

## 시추공 레이더 탐사를 이용한 손상대(EDZ) 탐지

조성준<sup>1)</sup>, 김정호<sup>1)</sup>, 손정술<sup>1)</sup>, 김창렬<sup>1)</sup>, 성낙훈<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>한국지질자원연구원 지반안전연구부, [mac@kigam.re.kr](mailto:mac@kigam.re.kr)

### Feasibility test on EDZ detection by using borehole radar survey

Seong-Jun Cho<sup>1)</sup>, Jung-Ho Kim<sup>1)</sup>, Jeong-Sul Son<sup>1)</sup>,  
Changryol Kim<sup>1)</sup>, Nak-Hun Sugn<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Geotechnical engineering Div., KIGAM

**요약** : 현재 건설중인 한국원자력 연구소 내의 지하 처분 연구시설에서 발파에 의한 터널 굴착 중 발생하는 손상대를 모니터링 하기 위해 시추공 레이더 반사법 탐사를 수행하였다. 60 m 길이의 진입 터널이 완성되고 끝단에 셸터가 만들어진 뒤 셸터로부터 길이 35 m의 수평 시추공을 뚫어 터널 굴착에 따른 손상대 모니터링을 위한 관측공으로 사용하였다. 시추공은 굴착터널로부터 5.5 m 떨어져 있으며, 2~4일 간격으로 5회 실험을 실시하였다. 터널의 굴착에 따른 터널면에서의 반사가 가장 강력한 반사면으로 작용하였으며, 서로 다른 날짜의 자료의 비교를 통해 터널 굴착면에 인접한 반사면의 변화를 감지 하였으며 이는 균열대의 생성과 암반 강도의 저하에 의한 것으로 여겨 졌으며 손상대로 평가되었다.

**주요어** : 손상대, 시추공 레이더 반사법 탐사, 모니터링

**Abstract** : Borehole radar reflection surveys were carried out in the horizontal borehole to detect EDZ while constructing the tunnel for the research facility of the nuclear waste disposal in Korea. The horizontal borehole has been bored at a length of 35 m from shelter to be parallel with the tunnel which would be planed. While the tunnel has been constructing with the explosive excavation, the borehole radar reflection surveys carried out 5 times with the interval of 2 or 4 days for monitoring EDZ. The most typical change of the reflection event resulted from the face of the wall of tunnel which had been produced newly by the excavation of the tunnel daily, EDZ has been detected with constructing images of difference between two measurement stages, and also the change of EDZ through the time has been done, which is due to the generation of crack and weakening of the rock strength of the face of the tunnel's wall near previous portion of the face of a blind end of tunnel according to explosive excavation.

**Keywords** : EDZ, borehole radar reflection survey, monitoring

## 1. 서론

지하 터널 굴착에 의해 터널 주변은 손상을 입게 되며 이 손상강도는 특히 굴착 방법에 영향 받게 된다. 핵폐기물 처분장 건설시 손상대(EDZ: Excavation Damaged Zone)의 정확한 탐지는 터널의 밀폐를 위한 설계와 시공을 위한 중요한 변수가 된다(Fairhurst and Damjanac, 1996). 다양한 물리탐사 기법들이 손상대의 탐지를 위해 적용되었는데, 탄성파나 초음파를 이용한 방법(Schuster et. al, 2001)이나 광대역 IP (SIP)탐사(Kruschwitz and Yaramanci, 2004) 등이 좋은 결과를 보여 주었다.

이 연구는 현재 건설중인 한국원자력 연구소 내의 지하 처분 연구시설에서 발파에 의한 터널 굴착 중 발생하는 손상대를 시추공 레이더 탐사를 이용하여 모니터링 하기 위한 것이다. Fig.1 은 손상대의 개념을 보여주는 모식도로 그림에서 보듯이 터널이 굴착됨에 따라 발생한 손상대 내에 생긴 균열에 의해 전체적인 유전율의 변화가 생길 것임을 예측할 수 있으며 이는 시추공 레이더 반사법 탐사 모니터링을 통해 감지될 것이다. 이 논문에서는 먼저 원자력 연구소내 지하 처분 실험장에 대해 설명하고 터널 굴진 방향과 평행하게 뚫린 평행 시추공에서 적용할 시추공 레이더 반사법 탐사와 모니터링 일정과 터널 굴착 깊이 등에 기술한 후, 100 MHz 및 250 MHz 안테나를 이용한 탐사 결과 및 해석 결과에 대해 기술한다.

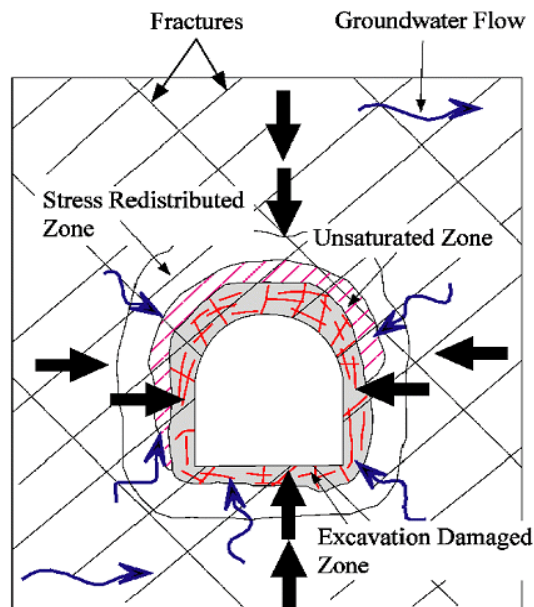


Fig. 1. Concept of EDZ. EDZ is generated newly by the explosive excavation especially.

## 2. 지하처분 연구시설

한국 원자력 연구소 내에 건설 중인 지하 처분 시설이 위치하는 지역의 지질은 복운모 화강암과 이를 관입한 산성과 염기성 암맥 그리고 제 4기 풍화 잔류토층으로 구성되어 있으며, 굴절법 탐사와 전기비저항 탐사를 통해 연구 모듈이 위치하는 곳의 암반은 비교적 신선한 것으로 알려졌다. 지하 처분 시설을 위한 터널 굴착의 총 연장은 230 m, 터널 단면은 6 m x 6 m 이며 연구 모듈은 터널의 양 끝 단에 위치하고 있다(Fig. 2). 터널은 약 10°의 하향 경사를 가지고 설계되었으며 시추공 레이더 탐사 모니터링을 실시할 때 60 m 까지의 진입 터널이 완성되어 있었다. 그림의 단면도의 컬러는 탄성파 속도를 나타낸다. 계획된 터널의 전체 24%가 RMR 81이상의 극경암으로 구분되며, 평균 RMR은 64이며, 평균 절리간격은 28cm 이다(Kwon et. al., 2006).

60 m의 진입터널이 완성된 후 끝 단의 왼쪽에 셸터(shelter)가 만들어 졌고 셸터에서 터널 굴착 방향으로 많은 시추공이 시추되었으며(Fig. 3), 이중 35m의 길이를 가지는 9번 수평 시추공이 모니터링 공으로 선택되었다.

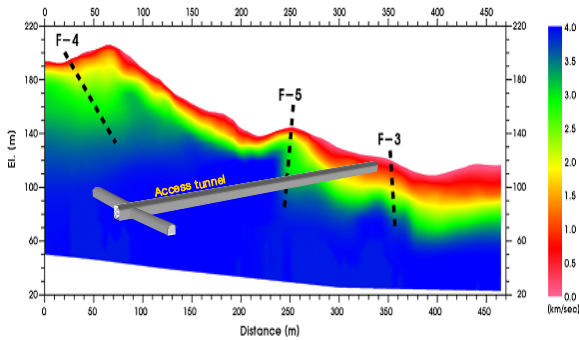


Fig. 2. Tunnel diagram for the research facility of the nuclear waste disposal with which the section of acoustic velocity is overlaid

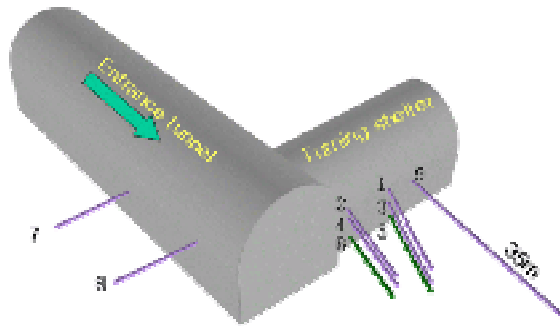


Fig. 3. Horizontal borehole for detecting EDZ by using the borehole radar reflection surveys (No. 9).

### 3. 시추공 레이더 반사법 탐사 모니터링

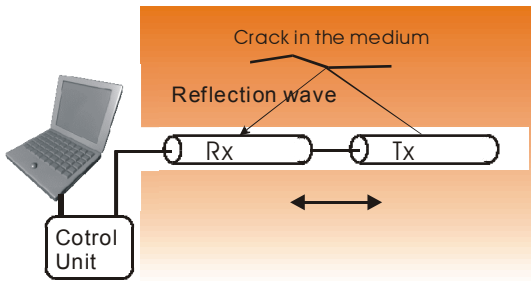


Fig. 4. Schematic diagram of borehole radar reflection survey in a horizontal borehole

시추공을 중심으로 360° 모든 방향에서 반사 신호가 들어 오기 때문에 해석에 주의를 기울여야 하며, 외부로 노출된 광케이블의 안전성 확보, 정확한 측정간격 확보 등에 유의해야 한다. 이 실험에서는 RAMAC/Borehole 100 MHz와 250 MHz 안테나가 사용되었으며, 자료처리는 당 연구팀에 의해 개발되어 상용화된 RADPRO® 를 사용하였다.

60 m 길이의 진입 터널이 완성되고 끝단에 쉘터가 만들어진 뒤 발파에 의한 터널 굴착이 시작되었다. Fig. 5와 같이 쉘터로부터 길이 35 m의 수평 시추공을 뚫어 터널 굴착에 따른 손상대 모니터링을 위한 관측공으로 사용하였다. 시추공은 굴착 터널로부터 5.5 m 떨어져 있으며, Fig. 5의 날짜는 시추공 레이더 반사법 탐사에 의한 모니터링을 실시한 날짜이며 색깔 변화로 표시된 부분은 그 날짜 까지의 터널 굴착 길이를 나타낸다. 각 실험명, 정확한 실험날짜와 터널 길이는 표 1에 표기되어 있다. 표에서 실험 Ex 1을 수행할 당시 이미 터널이 13m 굴착 되어 있음을 알 수 있다. 이는 현장 사정으로

터널 굴착에 따른 손상대를 모니터링 하기 위해 시추공 레이더 반사법 탐사를 적용하였다. Fig. 4는 수평 시추공에서의 레이더 반사법 탐사에 대한 개념도이다. 수평 시추공 레이더 반사법 탐사 역

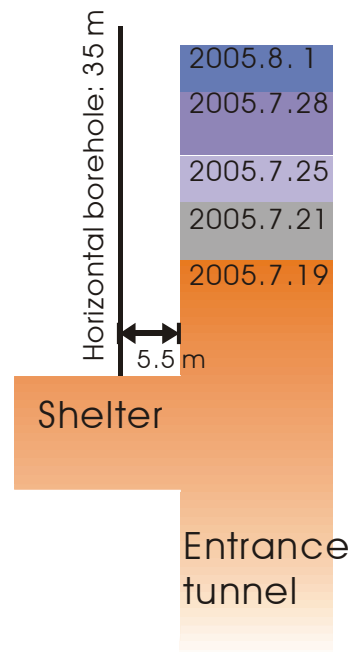


Fig. 5. Experiments schedule during the excavation of the tunnel. The horizontal borehole is located at 5.5 m apart from the tunnel.

터널 굴착 시작 단계에서부터 실험을 수행 하지 못했기 때문이다. 또한 5회 실험이 실시 되었 으며, 각 실험간의 간격은 2일 내지 3일 발파 정도가 되도록 조정하였다.

Table 1. The length of the excavation when experiments carried out

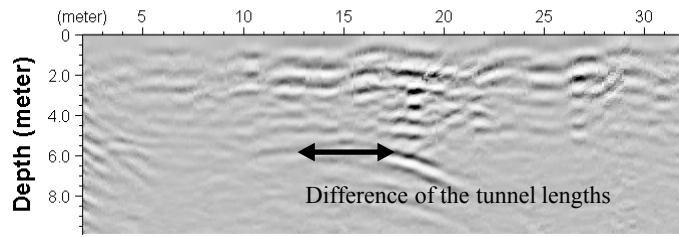
The name of experiment	Ex 1	Ex 2	Ex 3	Ex 4	Ex 5
The date of experiment	2005. 7.19	2005. 7.21	2005. 7.25	2005. 7.28	2005. 8.1
The length of excavation from shelter	13 m	17.5 m	22 m	28.9 m	33.3 m

#### 4. 모니터링 결과 및 해석

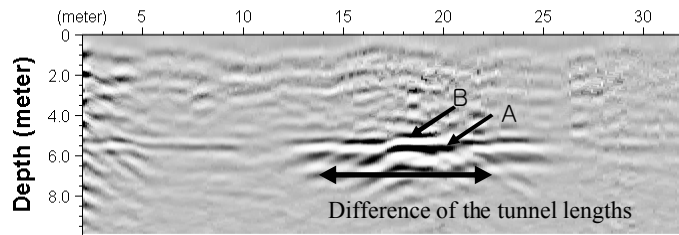
표1의 모니터링 실험에는 100 MHz 안테나와 250 MHz 안테나가 사용되었으며, 측정간격 은 둘 다 10 cm 이다. 그런데 250 MHz 안테나를 사용한 결과는 임피던스 부정합에 의한 링 잉 현상이 현저해 터널 굴착에 의해 발생하는 새로운 반사 이벤트를 찾기가 매우 어려웠다. 이 논문에서는 100 MHz 안테나에 의한 결과만 도시하겠다. Fig. 6은 100 MHz 안테나를 사 용하여 얻은 시추공 레이다 반사법 탐사의 결과이다. 각각 얻어진 자료에 DC 필터링, 이득 회 수, 밴드패스 필터링과 NMO 보정을 수행한 후 직접파와 링잉을 제거하기 위해 공간과수 영 역 필터링을 적용하였다. 이후 Ex 1을 기준으로 하여 각각의 모니터링 자료를 빼준 것이 Fig. 6의 자료이다. 예를 들어 Fig. 6(a)는 Ex 1의 반사법 단면에서 Ex 2의 반사법 단면을 빼 준 것으로 실제적인 계산은 두 자료의 동일한 트레이스의 동일 측정값을 빼주는 방식으로 이루어 진다. 이 프로세싱을 위해서는 두 자료간의 이득의 차이를 정밀하게 보정하는 것이 필 요하다. Fig. 6(a)는 2005. 7. 19 자료에서 2005. 7. 21 자료를 빼 준 것으로 새롭게 발생된 이벤트는 별로 없다. 단지 새로 발생한 터널 벽면에서의 반사와 회절양상 정도 가 특징적이다 . Fig. 6(b) 는 2005. 7. 19 자료에서 2005. 7. 25 자료를 빼 준 것으로 가장 특징적인 것은 평 행한 이벤트인 A로 이는 생성된 터널 벽면에서의 반사로 여겨지며, 이 보다 앞선 반사 이벤 트인 B 는 손상대면에서의 반사로 추정된다. 2005. 7. 19 자료에서 2005. 7. 28 자료를 빼 Fig. 6(c)에서 특징적인 이벤트는 A, B 와 C로 표시되어 있는데 A, B는 위의 해석과 동일하 며, C로 표기된 부분이 이전의 자료와 차이를 가지는 곳이다. Fig. 6(b)와 (c)를 비교해 보면 (c)의 C로 표기된 부분이 (b)에서는 터널 막장면에 인접한 곳으로 상당히 세기가 세고 A 와 B 이벤트에 포함되어 있음을 알 수 있다. 그러나 (c)에서는 신호의 세기가 약해지고 더 복잡 해졌음을 알 수 있다. 이는 2005. 7. 21에서 2005. 7. 25까지의 발파에 의해 균열이 확장되 면서 늘어나고 균열 사이가 공기로 충전 되어 신호가 복잡하고 약해진 양상을 보인 것으로 여겨진다. 정확한 손상대 범위를 확정하기는 어렵지만 이 부근에서는 1 m 이상 되는 것으로 여겨진다. 한편 Fig. 6(d)에서 보면 C는 변화가 없음을 알 수 있다.

다이폴 안테나를 사용한 이 실험은 모든 방향에서의 반사 이벤트가 기록되기 때문에 반사 이 벤트의 정확한 방향을 설정하는데 한계가 있다. 이를 해결하기 위해서는 방향 탐지 안테나가 도입되어야 할 것이다. 또한 100 MHz 안테나의 분해능으로는 손상대를 정밀 탐지하는데 어 려움이 있어, 고 주파수의 안테나의 사용이 요구되나 일반 결정질 암반대에 비해 가탐거리가 짧아 보다 터널벽에 근접한 시추공이 필요하다.

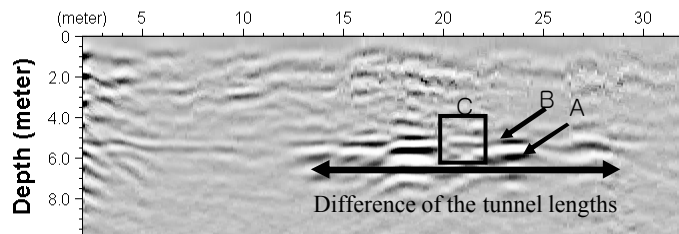
시추공 레이더 탐사를 이용한 손상대(EDZ) 탐지



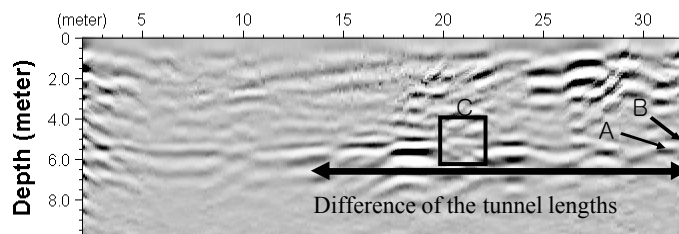
(a) Ex 1 - Ex 2



(b) Ex 1 - Ex 3



(c) Ex 1 - EX 4



(d) Ex 1 - Ex 5

Fig. 6. Subtraction image between the first measurement (Ex 1) and other.

5. 결론

현재 건설중인 한국원자력 연구소 내의 지하 처분 연구시설에서 발파에 의한 터널 굴착 중 발생하는 손상대 모니터링 하기 위해 시추공 레이더 반사법 탐사를 수행하였다. 60 m 길이의 진입 터널이 완성되고 끝단에 셸터가 만들어진 뒤 셸터로부터 길이 35 m의 수평 시추공을 뚫어 터널 굴착에 따른 손상대 모니터링을 위한 관측공으로 사용하였다. 시추공은 굴착터널로부터 5.5 m 떨어져 있으며, 2005년 7월 19일부터 8월 1일 까지 2~4일 간격으로 5회 실험을 실시하였다.

250 MHz 안테나를 사용한 결과는 임피던스 부정합에 의한 링잉 현상이 현저하고 감쇠가 커 터널 굴착에 의해 발생하는 새로운 반사 이벤트를 찾을 수 없었다.

100 MHz 안테나에 의한 결과에서 터널의 굴착에 따른 터널면에서의 반사가 가장 강력한 반사면으로 작용하였으며, 터널 굴착면에 인접한 반사면의 변화를 감지 하였으며 이는 손상대로 평가 되었다.

다이폴 안테나를 이용한 현재까지의 결과에서는 반사면의 정확한 방향을 탐지하기 어려웠다. 이를 해결하기 위해서는 방향탐지 안테나의 도입이 요구되며, 또한 정밀한 해석을 위해서는 굴착된 터널면에서의 GPR 탐사를 실시해 시추공 레이다 반사법 자료와의 상호 비교가 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 전문연구사업인 ‘지하정밀 영상화 융합기술 개발’ 과제의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- Fairhurst, .C and Damjanac, B., 1996, The Excavation Damage Zone- and international perspective. In: Martino, J.B., Martin, C.D.(Eds.), *Proceedings of the Excavation Disturbed Zone Workshop*. Canadian Nuclear Society, pp. 3-14.
- Kwon, S., Cho, W.J. and Han, P.J., 2006, Concept development of an underground research tunnel for validating the Korean reference HLW disposal system, *Tunnelling and Underground Space technology*, v. 21, pp. 203- 217
- Kruschwitz, S. and Yaramanci, U., 2004, Detection and characterization of the disturbed rock zone in claystone with the complex resistivity method, *Journal of applied geophysics*, **57**, pp 63-79.
- Schuster, K., Alheid, H.-J. and Böddener, D., 2001, Seismic investigation of the Excavation damaged zone in Opalinus Clay, *Engineering Geology*, **61**, pp. 189-197.