

## 수평 시추공간 지오레이다 토모그래피를 이용한 터널 굴착에 의한 암반 물성 변화의 고찰

정연문<sup>1)</sup> · 이명성<sup>1)</sup> · 송명준<sup>1)</sup> · 우 익<sup>1)</sup>

### Monitoring Rock Physical Property Changes due to Excavations Using Horizontal Crosshole Georadar Tomography

Yunmoon Jung, Myungsung Lee, Myungjun Song, Ik Woo

**ABSTRACT** The changes of electromagnetic wave velocity in rock were monitored to investigate rock behaviors due to the drill & blasting excavations through georadar tomography during the construction of the underground rock laboratory (5 m wide, 6 m high, and 140 m long) at Mabuk-Ri, Goosung-Myun, Yongin-Si, Kyunggi-Do. Two horizontal boreholes spaced 1.4 m apart were drilled parallel to the test tunnel before excavating it, high-resolution crosshole georadar tomography with about 500 MHz electromagnetic waves was performed at pre-excavation phase (May, 1996) and post-excavation phase (August, 1996). The data were acquired with the combination of 34 sources and 44 receivers with space of 0.3 m. Only 11 continuous receivers were selectively utilized with one fixed source. Sampling interval was 0.4 ns and each trace has 512 samples. The first arrival of each trace was picked manually with a picking software. The total number of rays used in inversion amounted to 34x11 and the size of pixel was determined to be 0.3 m. As an inversion technique, SIRT(Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) was applied in this study. The velocity of electromagnetic waves at post-excavation phase decreased as large as 15% in comparison with that at pre-excavation phase, which may be attributed to the creation of micro-cracks in rock due to excavations and saturation with groundwater. Small amount of borehole deviation made a critical effect in radar tomography. Totally different tomograms were created after borehole deviation corrections.

## 1. 서 론

인류에게 남겨진 마지막 공간으로서 지하공간의 중요성이 전세계적으로 대두되어 가고 있다. 특히 좁은 면적의 약 70%가 산악지역인 우리나라의 경우에 있어서 국토의 효율적인 활용이라는 측면에서 지하공간 개발의 필요성이 더욱 강조되어 가고 있는 추세이다. 지하공간의 성공적 개발을 위하여 어느 것 하나 중요하지 않은 것이 없겠으나 굴착설계는 지하공간의 안정성과 직접적인 연관이 있으며 굴착설계시에 암반의 거동을 정확히 예측하는 것이야말로 필수적이라 하겠다. 미국, 캐나다, 스웨덴, 영국등은 핵폐기물 지하 저장소 건설을 위하여 굴착에 의한 암반의 거동에 관한 연구를 수행하고 있으며 이와 같은 연구는 굴착영향범위(EDZ), 암반의 변형을 및 탄성과 속도의 변화등에 집중되어져

왔다.<sup>1)</sup>

현대건설(주) 기술연구소 지반기술부는 지하공간 개발에 필요한 기초 및 첨단 기술에 관한 연구를 꾸준히 수행하고 있으며 지하실험실에서 굴착에 따른 암반의 거동을 파악하기 위하여 계측, 수리시험, 지구물리시험 등 여러가지 현장 실험을 수행하고 있다. 본 연구에서는 경기도 용인군 구성면 마북리에 위치한 현대건설(주) 기술연구소에 건설한 폭 5 m, 높이 6 m, 총길이 약 140 m 규모의 지하실험실에서 첨단 지구물리탐사 기법중의 하나인 시추공간 지오레이다 토모그래피를 수행하였다. Access tunnel 벽면에 1.4 m 간격의 두 개의 수평 시추공을 test tunnel 방향과 평행하게 천공하여 test tunnel 굴착전인 1996년 5월과 굴착후인 1996년 8월에 약 500 MHz의 전자기파를 이용한 고분

1) 현대건설(주) 기술연구소 지반기술부

해능 지오레이다 토모그래피를 각각 수행하여 암반의 전자파 전파 속도의 변화를 고찰함으로써 터널 굴착에 따른 암반의 거동을 연구하였다.

## 2. 지오레이다 탐사

레이다(RADAR)는 RAdio Detecting And RAnging의 약자로서 제 2차 세계 대전중 적합대 또는 비행기를 포착하기 위하여 사용되기 시작하였다. 그의 기본 개념은 수 백만 또는 수 천만 Hz의 고주파 전자파 신호를 공중에 방사시킨 후 원하는 포착물에서 반사되어 온 전자파를 수신하여 포착물의 위치를 확인함에 있다. 이와 같은 원리를 지하에 그대로 적용한 것이 지오레이다 탐사로서 송신기(transmitter)에서 발생된 일정한 전기신호를 안테나를 통해 전자기파(electromagnetic wave)로 변환하여 방사하고, 전기적 물성이 다른 지질의 경계면에서 반사, 투과, 굴절 및 회절된 파를 안테나로 감지하고 전기신호로 재변환하여 수신기(receiver)에서 수신, 처리/분석함으로써 지하 매질의 특성을 규명하고 이를 가시적인 형태로 영상화하는 기술이다.<sup>2)</sup>

지오레이다 탐사법은 크게 지표 지오레이다 탐사(GPR: Ground Penetrating Radar 또는 Ground Probing Radar)와 시추공 지오레이다 탐사(borehole georadar)로 나눌 수 있으며, 시추공 지오레이다 탐사는 탐사 방식에 따라 단일시추공 레이다 탐사(singlehole reflection), 지표-시추공 레이다 탐사(VRP: Vertical Radar Profiling), 시추공간 토모그래피(crosshole tomography)로 분류할 수 있다. Fig. 1은 지오레이다의 탐사법을 개략적으로 보여주고 있다. 지표 지오레이다 탐사의 경우, 경제성, 신속성등의 이유로 반사법이 통상 적용되고 있으나 표토층의 높은 전기전도도로 인한 전파의 극심한 감쇄로 인하여 심부까지 탐사가 불가능하다. 따라서 지표 지오레이다 탐사는 지표 천부의 자세한 영상을 그려내기 위한 목적으로 사용된다. 이에 반해 시추공 지오레이다 탐사는 안테나가 심부에 위치할 수 있으므로 표토층내가 아닌 경우에는 전자파의 에너지 감쇠가 적으며 특히 안테나가 암반내에 위치할 경우에 암반의 낮은 전기전도도로 인하여 에너지의 투과가 용이하며 상대적으로 가탐거리가 길다.

토모그래피란 물체 외부에서 측정된 물성자료(주로, 주시나 진폭)를 이용하여 물체 내부의 임의의 단면에서의 물성분포를 가시화하는 수학적 역산법을 말하며 레

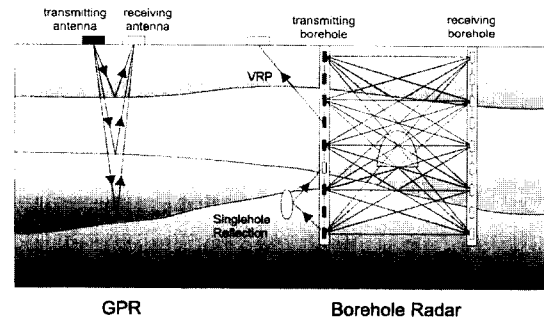


Fig. 1. Schematic diagram of georadar survey.

이다 토모그래피는 전자기파가 불균질체를 통과할 때 발생하는 파의 투과, 굴절, 산란, 감쇄 현상등을 이용한 것이다. 시추공간 지오레이다 토모그래피는 레이다를 이용한다는 측면외에는 의학용으로 사용되는 CT (Computerized Tomography)를 지하 탐사에 이용한 것이다. 의학용 토모그래피에 비해 지하구조를 규명하고자 하는 지오토모그래피는 투사각의 제약, 지질구조에서의 파의 복잡한 전파등으로 매우 심각한 한계를 내포하고 있으며 이러한 제약때문에 지오토모그래피에는 복잡한 이론과 매우 다양한 처리기법이 요구된다. 토모그래피에 이용되는 역산법은 크게 변환법(transform technique)과 급수 전개법(series expansion technique)으로 나눌 수 있으며 지오토모그래피에서는 투사각의 제약등의 이유로 급수 전개법이 주로 사용된다. 급수 전개법은 초기값을 지정하고 계산된 보정값으로 초기값을 반복적으로(iteration) 보정하는 방법이며 보정값을 계산하는 방법에 따라 ART, SIRT, LSQR, DLSQ, SVD, CG법등으로 세분된다.<sup>3)</sup>

## 3. 지형 및 지질

본 연구는 경기도 용인군 구성면 마북리에 위치하고 있는 현대건설(주) 기술연구소의 지하실험실에서 수행되었다. 본 지역은 지표에 노두가 거의 관찰되지 않을 정도의 풍화토층으로 이루어져 있는 완만한 구릉의 노년기 지형이다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 지하 실험실은 산 능선을 따라 진행되다가 90도 좌측으로 꺾이는데, 이 부분이 지표의 계곡부에 해당되며, 약 30 m의 토피를 갖게된다.

본 지역의 기반암은 경기 용인지역에 넓게 분포하는 선헤프리아기의 경기편마암 복합체중에서 가장 대표적 인 호상 흑운모편마암(banded biotite gneiss)으로 구

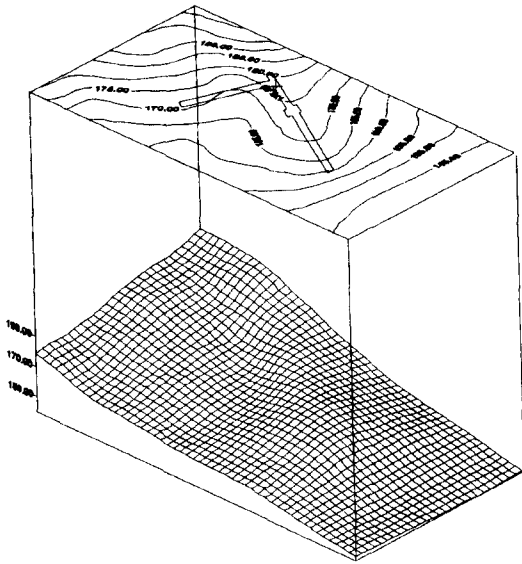


Fig. 2. Topography and location map of the HICT underground rock lab.

성되어 있으며, 부분적으로 규장 편마암과 각섬석 편마암을 배태하고 있다. 기반암은 전반적으로 흑운모와 각섬석등의 유색광물과 석영, 장석류의 무색광물이 교호되어 나타나는 호상 구조를 가진 편마암(banded gneiss)이 우세하나 부분적으로 편리구조가 잘 발달된 흑운모 편암(biotite schist)의 산상을 보이는가 하면, 국부적으로 열수변질의 증거도 관찰되는데, 이 부분은 규화(silicified)되어 있으며 잔균열이 많이 발달되어 있다.

본 지역의 기반암에는 엽리상 절리(foliation joint)가 전구간에 걸쳐 비교적 균질한 밀도로 관찰되고 있으며 엽리의 방향과 경사가 지역적으로 약간의 변화는 있으나 N75W/35SW의 방향이 가장 우세하게 나타난다. 암반의 공학적 분류를 시도한 결과, 터널 구간의 Q값은 0.63~5.8정도의 범위를 가지나 평균 3.3으로 다소 불량한(D class: poor) 암반 상태로 분류되었다. 또한 RMR system에 의한 암반분류를 한 결과, 평균 rating value가 48로 양호한 (3등급: fair) 암반에 속하는 것으로 평가되었다.<sup>4)</sup>

#### 4. 자료획득 및 분석

현대건설(주)은 1996년 3월부터 7월까지 경기도 용인군 구성면 마북리에 위치한 기술연구소 부지내에 순수 연구 목적으로 실제 터널 크기의 지하실험실을 건설

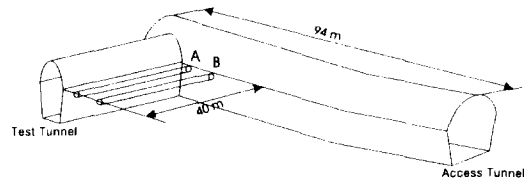


Fig. 3. Horizontal boreholes drilled parallel to the test tunnel.

하였다. 본 지하실험실의 규모는 폭 5 m, 높이 6 m이며 Fig. 2와 3에서 알 수 있듯이 약 100 m 길이의 access tunnel 끝에 40 m 길이의 test tunnel이 좌측 90도 방향으로 굴착되었다. 천공/발파 굴착이 암반의 거동에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 test tunnel을 굴착하기 전에 굴착 진행방향으로 터널 측벽으로부터 0.5 m와 1.9 m 떨어진 위치에 두 개의 수평 시추공을 40 m 깊이까지 평행하게 천공하였다. 이 두 개의 수평 시추공을 이용하여 test tunnel 굴착전인 1996년 5월과 굴착후인 1996년 8월에 지오레이더 토모그래피를 각각 수행하였다.

본 연구에 사용된 지오레이더 장비는 노르웨이 NGI (Norwegian Geotechnical Institute)가 주축이 되어 현대건설(주)과 공동으로 개발한 시스템으로 HP8753 network analyzer를 기반으로 개발되었다. 본 지오레이더 시스템은 송수신기인 network analyzer, 시스템 콘트롤 및 자료저장에 사용되는 PC, 그리고 여러 가지 주파수 범위를 갖고 있는 안테나들로 구성되어 있다. 본 연구를 위하여 공기중에서 1,500 MHz의 주파수를 발생시킬 수 있는 15 cm 길이의 dipole 시추공용 안테나가 제작되었으며 100~1,100 MHz의 주파수 영역이 자료획득시 사용되었다.

시추공간 토모그래피 탐사를 위하여서는 두 개의 시추공(송신시추공과 수신시추공)이 필요하다. 본 연구에서는 PVC 파이프에 송신안테나를 고정시켜서 송신시추공(borehole B) 내부로 송신안테나를 끝까지 밀어넣은 후, 같은 방법으로 수신시추공(borehole A) 내부로 밀어넣은 수신안테나를 매번 0.3 m 간격으로 11회 이동시켜 수신점 위치를 변화시키면서 레이더 송수신 측정을 실시한 후, 송신안테나를 0.3 m 후방으로 이동시키고 동일한 방법으로 반복 실시하였다. 한 송신안테나의 위치에서 수신안테나를 전방으로 1.5 m, 후방으로 1.5 m를 이동시켜 총 3 m의 거리에서 송수신 측정을 하였다.

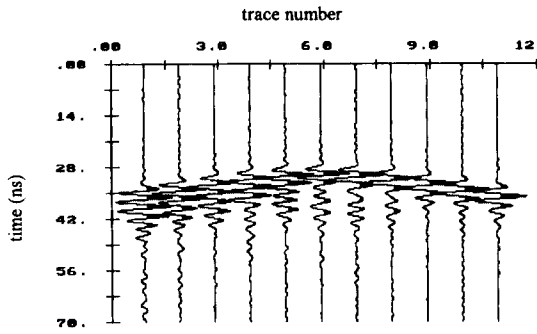


Fig. 4. Typical dataset acquired in georadar tomography.

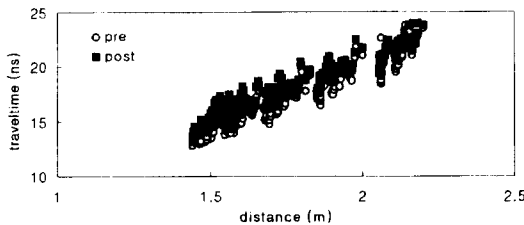


Fig. 5. T-X plot of first arrivals.

각 트레이스마다 512개의 자료를 0.4 ns 간격으로 샘플링하였고 신호대잡음비를 향상시키기 위하여 30 Hz를 intermediate frequency로 사용하였다. Fig. 4는 대표적인 획득 자료를 보여주고 있으며 이는 송신안테나를 한 위치에 고정시키고 수신안테나를 변화시키면서 획득한 자료들을 동시에 도시한 것으로 'shot gather'라고 불리운다.

시추공 A와 B는 40 m 깊이까지 천공되었으며 터널 굴착전에는 전 구간에서 자료가 획득되었다. 그러나 test tunnel 측벽에서 가까운 시추공 A가 편향된 천공으로 인하여 15 m 지점에서 손상되어 터널 굴착후에는 15 m 구간까지만 자료획득이 가능하였다. 또한 토모그램의 시작 및 끝 부분은 통상적으로 불충분한 자료로 인하여 결과의 신뢰성이 떨어지므로 해석에서 제외하였고 3.6 m 부터 12.6 m까지 구간만의 토모그램을 작성하였다.

'GEOMATE'라는 프로그램을 이용하여 각 트레이스의 초동을 수동으로 발췌하였다. GEOMATE는 발췌된 초동의 주시 및 진폭을 파일에 저장하며 Fig. 5는 발췌된 초동의 시간과 거리와의 관계(T-X plot)를 도시하고 있다. Fig. 5에서 터널 굴착후의 초동의 주시(청색 사각형)는 터널 굴착전의 초동의 주시(황색 원)와 비교

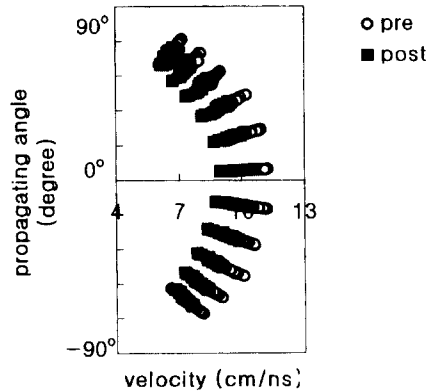


Fig. 6. Directional velocity plot.

하여 지연된 것을 쉽게 발견할 수 있으며 이는 터널 굴착후의 전파와 전파 속도가 터널 굴착전과 비교하여 느려진 것을 의미한다. 이와 같은 현상은 속도를 전파 방향별로 도시한 Fig. 6에서도 발견되고 있다. 전파 방향이란 송신안테나와 수신안테나의 위치에 따른 상대적 각도를 의미한다. Fig. 6에서 속도는 전파 방향과 특정한 관계를 갖고 있지 않은 것을 알 수 있으며 이는 조사 지역의 암반이 비교적 등방성(isotropic) 매질임을 의미한다.

### 5. 자료해석

시추공간 토모그래피 역산을 위한 전산처리 프로그램의 입력자료로는 통상적으로 수신과 초동의 주시(traveltime) 또는 진폭(amplitude)이 사용된다. 수신파의 주시에 근거하여 얻게 되는 처리영상은 속도 토모그램(velocity tomogram)이라고 하며 수신파의 진폭 감쇄량의 정보를 이용하여 얻게되는 처리영상은 진폭 토모그램(amplitude tomogram)이라고 한다. 일반적으로 전파는 지하수로 포화된 암반보다 건조한 상태의 암반에서 투과심도가 더욱 깊으며 함수비가 높을수록 전파속도는 낮아지고 진폭감쇄량이 커지는 경향을 가지고 있다. 본 연구에서는 주시 정보를 역산에 이용하여 영상처리를 하였다.

송신안테나는 0.3 m 간격으로 34개가, 각 송신안테나당 0.3 m 간격의 11개의 수신안테나가 사용되어 총 34×11개의 파선이 역산에 사용되었다. 그리고 통상적으로 급수 전개법(series expansion method)을 역산에 적용할 경우에는 탐사 단면을 픽셀(pixel)로 나누며

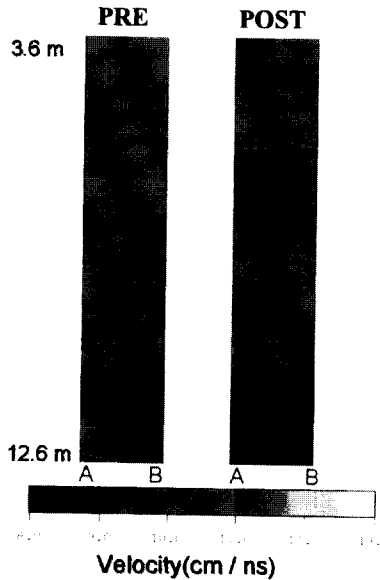


Fig. 7. Velocity tomograms before hole deviation corrections.

픽셀내의 물성은 일정하다고 가정한다. 본 조사에서는 픽셀의 크기를 0.3 m로 결정하였으며 역산 기법으로는 SIRT(Simultaneous Iterative Reconstruction Technique)를 사용하였다.

터널 굴착전후의 속도 토모그램이 Fig. 7에 나타나있다. 이 토모그램들은 두 수평 시추공을 포함하는 2차원 평면상에서의 속도 분포를 나타낸다. 토모그램의 수직 방향은 시추공 입구로부터의 거리, 수평방향은 두 시추공 사이의 거리를 의미한다. 토모그램내의 컬러는 매질내에서의 전자파의 전파속도를 의미하는 바, 적색은 높은 전파 속도를, 청색은 낮은 전파 속도를 각각 의미한다. 전체적으로 터널 굴착후의 조사 구간의 전자파 전파 속도는 터널 굴착전과 비교하여 감소하였으며 조사 구간의 후반부(10.3 m~12.6 m)는 전반부(3.6 m~5.8 m)와 비교하여 속도가 낮은 것으로 보인다.

레이다 토모그래피에서는 짧은 거리 차이에 기인하는 미세한 주위의 차이도 토모그램에 심각한 영향을 미친다. 다시 말해서, 탄성과 토모그래피에서는 무시될 수도 있는 수 십 cm의 시추공 편향도 레이다 토모그래피에서는 중대한 영향을 미칠 수 있다. 이와 같은 현상을 방지하기 위하여 본 연구에 사용된 수평 시추공의 편향을 Multiple Shot 측량기를 이용하여 측정하여 송수신 안테나의 정확한 위치를 파악하였다. 자료 획득에 사용되었던 송수신 안테나의 정확한 위치가 Fig. 8에

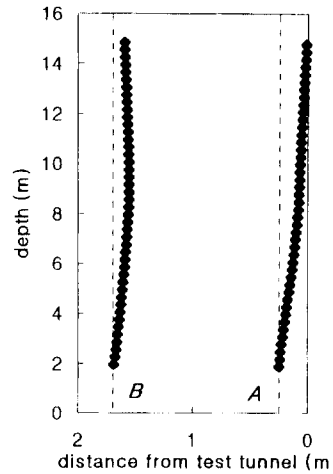


Fig. 8. Deviation corrected source/receiver locations.

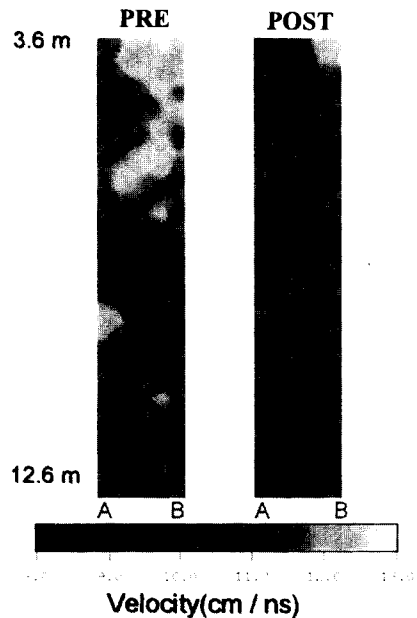


Fig. 9. Velocity tomograms after corrections.

표시되어있다. 시추공 A가 test tunnel과 평행하지 않게 천공되어 시추공 입구로부터 약 15 m 지점에서 손상될 수 밖에 없었던 이유를 명백하게 알 수 있다.

Fig. 9에는 시추공 편향을 보정한 후의 속도 토모그램이 나타나 있으며 Fig. 7의 시추공 편향 보정전의 토모그램과는 현저하게 상이함을 보여주고 있다. Fig. 7과 마찬가지로 전반적으로 터널 굴착후의 전자파 전파 속도는 터널 굴착전과 비교하여 감소하였다. 이와 같은 감소는 천공/발파 굴착으로 인하여 발생한 암반내의 미세 균열(micro-crack)이 지하수에 포화되었기 때

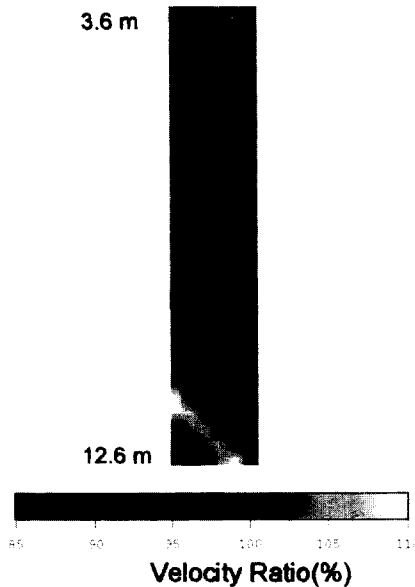


Fig. 10. Velocity change ratio.

문인 것으로 사료된다. 그러나 위에서 언급한 조사 구간간의 전후반부 사이의 속도 차이는 더 이상 파악되지 않았으며 이는 시추공의 편향에 기인하였던 것으로 판단된다. Fig. 9의 터널 굴착전 토모그램의 약 12 m 지점에서 나타나는 약 45도 각도의 저속도 선형 이상대는 코어에서 발견되는 절리의 방향과 잘 일치하고 있다.

Fig. 10은 동일 구간에서 터널 굴착 전후의 속도의 변화율을 보여주고 있으며 청색은 높은 속도 변화율을, 적색은 낮은 속도 변화율 또는 속도 증가를 각각 의미한다. 터널 굴착후의 조사 구간간의 전자파 전파 속도는 터널 굴착전과 비교하여 최대 15%까지 감소하였다. 이와 같이 조사 구간내의 속도 변화율이 일정하지 않은 것은 암반의 불균질성(inhomogeneity)에 기인하는 것으로 사료된다. Fig. 9에서 언급되었던 절리와 관련된 것으로 판단되는 선형 이상대에서는 터널 굴착후에 속도가 증가하였다. 이 현상은 주변의 계측기 설치 과정

에서 사용되었던 시멘트 그라우팅재가 절리에 우연히 충전된 것으로 설명되어질 수 있다.

## 6. 결 론

경기도 용인시 구성면 마북리에 위치한 현대건설(주) 기술연구소에 건설한 폭 5 m, 높이 6 m, 총길이 약 140 m 규모의 지하실험실에서 고분해능 시추공간 지오레이다 토모그래피를 수행하여 천공/발파 굴착에 따른 암반내의 전자파의 속도 변화를 성공적으로 고찰하였다. 터널 굴착후의 조사 구간간의 전자파 전파 속도는 터널 굴착전과 비교하여 최대 15%까지 감소하였으며 이와 같은 감소는 터널 굴착으로 인하여 발생한 암반내의 미세 균열이 지하수에 포화되었기 때문인 것으로 사료된다.

미세한 시추공 편향도 레이더 토모그래피에 심각한 영향을 미쳤으며 시추공 편향 보정후에 현저히 다른 토모그램이 작성되었다. 전자파의 전파 방향과 속도가 특정한 관계를 갖고 있지 않은 것으로 미루어 조사 구간간의 암반은 비교적 등방성 매질인 것으로 판단되며 조사 구간내의 속도 변화율이 일정하지 않은 것은 암반의 불균질성(inhomogeneity)에 기인하는 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. Barton, N., 1995, Rock mechanics investigations for radioactive waste repository design, 지하공간개발 Rock Cavern Stadium Project 최종성과 발표회 논문집, 현대건설 기술연구소, pp.1-69.
2. 이영남, 이명성, 1994, 지하공간개발: georadar와 tomography, 현대건설 기술연구소.
3. Jung, Y., Ibrahim, A. W., and Borns, D. J., 1991, Mapping fracture zones in salt: High-resolution, cross-gallery seismic tomography, Leading Edge, 10, pp.37-39.
4. (주)코아지질, 1995, 마북리 현대건설 기술연구소 지하실험실 지반조사 보고서, pp.1-11.