

탄성파 CT를 이용한 지하공동 충전 및 지반보강 효과 검증 연구 사례 Case study on Monitoring of Subsurface Reinforcement Using Seismic CT

이 두 성¹⁾, Doo-Sung Lee, 지 준¹⁾, Jun Ji, 안대영²⁾, Dae Young, Ahn

1) 한성대학교 정보공학과, Dept. of Information Engineering, Hansung University

2) 벽산 엔지니어링, Byucksan Engineering

SYNOPSIS : We have studied a monitoring method of ground reinforcement by filling subsurface cavities. Elastic properties of a rock can be estimated by measuring seismic velocity, and the effect of the reinforcement can be evaluated by observing the change in elastic properties of the medium. In this study, we have evaluated the effect of reinforcement by the time-lapse seismic method. The seismic velocity before and after the cavity filling was analysed by using crosswell CT method. The result of analysis shows that the seismic velocity of the medium has been increased after the reinforcement as expected.

KEYWORDS : 충전, 지반보강, 탄성파, CT, Time-lapse seismic.

1. 서 언

지표 하부의 암반특성을 파악하는 일은 지상 및 지하 주요 구조물 건설에 반드시 필요한 과제중 하나이다. 일반적으로 암반의 특성은 시추 코어를 분석하거나 시추공 영상 검층법에 의해서 이루어진다. 그러나 이러한 방법들은 시추 지점에서의 암반의 특성을 대표하므로, 암반 특성의 공간적 변화가 심할 경우에는 그 변화 양상을 파악하기 위해서 물리탐사법 중의 하나인 공동공 탄성파 탐사(Crosswell Seismic Survey)를 필요로 한다. 특히, 일정한 시차를 두고 수행하는 시차 탄성파법은 그 시차동안에 발생한 암반의 특성의 변화를 측정하는데 유용하게 쓰일 수 있다. 시차 탄성파법은 미국 석유업계에서 유전의 채유로 인한 매장량의 변화 탐지와 EOR (Enhanced Oil Recovery)로 지하에 주입한 증기의 거동상태

를 파악하는 도구로 쓰이고 있다 (Lee et al., 1995).

본 연구에서는 조사지역 내에 확인된 채굴적의 충전상태 파악 및 충전공정이 암반의 탄성 특성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 시차 탄성파법을 실시하였다. 자연상태의 암석의 동 탄성상수는 암반의 탄성과 속도로부터 산출할 수 있다. 본 연구에서는 충전 전과 후에 동일한 방식에 의한 공대공 탄성과 탐사를 실시하고 측정된 탄성과 자료에 주시역 산기법(travel time tomography)을 적용하여 속도단면 영상을 작성하였다. 속도영상에서 단면상의 속도분포를 관찰하였으며, 기준조사(Baseline survey) 속도영상과 2차조사(Monitor survey) 속도영상을 비교하여 충전 부분에서의 속도변화를 산출하고 이를 이용하여 충전공정의 효과를 평가하였다.

2. Data acquisition

사용한 탐사 장비는 발진기로 Bolt 사 제품인 시추공용 Airgun, 수신기로 24-channel Hydrophone, 그리고 지진기록계로는 Geometrics 사 StrataView 지진계를 각각 사용하였다.

시추공 A-시추공 B 공대공 탄성과 탐사

기준탐사(baseline survey)는 시추공 A와 B를 각각 발진공과 수신공으로 하여 심도 10 - 50m 구간에서 데이터를 취득하였다 (그림 1). 시추공간의 간격은 25.6m 로써 취득된 데이터는 관심구간(심도 30 - 45m)의 상태를 관측하기에 비교적 충분한 상태이었다.

자료취득은 공통발파점모음(common source gather)으로서, 우선 수신 system인 24 channel hydrophone을 심도 26 - 49m 구간에 1m 간격으로 설치하고 source 인 downhole airgun 을 심도 51m 에서 상부로 0.5m 간격으로 이동시키며 음파를 발생시키고 그 에너지를 hydrophone 에서 기록하였다. 기록은 초동을 확실히 인식할 수 있을 정도로 양호한 자료를 얻을 수 있었다. 이상의 기록 (Scan1)을 취득한 후 Hydrophone system을 2-25 m 구간에 설치하고 Scan1 과 같은 방법으로 이동시키며 데이터를 취득하였다 (Scan2). Scan2 에서는 수신공의 지하수위인 심도 12m 이하에서만 데이터를 취득할 수 있었다.

자료취득 변수로는 샘플간격이 0.125 ms, 기록길이 1024 샘플, record lead time 30 ms 을 사용하였다. Monitor 탐사는 조사지역의 충전 공정이 완료된 이후 기준탐사와 동일한 사양으로 실시하였다.

시추공 A-시추공 C 공대공 탄성과 탐사

이 구간의 자료 취득은 충전 공정이후에 실시하였으며 자료취득은 시추공 A를 발진공으로 하고 시추공 C를 수신공으로 하였고, 발진구간은 10-53m 이고 수신구간은 8-39m 이다. 이 단면의 시추공간 거리는 21.3m 이다. 이 단면상의 데이터는 A-B 단면보다 잡음수준이 높았으며, 특히 천부 (< 15m) 데이터는 높은 수준의 잡음으로 정확한 초동의 인식이 어려운 상태이다.

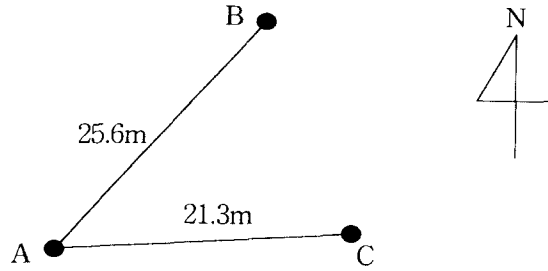


그림 1. The Survey layout.

3. Data processing

일반적으로 공대공 탐사(crosswell survey)에서 source를 이동시키면서 자료를 얻는데, source의 위치 및 source 발파시점에 대한 불확실성, source 에너지와 시추공과의 coupling 차이로 인한 source static 등을 고려해야한다. source 위치 및 발파시점의 문제는 기록의 주시에 영향을 크게 미칠 수 있으므로 초동을 picking 하기 전에 보정해야한다. source 발파시점에 대한 control은 system 마다 차이가 있으며 airgun의 경우 이를 보완하기 위하여 source trigger signature를 기록한다. 이러한 source의 영향은 공통발파점모음에서는 인식하기가 어렵다. 왜냐하면 모든 trace 에서 source 의 영향이 동일하기 때문이다. 따라서 source 의 영향을 확인하려면 자료를 공통수신점모음(common receiver gather)으로 sorting 해야한다.

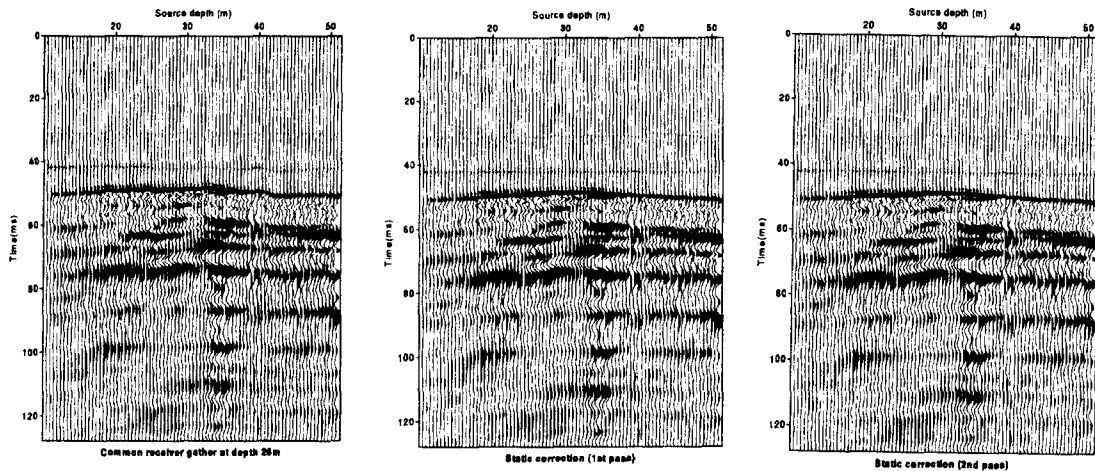


그림 2. Source static corrections. (LEFT) before correction, (Middle) after first pass, (Right) after second pass.

그림 2는 수신심도 26m 에서 기록된 모든 자료를 모아놓는 것이다. 여기에서 보면 record lead time 30ms 부근과 airgun firing time 42ms 부근에 system crossfeeding에 의

한 신호를 볼 수 있다. 모든 source가 동일한 triggering time 을 가졌다면 42ms 부근의 신호가 동일한 시간에 기록되어야 한다. 그러나 본 기록에서 보면 다소 차이를 보이고 있다. 따라서 이러한 source의 영향은 제거되어야 한다. 본 연구에서는 model trace를 사용한 crosscorrelation 방법으로 trace 간의 상대적 변화를 보정하였다. 즉 좌측에서 4 번째 trace를 기준으로 모든 trace가 기준 trace와 잘 match 되도록 trace를 위아래로 이동시켰다. 여기서 match에 사용한 구간은 38 - 43 ms 이다. 이 작업은 1차적으로 crosscorrelation을 통한 computer processing으로 최적 matching을 하였으며 몇몇 trace에 대하여 수작업으로 수정하는 단계를 거쳤다. 그림 2에서 이 결과를 제시하고 있다. 제시된 바와 같이 42 ms 부근의 신호가 동일한 시간대에 형성됨을 볼 수 있으며 이로서 source의 기계적인 영향은 제거되었다고 볼 수 있다. 이렇게 산출된 source statics를 모든 수신점모음(receiver gather)들에 적용한 후 초동을 picking 하였다.

4. Tomography에 의한 속도분석

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. 역산 공정은 다음과 같다:

1. 주어진 모든 자료를 이용하여 가장 근사하다고 생각하는 초기 속도모형을 작성한다.
2. 작성된 속도모형에서 파선추적을 통하여 모든 실측기록에 해당하는 진원과 수신점에서의 초동의 주시와 파선의 경로를 계산한다. 여기서는 유한차분법(Finite difference)에 근거한 방법을 사용하였다 (이두성, 1994).
3. (2)에서 산출된 이론 주시와 실측 주시와의 차이를 계산한다.
4. (3)의 잔차(residual)의 합을 최소화하는 방향으로 속도모형을 발전시킨다. 여기서는 SIRT 법을 사용하였다.
5. 잔차의 합이 충분히 적을 때까지 (2)에서 (4) 단계를 반복한다.

초기모형 및 역산 파라미터 설정

초기모형의 선정은 음파검층 또는 시추코어 분석 등의 자료를 이용하여 암반 내에서의 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.

시추공 A-시추공 B 기준탐사

그림 3(a)는 진원과 수신점의 심도의 차이가 0.5m 이내인 trace 들을 stacking 한 것이다. 시추공이 완전히 수직이라는 가정 하에 깊이에 따른 수평방향의 평균속도는 시추공간 거리(25.6m)를 이 trace 의 초동으로 나눔으로써 산출하였으며 그 결과를 그림 3(b)에 제시하였다. 이 자료에 의하면 매질의 속도분포는 깊이 20m에서 4200 m/s 이며 하부로 점진적으로 증가하여 30m 에서 4500m/s 이상에 이르고 다시 감소하여 34-45 m 구간에서는 4200 m/s 정도의 낮은속도 구간을 형성한다.

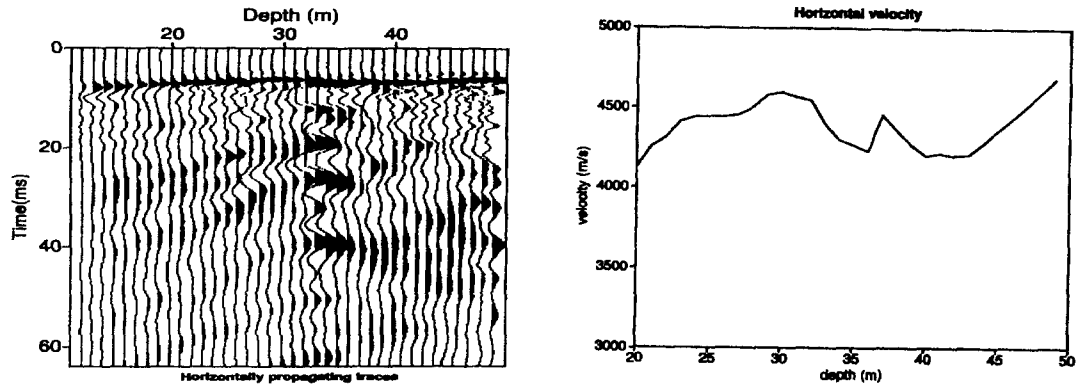


그림 3. (a) Horizontally propagating traces: Baseline data obtained from A and B. (b) Velocity Measured from the data shown in (a).

본 연구의 주요 관심사항은 채굴적으로 예상되는 부분의 충전 전후의 변화 사항인 것을 감안하여, 속도 모형을 3 개의 수평 블록과 54x34 개의 grid 형태로 정하고 각 블록 및 grid 의 최적 속도를 산출하고자 하였다 (그림 4(a)). 여기서 사용한 각 블록의 초기 속도는 3800, 4200, 4500 m/s 이다. 초기 속도모델은 수평진행 탄성과 주시로부터 산출하였으므로 비교적 실제 모델의 평균속도에 근사하다고 할 수 있다.

역산 최종 결과를 그림 4(b)에 제시하였다. 블록1 의 속도는 3820, 블록2는 4240, 블록3은 4500 등 초기속도와 거의 같게 나타났으며, 격자로 정의된 구간에서 속도변화가 나타나고 있다. 심도 35-47m, 시추공 A에서 12m 이내 구간에서 4200 m/s 이하의 주위보다 낮은속도대가 형성되며 심도 39-46m, 시추공 A에서 10m 이내구간에서 3800 m/s 이하의 최저 속도대가 형성된다. 시추공 A에 인접해있는 또 다른 시추공으로부터 심도 34m 에서 소규모 공동이 확인되었으므로, 이 저속도대(3,600-4,000 m/s)는 채굴적의 존재 또는 채굴로 인한 압반의 교란 상태를 나타낸다고 사료된다.

시추공 A-시추공 B Monitor Survey

충진공정이 완료된 후 기준조사와 동일한 사양으로 공대공 탄성파탐사를 실시하였다. 우선 충전효과를 검토하기 위하여 2개의 공통발파점모음(CSG)를 발체하여 비교하였다. 이들은 시추공 B 내의 심도 25m 에 위치한 진원으로부터 발사된 음파를 시추공 A 내의 심도 26-51m 구간에 설치한 hydrophone에서 수신된 기록이다. 공통발파점모음들과 이들의 초동을 분석한 결과 심도 32m 하부에서 monitor 데이터의 초동이 기준 데이터의 초동보다

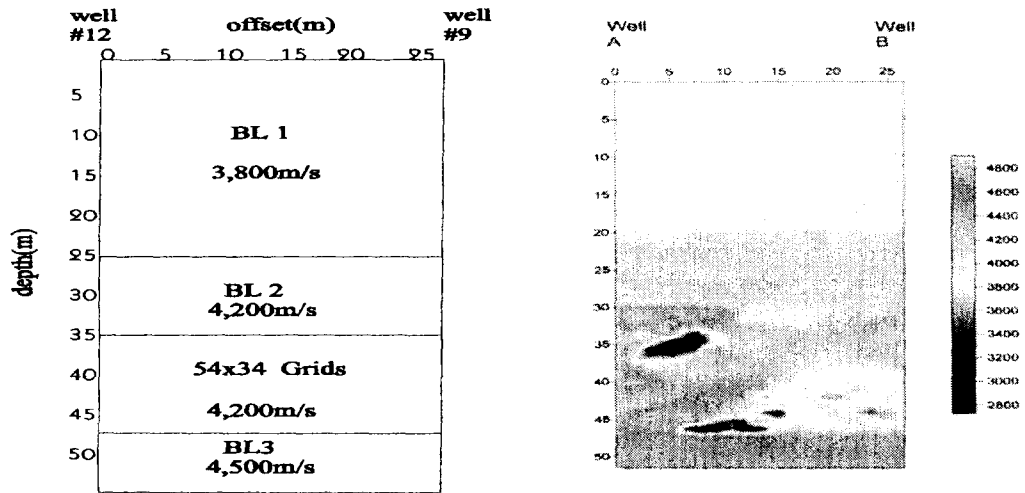


그림 4. (a) Initial velocity model for the tomographic inversion. (b) Velocity tomogram for the crosssection Well A-Well B.

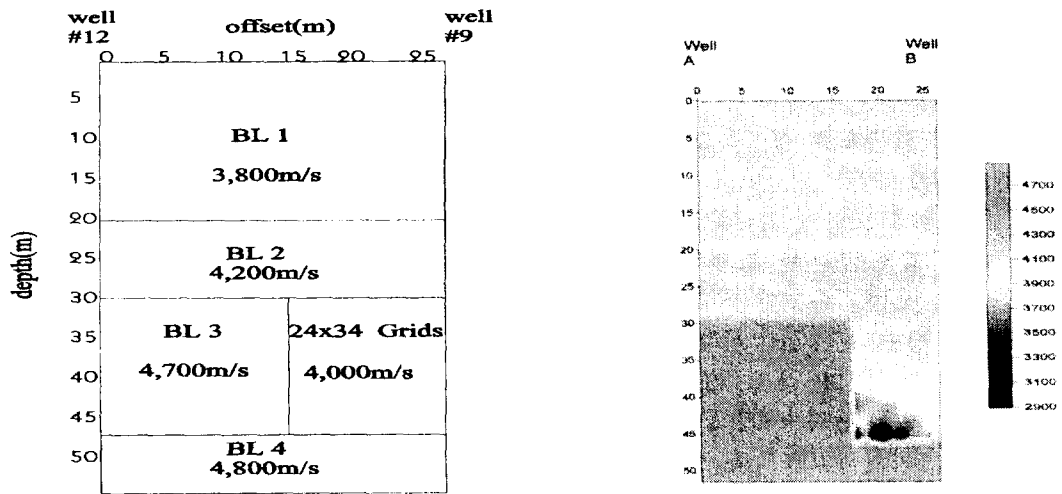


그림 5. (a) Initial velocity model for the tomographic inversion. (b) Velocity tomogram for the crosssection Well A-Well B.

빠르게 나타나는 것을 관찰할 수 있으며 이는 이들 파선이 통과한 부분 매질의 탄성과 속도가 증가했음을 나타낸다고 볼 수 있으며 이러한 현상은 충전효과를 분명히 나타내고 있다고 하겠다. 이 주행시간의 감소는 대략 평균 3% 정도이다. 그러나 측정 주행시간이 공대공 사

이의 시간이므로 실제 채굴영향권 주행구간에서의 감소만을 고려하면 실제로 이보다 큰 비율의 증가가 발생했다고 생각할 수 있다.

Monitor 데이터의 속도역산은 그림 5에 정의된 모델을 초기모델로 하여 반복역산법에 의하여 수행하였다. 그 이유는 역산의 주목적이 기준탐사에 의하여 정의된 채굴영향권(저속도 대) 내에서의 속도 변화 분포를 산출하기 위한 것이기 때문이다. 이 경우에도 기준탐사 경우와 마찬가지로 block 부분의 속도는 고정시키고 격자 부분의 속도 변화만을 허용하였다. 결과는 그림 5에 제시하였다. 예상했던 대로 저속도대의 속도가 기준탐사때(그림 4)보다 증가한 것을 볼 수 있다. 두 토모그램의 차이를(그림 5(b)-그림 4(b))보면 심도 30-40m 구간에서 200 m/s 이상의 속도 증가를 인지할 수 있다. 이 결과에 의하면 충전공정에 의하여 암반의 탄성과 속도가 대략 5% 이상 증가하였다고 볼 수 있다.

탄성과속도 변화에 의한 충전효과 분석

충진효과는 속도증가로서 나타났다. 이 효과 (200 m/s 속도증가)를 좀더 정량적으로 평가하기 위하여 porous media 에서 충전 물에 의한 간단한 탄성과속도 모델을 사용하였다. Wyllie 식에 의하면 탄성과 속도는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{1}{v} = \frac{\phi}{v_{fl}} + \frac{1-\phi}{v_r} \quad (1)$$

여기서 v 는 porous 매질의 속도, ϕ 는 porosity, v_r 과 v_{fl} 은 각각 암석과 충전물의 속도이다.

우선 cavity가 없는 부분 암석의 porosity 를 산출하기 위하여 다음의 값들을 사용하였다. 즉 암석의 속도를 6,000 m/s (실험실 측정값 참조, 안 대영 등, 1995), 물의 속도를 1,500 m/s, 채굴적이 없는 부분 매질의 속도를 4,600 m/s. 이들 값을 식 (1)에 대입하면 cavity가 없는 부분 암석의 porosity 는 대략 10% 정도이다.

다음으로 cavity volume을 계산하기 위하여, 식 (1)을 아래와 같이 변형하였다.

$$\frac{1}{v_c} = \frac{\phi_r + \phi_c}{v_{fl}} + \frac{1 - (\phi_r + \phi_c)}{v_r} \quad (2)$$

여기서 아래첨자 c, r, fl 은 각각 cavity, rock, fluid를 나타낸다. cavity 가 있는 부분의 탄성과 속도, v_c 를 3,800m/s, cavity porosity, ϕ_r 을 0.1 로하면, 위 식으로부터, cavity porosity ϕ_c 는 대략 9.3 % 가 된다.

모래로 cavity를 충전할 경우 최대로 cavity space 의 70% 정도 충전이 가능할 것이다. 이 수치는 구형입자를 정육면체 공간에 쌓았을 경우 빈 공간이 47.6 % - 25.96 % 라는 사실에 근거한 것이다 (Beaumont and Foster, 1987). 따라서 모래의 탄성과 속도를 5,700 m/s 으로 하면, 충전후의 최대 가능 탄성과 속도는 다음과 같이 산출할 수 있다.

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

위식으로부터 충전후 탄성과 속도는 4,113 m/s 이 된다. 따라서 위에서 가정한 cavity 모델

이 실제에 근사하다면, 채굴적 부분의 충진에 의한 예상 속도증가는 최대 310 m/s 정도일 것이다.

시추공 A-시추공 C crosswell survey

이 단면의 속도 분석도 위에서와 같은 방법으로, 우선 데이터 중 수평방향으로 진행한 기록들만을 발췌하여 심도에 따른 수평진과 속도의 변화를 관찰하였다. 시추공 A-시추공 C 단면상의 탐사는 단지 충진 이후에 실시하였으므로 충진효과를 직접적으로 평가할 수 있는 자료가 없어서 시추공 A-시추공 B 단면의 자료와 비교하였다. 역산결과에 의하면 지하 35m 하부에서는 시추공 A-시추공 B 단면보다 높은 속도를 보이며, 20-33m 구간에서는 다소 낮은속도를 보이며, 이러한 저속도 구간대의 낮은 속도분포는 이 단면이 시추공 A-시추공 B 단면 보다 더 큰 채굴의 영향을 받은 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 공대공 탄성과 연구는 채굴공동 충진효과 검증을 위하여 실시하였다. 충진이 암반의 탄성특성에 미친 영향을 암반을 통과하는 탄성파의 진과속도 변화를 검토 분석함으로써 평가하고자 하였다. 이번 연구에는 4개공 2개 단면에서 공대공 탄성과 자료를 취득하였으며, 이들 자료로부터 일차적으로 수평평균 속도를 직접 측정하였으며, 모든 기록의 초동주시를 사용한 반복 역산법으로 각 단면의 속도영상을 도출하였고, 영상에 나타난 단면의 속도분포를 채굴과 연계하여 해석하였다. 분석결과에 의하면 충진효과를 나타내는 속도증가를 분명히 확인할 수 있었다.

사 사

본 논문에서 사용한 CT 분석법은 과학재단 특정과제 지원에 의하여 개발된 방법으로 이 기관에 감사하며 또한 현장조사에 협조해주신 대한광업진흥공사 유영준박사, 벽산엔지니어링 직원 여러분, 서울대 대학원 조창수, 한현철, 조남대, 이지민 군에게 감사를 표한다.

참 고 문 헌

1. 안대영 등, 1995, 지하채굴에 따른 지반안정성 조사 평가: 벽산엔지니어링 주식회사.
2. 이두성, 1994, 유한차분법에 의한 파선추적 알고리즘: 한국자원공학회지, 150-155.
3. E.A. Beaumont and N. H. Foster, 1987, Reservoir I, properties: Treatise of petroleum geology reprint series No. 3: AAPG.
4. Doo Sung Lee, Veronica M. Stevenson, Phil F. Johnston, and C. E. Mullen, 1995, Time-lapse crosswell seismic tomography to characterize flow structure in the reservoir during the thermal stimulation: Geophysics, vol. 60, 660-666.