

선구조와 지하 투과 레이더를 이용한 지하공동구 위치 해석

장호식¹ · 서동주^{2*}

The Analysis of Underground Utility Tunnel Positions using Lineament and GPR

Ho-Sik JANG¹ · Dong-Ju SEO^{2*}

요 약

최근 토목시공 현장에서는 사면안정 및 보강공사를 하기 위한 앵커 및 굴착작업 도중에 일부 구간에서 지하 공동구가 발견되어 현장으로 사항이 발생되고 있다. 본 연구에서는 이들의 문제점을 사전에 미리 파악하고자 비파괴 물리검사인 지하 투과 레이더 탐사방법을 적용하여 지하공동구의 위치를 파악하는데 목적을 두었으며, 또한 입지적인 환경인 지질상태를 이해하기 위해 선구조 분석을 병행하였다.

먼저 입지분석에 의하여 연구 대상 지역의 지질상태를 파악할 수 있었고, 이를 기초로 하여 지하 투과 레이더 탐사 결과, 소규모 및 대규모의 지하 공동구 및 이상대의 위치와 규모를 파악할 수 있었다. 향후, 이와 같은 방법을 적용하여 시공현장에서 조사 및 설계에 대한 효율적인 시공방법과 유지관리를 수행하기 위한 접근 가능한 방법이라 판단된다.

주요어 : 지하 투과 레이더 탐사, 선구조, 입지분석, 지하 공동구, 이상대

ABSTRACT

In this study, GPR and lineament methods are used for the effective construction. GPR method is non-destructive testing to understand underground utility tunnel while lineament method is to understand locational environment. First, soil condition of the subject area is surveyed by location analysis. As the result of GPR survey, small-scale and large-scale of underground utility tunnel's location and scale were estimated.

From the result of estimation, it is found that the main cause of underground utility tunnel's generation was not the effect of landslide or disturbed foundation from the excavation work but crack of shear & tension from the effect of fault movement which grew by insulation surroundings. From now on, this investigation method would be very useful in the survey and design stage on site for the effective construction and maintenance.

Keywords : GPR, Lineament, Location Analysis, Underground Utility Tunnel, Anomaly

2006년 10월 17일 접수 Received on October 17, 2006 / 2006년 12월 11일 심사완료 Accepted on December 11, 2006

1 남해전문대학 토목환경시스템과 Dept. of Civil & Environmental System Engineering, Kyungnam Provincial Namhae College

2 동의대학교 토목공학과 Dept. of Civil Engineering, Dong-Eui University

* 연락처 E-mail : dpsdj@mail1.pknu.ac.kr

서론

오늘날 국내 건설 현장은 급격한 도시화와 경제성장과 더불어 토목 구조물의 대형화로 막대한 공사비와 유지관리에 많은 노력이 요구되어지고 있다.

그리고, 토목건설 현장에서는 다양한 지반여건 아래 예상치 못한 사고가 발생하거나 안전한 시공을 위해 정확한 지반조사가 확연히 요구되어지고 있는 실정이다.

특히, 건설현장에서는 지반에 대한 자료조사로 최근에 지반을 굴착하지 않는 지구물리탐사기술의 하나인 지하 투과 레이더(Ground Penetrating Radar)탐사를 이용하여 공사계획에서부터 설계, 시공 그리고 유지관리까지 여러 방면으로 활용되어지고 있다.

따라서, 현재 지하 투과 레이더 탐사 방법으로 응용되어지고 있는 분야로는 매장 또는 매몰되어 있는 유물을 탐사하기 위한 고고학 분야(장호식 등, 2003 : Weymouth 등, 1986), 도로포장상태와 매설관로를 탐사하는 도로분야(문두열 등, 2002) 등으로 다양한 방면에 적용되어지고 있다.

이러한, 지하 투과 레이더 탐사 방법이 사용되어지고 있는 특징으로는 비파괴 탐사방법이라는 점과 과학기술발달과 더불어 측정 장비에서도 탐사결과에 대한 정확도가 향상되었으며 관측방법에 있어서도 속도가 빠르다는 특징을 가지고 있다. 그리고 입지분석에 따른 연구로는 GIS 기법으로 산사태 취약성 평가(김경태 등, 2005)와 유적지 분포 예측(이진영 등, 2005) 및 토지적합성 분석(이기철, 2003)등 다양한 분야에 적용되어지고 있다.

따라서, 본 연구는 이런 특징을 가진 지하 투과 레이더 장비를 이용하여 현재 건설중인 현장에서 사면안정 및 보강공사를 하기 위한 앵커 및 굴착작업 도중에 일부 구간에서 지하 공동구가 발견되어 추가로 지하공동구가 존재할 것을 예측되어 조사지역에서의 입지적인

환경을 이해하기 위한 선구조 분석과 지구물리탐사 방법 하나인 지하 투과 레이더를 적용시켜 건설부지내에 존재하는 지하공동구의 위치와 규모를 파악하는데 그 목적을 두었으며, 차후 이런 탐사방법으로 건설공사를 하기 위한 조사 및 설계에 소요되는 경비절감과 효율적인 시공과 유지관리를 수행하기 위한 그 편리성을 도모하고자 한다.

지하 투과 레이더 이론

지하 투과 레이더는 10MHz ~ 수GHz 주파수 대역의 전자기 펄스를 이용하여 천부 지하 구조를 파악하는 전자파 탐사기법이다. 전자파는 파의 진행방향과 매질입자의 진동방향이 직각인 횡파의 일종으로 빛의 속도와 같은 $3 \times 10^8 \text{m/sec}$ 의 속도를 갖는다. 전자파는 암석과 토질에 따라 어느 정도의 깊이까지 전파되며, 이 에너지는 전기적 성질이 다른 두 매질의 경계면에서 반사된다.

여기서 전기적 성질이라 함은 매질의 유전율 대자율로부터 유도되는 고유의 임피던스를 말한다. 표 1은 이미 알려진 각 매질의 고유 전기전도도와 유전율을 나타낸다.

이 방법은 다른 탐사법에 비해 상대적으로 짧은 파장의 전자기파를 사용하므로 분해능이 높으며, 매질간 유전율의 차이에 의한 전자기파의 반사와 회절현상 등을 측정하고 이를 해석하여 지질구조를 파악한다. 따라서, 지하 투과 레이더의 탐사 개념은 그림 1과 같이 전자파의 반사법 탐사는 전자파를 짧은 폭의 펄스 형태로 지하에 전파시킨 후 전파 경로중 물리적 성질이 다른 매질의 경계에서 반사해 오는 전자파를 수신 분석하여 지중의 정보를 얻는 물리 탐사법으로 지하 매질을 전파해 나가던 전자파는 반사를 하게 되고 반사되어 온 전자파를 수신하여 전자파의 경로 시간과 전자파의 속도로 반사가 일어난 곳의 위치를 확인하는 레이더의 기본 원리와 같다.

TABLE 1. 각 매질에 따른 전기전도도와 유전율

매질	전기전도도(mS/m)	유전율
air	0	1
pure water	10~3×10 ⁻²	81
sea water	4	81
fresh-water ice	10 ⁻³	4
granite(dry)	10 ⁻⁸	5
limestone(dry)	10 ⁻⁹	7
clay(saturated)	10 ⁻¹ ~1	8~12
snow firm	10 ⁻⁶ ~10 ⁻⁵	1.4
sand(dry)	10 ⁻⁷ ~10 ⁻³	4~6
sand(saturated)	10 ⁻⁴ ~10 ⁻²	30
silt(saturated)	10 ⁻³ ~10 ⁻²	10
sea-water ice	10 ⁻² ~10 ⁻¹	4~8
basalt(wet)	10 ⁻²	8
granite(wet)	10 ⁻³	7
shale(wet)	10 ⁻¹	7
sandstone(wet)	4×10 ⁻²	6
limestone(wet)	2.5×10 ⁻²	8
copper	5.8×10 ⁷	1
iron	106	1
soil sandy dry	1.4×10 ⁻⁴	2.6
soil sandy wet	6.9×10 ⁻³	25
soil loamy dry	1.1×10 ⁻⁴	2.5
soil loamy wet	2.1×10 ⁻²	19
soil clayey dry	2.7×10 ⁻⁴	2.4
soil clayey wet	5.0×10 ⁻²	15

를 거친 자료로부터 고분해능의 연속적 지층 단면 영상을 얻게 된다.

탐사방법

1. 탐사장소

본 연구의 대상지역은 그림 2와 같이 울산광역시 언양읍 두동면 일원에 위치하고 있다. 이곳은 ○○댐 이설도로 공사로 사면안정 보강공사를 하고 있으며, 중심좌표로는 X축은 217,100m이고, Y축은 239,000m 이다.(지하 투과 레이더 : 3 축선)

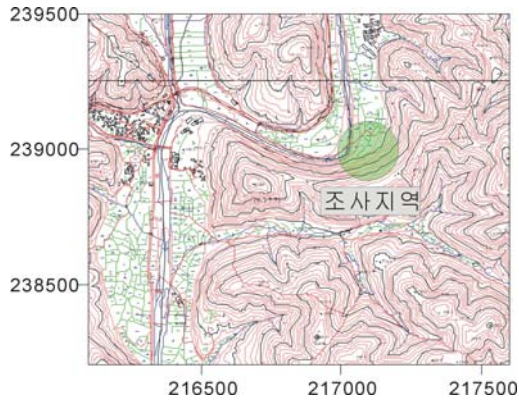


FIGURE 2. 연구지역 위치도

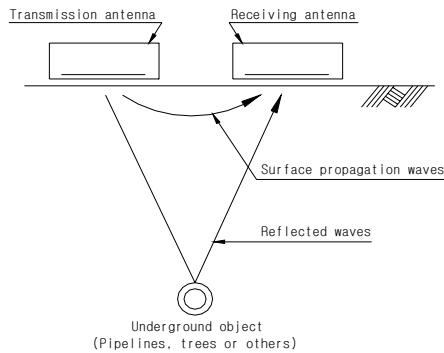


FIGURE 1. 지하 투과 레이더 탐사 개념도

그러나 레이더와는 달리 지하 매질의 물리적 불균질성에서 비롯된 많은 잡음이 생기므로 데이터의 적절한 처리가 필요로 하고 처리

2. 탐사방법

지하레이더탐사는 물리탐사 기술 중 고해상도 탐사 기술 중의 하나이며 수m~수십m 이내의 얇은 심도 지반을 조사할 수 있고, 지하 매질물 탐지 및 지하 정밀 영상화를 위해 실시할 수 있다. 또한, 지표하부의 지층경계, 지하의 불균질한 면, 파쇄대, 침하, 지하공동구 또는 지하 매질물 등과 같이 지하로부터 반사된 반사파를 수신안테나를 통해 기록하여 수신파형을 처리, 분석을 통해 지하 하부의 상태에 대한 정성적인 정보를 얻을 수 있다.

따라서, 본 연구에서의 탐사방법은 그림 3과 같이 크게 4단계로 나누어서 실시하였다. 또

한, 탐사구간은 그림 4와 같이 측선 1 ~ 3 구간으로 나누어서 탐사하였다.

Line-1 측선은 안테나의 중심주파수가 100MHz이고 송·수신기의 간격은 1m, 반사법 step mode 20cm 간격으로 데이터를 획득하였고 time window는 240ns, stacking은 64 stacks로 총연장 51.0m 탐사를 실시하였다. Line-2 측선은 중심주파수 50MHz, 송·수신기의 간격은 2m, 반사법 step mode 20cm, time window는 500ns, stacking은 64 stacks 총연장 50.8m, Line-3 측선은 중심주파수 100MHz, 송·수신기의 간격은 1m, 반사법 step mode 20cm, time window는 240ns, stacking은 64 stacks 총연장 35m로 데이터를 획득하였다. 조사를 실시한 구간에서는 현장 측량을 실시하여 지형경사가 변화되는 지점에 대한 고도를 획득하였다.

3. 탐사장비 제원 및 특징

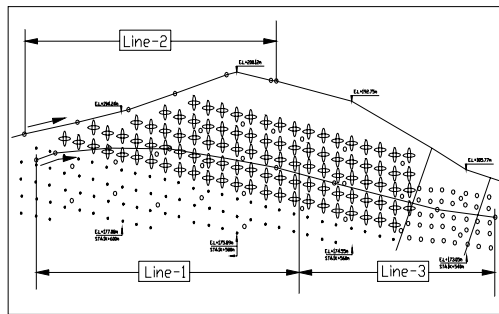


FIGURE 4. 지하 투과 레이더 관측 구간



FIGURE 5. 탐사장비 모습

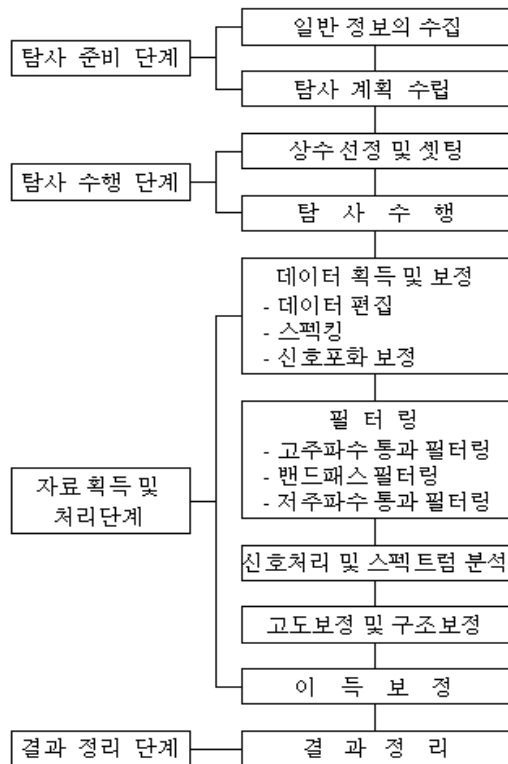


FIGURE 3. 탐사 및 결과 처리 흐름도

본 연구에 사용된 탐사장비는 그림 5 및 표 2와 같이 Sensor & Software사의 Pulse EKKOTM 100으로써 주로 저주파(12.5~200 MHz)의 안테나를 채택하여 탐사 심도를 깊게 한 것이 특징이며, 자동 셋팅 기능으로 반복적인 탐사에서 자료 획득의 시간을 단축할 수가 있으며, 자료의 질을 향상시킬 수 있도록 설계되어 있다.

또한 광케이블을 사용하여 수신 데이터의 질을 높이고 경우에 따라서는 시스템을 원격조정이 가능하도록 제작되어 있으며 주로 고고학 연구, 지하매설물조사, 지하공동조사, 지반조사 등에 이용된다.

TABLE 2. GPR 탐사 장비 제원

장비 세트	제원 및 측정조건	중심주파수 (MHz)	심도 (m)
▷ pulse EKKO™ 100 system	◇ Time Window : 32~2,048 ns	80	5~30
	◇ Sampling Interval : 800~8,000 ps	100	4~25
	◇ Stacking : 1~2,048 stacks	120	4~20
	◇ Control box power : 1Amp, 12V DC	300	1~9
▷ Sensors & Software, Canada	◇ Computer : Laptop	500	0.5~3.5
	◇ Data Storage : HDD, FDD	900	0~1
	◇ Output : All printer	1000	0~0.5
▷ Antenna 50~1,000 MHz	◇ Antenna Range : 50~900 MHz	2500	0~0.5
	◇ Step mode		
	◇ Continous mode		
	◇ Survey wheel mode		
	◇ Antenna seperation : 0.25~2.0m		

TABLE 3. 광역적인 선구조의 방향과 단열특성

주 향	특 징
N20-30E	양산단층과 평행한 방향의 선구조로서 양산단층과 운동 성격이 동일한 선구조
N30-50W	빈도수가 높은 선구조이며, 양산단층계에서 파생된 선구조로서 연장성이 길지 않고 양산단층과 다른 성격의 선구조 소지류의 흐름 방향과 유사한 선구조
N5-10W	연장성이 길지 않고 양산단층계에서 파생된 선구조

4. 지형 및 지질 특성

본 연구지역 일원은 북북동-남남서 방향의 단층선과 나란하게 산계가 발달하였다. 연화산(해발 530.5m)의 북서쪽에 위치하고 凹형의 지형을 나타내고 있다. 산계의 소계곡으로 발달하는 수계의 형태는 이수지상의 형태를 띤다.

조사지역의 입지적인 환경을 이해하기 위한 방법으로 선구조를 이용할 수 있다. 선구조(lineament)는 능선이나 고지역의 경계, 수계망, 해안선, 지층 또는 암석들간의 경계와 같은 지형적 형태의 공간적인 관계를 묘사하는 것으로 지표면에 나타나 있고, 지도에 나타낼 수 있는 단일 또는 복합된 선형을 가지며, 그 부분들이 직선적이거나 약간 만곡된 선관계를 가지고 배열되며, 지하 현상을 반영하는 것으로 정의하고 있다. Whitten and Brook(1972)은 선구조를 지형의 형태로 나타내고 지하 지

질구조도를 나타내는 선형으로 정의하고 있으며, Billings(1972)는 대부분의 선구조는 고각으로 경사지는 단층이나 또는 절리계로부터 기인된 것이라고 하였다.

선구조 분석을 위해 9km×8km의 대상구역을 설정하고 국토지리정보원 발행의 1:5,000지형도를 이용하여 가로×세로 간격을 10m로 한 수치표고자료(DEM : digital elevation model)를 작성하였다. 구축된 수치표고자료를 이용하여 가상 태양의 고도각을 수평면으로부터 45°, 태양 방위각을 W, N45°W, N 그리고 N45°E의 4방향으로 가정하고 Lommel-Seeliger법을 적용하여 작성한 4매의 전산 음영 기복도를 그림 6에 나타내었으며 이를 자료로 선구조를 육안으로 판독한 결과 표 3과 같다.

지형과 지질의 경계가 되는 선구조는 계곡의 형태로 잘 나타나는데 조사지역의 경우 북

북동-남남서 방향 선구조의 연장성이 가장 잘 발달하며 빈도수는 북북동-남남서 방향과 북서-남동 방향이 거의 대등하게 나타나며 북북서-남남동 방향의 선구조가 이차적으로 수반되어 있다. 북북동-남남서 방향은 한반도의 대표적인 취성전단 단열구조인 양산단층계에 속하는 양산단층과 같은 방향으로 규모면에서 가장 두드러진 선구조에 해당된다. 북서-남동 방향의 선구조는 조사지역에 발달하는 하천과 소지류의 방향과 거의 일치한다.

표 4와 같이 조사지역은 한반도 조구조 분류상 경상분지에 해당하며 한국지질도 1:50,000 언양도폭에 포함된다. 구성 암석은 중생대 백악기 하양층군에 해당하는 퇴적암류와 화산암

류인 유천층군의 안산암질암, 이를 후기에 관입하는 화강암질암으로 구성되며, 위 지층들을 제4기 하성퇴적층이 부정합으로 피복하고 있다.

조사지역 일원의 기저에 해당하는 대구층은 적색의 사질 실트스톤, 실트스톤, 사질세일, 세일 등이 우세하고 녹회색, 암회색 및 암회색의 사암, 사질 실트스톤, 실트스톤, 사질세일 및 세일 등과 호층을 이루고 있다.

탐사 분석

현장에서 획득한 자료는 Sensor & Software사의 EKKO 4.2 해석프로그램을 사용하여 필터링 및 20cm 간격의 연속적인 지형자료를 추

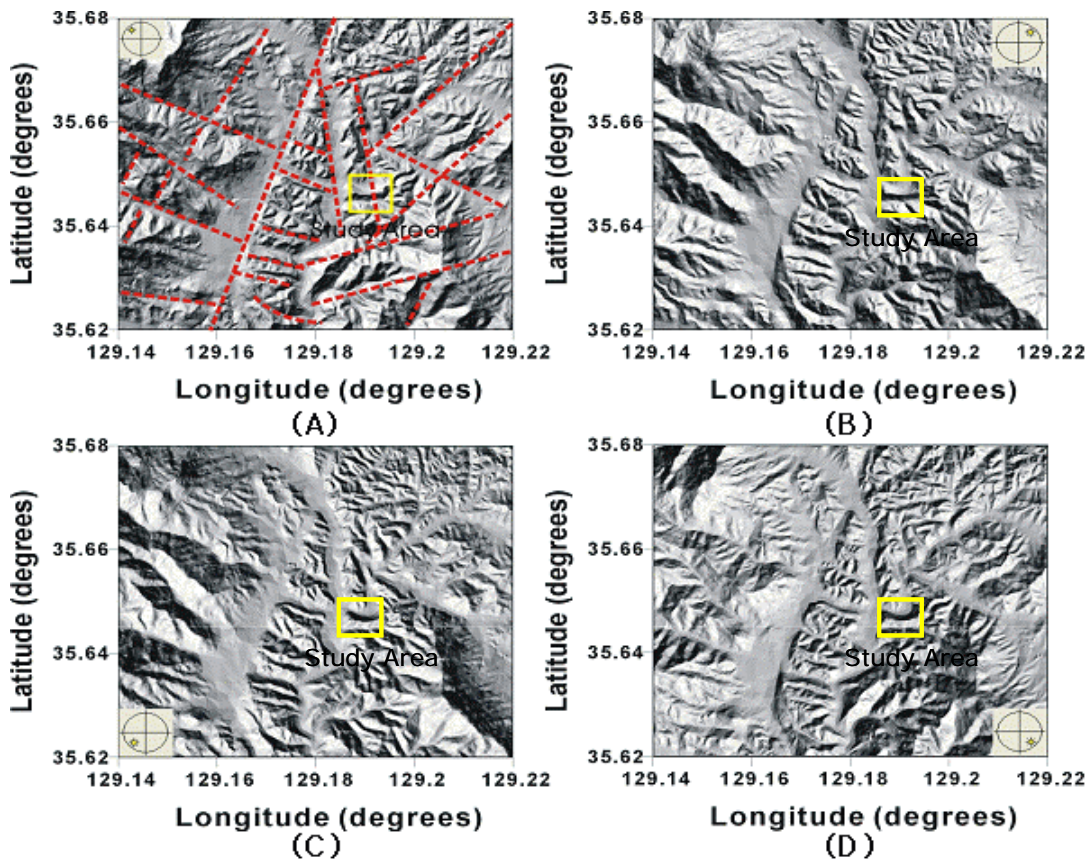


FIGURE 6. 음영기복도(태양의 고도/방위각, A:45/W, B:45/N45W, C:45/N45E, D:45/E)

출하여 지형보정을 실시하였다.

그림 7에서 관측된 지하 투과 레이더 탐사에 대하여 분석한 결과 Line-1 단면은 FFT FILTER 40 80 120 160MHz, LOWPASS FILTERED. CUTOFF 187.50 MHz로 처리하여 지형 보정한 단면으로서 기반암은 대구층에 해당하는 퇴적암으로 주로 녹회색, 적갈색의 사암 또는 세일의 호층으로 발달한다. 단면도에서 11.8m, 26.7m 지점에서 소규모의 공동 내지 이상대로 해석되고, 16.2m, 44.0m 그리고 47.5m 지점은 하부로 이상대가 계속 반복적으로 나타난다.

그림 8의 Line-2 단면은 FFT FILTER 20 40 70 90MHz, LOWPASS FILTERED. CUTOFF 80.50 MHz로 처리하여 지형 보정한 단면으로서 45.6m 지점을 제외하는 이상대는 하부로 연속적으로 지하공동구를 나타내고 있으며, 20.3m

지점의 이상대는 사면에 사교하는 이상대가 인지되고, 39.1m 지점은 Line-1의 44.0m 지점에 해당하는 지하공동구와 일치하는 이상대로 분석된다.

그림 9의 Line-3 해석단면은 FFT FILTER 40 80 120 160MHz, LOWPASS FILTERED. CUTOFF 187.50 MHz로 처리하여 지형보정한 단면으로서 7.6m, 27.5m 지점에 이상대가 관찰되고 하부로의 연속성은 불량한 것으로 해석된다.

연구지역의 지반적인 특징은 퇴적암에서 나타나는 블록상의 암괴의 형태를 띤다. 암괴의 경계를 이루는 불연속면들의 간격은 암층에 따라 다양하고 세일이나 실트스톤에서는 박층의 형태로 나타난다. 층리를 사교하면서 관입한 암맥들은 풍화정도가 심하고 단층에 의해 파쇄대를 나타내기도 한다. 절리의 발달과 이

TABLE 4. 지질계통표

제4기	신기하성층(Alluvium)
	부정합
	산성질 암맥(Acidic Dykes) 중성질 암맥(Intermediate Dyke)
	관 입
불국사관입암류	규장암(Felsite) 섬록암(Diorite) 반화강암(Aplite) 석영반암(Quartz porphyry) 화강섬록암(Granodiorite) 흑운모화강암(Biotute Granite) 연양화강암(Granite)
백악기	관 입
유천층군	장석반암(Feldspar porphyry) 유문석영안산암(Rhyodacite) 석영안산암질암(Dacite Porphyry) 주산안산암질암(Andestic rocks)
	관입 및 분출
하양층군	대구층(Sedimentary rocks)

에 수반된 풍화작용 및 지표수의 영향으로 점토질이 충전되어 있다. 그리고 조사지역 양단에 발달하는 소규모의 단층 파쇄대를 따라서는 상당히 풍화가 진행된 특성을 보인다.

연구지역은 암체가 국부적으로 단층작용에 수반된 파쇄대의 발달과 지형적 차이에 따른 풍화작용의 영향으로 측방 암상의 분포가 매우 불규칙하게 나타난다.

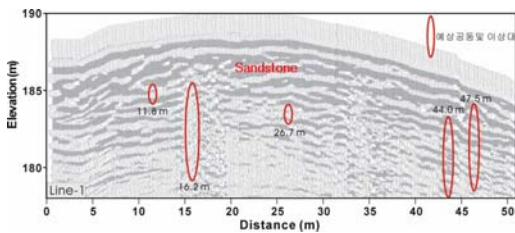


FIGURE 7. 관측 Line-1 구간(안테나 주파수 : 100MHz)

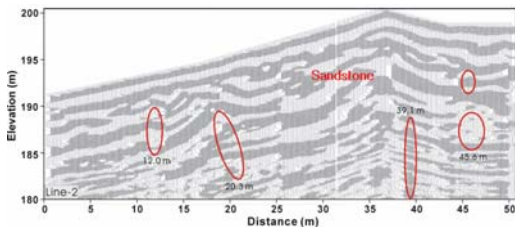


FIGURE 8. 관측 Line-2 구간(안테나 주파수 : 50MHz)

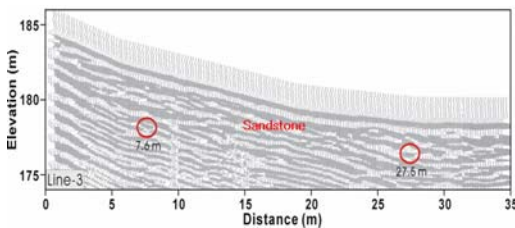


FIGURE 9. 관측 Line-3 구간(안테나 주파수 : 100MHz)

결론

효율적인 시공과 유지관리를 위해 지반을 굴착하지 않는 지구물리탐사기술의 하나인 지

하 투과 레이더 탐사와 선구조 분석을 이용하여 건설부지내에 존재하는 지하공동구의 위치와 규모를 파악한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 선구조 분석결과 연구지역은 양산단층계에 해당하는 단열구조와 밀접한 관계가 있고 방향성은 북북동-남남서 방향의 양산단층을 중심으로 이에 수반되는 북서-남동 내지 북북서-남남동 방향의 전단단열계가 분포하는 것으로 판단된다.

둘째, 연구지역의 지질은 중생대 백악기에 해당하는 경상계 퇴적암 지역으로 사암과 셰일의 호층으로 구성되어 있다. 그리고 단층작용에 수반된 파쇄대의 발달과 지형적 차이에 따른 풍화작용의 영향으로 측방 암상의 분포가 매우 불규칙하게 나타났다.

셋째, 탐사결과 연구지역에는 소·대규모의 지하 공동구로 예상되는 이상대가 인지되는데 이는 사면의 굴착공사로 인해 사면의 붕괴 또는 지반의 교란에 의해 발생된 지하 공동구이기 보다는 지구구조적인 단층대의 인접부에 위치하고 있으므로 단층운동영향에 의한 전단인장 균열에 해당하는 것으로 판단된다.

넷째, 차후 이런 탐사방법으로 건설공사내에서 지하 공동구의 규모를 미리 파악할 수 있는 좋은 방법이라 판단된다. **KAGIS**

참고문헌

김경태, 정성관, 박경훈, 오정학. 2005. GIS 및 RS기법을 활용한 산사태 취약성 평가. 한국지리정보학회지 8(1):75-87.

문두열, 이용희, 신병철. 2002. 지하 투과 레이더의 매질물 검출능력 측정에 관한 연구. 한국측량학회지 20(1):77-83.

이기철. 2003. 매크로 언어를 이용한 입지인자 변수조정에 따른 토지적합성 분석에 관한 연구. 한국지리정보학회지 6(1):59-77.

이진영, 박준범, 양동윤, 김주용, 홍세선, 정계욱. 2005. GIS 중첩분석을 이용한 요지유적 분포

- 예측의 시범연구. 한국지리정보학회지 8(4):165-175.
- 장호식, 김진수, 이종출. 2003. GPR를 이용한 유적지 위치 해석. 한국지형공간정보학회 논문집 11(1):45-49.
- Billings, M.P. 1972. Structural geology: London, Prentice-Hall.
- Weymouth, J. W. and R. Huggins. 1986. Archaeological site surveying program at the Univ. of Nebraska. Geophysics 51(3):538-552.
- Whitten, E.T.H. and Brook. 1972. Structural geology of folded rocks : Rand-McNally, Stokie, Illinois. **KAGIS**