

지하공동 충전효과 평가를 위한 시차 공대공 탄성파 토모그래피 연구*

이 두 성¹⁾

Time-Lapse Crosswell Seismic Study to Evaluate the Underground Cavity Filling

Lee, Doo Sung

요 약 : 공동충전 효과를 검증하기 위하여 실시한 시차 공대공 탄성파 탐사자료로부터 지하공동 부존 지역에서 충전 전과 후에 매질의 탄성파 전파속도의 변화를 확인하였다. 시차 공대공 탄성파 탐사자료에 나타난 반응과 시추조사 결과에 의하면 본 지역의 공동은 규모가 극히 소규모이거나 또는 폐쇄 등으로 충전된 것으로 보인다. 공동충전 효과는 토모그래피로부터 도출된 속도단면상의 탄성파 속도의 증가량을 분석함으로써 평가하였다. 시추공용 에어건을 진원으로 24-채널 하이드로폰을 수진기로 하여 자료를 취득하였다. 취득한 자료에는 무시할 수 없을 정도의 source statics를 확인할 수 있었다. 본 논문에서 제시한 보정방법은 2단계로; 1) 불규칙한 발파시점에 의한 영향 보정과 2) 잔여 정보정으로 이는 진원의 부정확한 위치에 대한 정보정이다. 본 논문에서는 고주파수 성분의 수치잡음이 억제되고 관심대상 부분에서 비교적 고분해능 영상을 도출할 수 있는 다단계 역산 방안을 제시하였다. 일반적으로 최소자승 주시토모그래피로는 평활화된 속도 영상을 얻을 수 있다. 따라서 이러한 역산으로는 비교적 소규모의 구간에서 발생한 적은 속도변화를 영상화하기에는 어려운 면이 있다. 본 논문에서는 속도모델의 파라미터를 변화시킨 2단계 제어 역산법으로 도출한 시차 토모그램으로부터 채굴 영향대에서 발생한 매질의 속도변화를 시각화 할 수 있었다. 2단계 역산법은 1-단계에서는 적절한 크기의 균일 격자로 구성된 모델을 사용하여 토모그램을 작성하고 이 토모그램에 2차원 중위수 필터를 적용하여 대략적인 속도구조 모델을 작성한다. 2-단계 역산시는 1-단계에서 작성한 속도모델을 수정하여 초기 모델로 한다. 모델 수정은 관심대상 부분만을 작은 크기의 균일격자로 재구성하는 것이다. 기준조사 토모그램을 2차 조사자료 역산의 초기 속도모델로 사용하였다. 속도변화는 공동대 부근에서만 예상되므로 그 이외 부분의 속도는 기준 토모그램과 동일하게 고정시키고 역산을 수행하였다.

Abstract : Time-lapse crosswell seismic data, recorded before and after the cavity filling, showed that the filling increased the velocity at a known cavity zone in an old mine site in Inchon area. The seismic response depicted on the tomogram and in conjunction with the geologic data from drillings imply that the size of the cavity may be either small or filled by debris. In this study, I attempted to evaluate the filling effect by analyzing velocity measured from the time-lapse tomograms. The data acquired by a downhole airgun and 24-channel hydrophone system revealed that there exists measurable amounts of source statics. I presented a methodology to estimate the source statics. The procedure for this method is: 1) examine the source firing-time for each source, and remove the effect of irregular firing time, and 2) estimate the residual statics caused by inaccurate source positioning. This proposed multi-step inversion may reduce high frequency numerical noise and enhance the resolution at the zone of interest. The multi-step inversion with different starting models successfully shows the subtle velocity changes at the small cavity zone. The inversion procedure is: 1) conduct an inversion using regular sized cells, and generate an image of gross velocity structure by applying a 2-D median filter on the resulting tomogram, and 2) construct the starting velocity model by modifying the final velocity model from the first phase. The model was modified so that the zone of interest consists of small-sized grids. The final velocity model developed from the baseline survey was as a starting velocity model on the monitor inversion. Since we expected a velocity change only in the cavity zone, in the monitor inversion, we can significantly reduce the number of model parameters by fixing the model outside the cavity zone equal to the baseline model.

Keywords : Time-lapse tomography, cavity

서 론

지표 하부의 암반특성을 파악하는 일은 지상 및 지하 주요 구조물 건설에 반드시 필요한 과제중 하나이다. 일반적으로 암반의 특성은 시추 코어를 분석하거나 시추공 영상 검층법

에 의해서 이루어진다. 그러나 이러한 방법들은 시추 지점에서의 암반의 특성을 대표하므로, 암반 특성의 공간적 변화가 심할 경우에는 그 변화 양상을 파악하기 위해서 물리탐사법 중의 하나인 孔對孔 탄성파 탐사(Crosswell Seismic Survey)를 필요로 한다. 공대공 탄성파 토모그래피는 공대공 탄성파

*1998년 4월 10일 접수

1) 한성대학교 정보공학과(Department of Information Engineering, Hansung university)

자료로부터 시추공 사이 매질의 탄성특성을 영상화하는 탄성파법이다. 일정한 時差를 두고 수행하는 시차 탄성파법은 그 시차 동안에 발생한 암반의 특성변화를 측정하는데 유용하게 쓰일 수 있다. 시차 탄성파법은 석유업계에서 유전의 채유로 인한 매장량의 변화 탐지와 증진회수법(Enhanced Oil Recovery)으로 지하에 주입한 증기의 거동상태를 파악하는 도구로 쓰이고 있다(Lee et al., 1995). 이 경우 증기주입에 의한 암석의 온도상승은 암석내의 탄성과 속도 감소를 야기한다. 따라서 속도변화를 측정함으로써 증기거동을 평가할 수 있다.

본 연구에서는 조사지역 내에 확인된 채굴적의 충전상태를 평가하기 위하여 시차 탄성파법을 실시하였다. 본 연구에서는 충전 전과 후에 동일한 방식에 의한 공대공 탄성과 탐사를 실시하고 측정된 탄성과 자료에 주시 역산기법(travel time tomography)을 적용하여 속도단면 영상을 작성하고 단면상의 속도분포를 관찰하였다. 공동충진은 암석내의 탄성과 속도를 증가시킬 것이다. 따라서 기준조사(Baseline survey) 속도영상과 2차조사(Monitor survey) 속도영상을 비교하여 충전 부분에서의 발생한 속도변화를 분석함으로써 충전공정의 효과를 평가하고자 하였다.

자료획득

사용한 탐사 장비는 발진기로 Bolt-社 제품인 시추공용 에어건(airgun), 수신기로 24-channel Hydrophone, 그리고 지진 기록계로는 Geometrics-社 StrataView를 사용하였다. 탐사는 시추공간의 간격은 25.6 m인 두 개의 시추공을 발진공과 수신공으로 하여 심도 10~50 m 구간에서 데이터를 취득하였다. 취득된 데이터는 관심구간(심도 30~45 m)의 상태를 관측하기에 비교적 충분한 상태이었다. 자료취득은 공동발파점모음(common source gather)으로서, 우선 수신 system인 24 channel hydrophone을 심도 26~49 m 구간에 1 m 간격으로 설치하고 진원인 에어건을 심도 51 m에서 상부로 0.5 m 간격으로 이동시키며 음파를 발생시키고 그 에너지를 hydrophone에서 기록하였다(Fig. 1). 기록은 초동을 확실히 인식할 수 있을 정도로 양호한 자료를 얻을 수 있었다. 이상의 기록(Scan-1)을 취득한 후 Hydrophone system을 2-25 m 구간에 설치하고 Scan-1과 같은 방법으로 진원을 이동시키며 데이터를 취득하였다(Scan-2). Scan-2에서는 수신공의 지하수위인 심도 12 m 이하에서만 데이터를 취득할 수 있었다.

에어건은 상업용 캔고압질소를 사용하였으며 중합하지 않고 한 진원에서 한번씩 발파하였다. 발파 및 에어건 이동에 소요된 시간은 평균 40 ms으로 80 발파 1 scan 기록을 취득하는데 1시간 정도이었다. 자료취득 매개변수로는 샘플간격이 0.125 ms, 기록길이 1024 샘플, record lead time 30 ms을 사용하였다. 2차탐사는 조사지역의 충전 공정이 완료된 이후 기준탐사와 동일한 사양으로 실시하였다.

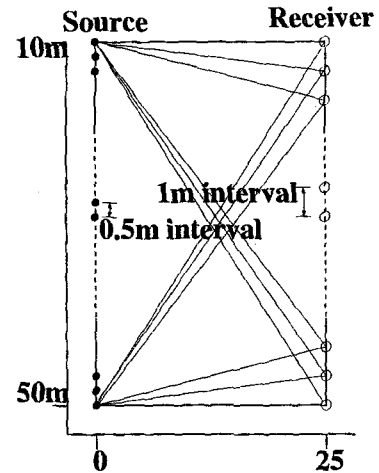


Fig. 1. Schematic diagram showing the source and receiver positions.

자료처리

일반적으로 공대공 탐사(crosswell survey)에서는 수신기를 한 지점에 설치하고 진원을 이동시키면서 자료를 얻는데, 진원의 위치 및 발파시점(onset-time)에 대한 불확실성, 진원서 발생한 에너지와 시추공과의 coupling 차이로 인한 source statics 등은 주시측정에 크게 영향을 미칠 수 있으므로 초동을 측정하기 전에 보정해야 한다. 발파시점에 대한 제어는 시스템마다 차이가 있으며 에어건의 경우 이를 보완하기 위하여 source trigger-signature를 기록한다. 이러한 진원의 영향은 공동발파점모음(common source gather) 기록에서는 인식하기가 어렵다. 왜냐하면 모든 기록에서 진원의 영향이 동일하기 때문이다. 발파시점의 불규칙성은 공동수신점모음(common receiver gather) 기록에서 쉽게 확인할 수 있다.

Fig. 2a는 심도 26 m에서 기록된 모든 자료를 모아놓은 공동수신점 기록이다. 여기에서 보면 기록 lead-time 30 ms 부근과 에어건 firing-time 42 ms 부근에 시스템 crossfeeding에 의한 신호를 볼 수 있다. 모든 진원이 동일한 발파시점을 가졌다면 42 ms 부근의 신호가 동일한 시간에 기록되어야 한다. 그러나 본 기록에서 보면 다소 차이를 보이고 있다. 이러한 진원의 영향은 제거되어야 한다. 본 연구에서는 시범기록(model trace)을 사용한 상호상관(crosscorrelation)을 측정변수로 한 최적화 방법으로 crossfeeding 신호가 동일시간에 있도록 보정하였다. 즉 좌측에서 4번째 trace를 기준으로 모든 trace가 기준 trace와 잘 적합(match) 하도록 trace를 위아래로 이동시켰다. 여기서 적합에 사용한 구간은 38~44 ms이다. 이러한 분석을 10개의 공동수신점모음 기록에서 수행하였으며 각 분석에서 산출된 보정시간을 평균하여 진원의 정보정도로 채택하였다. 보정 결과는 Fig. 2b에 제시하였다.

상술한 불규칙한 발파시점에 대한 보정은 시스템에 관련된 보정이다. 이 보정을 적용한 후 2차로 진원 위치의 불확실성 및 에너지와 시추공간의 커플링에 의한 residual statics를 상

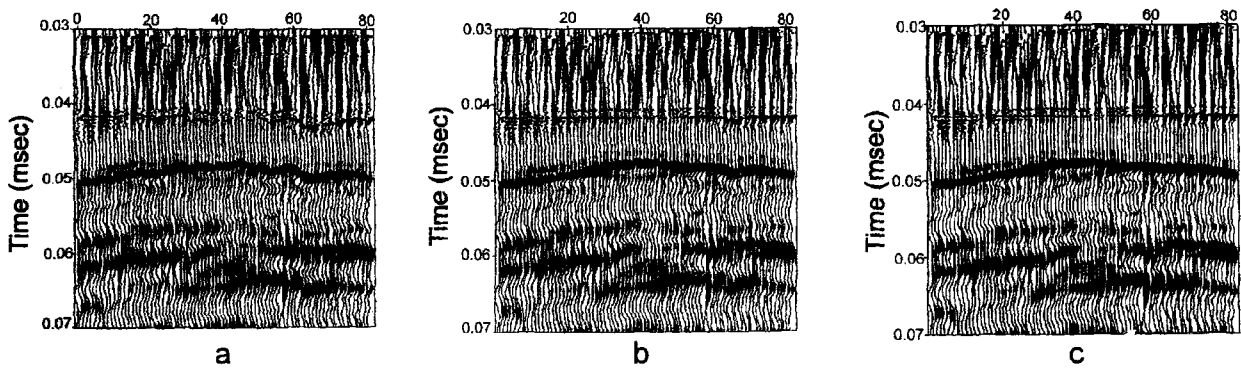


Fig. 2. Common receiver gather recorded at 30 m. a) raw data, b) after firing-time correction, and c) after residual velocity correction

기 10개의 공통수신점 기록에서 수행하였다. 진원 잔여 정보정의 산출과정은 1) 사용된 기록의 수신점의 심도와 동일한 심도의 진원에 의한 공통발파점모음 기록으로부터 normal moveout(NMO) 속도를 산출하고, 2) 이 속도로 공통수신점 기록에 NMO 보정한 후 초동들이 일정시간에 오도록 진원 정보정을 산출한다. 잔여 정보정도 1차보정과같이 10개 기록에서 산출된 진원 정보정을 평균하여 각 공통발파점모음 기록에 적용하였다. 따라서 이상의 정보정은 source consistent 정보정이다. Fig. 2c에 이 보정결과를 제시하였다.

토모그래피

본 연구에서 사용한 토모그래피 방법은 초동을 이용한 주시 토모그래피이다. 주시 토모그래피는 기록된 모든 데이터의 초동을 사용하여 기록된 trace가 통과하여온 매질의 속도를 산출하는 역산법이다. 측정된 데이터 즉 초동의 주시와 가장 잘 맞는 속도 모형을 구함으로써 매질의 속도 분포를 산출하는 방법이다. 여기서는 curved ray를 이용한 반복적인 역산법을 적용하였다(이두성, 1994). 역산은 2단계로 수행하였다. 1차로 모델을 균일한 직사각형 격자로 반복역산을 실시하였고 2차로 모델 파라미터 수를 줄이고 관심부분의 격자크기를 줄이기 위하여 불균질한 크기의 격자로 반복역산을 수행하였다.

초기역산 모델 파라미터 설정

일반적으로 주시토모그래피의 초기모형의 선정은 음파검층 또는 시추코어 분석 등의 자료를 이용하여 암반의 심도에 따른 속도 변화 또는 암반의 구조적인 특성 등에 대한 정보로부터 작성한다. 본 연구에서는 시추조사 자료에 근거한 예상 채굴적의 위치를 고려하였으며, 심도에 따른 속도변화는 공대공 자료중 수평방향으로 진행되는 trace 들로부터 산출하였다.

역산에 사용되는 모델은 일반적으로 균일한 크기의 격자로 구성하는 경우가 대부분이다. 그러나 초동을 이용한 반복역산법의 解는 실측치(측정된 파선의 초동)와 가정된 모델에 근

거한 이론 주시의 잔차를 최소화하는 모델로서 잔차의 크기가 동일한 다수의 모델이 가능하다(nonunique solution). 따라서 도출된 토모그램을 사용하여 지구구조를 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. 수평방향으로 긴 격자를 사용하면 공대공 탐사의 수평방향의 분해능이 수직방향의 분해능에 비하여 떨어진다는 사실 측면에서도 타당하다고 사료된다. 탄성파탐사의 수직방향 분해능은 대략 파동의 1/4 파장과 같으며 공대공 탄성파의 수평방향으로의 분해능은 $\gamma_{min}=(1/\lambda)^{1/2}$ 이다. 여기서 1은 전파거리이고 λ 는 파장이다.

Fig. 3a는 진원과 수신점의 심도가 동일한 trace 들을 발췌한 것이다. 시추공이 완전히 수직이라는 가정 하에 심도에 따른 수평방향의 평균속도를 산출하였으며 그 결과를 Fig. 3b에 제시하였다. 이 자료에 의하면 매질의 속도분포는 깊이 20 m에서 4200 m/s이며 하부로 점진적으로 증가하여 30 m에서 4600 m/s에 이르고 다시 감소하여 34~45 m 구간에서는 4200 m/s 정도의 낮은속도 구간을 형성한다. 수신공에 인접한 시추공에서 심도 34 m에서 소규모(<0.5 m) 공동이 확인되었는바, 이 저속도 구간은 채굴에 의한 저속도대의 존재를 지시한다고 볼 수 있다.

Fig. 3b에 제시한 속도를 초기속도로 하고 모델격자를 두

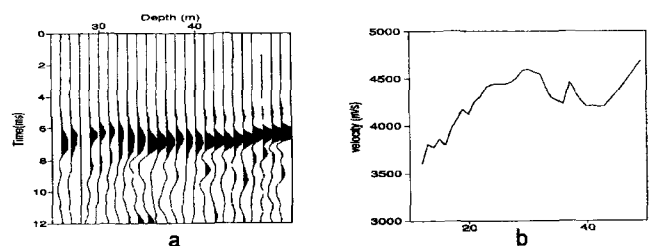


Fig. 3. a) Horizontally propagating traces, and b) Average horizontal velocity.

계 1 m 그리고 폭을 1 m, 3 m, 9 m로 하는 3개의 모델에 대한 반복 역산을 수행하였고 그 결과를 Fig. 4a~c에 제시하였다. 토모그램에서 속도범위는 3800~4500 m/s이며 백색부분이 고속도이며 흑색부분이 저속도대이다. 토모그램으로부터 지하구조를 해석시 주의해야할 사항은 영상에 나타난 잡음 또는 허상(ghost)이다. Fig. 4a에서 보면 대각선 방향으로 고속도대가 존재하며, 부분적으로 극히 저속도대가 분포하는데 대부분 이는 역산과정에서 발생하는 왜곡현상(artefacts)일 가능성이 높다. 이러한 영상왜곡 현상은 주로 각 속도요소를 통과하는 파선의 不在 또는 불충분함에 기인한다. 만일 특정 요소들을 통과하는 파선이 없을 경우 반복역산시 그 요소의 속도가 어떻게 변하던 주시잔차에는 영향을 미치지 못하므로 그러한 요소의 산출속도는 아무 의미가 없다. 더구나 만일 이러한 영상왜곡이 관심대상 영역에 나타날 경우 탐사 목적을 달성할 수 없게된다. Fig. 4c의 경우는 위에서와 같은 분명한 영상 왜곡현상은 볼 수 없으나 수평방향으로 분해능이 떨어진다.

2차역산 모델 파라미터 설정

어떻게 모델을 설정하면 왜곡현상도 줄이고 분해능도 가능한 한 높이는가 하는 문제는 주시토모그래피에서 매우 중요한 과제이다. 고분해능 토모그램을 도출하기 위해서는 작은

크기의 속도요소로 구성된 모델을 사용하여야 하는데 이 경우 위에서 제시한대로 고주파수 잡음을 포함하는 영상 왜곡 현상을 피할 수 없다. 이러한 잡음을 줄이는 가장 보편적인 방법으로 동적평활화법(dynamic smoothing)이 사용된다 (Nemeth et al., 1997).

관심 부분의 고분해능 영상을 도출하기 위한 모델파라미터 설정방법으로 2단계 역산법을 제시하고자 한다. 첫째는 탄성파 특성(주파수) 및 매질의 속도를 고려한 분해 가능한 최소 요소의 크기를 산출한다. 예를 들면 여기서 제시한 탐사의 경우 매질을 통과한 파동의 파장은 2.7 m(4000/1500)이다. 따라서 수직방향의 분해능은 1/4파장 즉 0.7 m이며, 수평방향 분해능은 두 개의 시추공 사이에서 대략 8 m이다. 따라서 이 경우 속도요소를 수평방향으로 긴 격자형태를 취하는 것이 바람직하다. 1차역산의 목적으로 매질의 대략적인 속도구조를 파악하는데 두었다. Fig. 5a는 Fig. 4a에 2D-median 필터를 적용한 결과이며 이를 Fig. 5b와 같이 9개 블록으로 단순화하였다.

파장이 무시된 즉 파선 토모그래피의 분해능은 단순히 파선과 구성요소의 기하학적인 관계에 의하여 정의될 것이다. 따라서 분해능은 파선과 구성요소의 기하학적인 관계를 나타내는 행렬을 분석함으로써 체계적으로 이해할 수 있으며 이 행렬의 null space에 해당하는 모델영역의 속도변화는 최소주시잔차에 무관하다. Rowbotham and Pratt(1997)은 모델에 대한 사

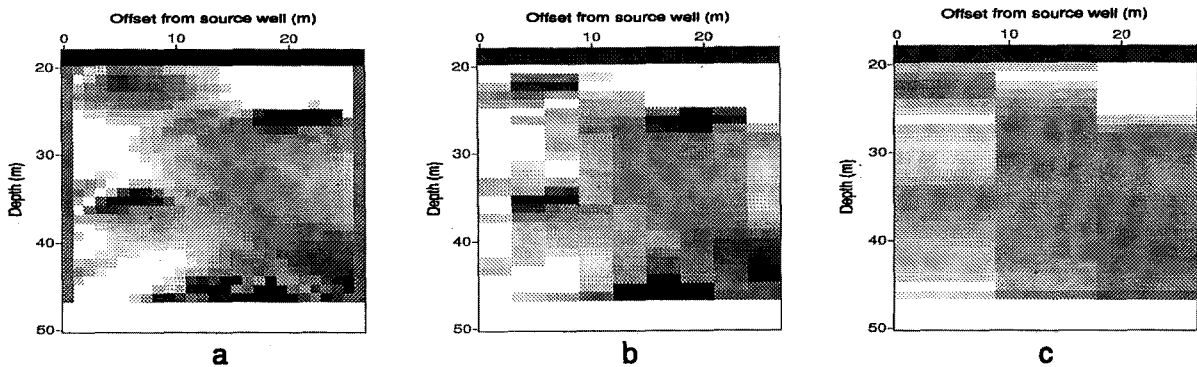


Fig. 4. Baseline velocity tomograms developed by using models of. a) 1×1 m grids, b) 3×1 m grids, and c) 9×1 m grids. Velocity ranged from 3,800 to 4,500 m/s. Black is the lowest and the white is the highest velocity

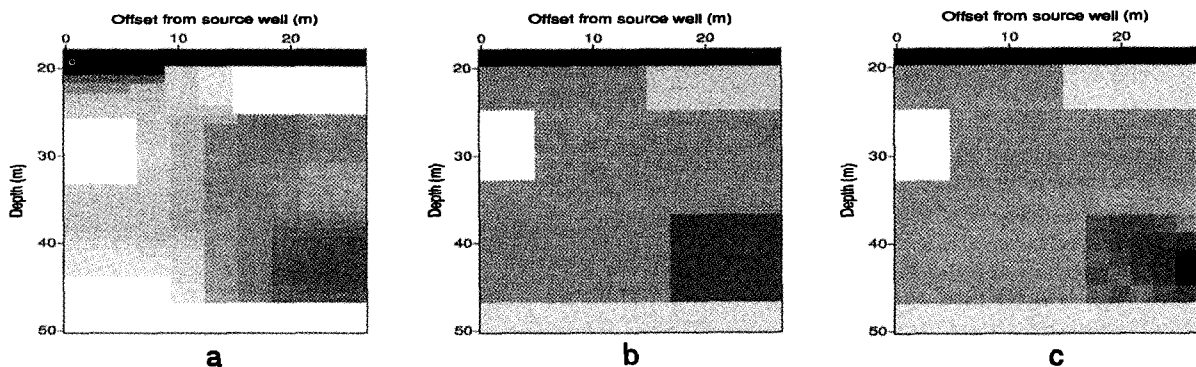


Fig. 5. Baseline velocity tomograms. a) 2-D median filter applied on Fig. 4a, b) 9-block velocity models designed from model (a), and c) final velocity model developed by using the model (b) as the starting velocity model

전정보(a priori information)를 null space에 투사함으로써 지형에 맞는 형태의 토모그램을 작성하는 방안을 제시하였다. 본 탐사의 주요 관심사항은 채굴적으로 예상되는 부분의 충전 전후의 변화 사항인 것을 감안하여, 채굴영향대로 사료되는 Fig. 5b에 제시된 블록중 좌측하단의 저속도 부분을 1×1 m 격자로 재 정의하고 각 블록 및 격자의 최적 속도를 산출하고자 2단계 반복역산을 하였고 그 결과를 Fig. 5c에 제시하였다.

충전후 토모그래피 (Monitor Tomogram)

충전공정이 완료된 후 기준조사와 동일한 사양으로 공동공 탄성파탐사를 실시하였다. 우선 충전효과를 검토하기 위하여 심도 26 m의 진원과 수신점에서 취득한 공동발파점모음과 공동수신점모음을 발체하여 비교하였다. Fig. 6a와 6b는 각각 충전 전과 후에 취득한 공동발파점모음 기록이다. 주시의 변화를 산출하기 위하여 두 기록의 상호상관을 구하였다. Fig. 6c 표시된 자료에 의하면 심도 33~40 m 구간의 수신점에서의 기록의 주시가 빨라진 사실을 확인 할 수 있다. 예상했던 대로 충전효과가 매질의 속도증가로 나타났음을 알 수 있다. Fig. 7a와 7b는 심도 26 m에서 취득한 충전 전과 후의 공동수진점모음 기록이다. 이들 기록의 상호상관(Fig. 6c)에서는 공동발파점모음에서와 같은 주시의 차이를 확인할 수 없었다. 이 분석은 토모그램 (Fig. 5c)에 제시된바와 같이 저속도대가 수신공부근의 심도 34 m 하부에 존재하며 수평연장이 수신공에서 10 m 이내라는 사실을 바쳐준다고 하겠다.

즉 토모그램에 제시된 모델 (Fig. 5c)에 의하면 이 공동수신점 모음의 모든 트레이스는 채굴영향대를 통과하지 않는다. 따라서 이들 트레이스들은 충전에 의한 영향을 전혀 받지 않았다고 볼 수 있다.

Fig. 6a에서 절선으로 표시된 튜브파를 2차 조사에서는 볼 수가 없다. 이 튜브파는 진원에서 발생한 파가 수신공 내의 40 m 부근에서 반사되어 수신공 내의 물속으로 전파되어 상부의 수신점에서 기록된 파이다. 튜브파는 대체로 공내의 임피던스 차이가 큰 부분에서 발생한다. 이러한 튜브파를 Fig. 6b에서는 발견할 수 없다. 이 사실은 이 부근에 채굴영향대의 존재로 매질의 임피던스의 차이가 심했던 것이 충전으로 인하여 상당히 감소되었다는 사실을 암시한다고 해석할 수 있다.

2차 탐사자료의 역산은 Fig. 4a와 Fig. 5c 정의된 모델을 초기모델로 하여 반복역산법에 의하여 수행하였다. Fig. 4a를 사용한 역산은 아무 제한 없이 20회 반복역산을 하였고 Fig. 5c를 사용한 역산의 경우는 격자로 구성된 저속도대 이외의 모든 구간의 속도는 고정하고 역산을 하였다. 도출된 영상과 기준영상과의 차이를 산출하였으며 그 결과는 Fig. 8a와 8b에 제시하였다. 이 토모그램은 속도변화를 영상화한 것으로 0 m/s 이하는 백색 300 m/s 이상은 흑색으로 표시하였다. 적은 격자를 사용한 일반역산법으로는 저속도대에서 예상되는 속도변화 비슷한 수준의 수치잡음이 광범위하게 존재한다는 사실을 알 수 있으며, 소규모의 구간에서 발생한 매질의 변화

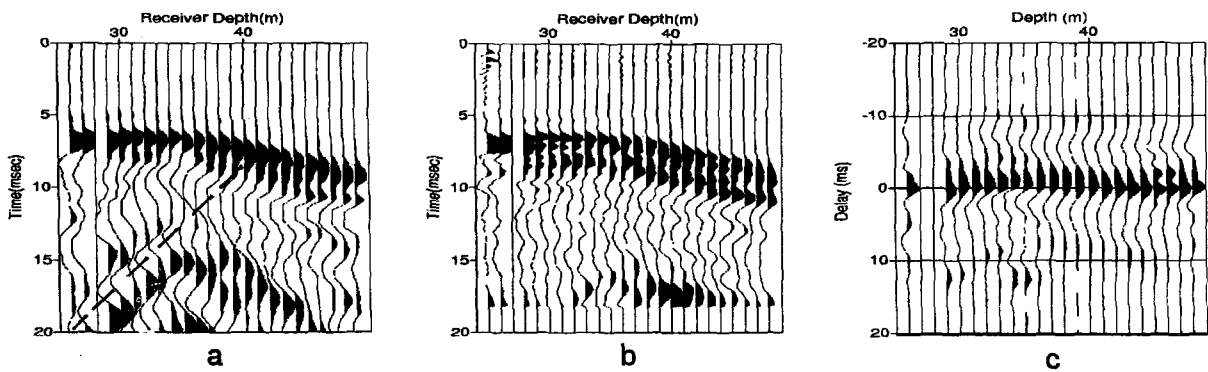


Fig. 6. Common source gathers at 26 m. a) baseline data, and b) monitor data. c) crosscorrelation of (a) and (b)

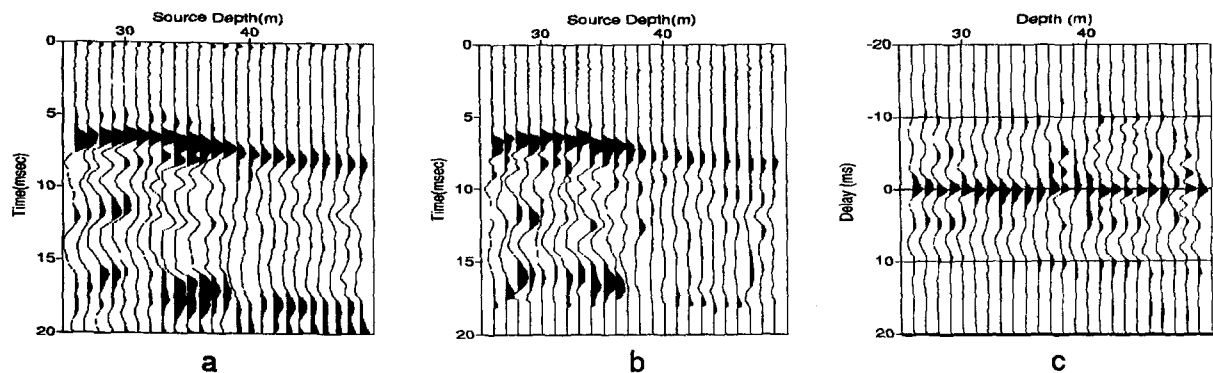


Fig. 7. Common receiver gathers at 26 m. a) baseline data, and b) monitor data. c) crosscorrelation of (a) and (b)

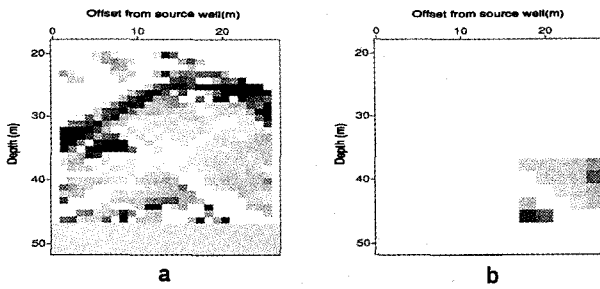


Fig. 8. Velocity difference tomograms developed. a) by the inversion with 1×1 m regular grid parameterization, and b) by the constraint inversion with irregular-size cell parameterization. Velocity ranged from 0 to 300 m/s. The white and black indicate the lowest and highest velocities, respectively

를 관측하기 위한 시차 탄성과 토모그래피에서는 사전정보를 사용한 제어 역산이 필요하다는 사실을 인식할 수 있다(Lee *et al.*, 1995).

토모그래피에 의한 충전효과 분석

충진효과는 속도증가로서 나타났다. 이 효과(200 m/s 속도 증가)를 좀더 정량적으로 평가하기 위하여 채굴영향대를 주변암석 보다 공극율이 큰 부분으로 정의하였다 (이두성 등, 1997). 본 탐사구간의 채굴영향대는 채굴적이 폐석으로 충전 또는 상반암의 붕락으로 인하여 채워 있어 채굴공동이라기보다는 공극율이 큰 부분으로 고려할 수 있다. 다공질 매질(porous media)에서 탄성과속도는 공극율과 충전물에 의한 시간평균을 이용한 Wyllie 식에 의하여 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{1}{v} = \frac{\phi}{v_h} + \frac{1-\phi}{v_a} \quad (1)$$

여기서 v 는 다공질매질의 속도, ϕ 는 공극율, v_a 과 v_h 은 각각 암석과 충전물의 속도이다. 우선 cavity가 없는 부분 암석의 공극율을 산출하기 위하여 다음의 값들을 사용하였다. 즉 신선한 암석의 속도를 6,000 m/s(실험실 측정값 참조, 안대영 등, 1995), 물의 속도를 1,500 m/s. Fig. 3b로부터 채굴영향이 없는 부분의 매질 속도를 4,600 m/s로 가정하면 식 (1)로부터 이 부분 암석의 공극율은 대략 10% 정도이다. 채굴영향대의 부피(공극율로 환산된)를 대략 산출하고자 식 (1)을 아래와 같이 변형하였다.

$$\frac{1}{v_c} = \frac{\phi_c + \phi_r}{v_h} + \frac{1 - (\phi_c + \phi_r)}{v_a} \quad (2)$$

여기서 아래첨자 c, r, fl 은 각각 채굴영향대, 암반, 충전물을 지시한다. 채굴영향대의 탄성과 속도, v_c 를 3,800 m/s, 암반의 공극율, ϕ_r 을 0.1로 하면, 위 식으로부터, 채굴영향대 공극율 c 는 대략 9.3% 가 된다.

모래로 공동을 충전할 경우 최대로 공동의 70% 정도 충전이 가능할 것이다. 이 수치는 구형입자를 정육면체 공간에 쌓

았을 경우 빈 공간이 47.6%~25.96%라는 사실에 근거한 것이다(Beaumont and Foster, 1987). 따라서 모래의 탄성과 속도를 5,700 m/s으로 하면, 충전후의 채굴영향대의 최대 가능 탄성과 속도는 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$\frac{1}{v_{cf}} = \frac{0.093 \cdot 0.7}{5700} + \frac{0.093 \cdot 0.3 + 0.1}{1500} + \frac{1 - (0.093 \cdot 0.3 + 0.1)}{6000}$$

윗식으로부터 충전후 탄성과 속도는 4,113 m/s이 된다. 따라서 위에서 가정한 공동 모델이 실제에 근사하다면, 채굴적 부분의 충전에 의한 예상 속도증가는 최대 310 m/s 정도일 것이다.

결론

본 공대공 탄성과 연구는 채굴공동 충전효과 검증을 위하여 실시하였다. 충전이 암반의 탄성특성에 미친 영향을 암반을 통과하는 탄성과의 전파속도 변화를 검토 분석함으로써 평가하고자 하였다. 이번 연구에는 시추공용 에어건 자료의 전처리 과정으로 진원의 정보정과 잔여정보정 방법을 개발하였으며 소규모 구간에서 발생한 매질의 변화를 성공적으로 나타내기 위한 2 단계 역산법과 제어역산법을 제시하였다.

모든 기록의 초동주시를 사용한 역산법으로 단면의 속도영상을 도출하였고, 영상에 나타난 단면의 속도분포를 채굴적 과 연계하여 해석하였으며 충전 전후의 속도변화 단면을 작성하여 충전효과가 속도증가로 나타남을 확인하였고, 다공질 매질에서의 탄성과 속도모델을 사용하여 충전효과의 정량적 평가를 시도하였다. 연구결과 시차 공대공 탄성과법이 지반보강 효과를 평가하는데 효율적으로 사용할 수 있다는 가능성을 제시하였다.

참고문헌

1. 안대영 등, 1995, 지하채굴에 따른 지반안정성 조사 평가: 벽산엔지니어링주식회사.
2. 이두성, 1994, 유한차분법에 의한 파선추적 알고리즘: 한국자원공학회지, 150-155.
3. 이두성, 지 준, 안대영, 1997, 탄성과 CT를 이용한 지하공동 충전 및 지반보강효과 검증 연구 사례: 한국지반공학회 '97 가을학술발표회 논문집, 267-274.
4. Beaumont, E. A. and Foster, N. H., 1987, Reservoir I, properties: Treatise of petroleum geology reprint series No. 3: AAPG.
5. Curtis, A. and Snieder, T., 1997, Reconditioning inverse problems using the genetic algorithm and revised parameterization: Geophysics, 62(5), 1524-1532.
6. Lee, D. S., Stevenson, V. M., Johnston, P. F. and Mullen, C. E., 1995, Time-lapse crosswell seismic tomography to characterize flow structure in the reservoir during the thermal stimulation: Geophysics, 60(3), 660-666.
7. Nemeth, T., Normark, E. and Qin, F., 1997, Dynamic smoothing traveltime tomography: Geophysics, 62(1), 168-176.
8. Rowbotham, P. S. and Pratt, R. G., 1997, Improved inversion through use of the null space: Geophysics, 62(3), 869-883.