

경암 내 소규모 공동 탐지를 위한 시추공간 탄성파탐사 기법의 적용성 연구

고광범¹⁾ · 이두성²⁾

A Study on the Detection of Small Cavity Located in the Hard Rock by Crosswell Seismic Survey

Kwang Beom Ko¹⁾ and Doo Sung Lee²⁾

요 약 : 경암 내에 존재하는 소규모 공동 탐지를 목적으로 시추공 간 탄성파자료에 대한 주시 토모그래피 및 Kirchhoff 구조보정 기법의 적용 가능성을 고찰하였다. 주시 토모그래피의 경우 수치모델링을 통한 검토 결과, 소규모 공동(2m × 2m)에 기인한 초동변위 양은 대단히 작고(<0.125 msec) 초동변위가 관측되는 수신기 오프셋 범위도 조사영역 평균속도의 1%의 초동변위를 탐지가능 기준으로 보았을 때 4m 이내로 나타났다. 이로부터 초동변위를 성공적으로 발체하기 위해서는 적정 샘플링 간격 0.03125 msec, 자료획득 송수신 간격을 가능한 좁게 설정하여야 함을 확인하였다. 한편, 시추공 탄성파 자료에 대한 Kirchhoff 구조보정 기법을 수치모델링 자료에 적용, 탐지 가능성을 확인하고 이를 현장자료에 적용하였다. 시추공 간 탄성파 자료에 나타나는 직접파 및 각종 모드 변환파 제거를 위해 메디안 필터 및 주파수 대역필터의 조합을 적용함으로써 공동에 의한 회절신호를 분리하였다. 공동 송신원 및 중합 구조보정 단면을 작성하고 이로부터 Kirchhoff 구조보정 기법은 공동에 의한 회절신호를 성공적으로 분리하였을 경우 공동에 대한 정보도출이 가능함을 확인하였다.

주요어 : 소규모 공동, 주시 토모그래피, Kirchhoff 구조보정, 메디안 필터

Abstract : For the detection of small cavity in the hard rock, we investigated the feasibility of crosswell travel-time tomography and Kirchhoff migration technique. In travel-time tomography, first arrival anomaly caused by small cavity was investigated by numerical modeling based on the knowledge of actual field information. First arrival delay was very small (<0.125 msec) and detectable receiver offset range was limited to 4m with respect to 1% normalized first arrival anomaly. As a consequence, it was turned out that carefully designed survey array with both sufficient narrow spatial spacing and temporal (<0.03125 msec) sampling were required for small cavity detection. Also, crosswell Kirchhoff migration technique was investigated with both numerical and real data. Stack section obtained by numerical data shows the good cavity image. In crosswell seismic data, various unwanted seismic events such as direct wave and various mode converted waves were also recorded. To remove these noises and to enhance the diffraction signal, combination of median and bandpass filtering was applied and prestack and stacked migration images were created. From this, we viewed the crosswell migration technique as one of the adoptable method for small cavity detection.

Keywords : small cavity, travel-time tomography, Kirchhoff migration, median filter

서 론

지하 공동은 주로 석회암 지대에서 오랜 시간을 두고 점진적으로 발달하는 석회동굴 등 자연적으로 형성되는 경우와 지하자원 개발 등 특정한 목적에 따라 인위적으로 개발된 것으로 나눌 수 있다. 인위적으로 만들어진 공동 중 지하심부 경암 내에 위치하는 소규모 공동의 위치 및 규모를 파악하기 위한 물리탐사 기법의 적용성 연구는 흥미로운 주제이다.

소규모 공동탐지에 적용할 수 있는 탄성파 탐사기법으로서 는 토모그래피 기법과 공동에서 산란된 신호를 Kirchhoff 구조

보정 기법을 사용하여 영상화하는 방법을 생각할 수 있다. 공동탐지를 위한 토모그래피 기법 연구로서 Schneider 등(1991)의 축소모형 자료를 이용한 연구와 Kirchhoff 구조보정 기법 연구사례로서 탄성파 수치 모델링 자료에 대한 연구(Hu *et al.*, 1988) 등이 있으며 국내의 경우, 콘크리트 축소모형 실험(장현삼과 김중열, 1993)을 통한 적용 예 등이 발표된 바 있다.

본 연구에서는 시추공 탄성파 자료를 이용하여 경암 내에 존재하는 소규모 공동탐지 가능성을 고찰하고자 하였으며, 해석기법으로서 상호 보완적인 측면을 고려, 시추공 간 주시 토모그래피 및 Kirchhoff 구조보정의 두 가지 기법을 적용하였다.

*2003년 2월 5일 접수

1) 한성대학교 영상화기술 연구실(Imaging Technology Research Laboratory)

2) 한성대학교 정보시스템 공학부(Dept. of Information System Engineering)

주시 토모그래피의 경우, 소규모 공동모형에 대한 수치 모델링을 통하여 공동의 존재를 지시하는 초동변위의 양상 및 크기를 고찰하고 현장자료에서 발췌한 초동과 비교, 검토함으로써 성공적인 소규모 공동탐지를 위한 자료획득 기준을 정량적으로 제시하고 적용성을 검토하였다.

Kirchhoff 구조보정 기법에 의한 공동탐지 가능성을 살펴보기 위하여 탄성과 수치모델링을 통한 기법의 적용성을 확인하고 현장자료에 적용하였다. Kirchhoff 구조보정 기법에 의한 공동 탐지 가능성은 공동에 의한 이차적인 탄성과 회절신호의 성공적 분리 여부에 좌우되는 바, 특히 시추공간 자료의 경우, 오프셋에 따라 정도의 차이는 있어도 회절파는 직접파에 상당히 근접되어 기록되므로 직접파의 제거에 신중함이 요구된다. 현장자료에 포함되는 직접파, 튜브파 및 각종 모드변환 파를 제거하고 탄성과 신호인 회절반응을 분리하기 위해 메디안 필터 및 대역필터링 조합에 의한 전처리 과정을 거쳐 구조보정 단면을 작성하였다. 회절신호가 성공적으로 분리되었을 경우, 구조보정 단면은 공동의 위치를 도출함을 확인함으로써 Kirchhoff 구조보정 기법의 적용 가능성을 검증하였다.

자료 획득

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 시추공간 탄성과 자료획득 배열이다. 송신원은 P파 발생 장비로서 OYO사의 OWS™, 수신기는 전중폭 24채널 하이드론폰을 이용하였으며 시추공간 간

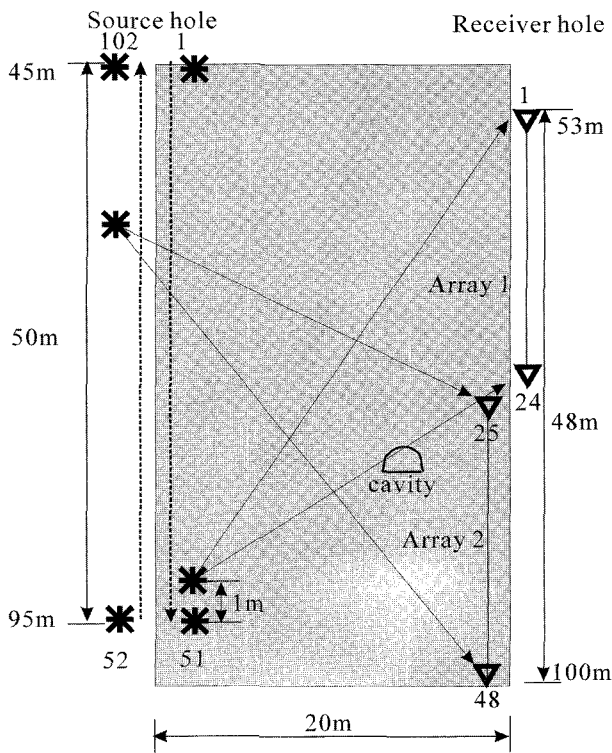


Fig. 1. Data acquisition geometry for the detection of small cavity.

격은 대략 20m, 송신원 및 수신기 간격은 각각 1m이다. 연구 대상지역 부근 경암의 속도분포는 4400~5200 m/sec, 공동에 대한 정보로서 크기는 2m×2m, 위치는 심도가 80m, 수평적 위치는 송신원을 기준으로 약 14m 거리에 존재하는 것으로 알려졌다. 공동을 기준으로 충분한 오프셋을 가지는 자료를 획득하고자 수신기 배열을 심도 53m~76m, 77m~100m 두 축선을 설정하였으며 각 배열당 심도 45m~95m에 걸쳐 102개의 0.125 msec 샘플링 간격을 가지는 시추공간 탄성과 자료를 획득하였다.

획득 자료에 대한 주파수분석 결과 탄성과 자료의 최대 유효주파수(dominant frequency)는 대략 1500 Hz로서 이에 따른 P파의 파장은 3m에서 3.5m 정도이다. 이 경우 본 연구의 탐지대상인 2m×2m 크기의 공동에 의한 탄성과 반응은 회절로서 설명된다. 따라서 본 연구에서, 공동의 크기에 관련된, '소규모'라는 용어의 정의를 탄성과의 주 파장(dominant wavelength)에 비해 같거나 작은 경우로 상정하여 논의를 진행하였다.

주시 토모그래피에 의한 소규모 공동탐지 가능성

주시 토모그래피는 송신원에서 발생하여 수신기에 도달한 초동으로부터 매질의 속도를 재구성한다. 따라서 공동탐지를 위한 주시 토모그래피가 실효를 거두기 위해서는 초동이 공동에 대한 정보, 즉 공동과 주변매질 간의 속도차에 기인한 국부적인 초동의 변화(초동변위)를 포함하고 있어야 한다. 배경 매질로서 경암은 탄성과의 감쇠가 크지 않아 고주파수의 탄성과 성분의 손실이 적은 장점이 있는 반면 경암은 빠른 탄성과 속도로 파장이 크므로 초동발체시 신중함이 요구된다. 결국 주시 토모그래피의 공동탐지 성패는 공동의 정보를 포함하는 초동변위의 크기 및 그를 포함하는 수신기 오프셋 범위가 불균질한 속도 등 지질학적 요인, 초동발체 등 자료처리 과정에서 발생하는 오차보다 크기에 달려있다.

경암 내 소규모 공동에 의한 초동변위의 크기 및 관측되는 수신기 오프셋의 범위를 살펴보기 위해 알려진 현장정보를 토대로 배경매질 속도 4600 m/sec, 심도 80m의 2m×2m 크기, 수평위치가 송신원에서 14m 떨어진 공동모형을 상정하고 유한차분법을 이용한 파선추적(Qin et al., 1992)에 의해 구한 초동을 Fig. 2에 도시하였다.

초동변위의 절대 크기를 살펴보기 위해 공동모델과 동일한 배경속도를 가지는 균질모델에 대한 초동을 뺀 결과를 심도 46m부터 2m 간격으로 도시한 결과가 Fig. 2-a)이다. 소규모 공동에 의한 초동변위는 수신기 오프셋 전 범위에 걸쳐 약 0.125 msec 이하이다. 따라서 초동변위를 도출하기 위해서는 자료획득 시 샘플링 간격은 최대 초동변위를 0.125 msec로 하였을 때 그 절반인 최소 0.0625 msec가 되어야 한다. 더구나 공동을 기준으로 ±10m 이내의 수신기 오프셋에 따른 초동변

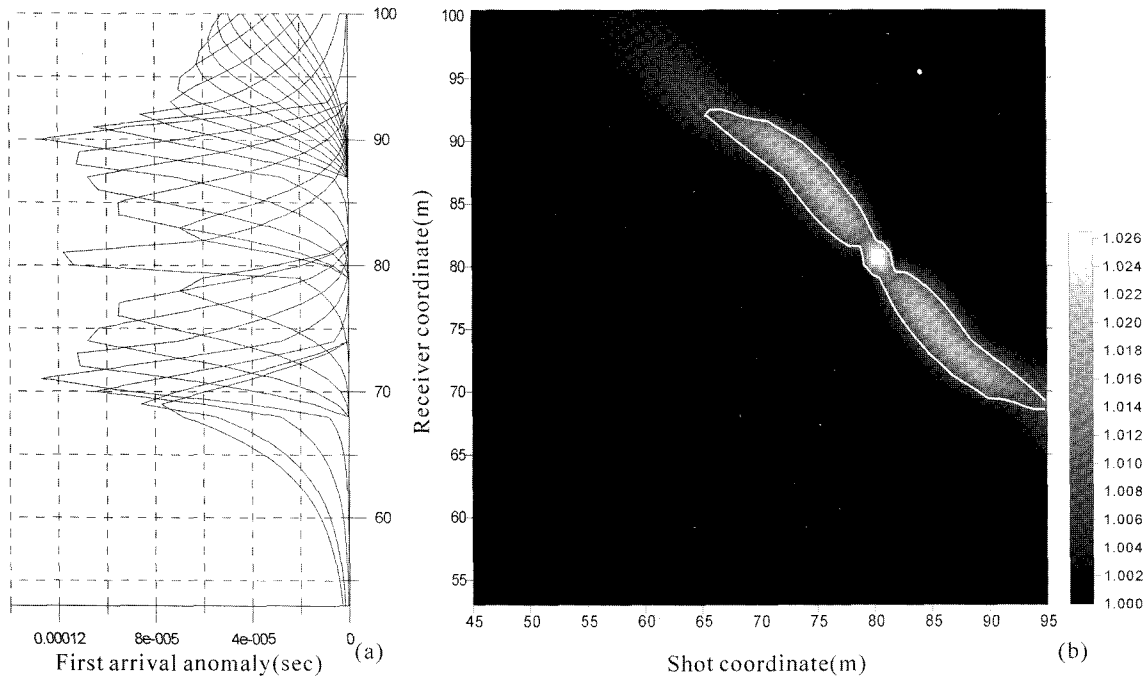


Fig. 2. First arrival plot by ray tracing method (Qin, 1992). First arrivals are calculated with void cavity (size of 2m×2m) model and homogeneous model respectively.

Background velocity is set to 4600 m/sec.

(a) First arriva anomaly plot by subtraction. (b) First arrival anomaly plot by normalization.

위 분포범위가 대략 0.06 msec 안팎인 점까지를 감안하면 ±10m 오프셋 범위에서 소규모 공동에 의한 초동변위를 정확히 발체하기 위해서는 0.03125 msec 정도의 샘플링 간격이 요구됨을 알 수 있으며 만일 요구되는 샘플링 간격이 기록기의 성능을 초과할 경우, 리샘플링과 같은 적절한 자료처리 과정이

필요하다.

Fig. 2(b)는 초동변위를 관측할 수 있는 수신기 오프셋 범위를 살펴보기 위한 것으로 공동모델에 의한 초동을 균질한 속도모델에 의한 값으로 정규화시켜 송수신 좌표에 따라 도시한 것이다. 공동탐지가 가능한 정규화된 초동변위의 기준을 1%

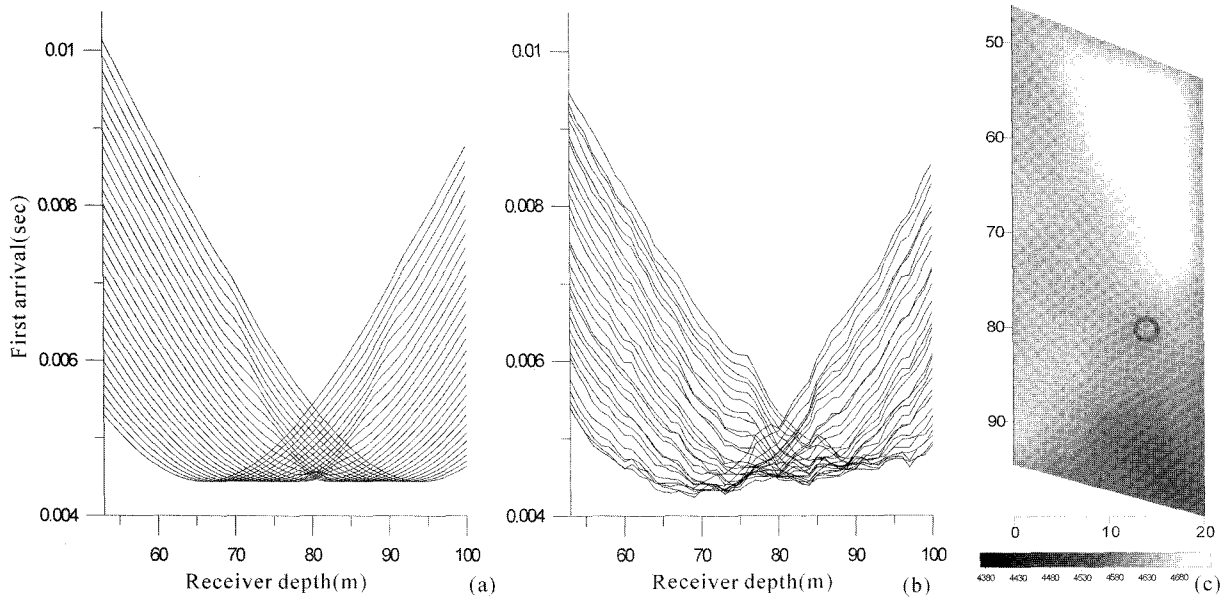


Fig. 3. Comparison of first arrival with theoretical (a) and raw data (b). Tomogram by travel-time tomography (Shin *et al.*, 2002) with picked data of (b) is also displayed (c).

(그림에서 실선으로 표시)로 하였을 때 발체 가능한 오프셋범위는 공동위치를 기준으로 최대 $\pm 15\text{m}$ 정도이며 초동범위를 파악할 수 있는 트레이스 수는 최대 5개로서 4m 수신기 오프셋을 넘지 못함을 알 수 있다. 이는 곧 자료획득 시 송수신 간격을 가능한 좁게 설정할수록 유리함을 의미한다.

Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)는 이론 결과와 실제 현장자료를 비교하고자 Fig. 2의 이론 초동치와 현장자료의 발체 초동치를 도시한 것이다. 아울러 Fig. 2(b)의 발체 초동을 이용한 주시 토모그래피(신동훈 등, 2002; 고광범과 이두성, 2002)에 의한 토모그램을 Fig. 3(c)에 도시하였다. Fig. 3의 (a)와 (b)를 대비하였을 때 (b)에서 심도에 따라 초동이 점진적으로 증가하는 전체적인 양상 외에는 공동에 기인한 초동변위는 뚜렷이 관측되지 않는데, 이는 불균질한 배경매질의 속도 등 지질적 요인과 자료획득시 소규모 공동탐지가 가능할 정도의 충분한 정밀도를 보장하는 적정 송수신 및 샘플링 간격의 불충분한 설정, 그리고 초동 발체 오차 등이 복합적으로 작용한 결과로 판단된다.

일반적으로 주시 토모그래피의 분해능은, 일차 프레넬영역, 즉 탄성과 파장 및 시추공간 거리와의 곱의 제곱근에 의해 근사적으로 구할 수 있다(Williamson and Worthington, 1993). 본 연구에서 획득한 탄성과자료를 살펴보았을 때 주주파수 1500 Hz, 평균속도 4600 m/sec이므로 주시 토모그래피의 최소 분해능은 약 8m 정도로서 주시 토모그래피 기법의 분해능 한계에 따른 탐지의 어려움도 가지고 있다고 보여진다. Fig. 3(c)의 토모그램을 살펴보았을 때 공동의 위치 부근에 약한 이

상대는 존재하나 이것이 공동의 위치정보를 나타낸다고 판단을 내리기는 어렵다고 판단된다. 결론적으로 위에 언급한 바와 같이 샘플링 간격 및 정밀한 배열에 따른 자료획득은 소규모 공동탐지를 위한 필요조건에 해당하며, 이어서 미소한 초동변위를 포착할 수 있을 정도의 정교한 초동발체가 이루어졌을 때 토모그래피 기법이 실효성을 가질 수 있는 충분한 조건이 만족될 수 있다. 이에 비추어 볼 때 주시 토모그래피의 공동탐지에의 적용성에 대한 보다 객관적인 판단은 적정 샘플링 간격 및 배열을 재설정하고 이에 의한 시추공 탄성과자료의 재획득 및 고찰 후 보다 심도있는 논의가 가능하다고 사료된다.

Kirchhoff 구조보정에 의한 소규모 공동탐지 가능성

소규모 공동에 대한 탄성과 반응은 회절로 나타나며 획득자료에서 공동에 기인한 회절신호를 성공적으로 분리할 수 있다면 시추공 간 구조보정 기법으로서 공동의 정보 도출이 가능하다.

본 연구에서는 합성탄성과 자료에 대하여 시추공 간 Kirchhoff 구조보정(Timoshin, 1970; Qin, 1993)의 적용성을 검토하고 현장자료에 적용하여 공동탐지 가능성을 고찰하였다. Kirchhoff 구조보정 기법의 적용에는 심도단면상의 임의의 위치에 대해서 송신원 및 수신원에서의 주시가 요구되는 바, 여기에서는 유한차분법을 이용한 파선추적 알고리즘(Qin et al.,

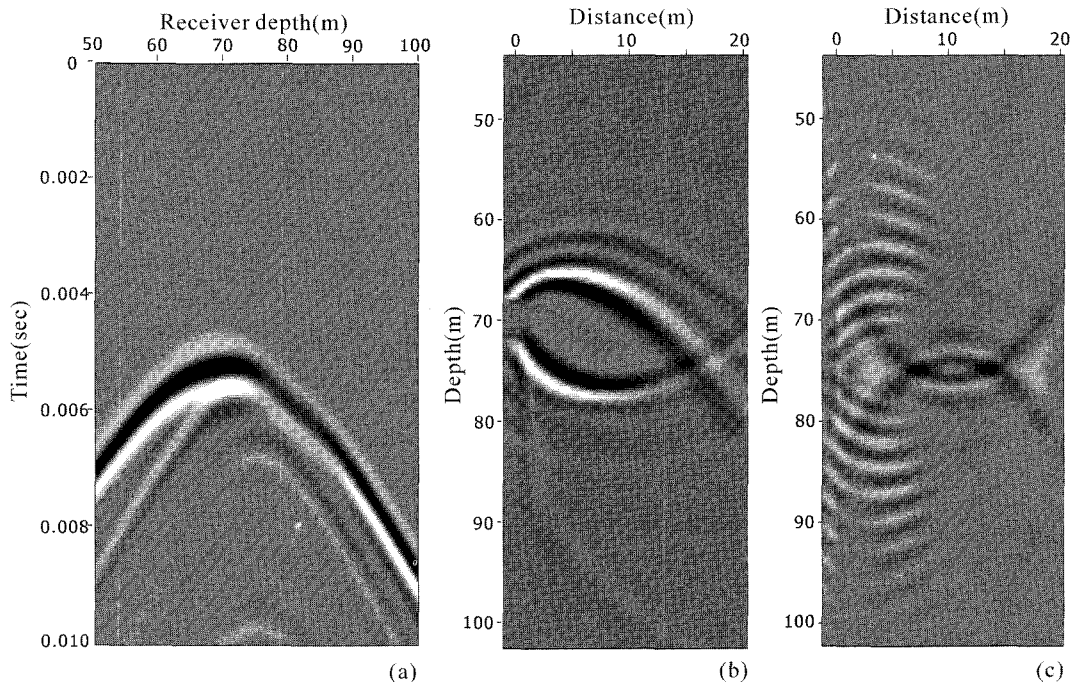


Fig. 4. Acoustic synthetic seismogram and migration image. Shot and receiver interval is set to 3m and 0.2m respectively. (a) Synthetic common shot gather with shot location 70m. (b) Partial migration image by common shot gather. (c) Stacked migration image with 17 shot gathers.

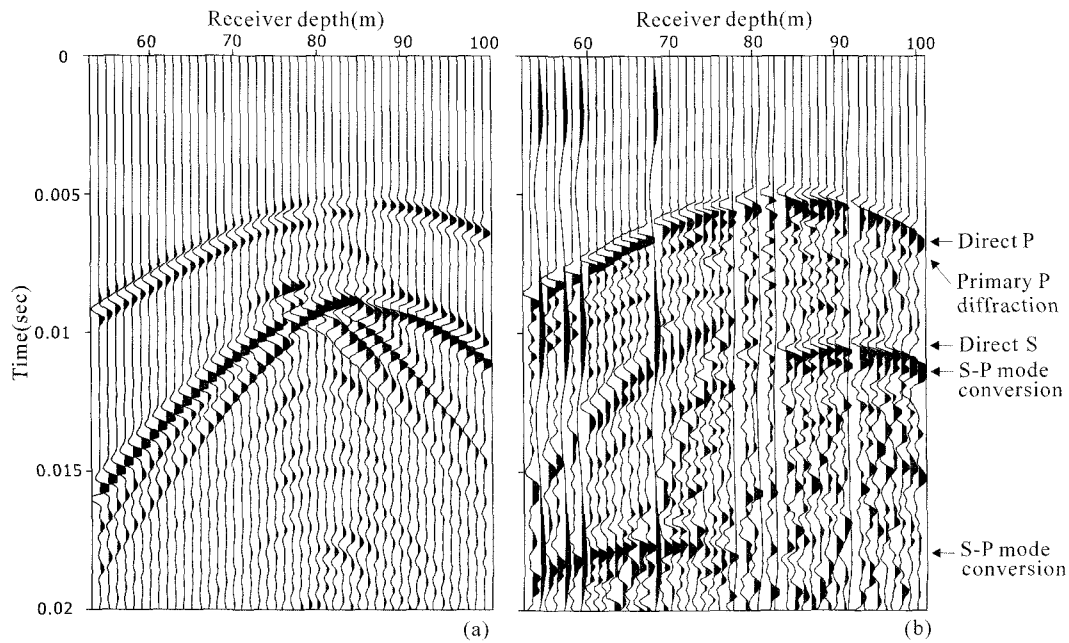


Fig. 5. Comparison of synthetic and raw common shot gather. Void cavity (2m×2m) is located at depth of 80m. (a) Elastic synthetic seismogram with background velocity 4600 m/sec. (b) Raw data.

1992)를 이용하였다.

시추공간 구조보정 기법의 소규모 공동탐지에의 적용성을 고찰하고자 acoustic 수치모델링(Xu *et al.*, 1991)에 의한 17개의 공동발파점 자료를 작성하였다(Fig. 4). 공동모델은 배경속도 4600 m/sec, 송수신 간 거리 20m 및 수신점의 간격은 0.2m로 하나의 공동발파점 자료는 심도 50m에서 101m까지 총 261개의 트레이스로 구성된다.

Fig. 4(a)는 심도 70m에서의 공동발파점 자료 일레이며 대응하는 Kirchhoff 구조보정 단면을 그림 4(b)에 도시하였다. 그림 4(c)는 최종적으로 공동에 의한 회절신호만을 추출한 17개의 공동 발파점 자료의 구조보정 결과를 중합한 구조보정 단면으로서 수평방향의 커버리지가 낮은 시추공 간 자료획득 배열로 인해 수평방향으로 스미어링된 것을 제외(Wu and Toksöz, 1992)하고는 공동을 성공적으로 영상화한 결과를 보여준다.

한편, 현장에서 획득한 시추공 간 탄성과자료는 직접파로서 P파와 S파, 그에 따른 각종 모드변환된 파들이 함께 기록된다. 이를 살펴보기 위하여 Fig. 5에 Fig. 2에서의 공동모델을 토대로 작성한 Elastic 수치모델링(Virieux, 1986)에 의한 결과(수평 성분 변위) 및 대응하는 공동 발파점 현장자료를 대비하여 보았다.

공동에 의한 탄성과 반응양상 고찰이 주된 관점인 점에 비추어 볼 때, 두드러진 차이점은 합성탄성과 기록의 경우, 공동을 통과하는 파형의 뚜렷한 감쇠를 보이는 반면 현장자료는 감쇠가 거의 관측되지 않는 점이다. 또한 직접 S파의 공동에 의한 변환파(합성탄성과 기록의 S-S 모드변환 파)도 현장자료에서의 관측이 힘들다. 이는 자료획득 시 사용된 송신원이 근

본적으로 P파 발생원(유영준, 2002)인 OYO사의 OWS™과 수신기로서 하이드로폰을 사용하였으므로 송수신 시추공에서 모드변환에 의한 에너지 손실에 기인한 것이라 판단된다. 따라서 본 연구에서는 직접 P파에 기인한 회절신호를 분리하는 데 초점을 맞추었다. 한편 합성탄성과 기록에 나타나지 않는 파는 송신원/시추공에 기인한 S-P 모드변환파로서 이를 구현하기 위해서는 송수신원/시추공을 포함하는 파동장 모사(wavefield simulation, Van Schaack, 1992)가 필요하다.

Kirchhoff 구조보정에서의 신호는 공동에 의한 회절파이므로 그 이외의 각종 탄성과 이벤트는 적절한 자료처리 방법으로 제거하여야 한다. 시추공 간 탄성과 자료에 대한 Kirchhoff 구조보정 기법 적용시 부딪히는 가장 큰 어려움은 일반적인 대부분의 시추공 간 탄성과자료의 경우 공동에 의한 회절파가 직접파에 바로 인접하여 수신기에 도달한다는 점이다. 따라서 공동탐지를 위한 시추공 간 구조보정 기법의 적용성 여부는 직접파를 효과적으로 제거함으로써 회절신호만을 분리해 내는 자료처리 과정에 좌우된다.

직접파를 제거하는 데는 웨이블릿 필터링(Xu, 1993)이나 층계함수 통과특성을 가지는 메디안 필터링(장현삼과 김중열, 1993; 장현삼과 김정호, 1994)이 주로 이용되며 본 연구에서는 메디안 필터링을 적용하였다.

Fig. 6은 메디안 필터를 이용하여 튜브파와 직접 P파를 제거, 회절신호를 강조하는 자료처리 과정을 보여주는 일례이다. Fig. 6(a)는 자동이득을 거친 심도 90m의 공동수신점 취합자료로서 각종 탄성과 이벤트 외에 튜브파가 우세한 전형적인 시추공 간 탄성과자료의 특징을 보여준다. 13점 메디안 필터

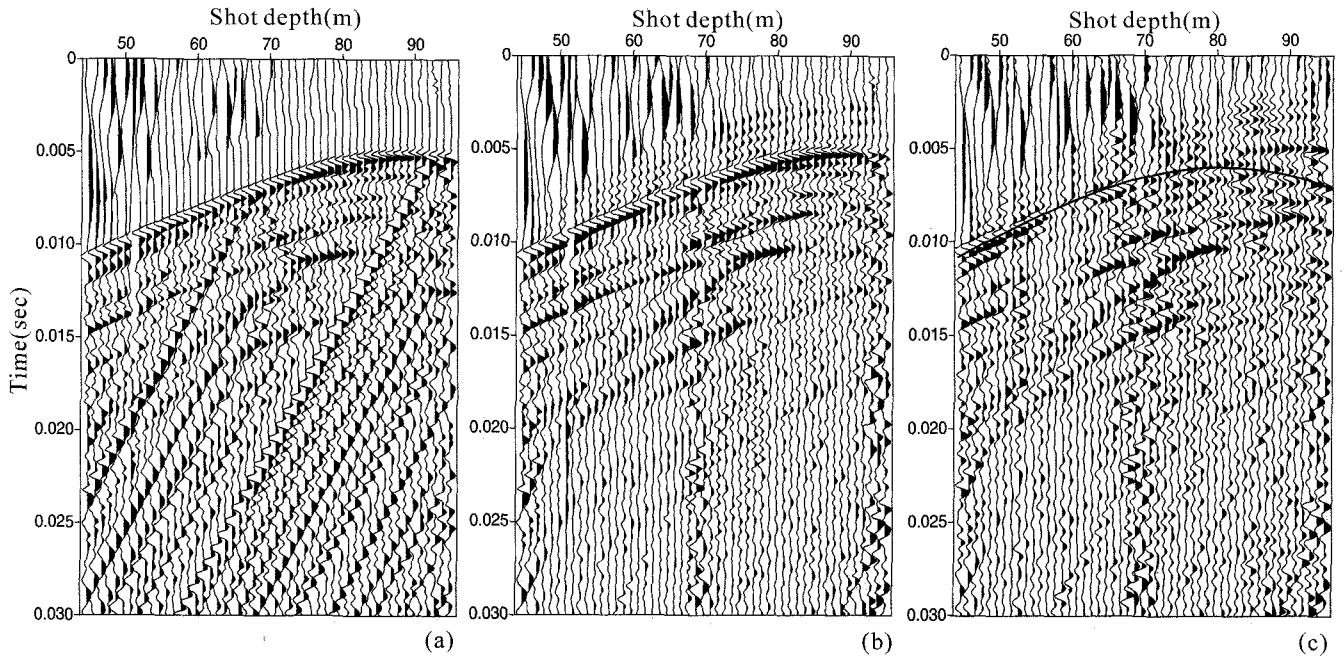


Fig. 6. Data processing steps for the extraction of diffracted P signal.

(a) Common receiver gather. Receiver depth is 90m. (b) Elimination of tube waves by median filtering. (c) Suppression of direct P waves by median filtering.

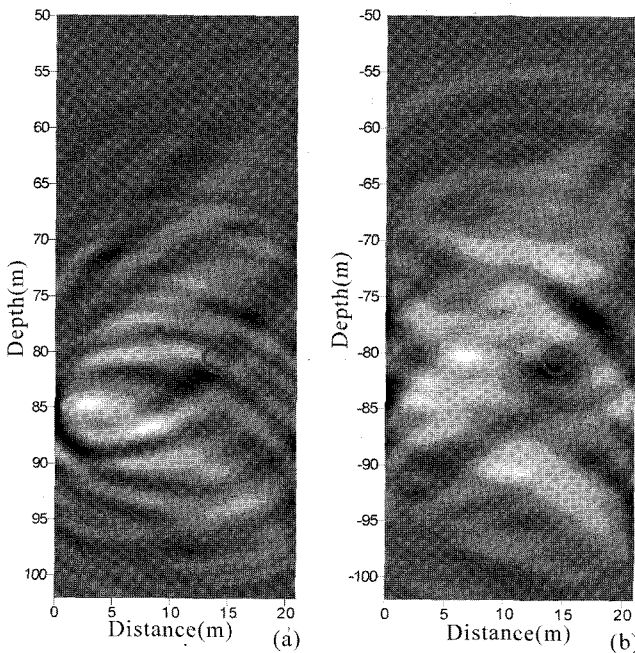


Fig. 7. Partial and stacked migration image. The result of Fig. 3-(c) is used as a migration velocity.

(a) Partial image for the source location 85m. (b) Stacked image using 27 shot gathers.

링 및 대역필터링 조합을 적용하여 튜브파 및 직접 P파를 제거한 결과를 Fig. 6(b) 및 (c)에 도시하였다. 직접파에 인접하여 회절파가 존재하므로 직접 P파의 신중한 초동발체가 요구되며 직접파를 제거함으로써 가려져 있던 80m 심도에서 침점

을 가지는 회절신호가 강조되었음을 알 수 있다.

이상의 자료처리 과정을 거쳐 시추공 간 구조보정 단면을 작성하였다. Fig. 7(a)는 심도 85m의 하나의 공동발파점 자료에 대한 Kirchhoff 구조보정 단면을 나타낸 것으로서 회절신호가 미약한 만큼 공동의 위치를 파악하기 힘들다. Fig. 7(b)는 회절신호의 분리가 양호한 심도 69m에서 95m까지의 27개의 공동발파점 자료의 구조보정 단면을 중첩하여 구한 영상단면이다. 보다 명확한 공동 영상을 보여주고는 있으나 이로부터 만일 사전정보가 없을 경우에도 공동의 존재를 정확히 파악할 수 있을 정도로 충분히 큰 진폭을 나타내지는 못하고 있다. 이의 가장 근본적 이유는 다른 이벤트에 비해 공동에 의한 회절신호가 상당히 미약하다는 것에 기인한다. 장현삼과 김중열(1993)은 공동에 수평한 방향으로의 SH 탄성과 송신원이 가장 강한 탄성과 회절신호를 발생시킨다고 발표한 바 있다. 결론적으로 만일 공동에 의한 회절신호의 성공적 분리가 가능하다면 시추공 간 구조보정 기법의 공동탐지에의 적용성은 충분하다고 판단되나 이를 보다 객관적으로 확인하기 위해 적절한 탄성과 송신원, 직접파에 인접하는 회절신호를 효과적으로 분리하기 위한 인라인 등 여러 가지 축선배열 등을 고려한 자료 재획득 및 검토가 필요하다고 판단된다.

결론

본 연구에서는 경암 내에 존재하는 소규모 공동 탐지 가능성을 검토하고자 시추공 간 탄성파자료에 대한 주시 토모그래

피 및 Kirchhoff 구조보정 기법의 적용성을 고찰하였다.

주시 토모그래피의 경우, 소규모 공동모형에 대한 수치 모델링을 통하여 공동의 정보를 포함하는 초동변위의 양상 및 크기를 고찰하고 현장자료에서 발췌한 초동과 비교, 검토하였다. 이로부터 적정 샘플링 간격은 0.03125 msec, 초동변위는 공동의 위치를 기준으로 $\pm 15m$ 이내 오프셋범위에 걸쳐 있으므로 이를 포착하기 위해서는 자료획득 송수신 간격을 가능한 좁게 설정하는 것이 필요함을 확인한 바, 본 연구에서 사용한 탄성파 자료는 송수신 및 샘플링 간격이 소규모 공동탐지가 가능할 정도의 충분한 정밀도를 보장하기에는 미흡하다고 판명되었다. 따라서 이 기법의 적용성 여부는 자료의 재획득 및 검토 후 판단할 수 있을 것으로 생각된다.

또한 Kirchhoff 구조보정 기법의 공동탐지에의 적용성을 살펴보고자 수치모델링 자료에 적용, 탐지 가능성을 확인하고 이를 현장자료에 적용하였다. 메디안 필터링 및 대역필터링 조합을 적용하여 튜브파 및 직접 P파를 제거, 가려져 있던 회절신호를 강조하고 구조보정 단면을 작성하였다. 이로부터 공동에 의한 시추공 간 구조보정 기법의 공동탐지에의 적용성은 충분하다고 판단되나 회절신호는 상당히 미약한 근본적인 문제점으로 인해 공동에 대한 사전정보가 없는 경우에도 일반적으로 정보도출이 가능할 정도의 충분한 분해능을 가지는 구조보정 단면은 보여주지 못한 바, 보다 객관적인 판단을 위해서 적절한 탄성파 송신원, 시추공간 외의 다양한 축선배열 등을 고려한 자료 재획득 및 검토가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국가지정 연구실 사업(NRL) 과제 “탄성파 영상화 연구개발 및 응용”의 일부이다. 한국과학기술기획평가원(KISTEP)의 재정지원에 감사를 드린다.

참고문헌

고광범, 이두성, 2002, 최적 토모그램 도출을 위한 시추공간 파선 토모그래피 사례연구: 한국자원공학회지, **39(4)**, 266-272.
신동훈, 고광범, 박재우, 지준, 이두성, 2002, 리눅스용 GUI 시추

- 공 탄성파 토모그래피 시스템 개발: 물리탐사, **5**, 150-156.
유영준, 2002, Personal communication.
장현삼, 김정호, 1994, 다중채널 방향성 중앙값 필터와 그의 응용: 한국자원공학회지, **31(6)**, 559-564.
장현삼, 김중열, 1993, 다중모드 시추공 구조보정에 의한 다성분 시추공-시추공 반사파 자료처리(II): 한국자원공학회지, **30**, 367-376.
Hu, L., McMechan, G. A., and Harris, J. M., 1988, Acoustic prestack migration of crosshole data: *Geophysics*, **53**, 1015-1023.
Qin, F., Luo, Y., Olsen, K. B., Cai, W., and Schuster, G. T., 1992, Finite-difference solution of the eikonal equation along expanding wavefronts: *Geophysics*, **57**, 478-687.
Qin, F., 1993, A Constrained Kirchhoff Migration of Crosswell Seismic Data: *University of Utah Tomography Project*, 1993 mid-year report, 77-106.
Schneider, W. A., and Balch, A. H., 1991, Tomographic inversion as a tunnel detection tool: A three dimensional physical modeling feasibility study: *61th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts*, 656-659.
Timoshin, Y. V., 1970, New possibilities for imagery: *Soviet Physics-Acoustics*, **15**, 360-367.
Van Schaack, M. Harris, J., Rector, J., and Lazaratos, S., 1992, High resolution crosswell imaging of a West Texas Carbonate Reservoir, Part 2 Wavefield simulation and analysis: *Seismic tomography project*, Stanford, 3, Paper B.
Virieux, J., 1986, P-SV wave propagation in heterogeneous media: Velocity-stress finite difference method: *Geophysics*, **51**, 889-901.
Williamson, P. R., and Worthington, M. H., 1993, Resolution limits in ray tomography due to wave behaviour: Numerical experiments: *Geophysics*, **58**, 727-735.
Wu, R. S. and Toksöz, M. N., 1987, Diffraction tomography and multisource holography applied to seismic imaging: *Geophysics*, **52**, 11-25.
Xu, J., 1993, Wavelet filtering of tube and direct waves in seismic data: *University of Utah Tomography Project*, 1993 Annual report, 221-244.
Xu, J., Sun, Y., and Schuster, G. T., 1991, Numerical solution of the acoustic wave equation for irregular free surface boundaries: *University of Utah Tomography Development project*, 1991 mid-year report, SLC, UT.