

터널 채널파를 이용한 사갱 연장성 규명

Estimation of the continuity of inclined pits by tunnel channel wave investigation

김중열¹⁾, Jung-Yul Kim, 방기문²⁾, Ki-Mun Bang, 정현기¹⁾, Hyun-Key Jung

¹⁾ 한국지질자원연구원 책임연구원, Principal Researcher, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources

²⁾ 대우엔지니어링 부장, Daewoo Engineering

SYNOPSIS : In this paper, a new novel technique of seismic survey is introduced to estimate the continuity of inclined pits filled with water. It was assumed that the pits would be connected to an abandoned railway tunnel that might be constructed in the past. Thus, detection of pit end was needed for the design of a new highway tunnel(Yukshimreong tunnel) that was likely to be met with a pit. In the beginning of exploration, no reliable, cost effective method was available. Hence, focus of interest moved toward the high impedance contrast(reflection coefficient $k \sim 0.8$) between water and rock. In this special model of sequence rock-water-rock, total reflection occurs and the seismic energy, when it is generated in the pit water, is nearly confined to the pit so that seismic waves can propagate much further within the pit. As a matter of convenience, this is called "tunnel channel wave". With these considerations in mind, seismic detonator(2g) was used as a source at the entrance of pit, whereas hydrophone chain(hydrophone interval=1m) was placed on the bottom of pit. With this appropriate source-receiver arrangement, desirable down-going and up-going waves could be observed that will help conform the continuity of pits. After about one year, it was ascertained that the inclined pit of interest was just nearby crossed with the newly excavated tunnel, as it was predicted.

Key words : tunnel channel wave, continuity of inclined pits, seismic detonator, hydrophone chain

1. 서 론

그림 1은 연장 약 3,100m에 달하는 육십령 터널도로 노선(대전-통영간 고속도로 노선 중 제 15공구에 해당)을 나타내고 있다. 터널 실시설계를 수행할 즈음 그로부터 약 60m 하부에 이미 일제시대 때 철도 터널공사가 착공된 것으로 알려졌다. 터널공사 착공 후 토공사를 위한 주변 벌개작업을 하는 과정에서 육십령 터널노선에 근접하여 역시 해방 전 굴착된 것으로 추정되는 철도터널 작업용 사갱이 두 개(편의상 사갱 1, 2로 명명)나 발견되어 이에 대한 조사의 필요성이 본격적으로 대두되었다. 그림 2에는 상기 사갱들과 예상된 폐철도 및 계획된 육십령 터널노선과의 상대적인 위치를 나타내고 있다. 만약 사갱 2의 연장이 약 200m를 초과할 경우에는 사갱과 육십령 터널노선이 인접될 가능성이 높아지며 그에 따른 터널시공 안정성이 크게 대두된다. 역시 사갱 1의 연장성도 폐철도 노선의 존재를 확인할 수 있는 단서가 되며 또한 그 상부에 시설될 금당교의 안정성에도 이러한 지반상태가 연계된다고 볼 수 있는 것

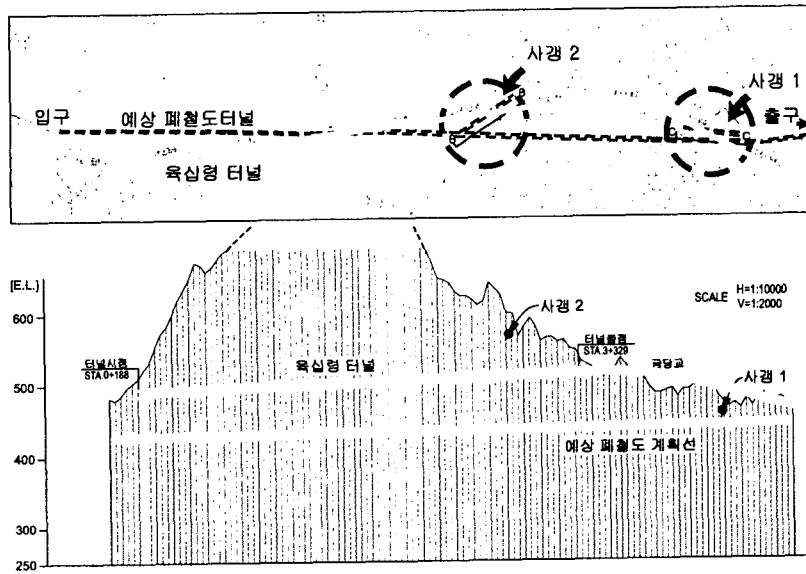


그림 1. 계획된 육십령 터널 노선과 일제시대 때 착공된 것으로 예상되는 폐철도 터널의 노선과의 상대적인 위치를 평면도와 입면도에 의해 나타내고 있다. 사갱 1, 2는 당시 철도 터널 작업을 위해 굴착된 것으로 추정되었으며 그들의 연장상태는 바로 육십령 터널 시공의 안정성과 직접적으로 연관되었다.

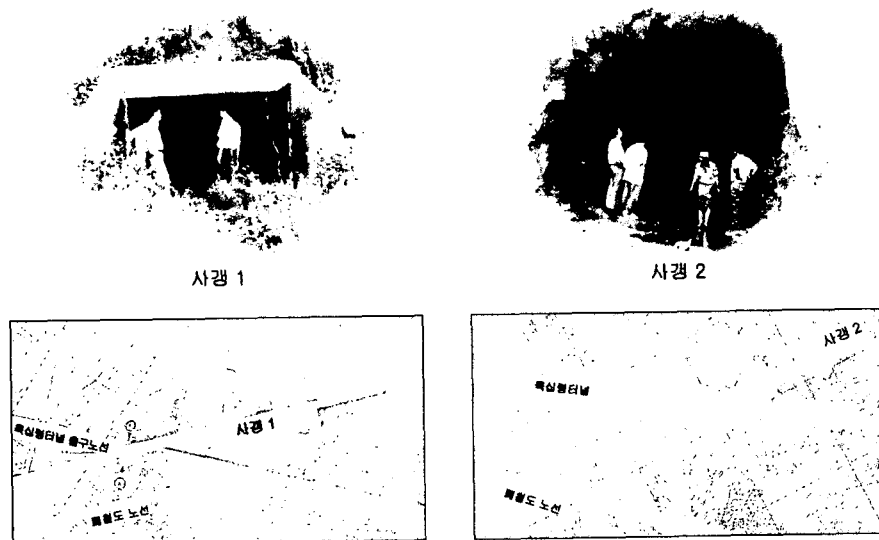


그림 2. 두개의 사갱과 예상된 폐철도 노선 및 육십령 터널 노선과의 상대적인 위치를 나타내고 있다. 만약, 사갱 2가 폐철도 노선과 연결되어 있다면 그것은 계획된 육십령 터널노선과 인접하여 교차될 것이 예상되었다.

이다. 따라서, 육십령 터널시공의 안정성 문제는 무엇보다 두 사갱의 연장상태에 귀결됨을 알 수 있으며 이에 대한 정확한 규명이 본 논문의 주요내용이 되고 있다. 그런데, 두 사갱에는 갱내수가 입구까지 차 있어 우선 그의 굴진상태나 연장 및 경사에 대한 정확한 판단은 어려운 실정이었다. 일차적인 시도로서 약 3m의 길이의 뾰뚱한 플라스틱 봉을 차례로 사갱 내에 밀어 넣고자 하였다. 그러나, 사갱 바닥이 평탄하지 못하여 약 50m 이후에는 봉에 대한 제어가 사실상 불가능하였다. 다음은 한국지질자원연구원서 독자적으로 개발(정현기 외, 1995)되어 국내·외 시판되고 있는 시추공 내시경(K-CAMLOG)을 변조한 새로운 형태의 내시경이 투입되었다. 그림 3의 상단에는 카메라 본체 부분(50w 할로젠 램프 2개를 방수 내장)을 조립 동작한 후, 그를 갱내에 밀어 넣는 전경을 나타내고 있으며 그로 인해 사갱 1에서는 약 44m까지, 사갱 2에는 약 65m까지 촬영이 가능하였다. 그러나, 촬영도중 갱도 바닥에 오랫동안 침전되어 있던 이물질들이 뭉게구름같이 떠올라 촬영화질이 급격히 하락하였으며(그림 3참조) 이러한 갱내 여건에서는 비록 ROV(Remote Operated Vehicle)가 활용되었더라도 역시 그와 유사한 결과가 기대되었다. 결국, 여기에는 갱도 연장 규명을 위한 하나의 새로운 착안이 요구된 것이다.

그림 4는 마치 강이나 운하로 흘러내린 물이 거의 그 주위로 유실되지 않고 오직 그들의 진로를 따라 흐르는 것과 유사하게 탄층 내에서 생성된 채널파(channel or canal wave)가 거의 탄층내에 국한되어 전달되는 상태를 나타내고 있다. 채널파는 하나의 특별한 유형의 탄성파로서 멀리 전달되는 특성을 갖고 있기 때문에 주로 탄층 연속성 조사를 위해 상용되고 있다. 만약, 사갱 혹은 터널 내에서 채널파와 유사한 탄성파가 생성되어 전달된다면(편의상 “터널 채널파”로 명명) 이는 바로 사갱 연장성 규명을 위한 하나의 훌륭한 여건을 마련하는 것이 되겠다. 다음은 우선 채널파와 터널 채널파와의 연계성을 요약하고 있다.

2. 터널 채널파의 생성

채널파가 생성되기 위한 최적의 암반구조 중의 하나는 탄층구조이다(그림 5(a)참조). 만약, 탄층의 노출된 부분(예: 막장)에 탄성과 발생원이 구사된다면 그로부터 생성되는 P파, S파 및 SH파는 탄층/암반 경계면의 높은 반사계수($IRI \approx 0.5$)로 인하여 대부분 전반사되고 동시에 변환파(converted wave)도 유발한다. 이와 같은 현상은 그 경계면에서 무수히 많이 일어나며 그들은 상호 중첩된다. 여기서 중첩되는 과정을 전체적으로 관찰하면 에너지가 소멸되는 부분(destructive interference)과 그 반대로 에너지가 증폭되는 부분(constructive interference)의 연속을 나타내며 후자는 탄성파 기록에서 일련의 파군(wave train)으로 관찰된다. 이와 같이 특이하게 생성되어 거의 탄층 내에서 전달되는 파군을 채널파라 한다. 채널파의 발달상태는 주로 탄층의 두께(대체로 탄성파 파장 λ 보다 작다) 및 경계면의 반사계수에 의해 크게 달리하며 그에 따른 복잡한 간섭현상은 그 특유의 분산현상(dispersion)을 초래한다(Krey, 1963 ; 김중열 외, 1989, 1990, Dresen and Rüter, 1994). 그런데, 갱내수로 채워져 있는 터널(사갱)구조(그림 5(b)참조)에는 우선 파장이 터널 폭보다 훨씬 작고($1/2 \lambda$ 이하) 또한 S파와 유관된 모든 탄성파(직접파, 반사파, 변환파 등)가 배제되고 있기 때문에(물에서는 S파가 전달되지 않음) 상기 채널파와 비교하여 보다 간소화된 파군이 전달될 것으로 본다. 한편, 탄층은 대체로 평탄한 경계면을 갖고 있다. 그러나, 터널은 대체로 원통형의 경계면을 나타내며 더구나 그 반사계수($R \approx 0.75$)는 탄층의 것보다 높기 때문에 갱내에서 생성된 탄성파는 거의 지배적으로 갱도를 따라 전달될 것이 기대된다. 다음은 이와 같이 새롭게 정의된 터널 채널파가 사갱 연장성 규명을 위해 어느 정도 기여할 수 있는가를 살펴보기로 한다.

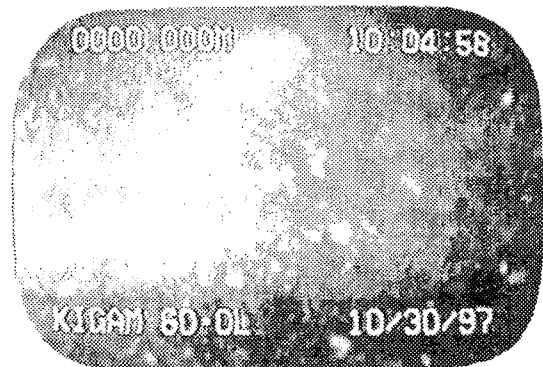
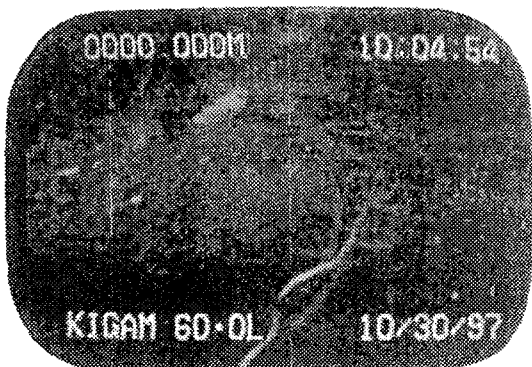
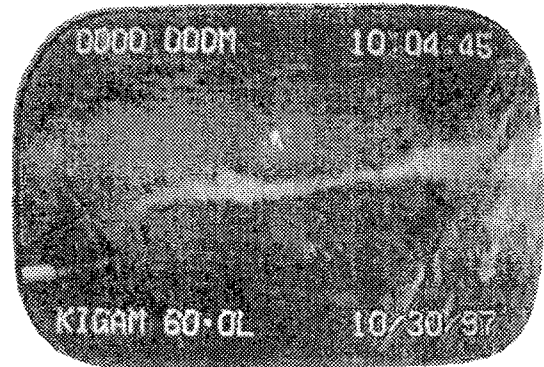
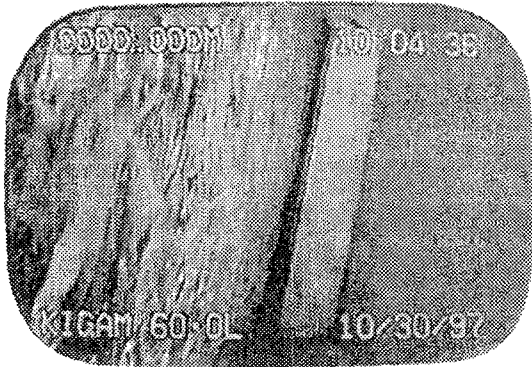
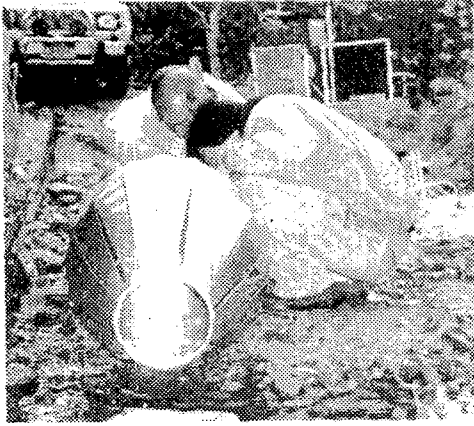


그림 3. 특별히 제작된 내시경을 갯내에 투입하는 전경. 촬영 화질은 갯도 바닥의 이물질이 부유함에 따라 급격히 하락하였다.

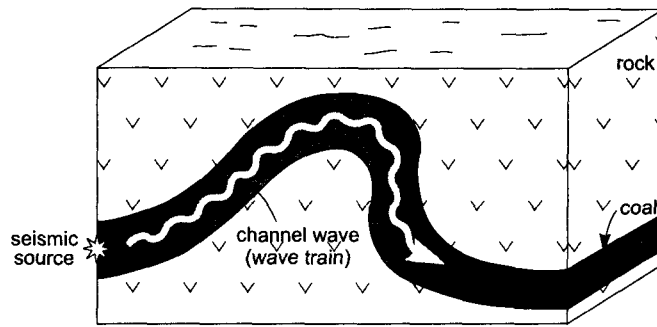


그림 4. 탄층 내에서 생성된 채널파는 거의 탄층 내에 국한되어 멀리 전달되는 특성을 보여주고 있다.

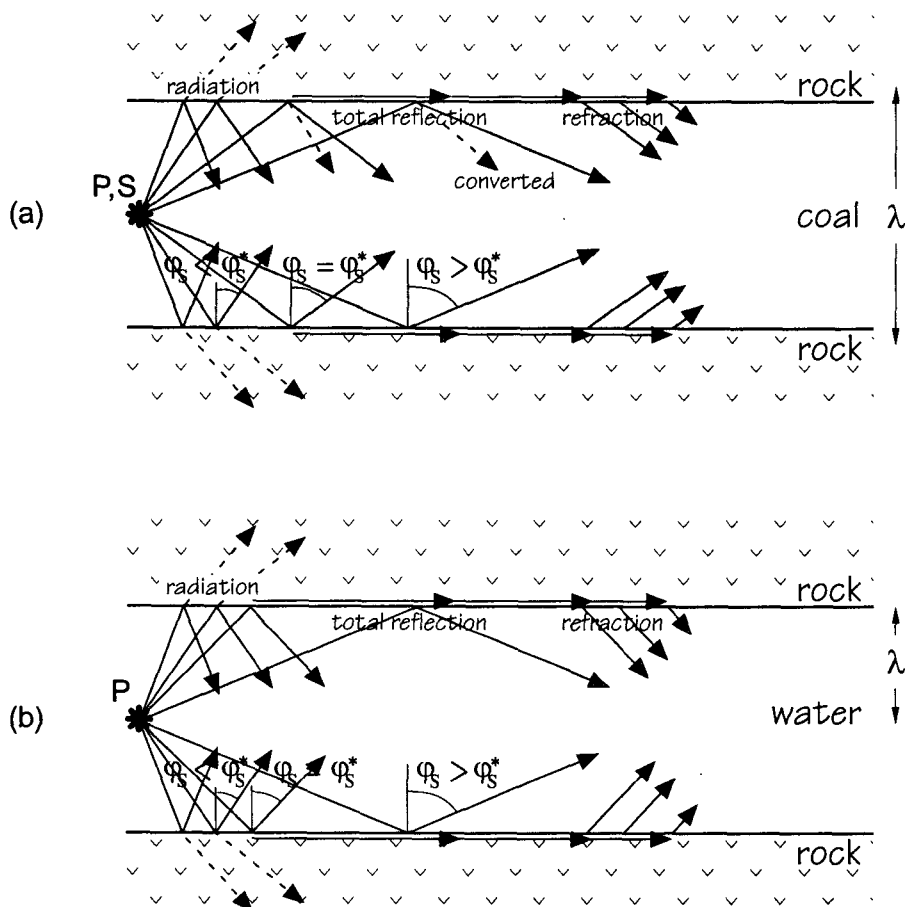


그림 5. 탄층 내의 채널파와 갱도내의 터널 채널파의 생성과정을 상호 대조하고 있다.

3. 사갱 연장성 규명

그림 6은 사갱 1의 연장성 조사를 위한 측정과정을 나타내고 있다. 발생원으로는 탄성파 탐사 전용 뇌관(2g)이 사갱 입구에서 사용되고 수신장치(다중채널 hydrophone chain, hydrophone 간격 1m)는 사갱 바닥에 배열되었다. 각 채널 기록은 10240 샘플을 갖고 있으며 그의 샘플링 간격은 1/32ms에 달하도록 하여 높은 주파수의 탄성파도 기록될 수 있도록 하였다. 따라서, 측정된 전체 주시 영역은 320ms가 되며 이는 만약 터널 채널파가 물의 속도로 전달된다면 사갱 연장길이 약 240m를 왕복할 수 있는 시간에 해당한다. 그림에서 사갱 1 하부에는 폐철도 노선이 연장되어 그들은 서로 만나는 것으로 예상되고 있다.

사갱 연장상태를 판단하는 기준은 사갱 내부로 전달되는 탄성파 파군을 하향파(downgoing wave)라 하였을 경우, 갱도 내의 큰 장애물(예: 갱도의 일부 혹은 전체 함몰상태, 갱도 막장 혹은 갱도 진로의 큰 변화)에 의해 반사되어 다시 갱도입구로 되돌아오는 상향파(upgoing wave)의 존재여부에 달려있다. 그림 7은 측정된 데이터를 단지 상용적인 전산기법에 의해 처리된 결과를 나타내고 있다. 여기서 주시 100ms 이전 세 개의 유사한 하향파가 관찰되고 있는 것은 뇌관 발파시 갱도 내의 이물질(예: 돌, 갱목 등)가 튕겨져 재발진된데 있으며 이러한 현상은 주어진 탐사여건에 비추어 불가피하다고 하겠다. (a)는 측정데이터에 단지 AGC(Automatic Gain Control)만 적용한 결과이며 (b)는 AGC 이후 다시 F-K(Frequency-Wave number) 필터(김중열 외, 1989)를 적용한 결과를 나타내고 있다. 여기서 화살표로 지적된 상향파가 뚜렷이 인식되고 있음을 볼 수 있다. 대체로 상향파와 하향파의 연장이 교차하는 지점이 바로 갱도 장애물 위치가 되며 그들은 갱도입구로부터 약 108m, 148m, 232m 거리에 떨어져 있는 것으로 판단되었다. 따라서, 그림 6에 나타난 사갱과 폐철도 진로와의 연계성을 고려한다면 상기 사갱은 폐철도와 연결되고 있다고 볼 수 있다.

그림 8은 사갱 2에 대한 측정과정을 나타내고 있다. 이번에는 hydrophone chain을 갱내에 밀어넣는 작업의 어려움으로 인하여 단지 25개의 수신기(hydrophone)만 배열할 수 있었다. 그림 9는 측정된 데이터에 단순히 AGC만을 적용한 결과를 보여주고 있다. 여기서는 사갱 1의 경우와는 달리 우선 재발진 현상이 상대적으로 약화되고 있으며 나아가서 관심의 초점이 되고 있는 상향파의 도달은 전혀 관찰되지 않고 있음을 볼 수 있다. 따라서, 사갱 2의 길이는 240m(측정한계치) 이상 되는 것으로 판단되었으며 이는 바로 사갱 2가 계획된 육십령 터널과 인접되어 교차될 수 있음을 시사하는 것이 되겠다. 이러한 결과가 발표된 후 육십령 터널 굴착과정에서 약 1년이 지난 즈음 상기 사갱 2가 실제로 인접하여 교차되고 있음이 확인되었다.

4. 결 론

육십령 터널 착공 시 터널 노선 주위에 해방 전 철도터널 작업용으로 추정되는 두 개의 사갱(사갱 1, 2로 명명)이 발견되어 그에 따른 육십령 터널시공의 안정성 문제가 크게 대두되었다. 이러한 문제는 무엇보다 사갱의 연장상태와 직접적으로 연관되기 때문에 그에 대한 정확한 규명이 본 논문의 핵심내용이 되었다. 만약, 물로 채워진 사갱 내에서 탄성파가 생성되면 우선 갱내수, 암반 경계면의 높은 반사계수($R \approx 0.75$)로 인하여 무수히 많은 반사파(전반사)가 유발되어 상호 중첩되며 그로부터 형성된 파군(wave train)은 갱도를 따라 멀리 전달될 것이 기대되었다. 이러한 특이한 탄성파 전달현상은 바로 탄층 구조에서 흔히 관찰되는 채널파의 것과 유사하다고 할 수 있다. 이러한 새로운 착상은 바로 현장실험으로 이어지게 되었으며 그 결과는 바로 사갱 연장성 규명을 위한 바람직한 자료가 되었다.

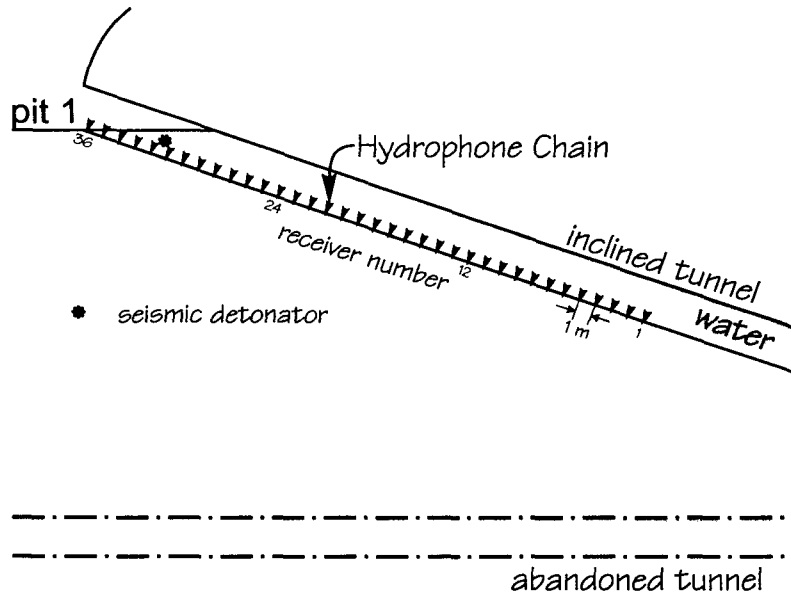


그림 6. 사갱 연장성 규명을 위한 발생원 및 수신기 배열 상태.

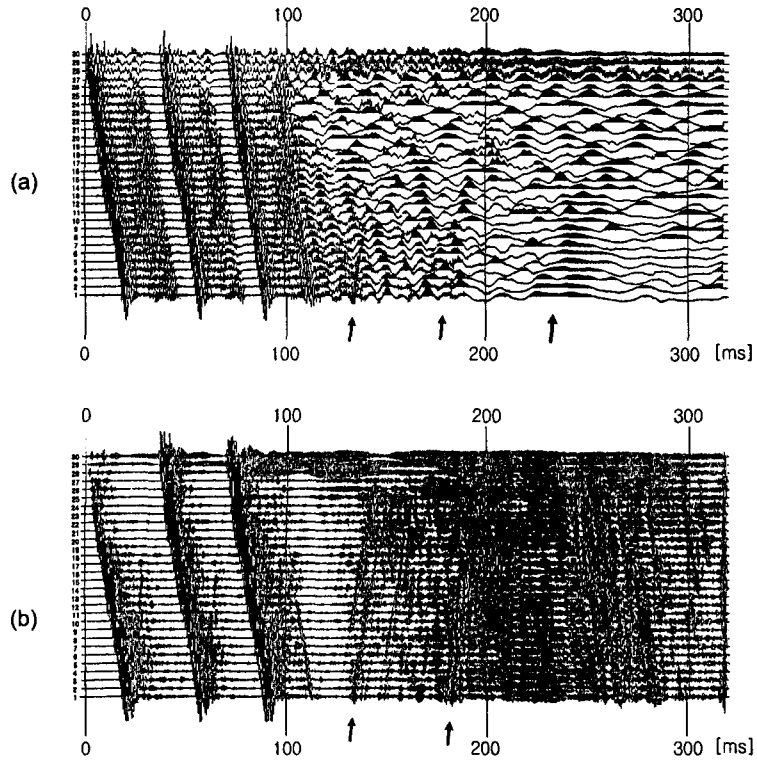


그림 7. 사갱 1에 대한 데이터 분석 결과.

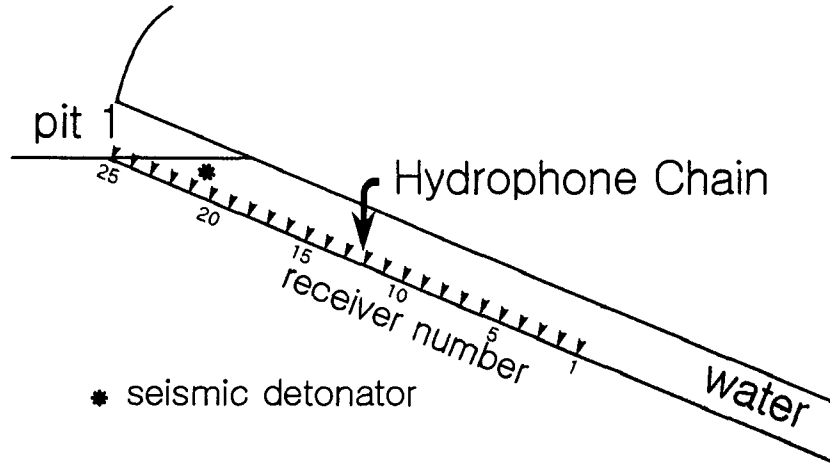


그림 8. 사갱 연장성 규명을 위한 발생원 및 수신기 배열 상태.

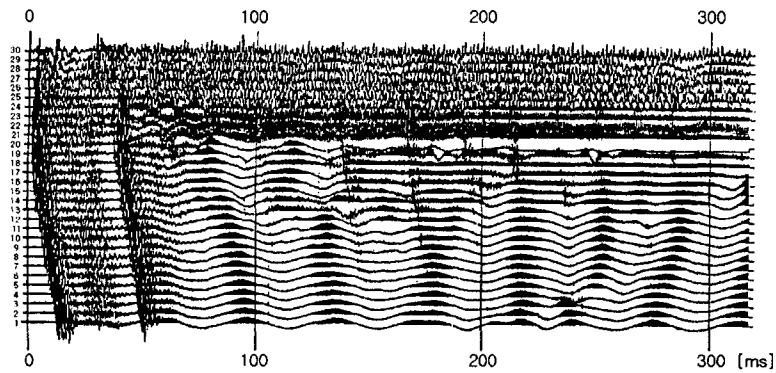


그림 9. 사갱 2에 대한 데이터 분석 결과.

5. 참고 문헌

1. 김중열(1983), "Feinstrukturuntersuchung in der seismik mit hilfe der shot-time homomorphen analyse", Ph D. thesis, Berlin University
2. 김중열, 구자학, 김상엽, 현혜자, 김기석(1989), "탄층연속성 조사를 위한 채널파의 연구(II)", 한국동력자원연구소, 과학기술처
김중열, 현혜자, 김기석, 김유성, 성낙훈, 구자학(1990), "탄층연속성 조사를 위한 채널파의 연구(III)", 한국동력자원연구소, 과학기술처
3. 정현기, 강동훈, 김기석, 김중열, 최종호(1995), "시추공 TV 검층기 국내개발 및 현장 적용사례", 한국자원공학회 특별 심포지움 논문집, pp.221~232
4. Dresen, L. and Rüter, H.(1994), *Seismic coal exploration. part B : in-seam seismics*, handbook of geophysical exploration, Vol 16B.
5. Krey(1963), "Channel waves as a tool of applied geophysics in coal mining", *Geophysics*, Vol 28. pp. 701~714