

지하공동지역에서 시추공간 탄성파 토모그래피 탐사자료의 진폭특성 분석 : 사례연구

Amplitude Characteristics Analysis of Crosswell Seismic Tomography Data in Underground Cavity

서 기 황(Ki Hwang Seo)*	한국지반물탐센터
유 영 철(Young Chul Yu)	충남대학교 지구물리연구실
유 영 준(Young Jun You)	광업진흥공사 물리탐사처
송 무 영(Moo Young Song)	충남대학교 지구물리연구실

요약 / ABSTRACT

폐갱도 지역에 형성된 지하공동과 그 주변에 발달된 파쇄대에서 공동공 탄성파 토모그래피 탐사의 신호변화를 해석하였다. 지하 공동과 파쇄대 주변에서는 초동시간의 지연과 에너지 감쇠 현상이 뚜렷하였고 파선의 우회현상으로 파선의 밀도가 저하되었다. 신선한 암반과 공동 주변을 통과한 트레이스에 대한 진폭스펙트럼 분석 결과 1000Hz정도의 주파수 범위까지는 진폭의 변화를 보이고 있지는 않으나, 2000Hz 정도에서는 공동 주변을 통과하는 것이 7dB 정도의 낮은 차이를 보이며, 3000Hz에서는 거의 20dB 정도까지 차이를 보인다. 본 연구를 통하여 탄성파 토모그래피 탐사를 이용한 신선한 암반과 지하 공동주위의 탄성파 자료 특성을 해석하였다.

주요어 : 지하공동, 탄성파 토모그래피, 탄성파 신호, 시간지연, 파선밀도

We interpreted the seismic signal characteristics from crosswell seismic tomography in the underground cavity like abandoned mines. The first arrival time delay and amplitude attenuation showed clearly at the low velocity zone of cavity and fracture. Also ray density decreased by detour of raypath. As a result of the amplitude spectrum analysis of fresh rock and low velocity zone, there were no noticeable differences of the amplitude up to about 1000Hz frequency, but indicated that the one passed around cavity decreased about 7dB at 2000Hz, and 20dB at 3000Hz. It was possible to compare the signal characteristics between two media by extracting the signal data from the fresh rock zone and the underground cavity through the seismic crosswell tomography.

Key Words : underground cavity, seismic tomography, seismic signal, time delay, ray path density

* Corresponding author: coda9@cnu.ac.kr

서 론

탄성과 토모그래피 탐사는 시추공내 진원점에서 생성된 탄성파의 물리적 특성을 다른 시추공내에 설치된 많은 수신점에서 기록하여 초동주시 (first travel time), 초동부분의 진폭(amplitude), 전체파형(full waveform) 등을 이용하여 지하구조를 도출하는 영상화 기술이다. 일반적으로 가장 널리 사용되고 보편화된 공대공 탄성과 토모그래피 탐사(crosswell seismic tomography)는 초동주시를 이용하여 2개의 시추공 사이에 속도 단면을 영상화한 토모그램으로부터 지하구조를 정밀하게 해석할 수 있기 때문에 최근 국내에서는 터널, 댐, 교량 등 대형 건축 구조물 관련 지반안정성 평가 조사, 지하 공동이나 폐갱도, 단층, 파쇄대 등의 연약 지질구조대 조사에 활용되고 있다.

토모그래피를 이용하여 파쇄대와 같은 저속도대를 규명한 예는 Liu 와 Crampin(1991)의 공대공 탄성과 탐사를 이용한 천부 파쇄대 연구, Jung 등(1991)의 고분해능 공대공 탄성과 토모그래피를 이용한 암염 지대에서의 파쇄대 연구와, Tura(1992)의 회절 토모그래피 응용 연구 등이 있다. 조사 지역과 유사한 방법으로 수행된 외국의 논문 중 Rehtien 등(1995)은 터널의 축을 중심으로 발진기와 수신기를 20cm간격으로 한 공대공 토모그래피 탐사를 실시하였고 이 자료로부터 최소시간을 따라 전파하는 파선경로를 추출하여 터널에서의 진폭감쇠를 확인한 바 있다. 본 연구에서는 비록 수신기 및 발진기 간격이 Rehtien 등(1995)의 연구 방법과 비교할 때 비교적 넓었으나 보다 다양한 공동 및 파쇄대가 인지되는 자료를 최대한 수렴하여 신호 특성 파악에 중점을 두어 연구하였다. 또한 국내에서는 최초로 1990년 경북 상주 소재 제림 탄광에서 국내 기술진에 의해 경암 및 단층 주위 파쇄대 분포를 규명하려는 시도를 시초로(Kim et al., 1994), 채굴 공동의 충전 효과 검증(이두성, 1998)등 여러 연구의 발전 및 다양한 탐사지역에 사용되고 있다.

본 연구는 폐갱도로 인하여 생성된 지하공동을 중심으로 하여 양단에 배치한 2개의 시추공 사이에서 획득한 탄성과 트레이스로 부터 초동주시, 진폭의 감쇠특성을 분석하였다. 그리고 지하 공동

에 의한 영향 즉 시간지연, 진폭 감쇠정도, 파선 밀도의 변화 등을 해석하여 공동 크기에 따른 탄성파의 거동을 예측하고 지하공동의 탐지에 신뢰성을 확보하고자 하였다.

본 연구 지역의 지질은 경기편마암복합체의 일부로서 선캠브리아기의 흑운모호상편마암으로 구성되어 있다. 특히 본 조사지역은 과거의 광산개발로 지하에 폐갱도와 채굴적 등의 지하 공동이 분포하며 현재 이의 위치와 규모를 파악하고자 시추공을 공동의 양단에 배치하였다.

자료취득 및 전처리

탐사지역 시추공 상황

탐사지역의 시추공은 총 12개로써 시추심도는 100m에서 120m내외로 직경은 NX 크기의 75.4mm 이다. 일부의 시추공은 다른 연구의 일환으로 공내 디지털 광학 촬영 용도의 아크릴 관(외경 $\Phi 70.0\text{mm}$)이 설치되어 있었으며, 강철제 관(외경 $\Phi 74.0\text{mm}$)으로 구성된 케이싱이 전 시추공에 설치되어 있었다. 그러나 케이싱과 공벽사이의 간격이 1~2mm 내외였으므로 밀착성이 거의 완벽하다고 판단되어지므로 이로 인한 에너지 전파 감쇠 현상은 적을 것으로 판단되었다. 따라서 그라우팅과 같은 케이싱과 공벽의 밀착도를 높이기 위한 부수적인 설치 보완 작업은 이루어지지 않았고 실제 자료의 S/N비는 매우 높게 기록되었다. 시추공 중 본 연구에는 탄성과 속도 역산 결과 공동의 형태가 가장 잘 나타난 2개의 공에서 획득된 자료를 이용하였으며, 그 조사심도는 116m에 이른다.

탄성파 자료의 취득

탐사자료의 취득조건은 채취시료수 2048, 시료채취 간격 $125\mu\text{s}$, 기록시간 256ms이다. 따라서 시료채취 간격으로 기록할 수 있는 최대의 주파수 즉, 나이퀴스트 주파수는 4000Hz가 된다. 그리고 수신점 및 진원점은 자연 지하수의 하부에 각각 1.0m 간격으로 설치하여 측정하였다.

Fig. 1 은 필터링전의 원시 탄성파 자료를 공통

수신점모음에 의해 나타난 위글트레이스이다. 공동수신점 모음을 실시한 심도는 하이드로폰 위치로 주상도상으로 신선한 암반인 심도 93m 부분이다. 기존 폐갱도 자료상에 나타난 공동이 위치하는 부분(Fig. 1. A)에서 초동지연 및 진폭감쇠가 잘 나타나고 있으며 특히 발진위치 번호로 볼 때 88m 근처에서 가장 심한 초동의 지연 및 진폭감쇠가 나타난다. 역산시 초기 자료의 질을 가늠할 수 있는 초동의 발체는 Fig. 1에서와 같이 대역필터를 사용하기 전인 원시 자료에서도 발체가 수월할 만큼 초동이 잘 나타났고, 조사심도 / 공간거리 (116m / 23.4m)가 4.95로 비교적 큰 편이므로 ray coverage가 다양한 각도로 구성되어, 본 자료가 높은 S/N 및 지하정보를 갖고 있는 것으로 판단된다.

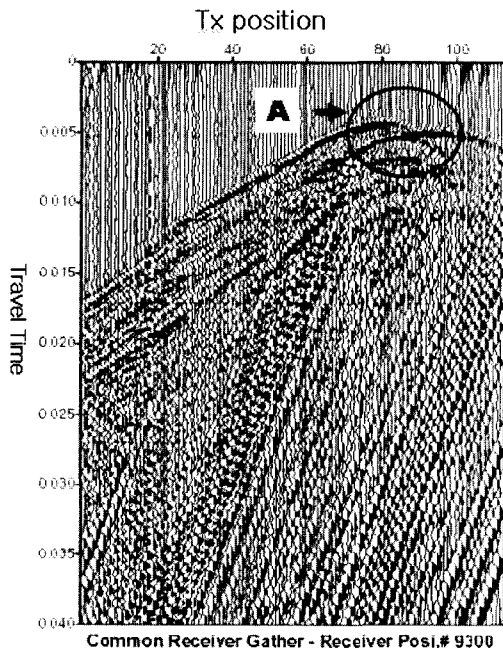


Fig. 1. Wiggle trace plot of Common Receiver Gather at receiver position(G.L. -93m)

탐사장비

탄성파 발생에 사용된 장비는 Table 1에 나타난 것처럼 일본 응용지질(OYO) 회사에서 제작한 시추공용 탄성파 진원장치인 OWS(Model 1394B)

로 직경 50mm, 길이 2.34m, 무게 18.5Kg이다. 탄성파 발생원리는 시추공내 지하수 속에서 다중원반형 강판의 상단에 스프링이 장착된 햄머가 타격될 때 음파형 탄성파가 발생되며 이는 시추공벽을 통하여 매질을 따라 전파한다. 탄성파 에너지 발생시점을 알려주는 트리거 신호는 진원장치 내부에 설치된 지오폰에 의해 자동 수신된다. Fig. 2은 Ogura 등(1999)의 실험에 의해 다중원반형 시스템을 갖는 OWS 진원기의 신호 대역을 나타낸 스펙트럼이며 이 진원기의 최대 주파수는 5000Hz정도로써 매우 높은 고주파수를 발생하고 있음을 보여주고 있다. 시추공 수신장치는 미국 Bolt사의 하이드로폰을 사용하였는데 내부에 pre-amplifier가 내장되어 있으며 주파수 반응 범위는 2~15,000Hz이다.

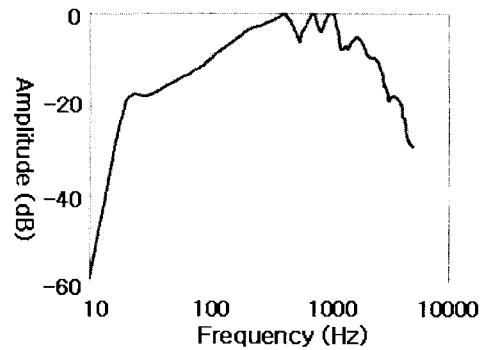


Fig. 2. Spectrum of multi-layered disk source at the shortest distance in crosshole of fresh rock(Ogura et al., 1999).

해석과정

연구 자료는 리눅스 운영 체제인 PC로 전송하여 자료의 전처리가 수행되는데 이는 초동을 발체되어 저장된 데이터의 역산이 수행되기 전까지의 과정이며 이 과정에서는 크게 포맷 변환과 편집, 공통수신점모음, 대역 필터링, 그리고 초동발체의 순차적 과정이다. 전처리에 사용된 프로그램은 미국 Colorado School of Mine의 CWP(Center Wave Phenomena)에서 개발된 탄성파 자료처리 전용인 SU(Seismic Unix) 모듈을 이용하였다. 이는 유닉스 기반의 컴퓨터에서 지진파 자료를 처리하고 연구, 교육할 수 있는 환경이 주어진다. 또

Table 1. Specification of equipment used for crosswell seismic tomography in the study area.

Content	Record	Source	Receiver
Production Co. (model)	Geometrics (StrataView R24)	OYO (1394B)	Bolt tech. (HTI-90-U)
Characteristics	seg2 format 2048 samples sampling ratio: 125 μ s record length: 256ms	OWS Diameter: 50mm Length: 2340mm trigger by geophone	Phone ϕ 60mm spacing 1m, 24ch Mounted by pre-amp.
Accessory	trigger cable	controller-stacking: 10ch/cycle power: DC120V op. power: AC100V cable length: 220m	24ch array interface 24ch transformer cable length: 300m

한 소스 코드가 완전 공개되기 때문에 기능 변형 및 확장, 응용 프로그램 개발에 이용할 수 있는 기회를 준다(Cohen and Stockwell, Jr., 1995).

전처리 과정에 사용된 SU 명령 라이브러리는 SEG2를 SEGY로의 포맷변환(format conversion) 작업 라이브러리인 'seg2seg', 현장자료의 헤더를 편집하기 위해 'sushw', 공통수진점모음(Common Receiver Gathering)을 위해 'suwind', 트레이를 도시하기 위한 'suxwigb' 등을 이용한다. 그리고 대역필터를 위해 'sufilter', 스펙트럼 분석을 위해 'sufft' 등의 명령 라이브러리를 주로 이용하였다.

본 연구에서 사용한 토모그래피 방법은 초동을 이용한 주시 토모그래피이다. 주시토모그래피는 기록된 모든 데이터의 초동을 사용하여 기록된 트레이스가 통과하여온 매질의 속도를 산출하는 역산법이다. 측정된 데이터 즉 초동의 주시와 가장 잘맞는 속도 모형을 구함으로써 매질의 속도 분포를 산출하는 방법이다. 이때 얻어진 탄성과 속도 분포는 매질의 불성을 지시하며 이를 나타낸 단면을 속도 토모그램(Velocity tomogram)이라고 한다. 여기서는 파의 전파시간과 파선의 경로, 파선이 통과하는 매질의 속도와 관계를 이용하여 대상단면의 속도구조를 영상으로 재구성하는 반복적 비선형 주시 토모그래피(Nonlinear iterative travel time Tomography) 방법을 이용하였다. 도달시간계산을 위하여 역속도는 균일한 격자를 가진 역속도 구조로 변환하기 위하여 1차

선형내삽을 수행하였다. 역산은 반복적 역투영법인 SIRT법을 적용하였다.

자료처리 결과 및 해석

속도토모그램 해석

본 연구에 사용된 시추공은 공간거리 23.4m, 조사 심도 116m로 수직거리가 수평거리에 비해 5배 이상 되므로 전체 구간을 하나의 토모그램으로 작성할 때 소규모 지하 공동이나 파쇄대를 나타내는 저속도대의 해상도를 저하시킬 수 있다. 따라서 이러한 저속도대의 구간에 해당되는 트레이스(Fig. 3. 박스부분의 탄성과자료)를 추출하여 역산한 결과 지하 공동이나 파쇄대와 같은 저속도대의 속도 토모그램이 보다 잘 형상화 되었다(Fig. 3).

채굴적 공동으로 생각되는 구역이 물로 채워졌을 경우 속도 토모그램 상에서 빈공동의 속도가 물의 탄성과 속도 1500m/s를 보여야 하나 그보다 높게 나타나는 이유는 다음과 같이 설명된다. 첫째로, 채굴적 규모가 그리 크지 않을 경우 Fermat의 원리에 의한 탄성과 전파 특성에 의해 진원점에서 수진점에 이르는 최단 주행파선은 채굴적을 관통해온 것이 아니고 우회하여 그 주위를 통과해 왔다고 생각할 수 있다. 따라서 이 경우 속도 토모그램 상의 속도는 물의 속도(1,500m/s)보다는 높고 주위 암반의 속도보다는 낮게 나타날 것이

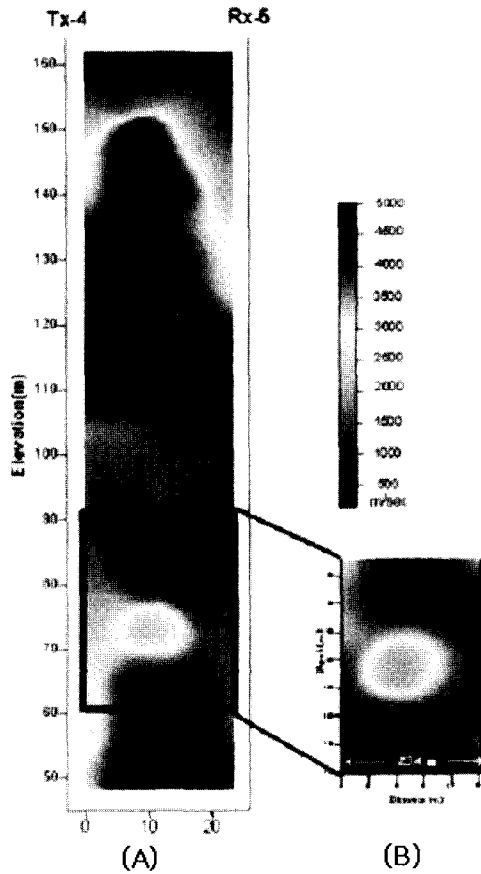


Fig. 3. Velocity tomograms showing underground cavities. (A) All interval section. (B) Block section

며 그 값은 채굴 공동의 크기와 충전 물질에 따라 다르게 나타날 것이다. 둘째로, 본 조사에 사용한 속도 분포의 영상화 기법의 특성상 평활 및 분산(smoothing/spreading) 효과를 고려할 때 속도셀의 크기를 1m로 역산하였을 경우, 토모그램에서 나타난 저속도 이상대는 그 규모가 실제 보다는 다소 크게 나타나며, 속도값 또한 실제보다 크게 나타난다.

파선 밀도와 진폭변화 특성

Fig. 4(A)는 역해 과정 중에 곡선 파선임을 가정하여 그 파선의 경로 및 형태를 도시한 것이다. 저속도대 구간의 부분 역산 단면으로부터 저속도대와 신선한 암반의 경계부가 확연히 인지되는

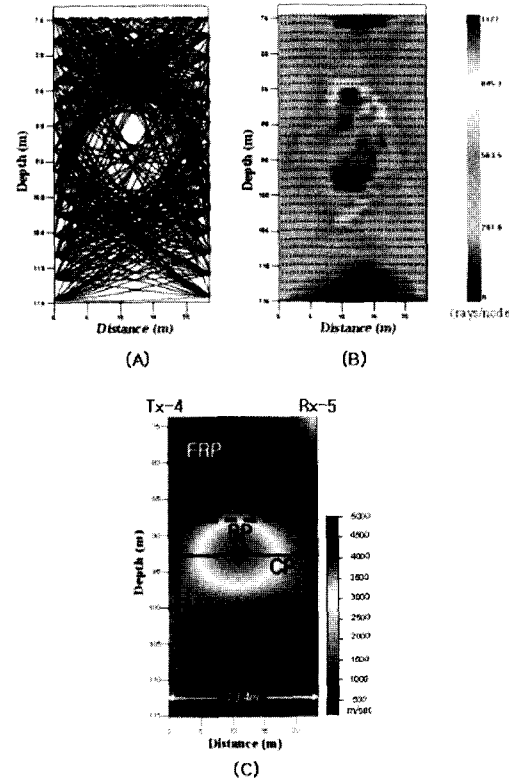


Fig. 4. Illustration of curved raypaths in between Tx-4 and Rx-5 hole. (A) Plot of raypaths. (B) Plot of rays per node. (C) Three types of the shortest distance waves passing through different rock conditions (FRP: Fresh Rock Passing, BP: Boundary Passing, CP: Cavity Passing).

데 특히 이러한 경계부에서 파선의 휨은 매우 심한 양상을 띄게 된다. 이를 각각의 셀 하나에 대한 파선의 수로 나타낸 그림이 Fig. 4(B)이며 전체적으로 파선의 수가 경계부에서 높은 값을 나타내고 있고 또한 저속도대(공동)의 상부에 특히 집중됨을 보여주고 있다.

Fig. 4(C)에 도시한 것을 보면 신선한 암반이 위치한 구간을 통과하는 탄성과파자료(FRP)와 공동을 통과하는 것(CP)과의 진폭스펙트럼 분석 결과, 1000Hz 정도의 주파수 범위까지는 진폭이 별 차이를 보이고 있지는 않으나 2000Hz 정도에서는 공동을 통과하는 것이 7dB 정도 낮은 차이를 보이며, 3000Hz에서는 거의 20dB 정도까지 차이를 보

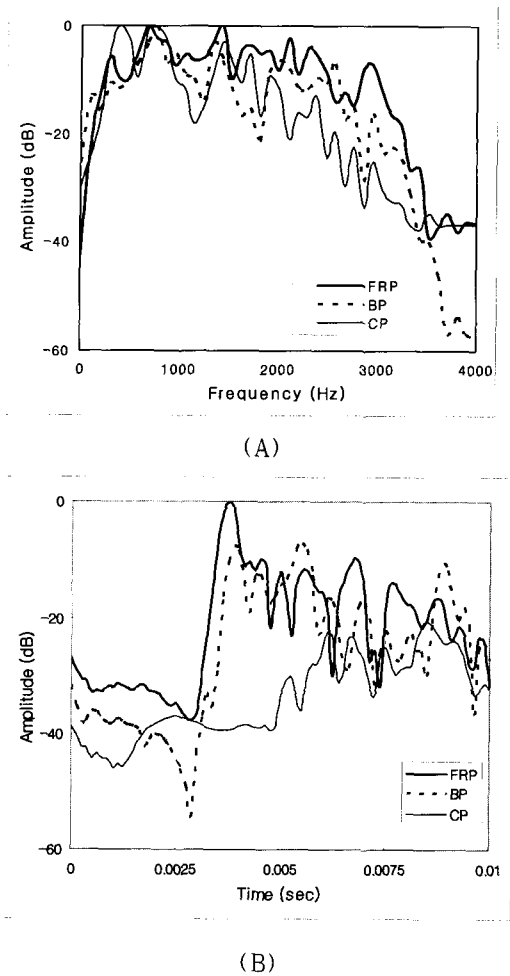


Fig. 5. Spectra showing the characteristics of three types of shortest distance wave(FRP: Fresh rock-passing, BP: Boundary-passing, CP: Cavity-passing). (A) Frequency versus amplitude. (B) Time versus amplitude.

임을 알 수 있다(Fig. 5(A)참조). 마찬가지로 Fig. 5(B)에서처럼 시간-진폭 그래프에서도 0.006초까지 FRP와 CP는 뚜렷하게 진폭차이를 나타내고 있으며, 최고 진폭을 보이는 영역의 주기로 FRP와 CP는 현저한 차이를 보인다.

이는 공동에서 진폭감쇠 경향이 우세함을 의미하는데 공동의 크기가 증가할수록 이러한 경향은 선형의 관계를 보일 것이라 사료된다. 따라서 연구지역에서의 속도 단면들에는 공동의 크기, 형태

등이 다양하게 파악되는 바, 역산 단면으로부터 그 폭을 측정하였다. 이것은 실제 지하 공동의 크기를 나타내는 것은 아니지만, 수평으로 이동하는 파선을 추출할 경우 진폭 결정이 용이하다는 점, 역산단면상에도 큰 속도차에 의해 형성되는 경계의 파악이 수월하다는 점, 또한 이러한 이유로 인해 수평 폭을 결정하기 좋다는 장점에 의해 시도되었다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 3에서 속도 토모그램상에 나타난 공동이 파악되는 위치의 매질을 최단거리로 주행하는 직접파 탄성과 트레이스들만을 추출하여 초동의 진폭을 산출하여 도시하였다(Fig 6.).

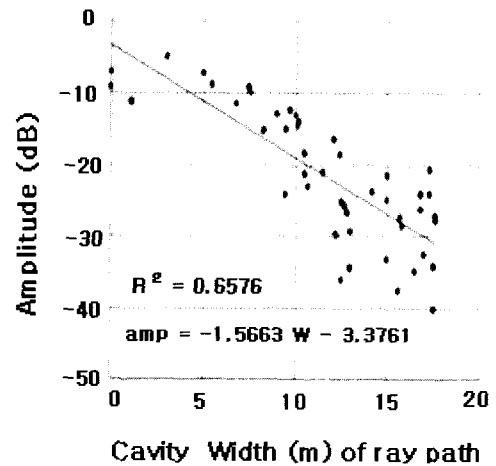


Fig. 6. Relationship between cavity width and amplitude(dB) along horizontal raypaths.

Fig. 6에 의하면 공동의 직경이 5m일 경우에 진폭은 약 -10dB 이며 15m일 경우 -30dB 근처에 분포하게 된다. 본 연구에 있어서 속도 토모그램상의 공동의 폭(W)에 대한 진폭(amp)의 변화는 1차 회귀 분석 결과 다음의 식으로 유도되었다.

$$amp = -1.5663 W - 3.3761$$

$$R^2 = 0.6576$$

즉, 속도 단면으로부터 측정된 공동의 폭이 1m 증가할 때, 진폭은 약 1.6dB 감소하는 경향을 보인다.

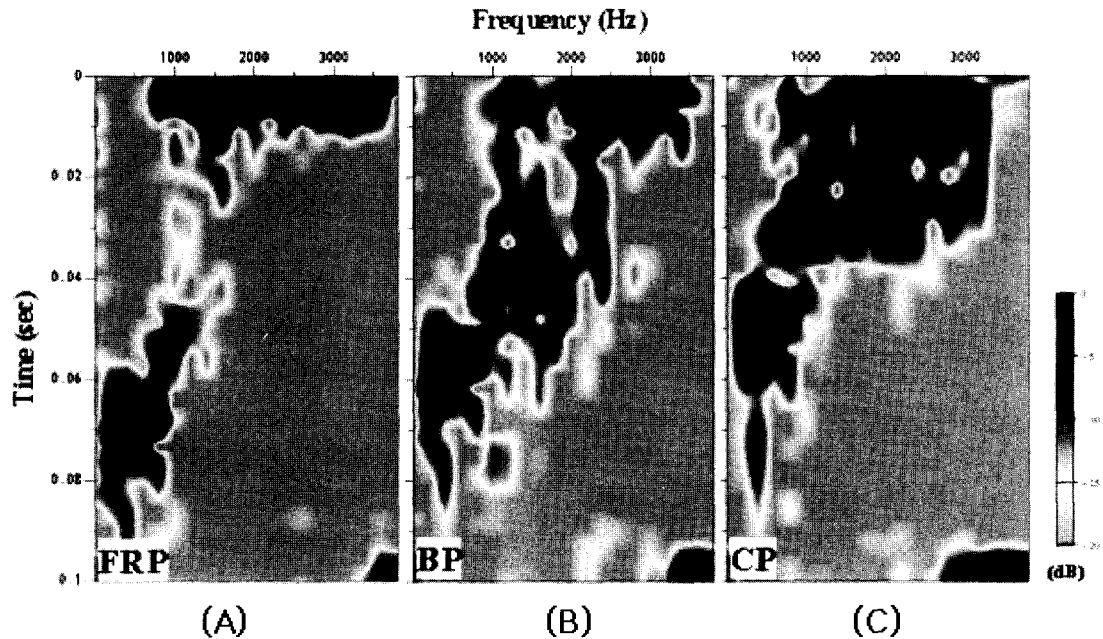


Fig. 7. Time-frequency representation of seismic data(FRP: Fresh rock-passing , BP: Boundary-passing, CP: Cavity-passing) via the multiple filter technique.

다중필터 분석

Fig. 4(C)에서 언급하였던 3종류의 최소시간을 따라 전파하는 파선경로를 이용하여 Dziewonski 등(1969)이 제안한 다중 필터 분석(multiple filter analysis)을 실시하였다. Fig. 7에서 볼 때 검은색 부분이 진폭이 큰 값을 보이는 부분인데, 연구지역에서 획득된 데이터의 초동은 0.01초 미만에서 파악되므로 이 시간영역에서는 A그림이 큰 진폭과 넓은 주파수 범위를 보이는 양상이다. 그러나 B에서 C로 갈수록 이러한 주파수 범위는 점점 줄어들게 된다. 즉, 신선한 암반을 통과하는 최소시간을 따라 전파하는 파선경로의 경우 0~-10dB의 높은 진폭값을 보이는 주파수 범위는 600~4000Hz이며, 경계면을 통과하는 것은 600~3500Hz, 공동을 통과하는 것은 600~3300Hz의 범위를 갖는다. 또한 세로축의 주시가 증가할수록 경계부와 공동의 것이 신선한 암반을 통과하는 최소시간을 따라 전파하는 파선경로보다도 진폭 분산이 더 심하게 나타났다.

토의 및 결론

최근 폐광산 및 석회암지대에서의 지반안정성 평가조사와 관련하여 이를 효과적으로 탐지하는 기술의 필요성이 대두되고 있다. 최근 공동공 탄성과 토모그래피 탐사로부터 공동 주변부나 파쇄대 탐지 분해능에 있어 효과적인 기법으로 사용되어 지고 있다.

기존의 폐광산에서 갱도와 채굴적 위치 및 시추자료가 있는 곳을 대상으로 공동공 탄성과 토모그래피 탐사로부터 지하공동 및 공동 주변부나 파쇄대에 나타나는 탄성과의 신호변화를 연구하였다. 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

본 조사지역에서 공동으로 간주되는 저속도대의 영향에 의한 초동주시의 시간차는 최대 1.2msec이며, 이에 준하는 최고 속도차는 1950m/sec이다.

신선한 암반이 위치한 구간을 통과하는 탄성과와 공동을 통과하는 탄성과의 진폭스펙트럼 분석 결과, 1000Hz정도의 주파수 범위까지는 진폭이 별

차이를 보이고 있지는 않으나, 2000Hz정도에서는 공동을 통과하는 것이 7dB정도 낮은 차이를 보이며, 3000Hz에서는 거의 20dB정도까지 차이를 보인다. 또한 공동대를 따라 전파하는 최소시간을 따라 전파하는 파선경로상에서 관측되어지는 공동의 폭-진폭 그래프를 산출한 결과 공동의 폭 1m당 1.6dB정도의 진폭감쇠가 있다.

다중 필터 기술에 의한 주파수 및 진폭 분석을 실시한 결과 신선한 암반으로 전파하는 파선경로의 경우 0~-10dB의 높은 진폭값에 해당하는 주파수 범위는 600~4000Hz이며, 경계면을 통과하는 것은 600~3500Hz, 공동을 통과하는 것은 600~3300Hz의 범위를 갖는다. 또한 세로축의 주기가 증가할수록 경계부와 공동의 것이 신선한 암반을 통과하는 최소시간을 따라 전파하는 파선경로보다도 진폭 분산이 더 심한데 이러한 현상들은 시간영역이 증가할수록 반사파 및 잡음에 대한 진폭의 증가가 있을 뿐, 직접파 영역에서의 탄성파 에너지는 상대적으로 작아지게 되어 주파수 영역이 좁아지고 진폭도 집중하지 못하는 것으로 파악되었다.

본 연구에서 나타난 것처럼 공동 탄성파 토모그래피 탐사에서 탄성파 신호는 신선한 암반과 지하공동 주변의 속도차이, 주파수 변화, 에너지 감쇠 등을 발생시키므로 이들의 분석으로부터 지하 공동탐지 가능성을 향상시킬 수 있다. 앞으로 이와 관련하여 폐갱도에 형성된 지하공동의 모형 실험과 파형구분 및 3차원 가시화에 대한 연구결과를 게재할 예정이다.

사 사

이 연구는 건설기술연구개발과제인 2002년 산학연 공동연구개발사업 (과제명 : 석회공동 탐지 기술 개발 및 지침 작성, 과제번호 : C101A1000040 - 02A0200 - 02850)의 지원으로 수행된 연구 결과의 일부로, 연구비를 지원해주신 한국건설기술연구원에 감사드리며 심사위원들께도 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김중열, 현혜자, 김기석, 김유성, 1994, 갱내 지오토모그래피에 의한 탄층 연속성조사, 한국자원공학회지, 31권, 413-418
- 이두성, 1998, 지하공동 충전효과 평가를 위한 시차 공동공 탄성파 토모그래피 연구, 한국지구물리탐사학회지, 1권, 25-30.
- Cohen, J.K., and Stockwell, J.W., Jr., 1995, The SU user's manual, Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines.
- Jung, Y., Ibrahim, A. and Borns, D., 1991, Mapping fracture zones in salt: High-resolution, cross-gallery seismic tomography, The Leading Edge, v. 10, n. 4, 37-39.
- Liu, E. and Crampin, S., 1991, Estimating near-surface fracture systems from seismic anisotropy using combination of crosshole surveys, VSPs and RVSPs, 61st Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 103-106.
- Ogura, K., Shoji, Y., and Oohashi, T., 1999, Development of a multi-disk type borehole seismic source-study of its possibility, Buturi-Tansa(SEGJ), v. 52, n. 2, 141-152.
- Rechtien, R.D., Greenfield, R.J., and Ballard, R.F., Jr., 1995, Tunnel signature prediction for a cross-borehole seismic survey, Geophysics, v. 60, 76-86.
- Tura, M.A.C., 1991, Application of diffraction tomography to fracture detection, 61st Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys., 836-839.

투 고 일	2003년 2월 4일
심 사 일	2003년 2월 5일
심사완료일	2003년 3월 5일

지하공동지역에서 시추공간 탄성파 토모그래피 탐사자료의 진폭특성 분석 : 사례연구

서기환

한국지반물탐센타 자료처리실
대전 유성구 궁동 220 기초과학관 1호관 1336호
Tel: 042-821-6423
e-mail: coda9@cnu.ac.kr

유영철

충남대학교 지질학과 지구물리
대전 유성구 궁동 220 자연대 지질학과
Tel: 042-821-6423
e-mail: zrose@empal.com

유영준

광업진흥공사 물리탐사처
서울 동작구 신대방동 686-48
Tel: 02-840-5600
e-mail: yjyou@kores.or.kr

송무영

충남대학교 지질학과 지구물리
대전 유성구 궁동 220 자연대 지질학과
Tel: 042-821-6423
e-mail: mysong@cnu.ac.kr