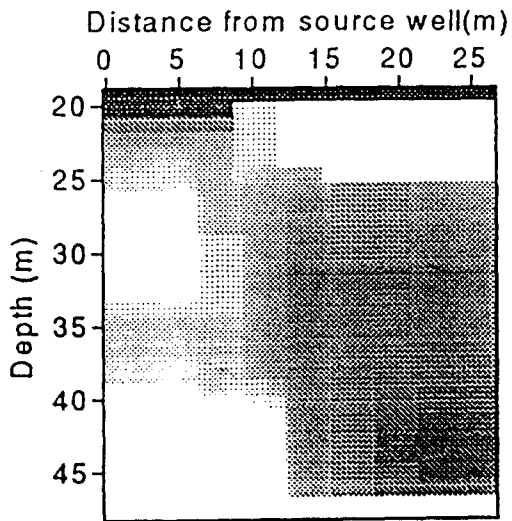


Fig.7 2D median filtered image

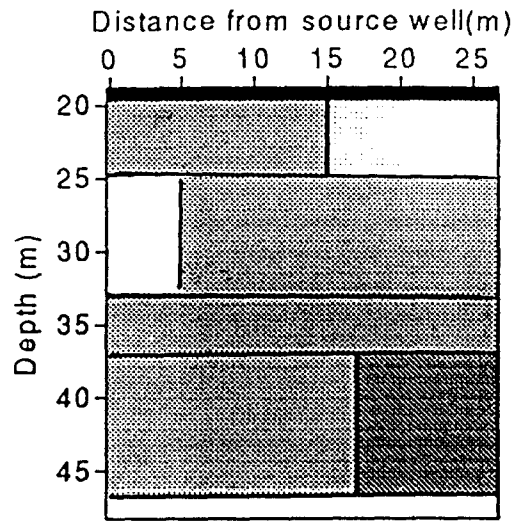


Fig.8 9-blocks input model

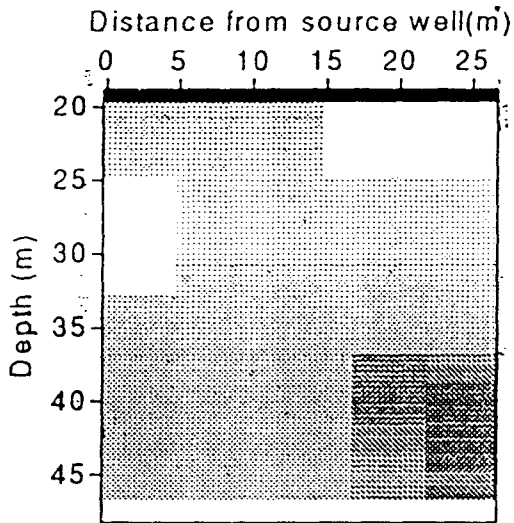


Fig.9 9-blocks model(image)

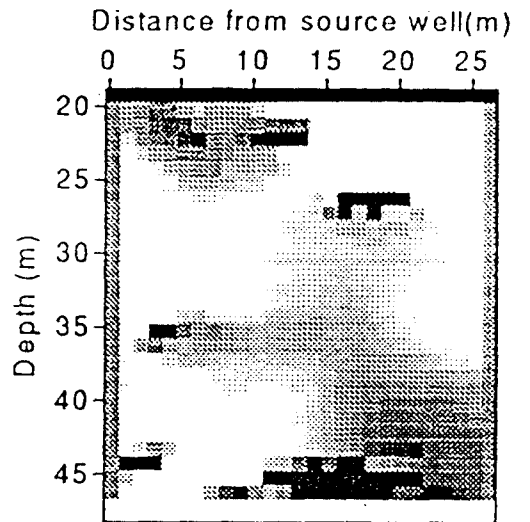


Fig.10 1x1m (monitor)

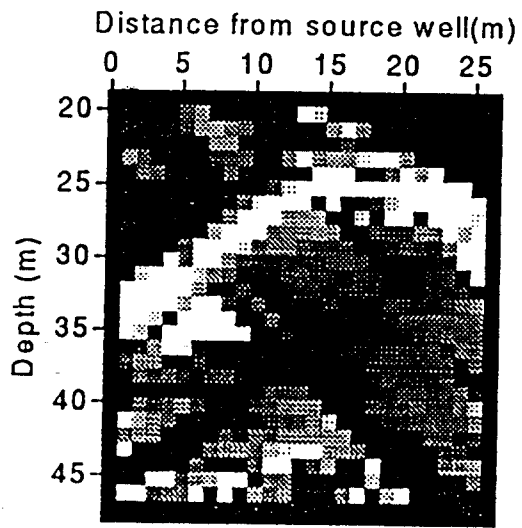


Fig.11 1x1m (difference)

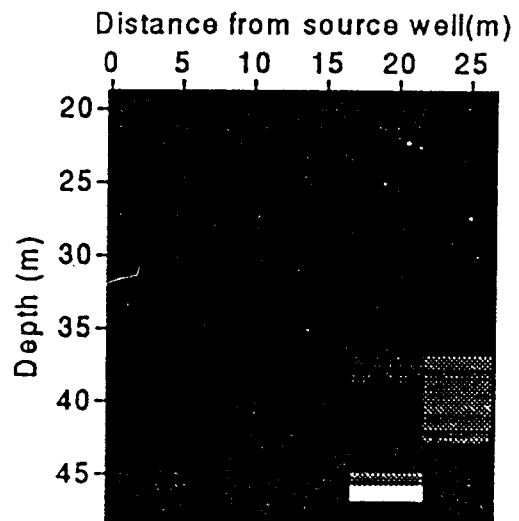


Fig.12 9 blocks (difference)

위한 토모그래피의 역산은 사전정보를 충분히 이용한 모델설정과 역산의 제어과정이 필요하다.

결 론

지하구조를 규명하기 위한 하나의 방법으로 탄성파의 초동을 이용한 공대공 토모그래피가 시추공사이 매질의 탄성 정보를 획득할 수 있는 방법으로 정밀 지반조사에 이용이 증가하고 있는 추세에 있다. 주시 토모그래피는 파의 초동만을 이용하여 지하의 속도구조를 밝히는 방법으로 자료취득이나 처리가 비교적 쉬운 탄성파 탐사법이다. 주시 토모그래피 적용에 있어서 유의해야 할 사항을 요약하면 다음과 같다.

1. 조사대상 구간에 대한 가능한 많은 정보를 수집하고 특히 관심대상 구역을 확인하여 많은 파선이 그 구간을 통과하도록 탐사설계를 하여야 한다. 이때 파선이 매질을 가능한 여러 방향으로 투사되도록 설계하여야 신뢰할만한 역산 결과를 얻을 수 있다.

2. 탄성파와 매질의 특성을 고려하여 속도 요소의 크기를 설정한다. 크기는 최소 요소의 크기 보다 다소 작게 함이 바람직하나 너무 작게 하면 허상 등 영상 왜곡 현상이 발생하여 해석하기 곤란한 영상을 얻게된다.

3. 관심대상 부분의 세밀한 결과를 보기 위하여 속도 격자의 크기를 작게 하여야 할 경우 그 이외 부분 특히 파선의 coverage 가 적은 부분은 요소를 크게 하는 방법을 적용함이 바람직하다.

4. 최종적으로 영상을 해석할 때 분해능 행렬을 분석함으로써 해석결과에 대한 신뢰도를 평가함이 바람직하다.

사사

본 논문에서 사용한 공대공 탄성파 자료 분석법은 과학재단 특정과제 지원에 의하여 개발된 방법으로 이 기관에 감사를 표한다.

참고문헌

Jackson, D. D., 1972, Interpretation of inaccurate, insufficient and inconsistent data: Geophys. J. Royal Astr. Soc, 28, 97-109.

Williamson, P. R., 1991, A guide to the limits of resolution imposed by scattering in ray tomography: Geophysics, 56, 202-207.