

천부층 지진파 반사에 대한 해상도
(지하 공동에 응용)

High Resolution for Shallow Seismic Reflection
(Applied to the Underground Cavity)

김소구(Kim, So Gu)

한양대학교 지구해양학과

요약/Abstract

Digital 지진계(24ch)와 고성능 지오폰(50-500Hz)을 사용해서 고해상 지진파 탐사를 수행한다. 미소단층, 파쇄대, 균열대, 공동과 같은 지하구조를 탐지하기 위해서는 탐지목표물의 수평, 수직 고해상도를 올리는 것이 중요하다. 즉 Nyquist주파수는 기록지의 최고 주파수보다 커야 하고 또한 최고파수(Wave Number)는 Nyquist파수($1/2\Delta x$)를 초과해서는 안된다. 최고 주파수는 저주파 통과 필터 혹은 Anti-alias 필터를 이용해서 제거되고 최고파수(f/v)는 지오폰 간격 Δx 를 조절해서 제외시킬 수 있다. 공통 발파 거리(Common Offset)와 Single-end Shooting 방법에 의해서 얻어진 지진기록지는 적절한 최적간격(20~50m), 저주파와 고주파 통과 필터(100~198 Hz), 그리고 지오폰 간격(0.5m~2m)를 이용해서 고해상도를 얻는다. 터널 상부 지표에서 Single-end Shooting에 의해서 획득한 반사지진파 기록지는 쌍곡선형의 Fraunhofer회절이 생기는 것을 볼 수 있다. 공통발파 기록에서는 터널을 통과한 초동이 낮은 진폭으로 감쇠되었고 공동에 의한 반사파는 지연된 단순 충격 파형(Single Impulsive Wave-form)임을 보여 준다. Chervený와 Psencik (1983)의 Ray Method에 의한 이론적 결과도 실측 결과와 유사함을 알 수 있다. 즉 터널을 통과한 지진파는 지연되었고 반사된 파도 낮은 속도때문에 지연되어서 나오나 공동과 암석의 큰 음향 임피던스(Acoustic Impedance)는 강한 단순 충격파형을 보여주었다.

The high resolution studies for shallow seismic reflection are carried out using 24-channel seismograph and the high sensitivity geophone(50-500Hz). In order to study the underground structures such as small faults, fractures, cracks and cavities, it is of great importance to enhance

high resolution of the seismic records for the targets vertically and laterally. In analysis of high resolution seismic reflection, Nyquist frequency(F_N) should be larger than the highest frequency in the records and the highest wave number should not be exceed the Nyquist wave number($1/2 \Delta x$). The highest frequency above the Nyquist will be removed using low pass filter or anti-alias filter. The trace interval Δx should be taken into account so that the highest wave number(f/v) can be less than $1/2\Delta x$.

The Fraunhofer diffraction of a hyperbola seismic section above the tunnel appears on the common offset method, and little first arrivals of direct wave on the single-end shooting, delayed strong impulsive reflections are also shown above the tunnel.

Ray Method(Chervey and Psencik, 1983) also represents the same results that the reflected waves from the tunnel are delayed and single impulsive with little first arrivals, while transmitted waves through the tunnel are delayed with low frequency.

서론

지진파의 이용은 크게 둘로 나누어 이론 지구 물리학에 이용되는 고체 지구물리학(Solid-Earth Geophysics)과 석유 탐사와 같이 자원 탐사에 활용되는 탐사 지구물리학(Exploration Geophysics)을 들 수 있다. 이 두 분야는 지난 반세기동안 급성장하는 첨단 전자장비(Hardware)와 기술(Software)의 개발로 눈부시게 발전되어 왔다. 그리고 이들 두 분야는 모두 지구내부구조나 심부층 지층구조(~3000m)를 세밀하게 관찰하는 목적으로 발전되어 왔다. 그러나 천부지층(1000m이내)의 지진파 탐사는 그동안 침체해 있다가 최근 급성장하는 산업시설의 안전, 지열 탐사 및 복잡한 군사시설(땅굴)의 탐지목표로 관심이 증대되었다(김중렬, 1986). 본 연구는 지하 100~300m에 묻혀있는 지질구조(미소단층, 폐쇄대, 균열대등) 및 지하공동을 탐지하기 위한 전초작업으로 이미 알려진 터널을 모델로 고해상도 지진파탐사를 수행한 것이다

(김소구, 1993).

본 지구물리탐은 그동안 지하공동 탐사작업을 휴전선 일대와 그밖에 유사한 공동탐사를 여러 곳에서 수행한 일이 있다. 특히 지하 200m 이내에서 목표물(Target)을 탐지하는 것은 물리적으로 또는 탐사방법적으로 매우 어려운 점이 많이 있다는 것을 발견했다. 이 지역의 지층구조는 비동질(Inhomogeneous), 이방성(Anisotropic)등 복잡성과 탐지 목표물(Target) 크기와 지진파 주파수(파장) 비례에서 오는 탐지 분리는 지진파의 투과력과 분해력의 관계에서 일어나는 탐사장비의 어려운 점 그리고 적절한 지진 에너지의 활용등이 이러한 문제를 해결하는데 어렵게 하였다. 장장 5년동안 DMZ기존 땅굴지역과 또는 이와 유사한 지역에서 지진파 탐사를 꾸준히 수행하여 오면서 장비와 기술을 크게 개발시켰다. 탐사 장비는 PC에 부착하여 사용하는 24ch 디지털 지진계와 50~500Hz고 감도 지오폰을 활용하여 좋은 성과가 있음을 알 수 있었다. 아울러 이와같은 자료분석은

또한 Ray Method에 의한 지진파의 전파과정에서도 일치함을 보여준다.

이론 및 방법

광학적으로 회절에는 근거리(Near-Field)에서 일어나는 구면파(Spherical Wave)의 Fresnel회절과 원격거리(Far-Field)에서 관찰되는 평면파(Plane Wave)의 Fraunhofer회절이 있다. 본 연구에서는 파장이 목표물 길이보다 작다고 생각하기 때문에 Fraunhofer회절로 간주된다. 따라서 제일 Fraunhofer회절의 초점 평면(Focal Plane)의 반경 $R = \alpha/2(2f/fd)^{0.5}$ 라고 쓸 수 있다(Kleyn, 1983). 여기서 α 는 P파의 속도, t 는 P파의 왕복 주행시간, fd 는 P파의 탁월 주파수이다. 또한 초점 평면의 폭을 W 라 하면 $W = (2\lambda z)^{0.5}$ 라 쓸 수 있는데 여기서 λ 는 파장, z 는 깊이를 나타낸다. 즉 Fraunhofer회절 평면직경 W 가 크면 클수록 해상도는 떨어진다. 따라서 고해상도를 올리려면 사용되는 지오폰의 주파수가 고주파(High Frequency)인 것을 사용하는 것이 좋다.

Chervený와 Psencik(1983)가 Ray Method에 의해서 개발한 Ray-tracing과 이론지진 기록지(Synthetic Seismogram)는 비등질(Inhomogeneous), 이방성(Anisotropic)매질을 통과한 지진파장(Seismic Wave Field)을 다루는데 큰 의의를 제시하고 있다. P 혹은 SV파가 제1차의 경계면(Interface)에 부딪치게 되면 반사된 P파와 SV파반사 및 굴절된 P파와 SV파가 생성된다. 그러나 SH파가 제1차 경계에 부딪치게 되면 오직 반사 및 통과한 SH파만 생성하게 된다. 입사파와 반사파의 진폭비율은 경계의 구형 상태 혹은 입사파의 펄스에 관계없이 오직 입사각과 경계에서 탄성계수와

밀도에 의존한다. 선형화된 탄성 동력운동방정식(Chervený et al. 1977).

$$\rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \nabla(\nabla \cdot U) + \mu \nabla^2 U + \lambda(\nabla \cdot U) + \nabla \mu X(\nabla X U) + 2(\nabla \mu \cdot \nabla) U \quad (1)$$

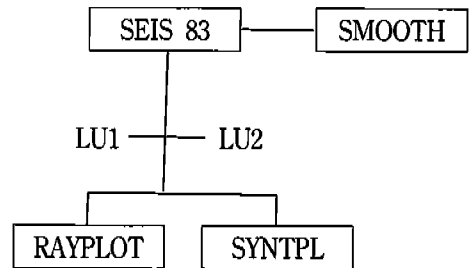
여기서 $U(x, t)$ 는 입자의 변위 벡터이고 X 는 벡터곱을 나타낸다. 이것에 대한 해는 어떠한 움직이는 표면을 따라서 비해석적인 해를 찾는다. 이 움직이는 표면을 파면(Wave-front)이라 부르고

$$t = \tau(X_i) \quad (2)$$

라고 쓴다. 이것은 또한 위상함수(Phase Function) 또는 Eikonal이라 부른다. 식(1)의 해는 파선 계열(Ray Series)로 나타낸다.

$$U_k(X_i, t) = \sum_{k=0}^{\infty} U_k(X_i) F_k(t - \tau(X_i)) \quad (3)$$

여기서 $U_k(X_i)$ 는 진폭 상수가 된다. 이것에 대해서는 Chervený et al.(1977)에 자세히 설명되어 있다. Chervený와 Psencik(1983)는 Ray Method에 관한 파선경로와 진폭/도착시간에 관한 전산 프로그램을 개발하였다. 즉



지진파장의 수치모델 프로그램 SEIS83을 돌리면 진폭/주행시간 출력화일인 LUI과 이론지진 기록지인 LU2 화일이 생성된다. 이들

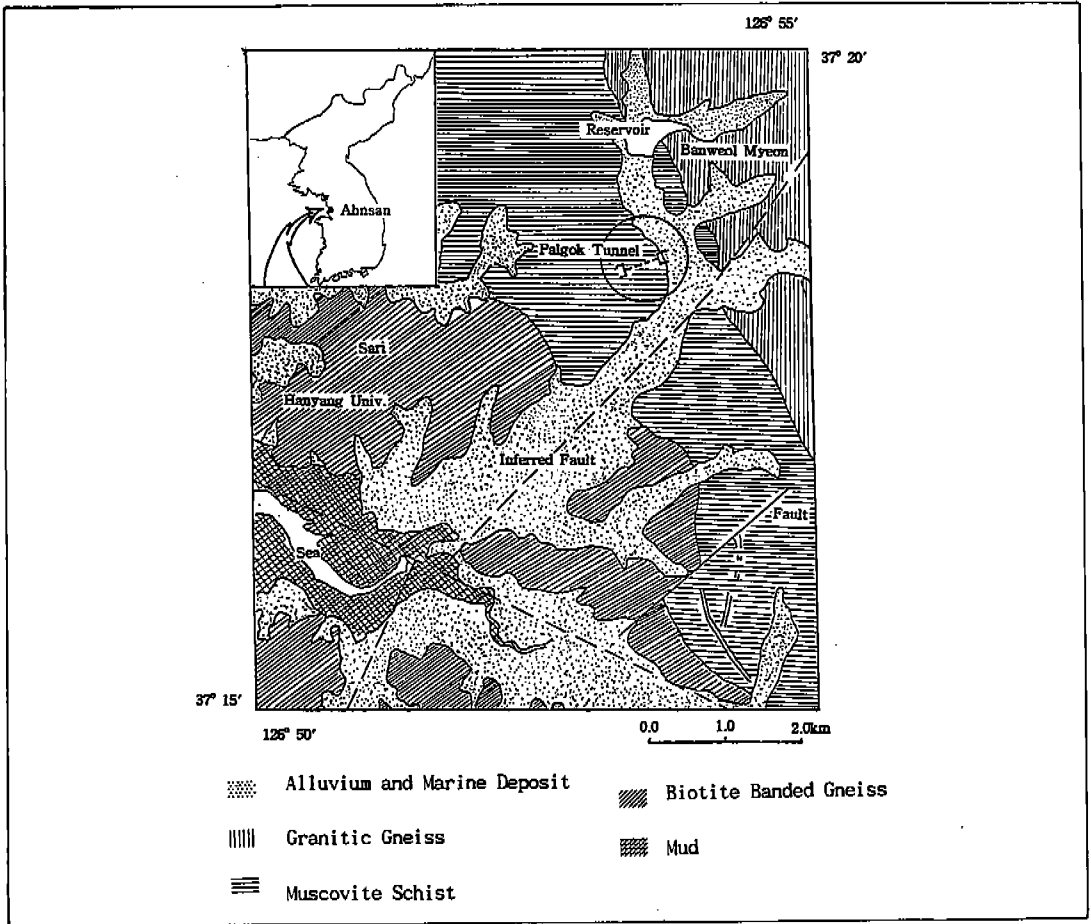


Fig. 1 The seismic exploration site for the underground tunnel.

화일은 도식화(plotting)하기 위해서 RAY-PLOT와 SYNTPL에 사용된다. 그리고 SMOOTH는 SEIS83의 입력자료에 속도보정을 할때 사용된다.

분석 및 해석

반사 지진파탐사방법은 본 지구물리팀이 보유하고 있는 24ch의 디지털 지진계와 50~500Hz 고성능 지오폰을 0.5~2m 간격으로 배열하여 탐사하였으며, 탐사법은 Single-end

shooting과 공동 발파 방법으로 수행했다. 진원에서 관측점까지 최적거리(Optimum Window)는 20~50m로 하고 15kg Hammer를 5번 연속강타후 중첩에 의해 중합하였다. 반사지진파의 속도는 Single-end shooting방법에 의해 구한다. 즉 발파시(Time Break)는 지진기록지의 시작(Onset)에서 출발되기 때문에 $t_0 = [t_x^2 - (x/v)^2]^{1/2}$ 에서 원점에서의 왕복 주행시간을 쉽게 구할 수 있다. 기록시간(Record Time)은 500ms이며 SPS(Sample/second)는 2000이므로 $\Delta t = 0.5ms$ 로 기록되었고 기록시

간이 1000ms, SPS는 1000이므로 $\Delta t=1ms$ 로 기록되었다. 본 연구에서 얻어진 반사지진파의 실험결과는 아래와 같다.

- $\alpha_1=1026.9m/sec$ (풍화암에서 P파속도)
- $\alpha_0=518.5m/sec$ (공동위에서 P파속도)
- $t_0=0.0575sec$ (MMO후의 P파의 왕복주행시간)
- $h=14.9m$ (지표에서 공동까지의 깊이)
- $R=6.35m$ (Fraunhofer 반경)

실제로 공동은 지표면에서 15~20m(정상에 따라 변화)아래 있으며 그 크기는 폭 약 8m, 높이 8m의 호형(Arch)으로 되어 있다. 그림 2에서 보는 바와 같이 공동에서 반사파는 지연된 강한 단순충격파형을 보여준다. 그림 3의 공동 발파 거리에서는 공동에서 반사파를

쌍곡선형의 강력 단순 충격 파형(↓방향)을 이루고 그 후에는 파형이 매우 단순한 것을 볼 수 있다. 특히 16ch에서 22ch까지의 초동 진폭은 매우 미약하고 지연된 곳에서 (50ms) 강한 반사파 진폭을 읽을 수 있으나 그후에는 파형이 거의 나타나지 않는 현상을 볼 수 있다. 그림 2, 3, 4 및 5는 모두 Ground Roll을 제거하기 위해서 아나로그 저주파 통과 필터(50Hz)를 입력시킨 상태에서 탐사를 수행하였다. 이 아나로그 필터는 한번 입력시키면 자료 분석시 임의로 조절할 수 없다. 그 반면에 디지털 필터는 자료분석시 임의로 적절한 필터로 조절할 수 있다. 그림 3, 4의 차이는 그림 3은 디지털 필터를 사용하지 않았고, 그림 4는 Low-cut Filter(100Hz), High-

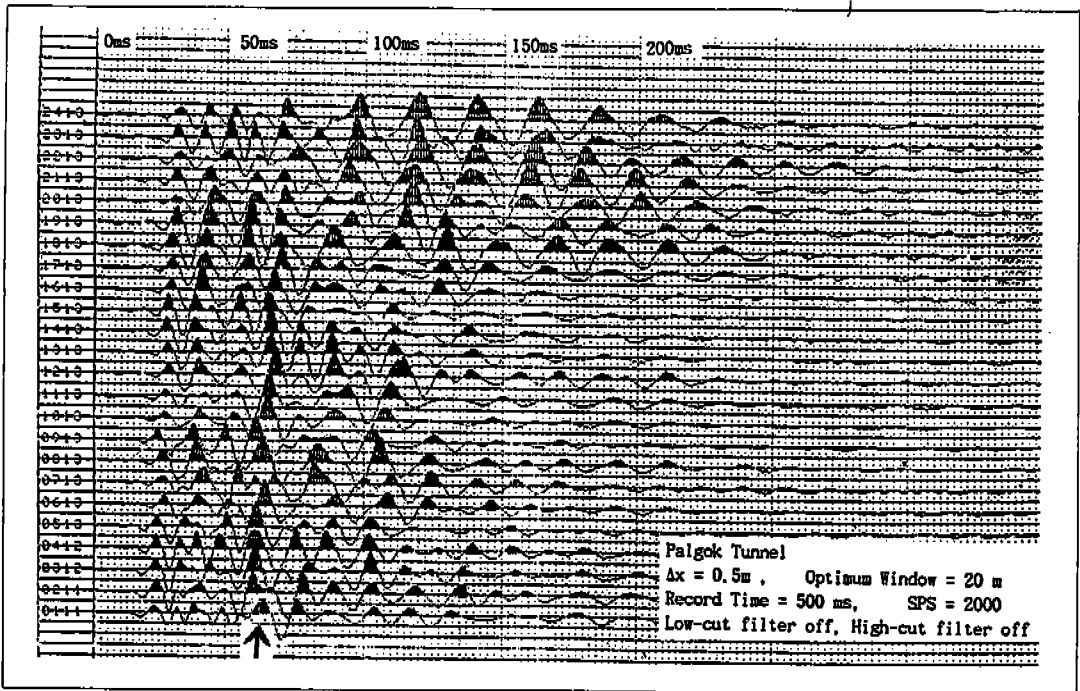


Fig. 2 Reflection Seismograms for the Single-end shooting above the Palgok Tunnel. The bright Spot indicated by an arrow represents the strong reflection from the cavity.

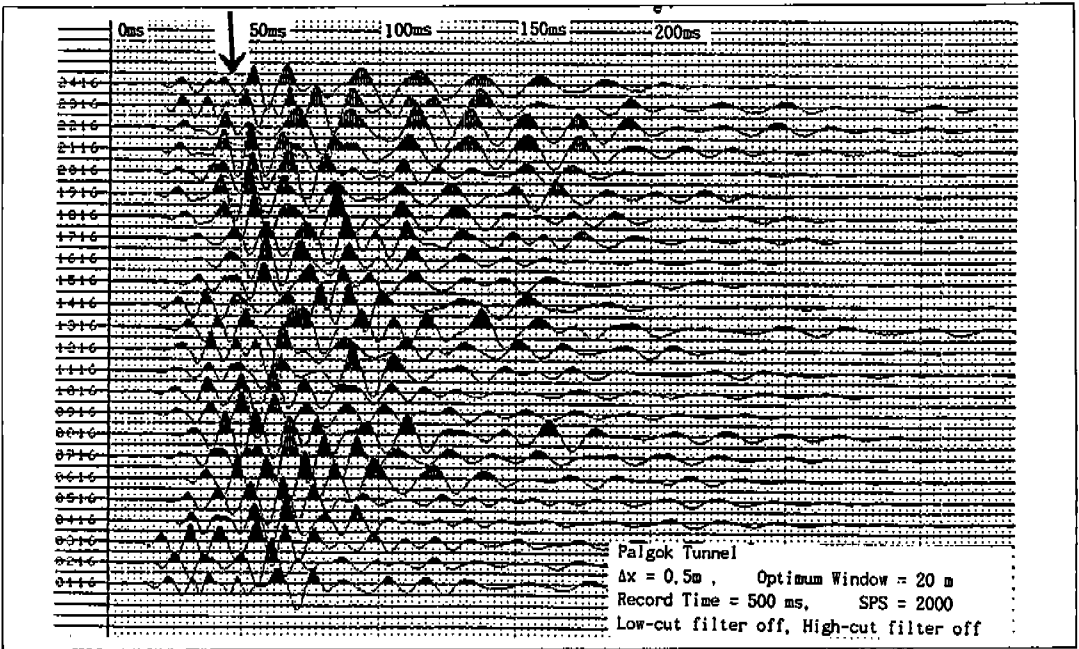


Fig. 3 Reflection Seismograms for the Common Offset Method without digital filters above the Palgok Tunnel. The arrow indicates a bright spot representing the strong reflection from the cavity. Low frequency waves due to the absence of low-cut filters.

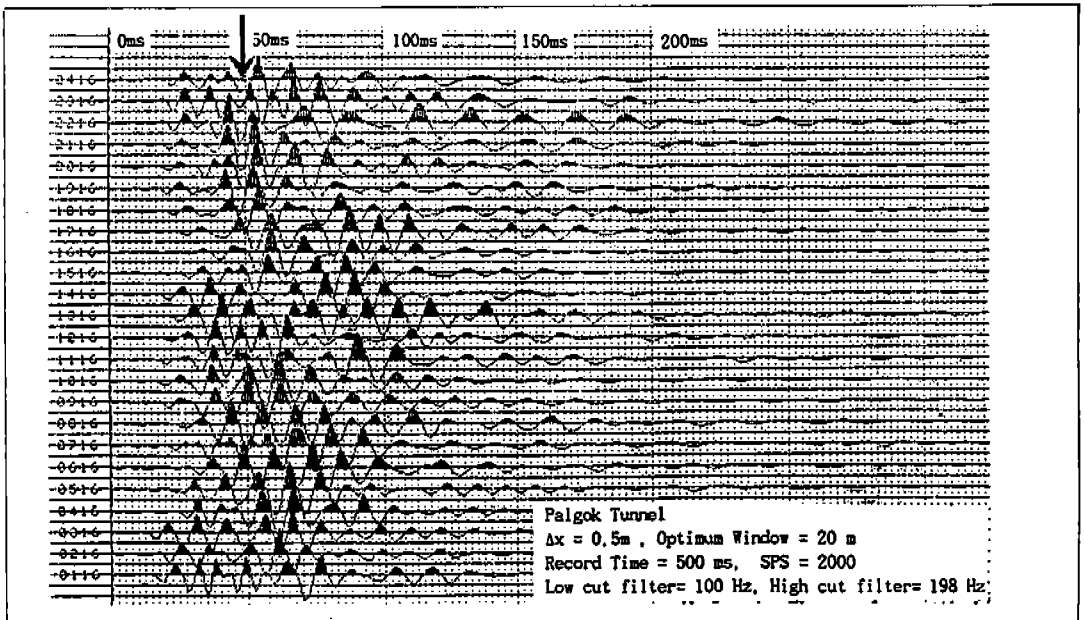


Fig. 4 Reflection Seismograms for the Common Offset Method with digital filters above the Palgok Tunnel. The arrow indicates a bright spot that is reflected from the cavity. It is a delayed and hyperbolic shape. Low frequency waves disappeared due to the absence of low-cut filters.

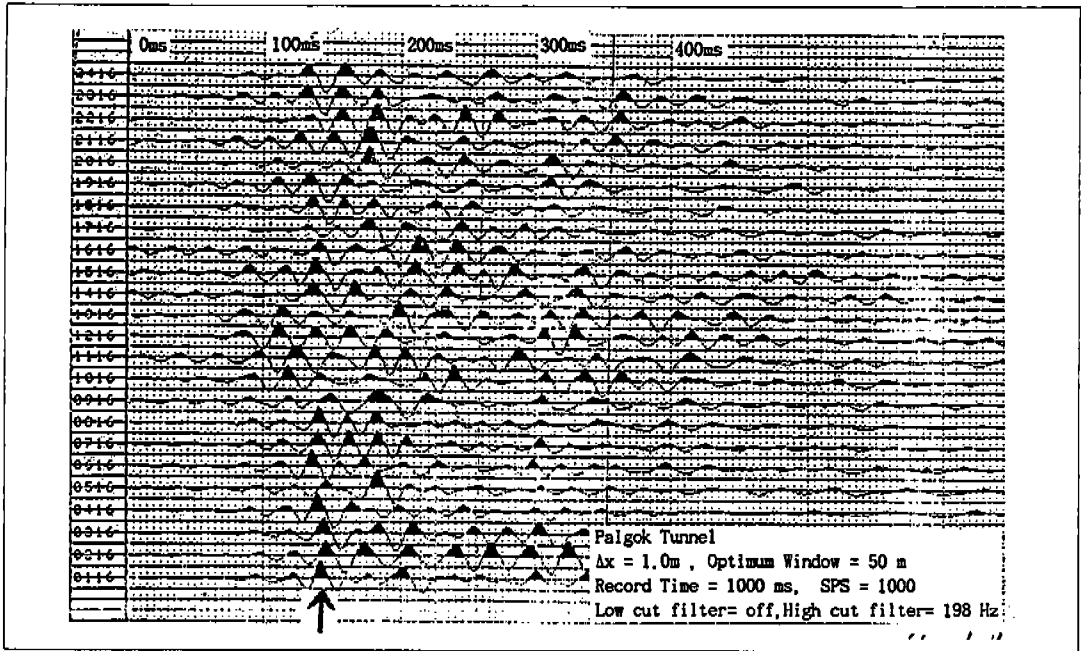


Fig. 5 Reflection Seismograms for the Common Offset Method without digital filters above the Paigok Tunnel. The arrow indicates a bright spot that is reflected from the cavity. It is a delayed due to the low-velocity of the cavity.

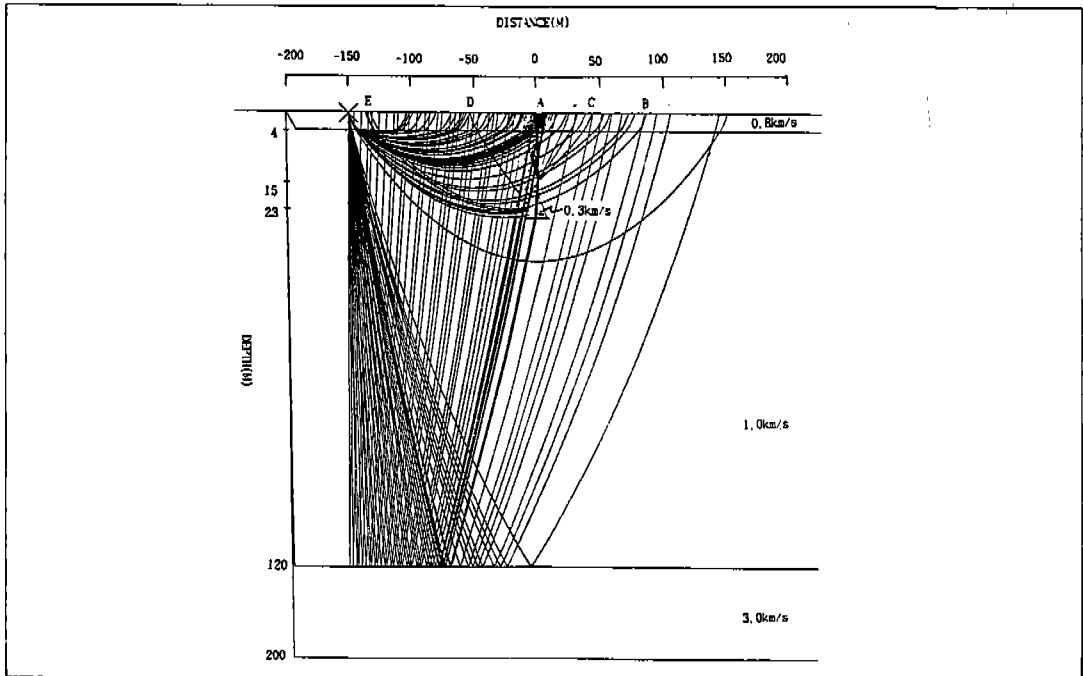


Fig. 6 The Ray-Trace diagram for the underground tunnel model using the Ray Method. B, C represent the arrivals of the transmitted waves through and from the cavity, and D, E the reflected waves from the cavity surface.

cut Filter(198Hz)를 사용한 것이다. 그림 5는 지오폰간격을 늘리고 최적윈도우(Optimum Window)도 확장해서 탐사한 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 공동위에서 반사는 훨씬 선두 채널에서 나타났으며 진폭은 훨씬 낮은 편이다. Ray Method에 의한 수치모델에 의한 지진파 전파와 이론지진 기록지를 재생시킬 수 있다. 그림 6에서 발과점에서 출발한 파선(Ray)은 제1층(충적층)에서 굴절, 지하 120 m에서 반사, 그리고 지하 15m에 있는 공동에서 반사와 투과를 하여 66개의 지오폰에 도달하게 된다. 그림 6에서 보는바와 같이 처음에는 풍화암에서 굴절파가 공동을 중심

으로 수평거리 -100m와 100m사이에서 도달되며, -50m와 50m사이에서는 기반암(속도 : 3.0km/sec)에서 반사되어 도달되는 반사파가 탐지된다. 다시 -130m(E) 지점에서는 공동에서 반사된 강한 지연반사파가 탐지되고, 다시 -60m(D)지점에서는 공동에서 반사된 강한 지연파가 탐지된다. 이들은 각각 그림 6, 7 및 8에 잘 나타나 있다. 공동을 통과하지 못하고 기반암에서 직접 도달되는 반사파는 C 지점에 조금 빨리 도달되는 것을 알 수 있다. 그림 8은 그림 7과 마찬가지로 이론지진 기록지(Synthetic Seismogram)이고

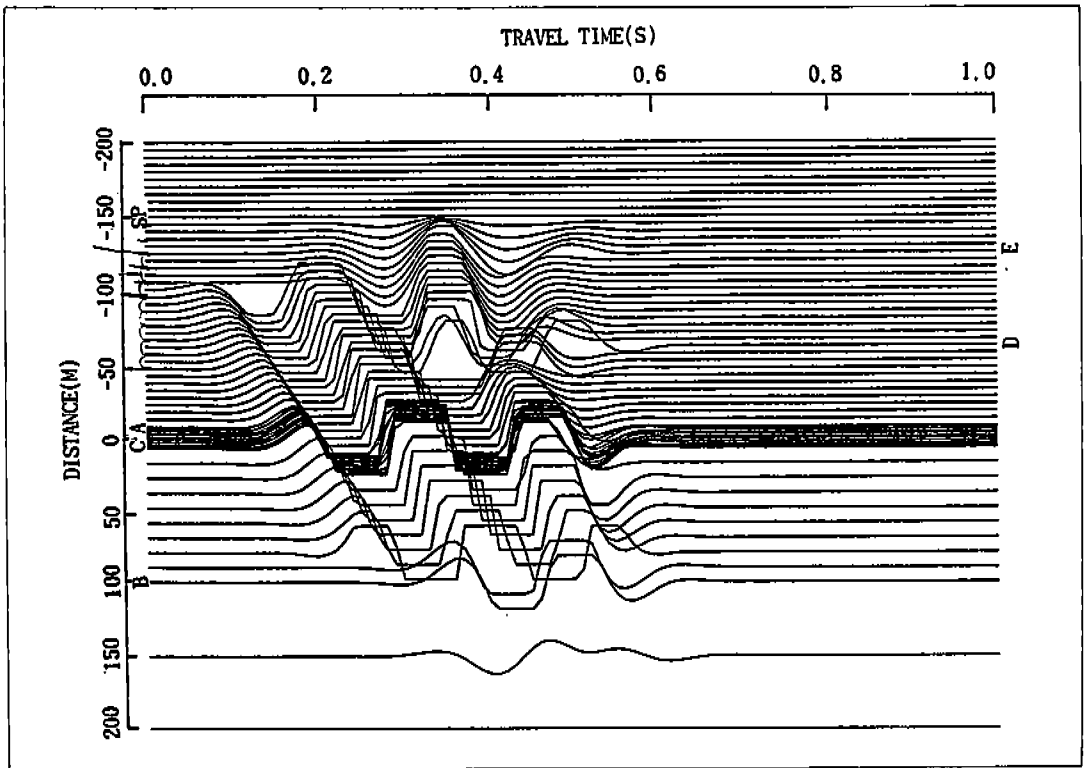


Fig. 7 The Synthetic Seismograms for the underground tunnel model using Ray Method. B, C and D, E represent the arrivals of transmitted and reflected waves through and from the cavity. A indicates arrivals of reflected waves from the bedrock.

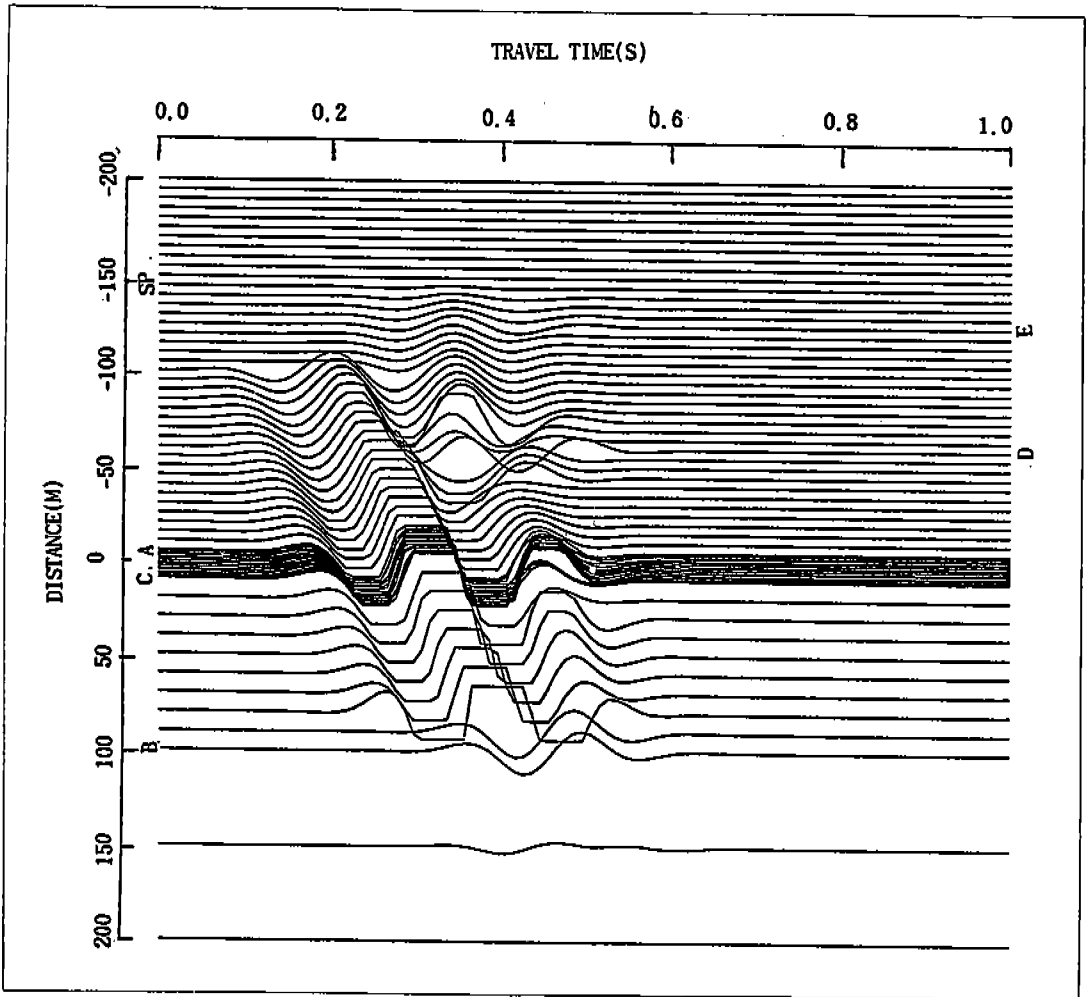


Fig. 8 The Synthetic Seismograms for the underground tunnel model using Ray Method. B, C and D, E represent the arrivals of transmitted and reflected waves through and from the cavity. A indicates of reflected waves from the bedrock. The interval between each receiver is wider than that of Fig. 7.

단지 Trace간격을 확장한 것이다.

결론 및 논의

결론적으로 24ch의 디지털지진계와 고성능 지오폰(50~500Hz)을 가지고 공통발파 거리(Common offset)와 Single-end Shooting방법으로 지하 터널의 위치와 깊이는 충분히 찾을

수 있었다. 또한 이것을 이론적으로 Ray Method에 의해 지진파의 수치모델 프로그램으로도 공동이 존재했을때 일어나는 반사파와 투과파를 면밀히 분석하면 공동의 위치와 깊이를 결정할 수 있음을 보여 주었다. 다만 심부층 지하땅굴(200~300m)을 탐지하기 위해서는 보다 강력한 지진에너지원이 필요할 것이다. 본 지구물리팀에서 이러한 강력에

너지원을 위해 현재 Seisgun을 준비하고 있다. 그리고 본 지구물리팀이 운영하는 미소지진 관측망(Micro-Seismic Array)을 전방 DMZ 지역에 설치하고 일정방향의 지진파 특히 P파와 SH파를 정밀관측하고 이들의 위상(Phase), 진폭(Amplitude) 및 도착시간(Arrival Time)을 정밀 분석하면 효과적으로 지하 공동(땅굴)의 위치를 탐지할 수 있다고 본다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 산하의 고려대학교 전략 광물 자원 센터의 지원과 한양대학교내 연구비의 보조로 이루어 졌다. 그리고 지구물리실의 이승규군과 해양연구소 전산실의 구분관, 강해석 두분의 도움이 컸다. 이들 모두에게 깊은 감사를 드린다.

참고문헌

김중열 1986, 반사법 탄성과 탐사에 의한 지하터널 탐지 가능성, 대한광산학회지 V. 23, pp.364-370

김소구 1993, 천부층 반사 지진파와 해상도에

관한 연구, 한국자원공학회 제60회 학술 발표회, 서울대학교, 1993. 4. 30-5. 1. p. 131

Kleyn, A.H 1983, Seismic Reflection Interpretation, Applied Seismic Publishers, London and Newyork, p.269

Cerveny, A., Molotkov, I.A., and Psencik, I. 1977, Ray Method in Seismology, Univerzita Karlova, Praha, p.214

Cerveny, A., Psencik, I. 1983, Numerical Modelling of Seismic Wave Fields in 2-D Laterally Varying layered Structures by Ray Method, Czechoslovakia, p.500

김소구

한양대학교 지구해양과학과
경기도 안산시 대학동 396
425-791

TEL : (0345) 82-2111

FAX : (0345) 82-2808