

지오레이다 토모그래피를 이용한 굴착에 의한 암반물성 변화에 관한 연구 Investigation of Rock Physical Property Changes by Excavation Using Georadar Tomography

정연문¹⁾, Yun-Moon Jung, 이명성¹⁾, Myung-Sung Lee, 송명준¹⁾, Myung-Jun Song,
우익¹⁾, Ik Woo, 이영남¹⁾, Young-Nam Lee

¹⁾ 현대건설(주) 기술연구소 지반기술부, Hyundai Institute of Construction Technology

SYNOPSIS : The importance of developing underground space is emphasized to make effective use of limited land. As a leading pioneer in Korea, Hyundai Institute of Construction Technology (HICT) has been performing the basic and up-to-date technologies needed for developing underground space. HICT are carrying out several field experiments to study the rock behaviors due to excavation at the biggest test tunnel in Korea (W=5m, H=6m, L=140m) located at Mabukri. As one of methods to investigate rock physical property changes by excavation, crosshole georadar tomography, one of state-of-the-art geophysical methods, was applied. Horizontal crosshole georadar tomography was executed twice; at pre- and post-excavation phases in use of two horizontal boreholes that were drilled parallel to the test tunnel. The comparison of two tomograms showed the velocity of radar waves in rock has decreased 10% at maximum after excavation.

Key words : excavation, rock physical property, georadar tomography

1. 서론

인류에게 남겨진 마지막 공간으로서 지하공간의 중요성이 전세계적으로 대두되어 가고 있다. 특히 제한된 국토를 가진 우리나라의 경우에 있어서 국토의 효율적인 활용이라는 측면에서 지하공간 개발의 필요성이 더욱 강조되어 가고 있는 추세이다. 지하공간의 성공적 개발을 위해서 어느 것 하나 중요하지 않은 것이 없겠으나 굴착설계는 지하공간의 안정성과 직접적인 연관이 있으며 굴착설계시에 암반의 거동을 정확히 예측하는 것이야말로 필수적이라 하겠다. 현대건설(주) 기술연구소 지반기술부는 지하공간 개발에 필요한 기초 및 첨단 기술에 관한 연구를 꾸준히 수행하고 있으며 국내 최초의 실험 터널을 건설하면서 굴착에 따른 암반의 거동을 파악하기 위하여 계측, 수리시험, 지구물리시험등 여러가지 현장 실험을 수행하고 있다.

본 연구에서는 경기도 용인군 구성면 마북리에 위치한 현대건설(주) 기술연구소 부지내에 건설한 폭 5m, 높이 6m, 총길이 약 140m 규모의 국내 최초의 실험 터널에서 첨단 지구물리탐사 기법중의 하나인 시추공간 지오레이다 토모그래피를 수행하였다. access tunnel 벽면에 1.4m 간격의 두 개의 수평 시추공을 천공하여 test tunnel 굴착전인 1996년 5월과 굴착후인 1996년 8월에 수 백 MHz의 전자기파를 이용한 고분해능 지오레이다 토모그래피를 각각 수행하여 암반내에서의 전자파 전파 속도의 변화를 고찰함으로써 굴착에 따른 암반의 거동을 연구하였다.

래피는 레이더를 이용한다는 측면외에는 의학용으로 사용되는 CT (Computerized Tomography)를 지하 탐사에 이용한 것이다. 의학용 토모그래피에 비해 지하구조를 규명하고자 하는 지오토모그래피는 투사각의 제약, 복잡한 지질구조에서의 파의 전파등으로 매우 심각한 한계를 내포하고 있으며 이러한 제약 때문에 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.

2.2 지오레이더 시스템

본 연구에 사용된 지오레이더 장비는 노르웨이 NGI(Norwegian Geotechnical Institute)가 주축이 되어 현대건설과 공동으로 개발한 시스템으로 HP8753 network analyser를 기반으로 개발되었다. 본 지오레이더 시스템은 송수신기인 network analyser, 시스템 콘트롤 및 자료저장에 사용되는 PC, 그리고 안테나로 구성되어 있다. 본 연구를 위하여 공기중에서 1500 MHz의 주파수를 발생시킬 수 있는 시추공용 안테나를 제작하였다.

본 시스템은 시영역의 임의 impulse 파형신호와 동일한 주파수 샘플을 순차적으로 발생시켜 각각의 신호응답을 얻은 후 주파수영역에서 합성하는 방법을 사용하고 있기 때문에 impulse신호를 사용하여 동시에 광대역 주파수 응답을 측정하는 상용 impulse 시스템과 작동원리에 차이점이 있다. 본 지오레이더 시스템의 특징은 다음과 같다.

- (1) 레이더 신호로서 step frequency 신호 (FMCW; Frequency Modulated Continuous Wave)를 사용하고 있다.
- (2) HP network analyser는 0.3 MHz - 3 GHz 광대역에서 작동하므로 본 시스템은 원거리와 근거리 목표물을 탐지할 수 있는 능력을 가지고 있다.
- (3) 주파수대역을 소프트웨어로 선택할 수 있어서 시스템의 구성과 현장운영시 신호파형의 선택이 자유롭다.
- (4) 주파수 영역에서 direct coupling 신호는 반사파에 비해 매우 안정되므로 수신기의 dynamic range에 대한 제약이 impulse 시스템에 비해 작다.
- (5) 시스템의 응답특성을 측정하는 문제와 같이 주파수영역에서 신호처리기법이 용이하고 합리적인 경우가 많다.

HP8753 network analyser의 최대 출력은 증폭기 1개를 사용하는 경우 평균 1 Watt이며 샘플링 수는 3, 51, 101, 201, 401, 801, 1601중에서 선택된다. Network analyser의 수신기는 각각의 주파수 샘플에 해당하는 수신신호를 band-pass 필터링하도록 설계되어 있는 바, 대역폭(intermediate frequency)은 10 Hz, 30 Hz, 100 Hz, 300 Hz, 3000 Hz 중에서 선택할 수 있으며 이는 시영역에서의 중첩(stack)과 같이 신호대잡음비를 향상시키는 효과를 가지고 있다. 수신기의 열잡음 레벨은 대역폭에 비례하여 커지므로 필터링 대역폭이 작을수록 유리하나 이 경우 신호측정에 소요되는 시간이 길어지므로 시험조건에 따라 적절히 결정해야 한다. 본 시스템의 자료획득 속도는 주파수 샘플 201개, 3000 Hz의 수신기 대역 필터를 사용하는 경우, 측정당 0.5 초, 30 Hz의 대역필터의 사용하는 경우, 측정당 5 초 정도의 시간이 각각 소요된다.

3. 지형 및 지질

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

본 지역의 기반암은 경기 용인지역에 넓게 분포하는 선캠브리아기의 경기편마암 복합체중에서 가장 대표적인 호상 흑운모편마암(banded biotite gneiss)으로 구성되어 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 기반암은 엽리상 절리(foliation joint)가 가장 우세한 불연속면으로서 전구간에 걸쳐 비교적 균질한 밀도로 관찰되고 있다. 엽리의 방향과 경사가 지역적으로 약간의 변화는 있으나 N75W/35SW의 방향이 가장 우세하게 나타난다. 절리의 특성등을 관찰하여 암반의 공학적 분류를 시도한 결과, 터널구간의 Q 값은 0.63~5.8 정도의 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.

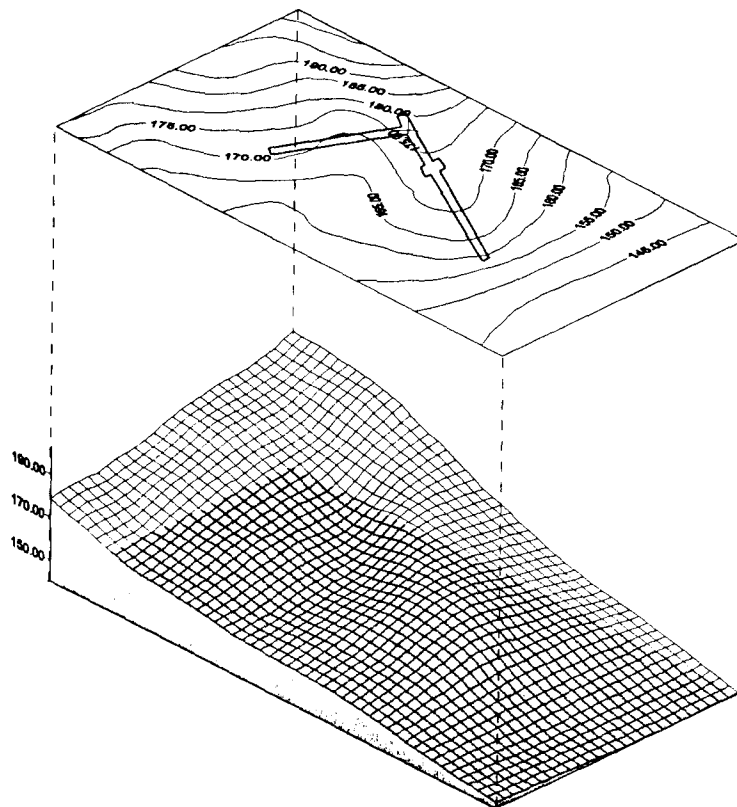


그림 2. 현대건설 시험터널의 지형 및 위치도

4. 자료 획득

현대건설(주)은 1996년에 경기도 용인군 구성면 마북리에 위치한 기술연구소 부지내에 국내 최초의 실험 터널을 건설하였다. 본 실험 터널의 규모는 폭 5m, 높이 6m이며 그림 2와 3에서 알 수 있듯이 94m 길이의 access 터널 끝에 40m 길이의 테스트 터널이 좌측 90도 방향으로 굴착되었다. 테스트 터널을 굴착하기 전에 굴착 진행방향으로 터널 측벽으로부터 0.5m와 1.9m 떨어진 위치에 두 개의 수평 시추공을 40m 깊이까지 평행하게 천공하였다. 이 두 개의 수평 시추공을 이용하여 테스트 터널 굴착전인 1996년 5월과 터널 굴착후인 1996년 8월에 지오레이다 토모그래피를 각각 수행하였다.

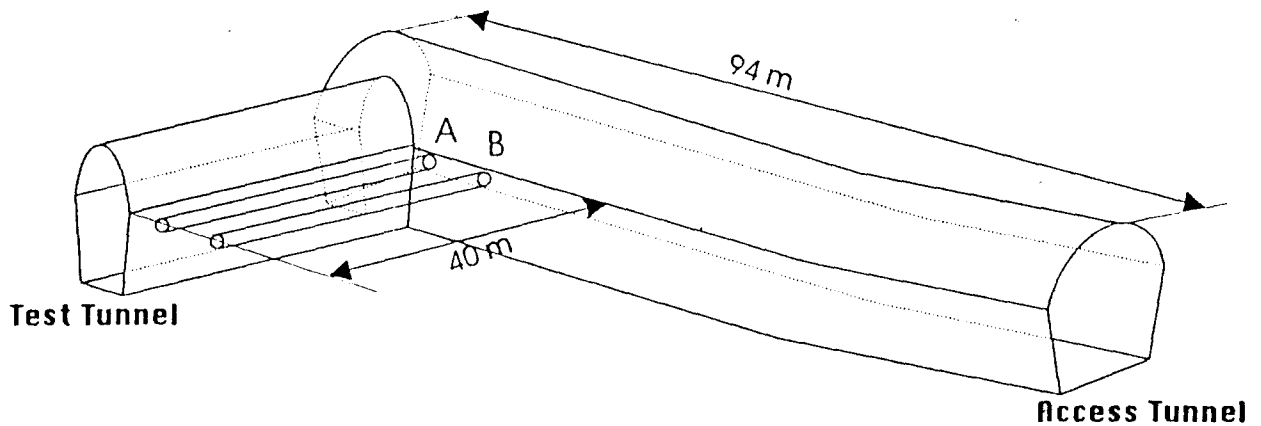


그림 3. 시험터널내에 천공된 수평 시추공의 위치도

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

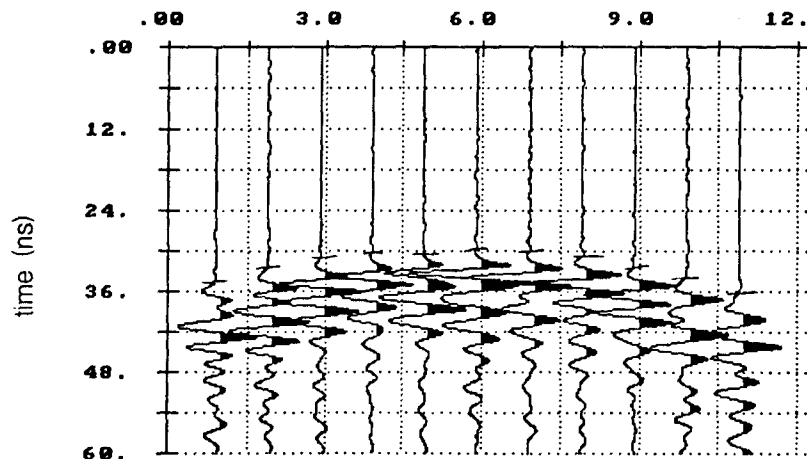


그림 4. 지오레이다 토모그래피를 위한 획득자료

3m의 거리에서 송수신 측정을 하였다. 본 시험에 사용된 시추공 안테나는 길이가 15cm이며 공기중에서 1500 MHz의 레이다파를 발생시키는 dipole 안테나이며 본 실험에서는 100~1100 MHz 대역의 주파수를 선택적으로 사용하였다. 각 트레이스마다 512개의 자료를 0.4ns 간격으로 샘플링하였고 신호대잡음을 향상시키기 위하여 30 Hz를 intermediate frequency로 사용하였다. 그림 4는 대표적인 획득 자료를 보여주고 있다. 이는 송신안테나를 한 위치에 고정시키고 수신안테나를 변화시키면서 획득한 자료들을 동시에 도시한 것으로 shot gather라고도 불리운다. 송신안테나와 수신안테나의 조합마다 하나의 트레이스가 획득된다.

5. 자료 처리 및 해석

시추공간 토모그래피 시험결과의 역산을 위한 전산처리 프로그램의 입력자료로는 통상 수신파 초동의 주시(traveltime) 또는 진폭(amplitude)의 크기가 사용된다. 수신파의 주시에 근거하여 얻게 되는 처리영상을 속도 토모그램(velocity tomogram)이라고 하며 수신파의 진폭 감쇄량의 정보를 이용하여 얻게 되는 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.

수평 시추공의 천공 깊이는 40m이나 터널 굴착 과정동안 측벽으로부터 0.5m 떨어진 시추공이 약 20m 깊이에서 손상되어 안테나를 삽입할 수 없었기 때문에 터널 굴착후에는 시추공 끝까지 자료를 획득할 수 없었다. 본 논문에서는 시추공 입구로부터 3.6m부터 13m까지만의 토모그램을 작성하였으며 그림 5에 나타나있다. 송신안테나는 0.3m 간격으로 34개가, 각 송신안테나당 0.3m 간격의 11개의 수신안테나가 사용되어 총 34x11 개의 파선이 역산에 사용되었다. 그리고 통상적으로 급수 전개법(series expansion method)을 역산에 적용할 경우에는 탐사 단면을 픽셀(pixel)로 나누는 바, 본 조사에서는 탐사 단면을 총 30x5 개의 픽셀로 나누었다. 역산 기법으로는 CG(Conjugate Gradient)를 사용하였으며 반복 역산 회수는 20회로 제한하였으나 10회 반복이전에 해를 구하였다.

통상 수직 시추공을 이용하는 경우에 토모그램은 두 시추공을 포함하는 2차원 단면도이나 본 연구에서는 수평 시추공을 이용하였으므로 토모그램은 두 시추공을 포함하는 2차원 평면도가 된다. 그림 5에 나타난 토모그램의 수직방향은 시추공 입구로부터의 거리를, 수평방향은 두 시추공 사이의 거리를 의미하며 토모그램은 매질내에서의 전자파의 전파속도를 의미한다. 그림 5에서 적색은 전파속도가 빠른 구간을, 청색은 전파속도가 낮은 구간을 각각 의미한다. 전체적으로 터널 굴착후의 조사 구간의 전자파 전파 속도는 굴착전과 비교하여 감소하였는 바, 이는 굴착으로 인하여 암반에 미세 균열(micro-crack)이 발생하였고 그 곳이 지하수에 포화되었기 때문인 것으로 판단된다. 그림 6은 동일 구간에서 터널 굴착 전후의 속도의 변화율을 보여주고 있다. 터널 굴착후의 조사 구간의 전자파 전파 속도는 터널 굴착전과 비교하여 최소 1%에서 최대 10%까지 감소한 것을 알 수 있다. 적색은 속도 변화율이 낮은 구간을, 청색은 속도 변화율이 큰 구간을 각각 의미한다. 이와 같이 속도 변화율이 일정하지 않은 것은 암반의 불균질성(inhomogeneity)에 기인하는 것으로 판단된다.

6. 결론

경기도 용인군 구성면 마북리에 위치한 현대건설(주) 기술연구소 부지내에 국내 최초의 실험 터널을 건설하면서 굴착에 따른 암반의 거동을 파악하기 위하여 여러가지 현장 실험을 수행하고 있다. 수평 시추공을 이용한 지오레이더 토모그래피를 수행하여 굴착에 의한 암반 물성의 변화를 규명하였다.

굴착으로 인하여 암반에 발생한 미세균열에 포화된 지하수의 영향으로 터널 굴착후의 조사 구간의 전자파 전파 속도는 굴착전과 비교하여 최대 10%까지 감소하였다. 조사 구간내의 일정하지 않은 속도 변화율은 암반의 불균질성에 기인하고 있는 것으로 판단된다. 획득 자료의 분석 및 해석이 계속 진행되고 있으며 시추공의 편향(deviation) 및 암반의 이방성(anisotropy)의 효과도 고려될 예정이다.

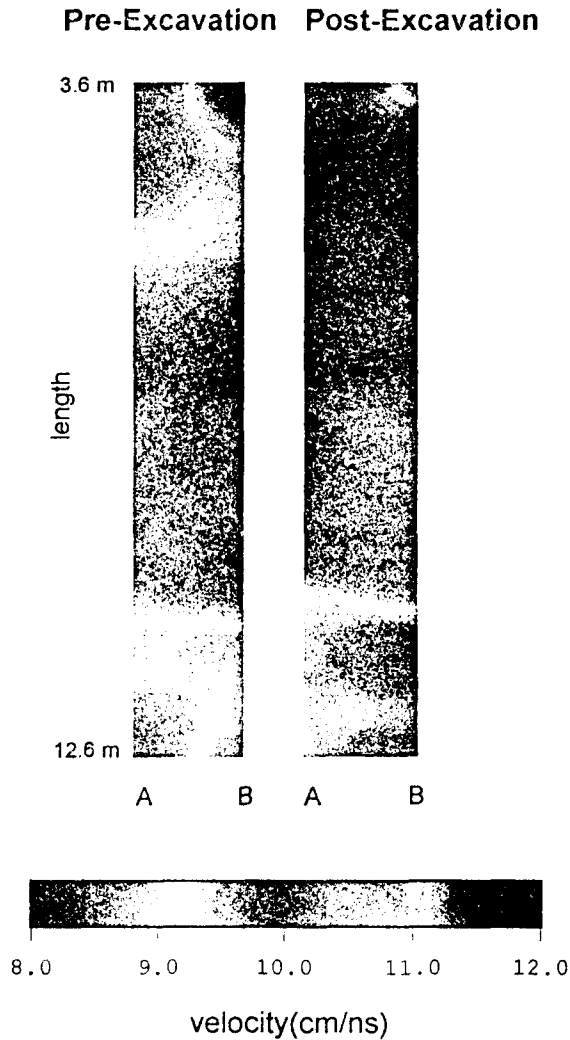


그림 5. 전자파 속도 토모그램

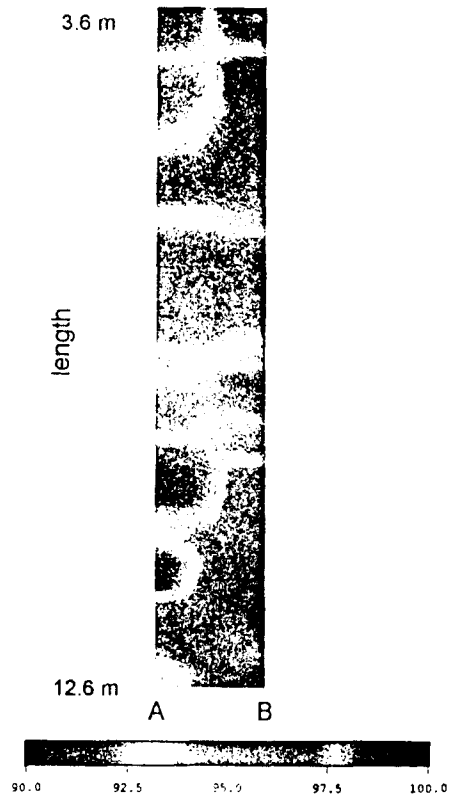


그림 6. 터널 굴착전후의 전자파 속도 변화율

참고문헌

1. (주)코아지질(1995), 마북리 현대건설기술연구소 지하실험실 지반조사 보고서.
2. 현대건설(주) 기술연구소(1994), 지하공간개발 GEORADAR와 TOMOGRAPHY.
3. Barton, N.(1995), "Rock mechanics investigations for radioactive waste repository design",

지하공간개발 Rock Cavern Stadium Project 최종성과 발표회 논문집, 현대건설 기술연구소, pp.1~69.

4. Westerdahl, H., Kong, F. and Kristiansen, J.(1994), "Geophysical investigations", *Rock Cavern Stadium Final Report*, NGI, SINTEF, Ostlandsforskning, pp.53~60.