

지하구조 해석을 위한 탄성과 굴절법 토모그래피 탐사 사례연구

A Case Study on Seismic Refraction Tomography Survey for Subsurface Structure Interpretation

유 영 준 (Young June You)
유 인 결 (In Kol Yoo)
송 무 영 (Moo Young Song)

대한광업진흥공사 자원탐사처 물리탐사부
대한광업진흥공사 자원탐사처 물리탐사부
충남대학교 지질학과

요약 / ABSTRACT

탄성과 굴절법 탐사를 이용한 지반조사시 탐사 결과로부터 표토층 및 풍화대 깊이, 연암 또는 기반암의 심도, 단층 파쇄대나 연약지반의 위치 및 규모, 지질경계 등을 파악, 지하 속도분포를 도출함으로써 Rippability 등 지반 공학적 특성의 정량적 평가가 가능하다. 이를 위하여는 양질의 자료 취득은 물론 조사 목적과 탐사심도에 맞는 축선길이 및 배치, 수신점과 진원점 간격 및 배치, 지형기복 여부 등 현장조사 파라미터의 설정이 중요하다. 택지개발 지역의 절토 사면부에서는 수신점 간격을 3~5m 정도가 적합하며 축선의 배열은 주축선과 주요 지점에서 이에 사교하는 부축선 배치가 필요하다. 굴절법 토모그래피 해석기법의 적용시, 조사장비의 가용 채널 수에 1/4 이상의 진원점으로부터 자료를 취득해야 지하구조 해석시 지형의 영향에 의한 왜곡현상을 감소시킬 수 있다. 편마암 지대인 절토사면부에서 시추자료와 비교하여 탄성과 속도 토모그램에 의한 지반분류는 토사 700m/s 이하, 풍화암 700~1,200m/s, 연암 1,200~1,800m/s이고 굴삭난이도(리퍼빌리티)는 리핑암 700~1,200m/s, 발파암 1,800m/s 이상으로 나타났다.

주요어 : 탄성과 굴절법 토모그래피, 자료취득 파라미터, 속도 토모그램, 리퍼빌리티

For quantitative evaluation of geotechnical engineering properties such as rippability and diggability, clear interpretation on the subsurface velocity structures should be preceded by figuring out top soil, weathered and soft rock layers, shape of basement, fracture zones, geologic boundary and etc. from the seismic refraction data. It is very important to set up suitable field parameters, which are the configuration of profile and its length, spacings of geophones and sources and topographic conditions, for increasing field data quality. Geophone spacing of 3 to 5m is recommended in the land slope area of house land development site. In refraction tomography technique, the number of source points should be

more than a quarter of available channel number of instrument and the subsurface structure interpretation can be decreased the artifact of inversion by topographic effect. Compared with core logging data, it is shown that the velocity range of the soil is less than 700m/s, weathered rock 700~1,200m/s, soft rock 1,200~1,800m/s on the velocity tomogram section. And the upper limit of P-wave velocity for rippability is estimated 1,200 to 1,800m/s in land slope area of gneiss.

Key Words : Refraction tomography, field parameters, rippability, velocity tomogram,

서 론

탄성과 굴절법 탐사가 오래전부터 토목 지질조사분야에서 많이 이용되어 토목분야에서의 『물탐』이라고 하면 탄성과 굴절법 탐사라고 말하는 시기도 있었고 현재에도 터널, 댐, 도로 등 토목 구조물의 기초지반조사에 필수적이라고 말하며 시행되고 있다. 또한 일본의 경우, 지질조사소의 『物理探査・調査研究一覽』(1995)에 의하면 일본내에서 실시된 총 732건의 각종 조사중 토목관계 조사목적으로 이용된 굴절법 탐사는 184건으로 전체의 25%에 달할 정도로 매우 주요한 조사방법으로 인정을 받고 있다. 물리탐사가 지반공학 분야 등 응용지질에서 이용되기 위해서는 탐사결과를 해석하여 토목 건설분야에서 요구하는 지반의 공학적 특성을 정량적으로 평가해 주는 것이 중요하다.

탄성과 굴절법 탐사는 토목지질 분야인 터널, 댐부지, 도로, 택지조성 등 구조물 기초지반 조사에 잘 이용되고 있는 이유는 ① 지표에서 실시할 수 있는 탐사이고 이른산 어떠한 지형에서도 적용이 가능하며, ② 탄성과동의 초동 주시만을 이용하기 때문에 자료취득이 비교적 쉽고, ③ 주시곡선의 특징이 잘 연구되어 있어서 효율적인 해석이 가능하다. 그리고 ④ 속도값의 토목공학적인 이용법의 연구가 잘 되어 있다는 점 등이다.

그러므로 오래전부터 개발되어 현재까지 시행되고 있는 굴절법 탐사는 지하의 속도구조를 층구조라고 가정하고 절단시간법, 지연시간법, Reciprocal time 법, Plus-minus 법 등의 기법을 적용하고, 보다 발전적으로 GRM(Palmer, 1981) 기법을 개발, 자료의 해석을 하여 왔다. 이들 방법 모두 주시곡선에 나타난 특징을 이용하여 속도구조를 구하는 점에 있어서 원천적인 한계가 있으며 지형이나 지하구조가 복잡하게 되면 해석오차가 커지게 되는 문제점을 가지고 있다.

전통적인 굴절법 탐사 자료처리 및 해석은 지형요철, 지하 굴절 경계면의 복잡성, 지반구조 세분화의 한계성 등의 문제점이 있다. 예를들면 터널지역의 경우 터널부에 해당하는 암반 분포상황의 파악이 곤란하다거나, 대절토 사면부나 토목 건축부지 조성지역의 경우 암반의 발파 여부 등 공사물량 계산을 위한 풍화암과 연암의 경계부를 명확하게 제시해주지 못한다는 점이다.

탄성과 토모그래피 해석기법은 일반적으로 2개의 시추공을 이용한 공대공 탄성과 탐사에 널리 적용되어 왔다. 최근 이를 점차 발전시켜 지표 굴절법 탐사 자료처리에 직접 적용하여 지하구조 해상도를 향상시키고 있다(Zhang et al., 1996; 林 등, 1998; 羽龍 등, 2001). 국내에서도 유한 차분법을 이용한 토모그래피 기법을 개발하여 공대공 토모그래피 탐사 해석에 이용하였다(이두성, 1995; 조창수 등, 1998). 유영준 등(1999)은 토모그래피 해석기법을 지표 굴절법 탐사자료에 적용한 바 있다.

따라서 본 연구에서는 전통적인 굴절법 탐사 자료해석에 발생하는 문제점을 극복하고 토목 지질조사 분야에서 실질적으로 이용할 수 있고 이용가치가 높은 양질의 기초자료를 제공하고자 축선배열 및 현장 자료취득법에 대하여 제시한다. 그리고 탄성과 굴절법 토모그래피 해석기법을 이용, 택지조성 지역의 대절토 사면부 현장에 대하여 적용하고 이 결과에 따라 토목/건설분야에서 요구되는 정량적인 설계/시공자료를 제공할 수 있는 기법을 제시하고자 한다.

지반의 탄성과 속도의 지반공학적인 이용

일반적으로 선진국에서는 건설 기초 공학 분야에서 탄성과 속도값이 널리 이용되고 있다. 탄성과 속도값은 구조물의 건설 정보로 직접 사용되지는 않지만 지반내를 전파하는 속도가 지반의 상황에

따라 변하기 때문에 구조물이 구축되는 지반의 공학적 평가 자료로서 중요한 지표가 될 수 있다.

암반의 탄성과 속도는 풍화, 변질, 파쇄나 균열의 발달 등에 의해 P파와 S파의 속도가 변화하지만 P파의 속도 측정이 훨씬 용이하므로 흔히 V_p 를 측정하여 이의 변화로부터 암반의 상태를 추정할 수 있다. 따라서 댐, 터널 등의 구조물에서는 건설 시공의 기초 자료로서 탄성과 속도가 이용된다. 일반적으로 현장 탄성과 속도의 측정은 굴절법, 검층법(Sonic or velocity logging), 공간속도 측정법(Crosshole test) 등의 방법으로 행하여지지만 개략 조사의 단계에서는 P파 굴절법 탐사가, 정밀조사 단계에 들어가면 시추공을 이용한 속도 측정법 등이 적용된다.

현재까지 국내외적으로 알려진 탄성과 속도의 분류를 보면 V_p 가 3000~6000m/s에 약 75%의 자료가 집중되고 있다(日本 物理探査學會, 1990). 이러한 탄성과 속도는 지반의 굴착방법의 선택에 이용될 수 있다.

암반은 암석과 균열 등의 공극을 채운 점토나 물, 공기 등으로 구성되어 있으며 암석은 광물의 집합체이다. 암석과 지반을 구성하고 있는 대표적인 조암광물인 석영이나 장석의 P파 속도는 5,500~6,500m/s 정도이지만(佐々 등, 1993), 이들의 집합체인 암석내에는 광물입자 사이에 존재하고 있는 미세균열이나 고결 당시 발생한 공극 등이 존재한다. 공기의 P파 속도는 331.45m/s(0°C, 1기압)이고 물의 P파 속도는 1,500m/s로 어떠한 조암광물의 P파 속도보다 느리다. 따라서 암석내에 공극이 많으

면 암석의 탄성과 속도는 떨어진다. 그리고 탄성과 속도에 영향을 미치는 공극이외의 요인은 암석의 풍화진행 정도, 고결도, 생성시기 등이다. 또한 암반내 단층 파쇄대 지역의 경우 처럼 균열의 발달이 많아 공극율이 커지게 되어 암반내 부분적인 전파 속도를 저하시킨다.

탄성과 전파속도는 탄성정수와 관계가 있다는 것은 이미 널리 알려진 사실이다. 탄성과 전파속도와 밀도를 측정하게 되면 탄성정수를 산출할 수 있는데 이를 동탄성정수(dynamic elastic modulus)라고 부르며, 시편을 이용하여 재료시험 장비로부터 측정된 탄성정수는 정탄성정수(static elastic modulus)로 구별하여 사용된다. 일반적으로 동탄성정수는 정탄성정수보다 크며, 동탄성정수/정탄성정수 비는 미고결층에서 15~50, 암석의 경우 1~20 정도로 탄성정수의 값이 작아지면 그 비의 값은 커진다.

암반을 구성하고 있는 암석이 견고하고 강도가 커지게 되어도 많은 균열이 존재하면 암반으로서의 강도는 저하한다. 암반의 P파 속도는 암반의 강도 특성을 나타내는 풍화정도와 균열의 빈도(RQD)와 밀접한 관계가 있기 때문에 P파 속도 값은 암반평가에 널리 이용되고 있다. 예를들면 터널, 댐 건설을 위한 암반분류, 사면경사나 안정성 평가, 암반의 굴삭능력(rippability) 평가 등에 이용된다.

토목공사를 위한 지반의 절취방법 측면에서 흙 및 암반의 구분은 도저(Dozer) 및 백호우(Backhoe) 작업에 해당하는 토사, 리퍼 작업에 해당하는 리핑암과 발파에 의해 절취되는 발파암으로 구분한다. 절취방법 조사는 보링조사, 현장조사, 기시공된 공

Table 1. Classification of ripping and blasting rocks with discontinuity frequency (Korea Highway Corporation, 1996)

Item		Construction working		
		Soil	Ripping rock	Blasting rock
P-wave velocity(%)	Group A	Below 700	700~1,200	above 1,200
	Group B	Below 1,000	1,000~1,800	above 1,800
Standard Penetration Test(N)		Below 50/10	Above 50/10	-
Discontinuity frequency	RX	-	Below TCR=5%	Above TCR=5~10%
		-	RQD=0	RQD=0~10%
	NX	-	Below TCR=25%	Above TCR=25%
		-	RQD=0	Above RQD=0~10%

Table 2. Classification of rippability(Bell, 1992)

Rock quality	Extremely hard rock	Very hard rock	Hard rock	Soft rock	Very soft rock
P-wave velocity(%)	>2,150	1,850-2,150	1,500-1,850	1,200-1,500	450-1,200
Excavation	Blasting	Extremely hard ripping or blasting	Very hard ripping	Hard ripping	Easy ripping

사기록의 조사, 현장 탄성과 탐사, 암석에 대한 일축압축강도와 탄성과 속도시험 등을 통하여 판단한다. 그리고 암질의 종류, 층리와 절리 등의 유무, 풍화정도, 시공장비 성능, 시공방법에 따라 그 변화요인이 많으므로 일률적으로 판단한다는 것은 곤란하므로 제반사항을 고려하는 것이 바람직하다. 건설표준품셈의 암반 분류기준은 자연상태 및 실내시험의 P파 탄성과 속도, 암반내압강도 등을 고려한 암종이 연암을 경계로 리퍼빌리티를 판단한다.

한국지반공학회 『구조물 기초 설계기준』(1997)에 따르면 속도지수(velocity index)와 RQD에 의한 암반분류, Rippability 분류(한국도로공사, 1996; Bell, 1992) 기준을 마련하였다. Table 1은 탄성과 P파 속도, RQD, TCR을, Table 2는 탄성과 P파 속도에 따라 암반의 강도와 Rippability를 분류하였다.

현장 자료취득 방법

토목지질조사에 있어서 굴절법 탐사를 실시하기 위해서는 조사지역의 지형이나 지질 등의 상황을 고려하여 조사목적에 적합한 조사계획을 수립할 필요가 있다. 조사결과에 중요한 영향을 미치는 일차적인 요소는 양질의 현장 자료취득과 적절한 해석법이다. 특히 우리나라 대부분의 조사대상 지역은 지형의 기복이 심하여 양질의 현장자료 취득을 위한 측선 설계가 중요하다.

한국지반공학회 『구조물 기초 설계기준』(1997)에 따르면 “탄성과 굴절법 조사방법은 수진점 5~10m, 진원점 간격 30~60m로 하고 진원은 화약이나 함머를 사용하여 얻은 자료로부터 주시곡선 및 탄성과 속도를 측정하고, 지층구조, 풍화정도, 파쇄대, 리퍼빌리티를 판단하여 설계 및 시공자료에 적용한다”라고 기술되어 있다. 일본 토목학회에서 제정한 터널의 표준시방서 해설 제8조에 따르면 “탄성과 탐사는

주로 굴절법이 이용되지만, 탄성과 탐사에 의해 얻은 결과는 표층에 존재하는 미고결 퇴적물 기반까지의 깊이, 지질경계의 위치, 풍화층의 깊이, 단층, 파쇄대와 기타 연약지반의 위치, 규모, 폭 등이다. 터널 중심선을 따라 지표에서 굴절법 탐사를 실시함에 있어서 장대 측선을 제외하고 일반적인 경우 수진점 간격은 5~10m이다.”라고 기재되어 있다.

측 선 설 계

측선이란 측정을 실시하는 위치를 보기 위해 지표상에 설정한 선이다. 전통적인 방법에서 측정결과와 해석은 원칙적으로 지표면이 수평이고 하나의 직선상에서 절단한 단면내에 파동의 전파경로가 있는 경우를 전제로 할 때 성립된다. 그래서 해석의 용이성과 해석 정밀도의 향상을 위해 해석법의 전제조건을 가능한 한 만족하도록 측선을 설정해야 한다.

조사대상 지역에 대하여 측선 1개 전개(spread)가 가장 이상적인 경우는 Fig. 1에서 지형기복이 없는 S1과 S2사이이다. 대부분의 산악지형의 경우 이와 같은 경우는 흔하지 않으므로 가능한 한 S1과 S2의 전개가 이루어지도록 측선 설계를 하는 것이 바람직하다. 택지조성 지역이나 토석 채취장 등과 같이 조사대상 지역 전체에 대하여 기반암의 형상을 조사할 때 측선을 일정간격 직선으로 배열하는 경우가 많다. 이 경우는 측선간격을 조정해서라도 가능한 한 지형경사가 일정하게 되는 위치를 택하는 것이 좋다.

조사지역이 선상으로 있는 경우 적절한 전개길이와 진원점의 배치가 중요하다. Fig. 1은 지형기복이 있는 경우 터널 예정선과 같이 선상으로 측선 배열을 도시한 것으로 S1과 S6를 연결한 것과 같은 측선의 경우가 많다. 이 경우 적어도 진원점의

위치는 지형의 정상부, 계곡부에 배치를 하여 동일 방향의 지형경사에 대한 굴절 파선이 구성되도록 해야 한다. 그리고 전통적인 해석방법에 있어서 이와 같이 지형기복이 있는 경우 굴절면에 해당하는 주시 곡선상에서 요철이 생기므로 세심한 주의가 필요하다.

조사계획을 세울 때 조사지역의 지형도를 이용하여 축선의 위치, 길이를 결정하는 경우가 많다. 지형도에 표시한 축선 길이(수평거리)가 일반적으로 조사축선 길이에 해당된다. 그래서 지형이 거의 수평인 경우 지형도상의 축선길이가 조사된 실제 길이(사거리)가 거의 같지만, 지형경사가 있는 경우 실제 길이는 길게된다. 예를들면 경사가 15°일 때 3.5%, 20°일 때 6.5%, 30°일 때 15% 길게된다. 따라서 경사지형에 설정된 축선의 표시는 수평거리 축선, 사거리 축선을 구분하여 표시하는 것이 좋다.

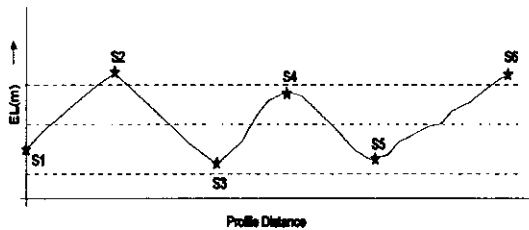


Fig. 1. Source points and spread in profile with topography

굴절법 탄성과 탐사에 있어서 탐사심도란 용어는 지하의 어느 심도까지 지하구조를 파악한다는 의미에서 조사목적에 입각한 것과 탐사원리 때문에 축선길이에 의해 제약된 탐사 깊이의 한계이다. 따라서 조사목적에 적합한 축선을 설정하기 위해서는 탐사심도와 축선 길이에 관하여 사전에 파악하는 것은 중요하다. 탐사심도와 축선길이의 타당성을 검토해야 한다. 기존 자료를 이용하여 조사지역의 개략적 지질구조를 상정하고 그들의 지층에 대한 적당한 속도치를 가정하고 탐사심도가 주어진다면 필요한 축선길이를 얻을 수 있다. 진원점 A로부터 직접파와 선두파가 동시에 도달하는 교차거리(crossover distance, XA)와 하부층의 굴절파의 주시범위 x를 알고 있을 때, 양단 진원점을 사용한다고 하면, 축선길이(X)는 $X=2X_A+x$ 이다.

(1) 터널조사

축선설정은 지표답사 등의 예비조사를 실시한 결과에 의해 계획을 세우지 않으면 않된다. 가장 간단한 축선은 터널 중심선을 따라 축선을 설정하는 것이다. 암반내를 통과한 굴절파의 초동은 최단 시간의 경로를 따라 전파된 것이기 때문에 중심선과 평행하게 존재하는 파쇄대나 연암대는 탐지될 수 없다. 한편 축선의 바로 직하부에는 없어도 축선 부근에 고속도층이 있으면 그것을 통과한 굴절파의 초동이 먼저 나타나므로 지하구조 해석에 오류를 범할 수 있다. 이를 방지하기 위해서는 기본적으로 중심선의 축선 이외에 교차 축선의 설정이 필요하다. 그리고 이 교차 축선은 단층 등이 예상되는 경우나 지형상 계곡부하고 터널 입출구부에서도 설정하는 것이 바람직하다.

실제 우리나라에서 시행되고 있는 터널지역의 굴절법 탐사는 대부분 터널길이와 조사축선 길이가 동일하다. 어떤 경우는 터널 입출구부만 조사하는 경우도 있다. 이렇게 까지 된 원인중에 하나는 우리 물리탐사 기술자들이 토목지질조사에 필요한 결과를 도출해 내지 못한 데 책임이 있으며 이는 개선되어야 한다고 생각한다. 따라서 인공위성 영상자료나 항공사진 판독결과와 지표 지질 조사자료 등을 종합한 지질 구조선의 해석과 함께 조사 축선의 위치, 방향, 조사 물량 등을 결정해야 한다.

(2) 절토사면 조사

사면붕괴 조사는 사면 경사방향의 풍화층 깊이와 형상, 단층 파쇄대의 위치 등을 파악해야 한다. 사면 붕괴 원인이 기초지반내의 풍화와 파쇄, 연약층의 존재에 의한 것인가, 표층 퇴적물에 의한 것인가를 밝혀내야 한다. 조사목적은 사면 붕괴 발생 원인, 발생기구의 규명 및 방지공법을 검토하기 위해 조사 지역내의 속도구조와 지질과의 대비, 기반암 면의 형상, 암반의 저속도부의 분포상황 등을 파악하는 것이다.

넓은 지역에 걸쳐 사면 붕괴된 지역에서의 축선은 주 붕괴 방향을 중심으로 격자상 또는 부채꼴로 배치하는 것이 보통이다. 축선의 방향을 지형의 경사방향이나 지층의 주향 또는 경사방향으로 하는 경우가 많다. 경사방향의 축선중 1개 이상은 해당 지역의 정상부의 원지형까지 연장하여 설정할 필요

가 있다. 또한 현재 붕괴된 지역만이 아니고 주변 지역까지 포함시켜 조사해야 한다. 협소한 지역에서의 사면붕괴 조사의 경우 지층의 주향과 경사를 알고 주 붕괴지역의 중심선을 따라 길게 주축선을 설정하고 이에 교차하는 부축선을 여러개 설정한다.

(3) 부지조성

부지조성에 있어서 탄성과 탐사의 목적은 기반암 분포와 지반의 시공성(rippability), 그리고 연약층의 분포 등을 파악하는 것이다. 전자는 표층 퇴적물이나 풍화대로부터 기반암 부근까지 비교적 천부의 조사이고 후자는 절취 또는 성토로 자연상태를 변화시켜 발생될 수 있는 사면 붕괴 또는 침하 방지 대책 등을 검토하는 조사가 이루어져야 한다. 대규모 택지 조성지역의 조사에서는 절취사면의 시공성 파악과 성토 예정지의 지반상황 등을 조사목적으로 축선을 배치해야 한다.

본 연구는 경기도 용인시 죽전리 소재 죽전지구 택지개발 조성지역에서 대절토 사면지역을 중심으로 축선을 배열하여 조사하였다. 이때 축선 배열의 주안점은 시추자료와 비교하기 위해 시추공 위치와 연계하여 설정하였다.

현장 자료취득

일반적으로 동일 지반조건이라면 탄성과 진원의 종류 및 탐사대상 심도 등에 따라 수진점 간격 및 진원점 이격거리(Offset) 등이 좌우된다. 일반적으로 굴절법 탐사에 사용되고 있는 진원의 종류는 화약, 합머, 중추낙하, 에어건 등이며 이중 화약과 합머가 가장 널리 이용된다.

일반적으로 토목지질 조사에 사용되는 수진점 간격은 5~10m 범위에서 선택적으로 사용한다. 이 수진점 간격은 전기길이 및 탐사심도와 밀접한 관계가 있다. 보통 비교적 천부의 탐사심도에 대하여는 5m, 심부인 경우는 10m의 수진점 간격을 채택하곤 한다. 한편 이 수진점 간격은 진원의 세기와의 관계가 있다. 필자의 경험에 의하면 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 합머(무게 약 5kg) 타격의 경우 결정질 암반으로 구성된 산악지형이고 주변 잡음이 전혀 없는 경우 최대 수진거리가 100m 내외이므로 24채널 전개의 경우 수진점 간격이 5m

이내가 바람직하다. 또한 심도 50cm 정도의 깊이에서 화약 125g을 사용하는 경우 최대 수진거리가 240m 내외이다. 그러나 진원의 수직중합(Stacking)에 의한 신호/잡음의 비(S/N ratio)를 향상시키면 수진거리는 어느 정도까지 대수적으로 증대시킬 수 있다.

진원점 간격은 지하구조의 해석정도와 작업능률과 밀접한 관계가 있다. 그 위치는 최소한 1개 전개구간에 대하여 적어도 양단과 중앙점 가능하다면 양단으로부터 일정거리 이상 이격한 원격 진원점을 설정하면 좋다. 이때 원격 진원점은 조사 전개구간 내 전체의 기반암 속도주시 자료를 얻을 수 있도록 양단의 진원점에서 일정거리 이격한다. 이때 얻은 주시자료는 양단에서 얻은 해당 속도주시의 시간차만큼 이동시키는 것을 phantoming 기법(Redpath, 1973)이라 한다. 보다 정확한 기반암 분포 형상을 파악하고자 할 때는 원격 진원점을 설정해야 하며 그때 이격거리는 phantoming 도달시간 거리만큼 하면 된다. 필자의 경험에 의하면 수진기 24채널과 그 간격 5m 이내일 때 현장 자료부족으로 인한 지하구조 왜곡현상을 줄이기 위해서는 1개 전개구간 당 적어도 원격 진원점을 포함하여 7점 이상의 위치에서 자료를 취득하는 것이 좋다. 그리고 터널 등과 같이 선상의 축선인 경우에는 전개구간별 phantoming 도달시간 거리 만큼 중첩을 하거나 양단 수진점으로부터 일정거리 이격한 원격 진원점 자료를 취득해야 한다. 토모그래피 해석 기법을 적용할 때 각 cell별로 충분한 파선이 통과되도록 하여 정밀한 지반 속도분포를 파악하고자 하는 경우 수진점 4개소 간격 정도로 진원점을 배열 및 조사구간내 기반암에 해당하는 파선이 충분히 카바될 경우 양질의 지하구조를 얻을 수 있다. 이 경우 현장 자료량은 전통적인 해석방법에 비해 적어도 3배 이상된다.

지표 굴절법 탐사 토모그래피 해석

굴절법 탐사자료의 해석에 있어서 필요조건은 해석 정밀도가 높을 것, 복잡한 지하구조에서도 해석이 가능할 것, 단시간에 해석할 수 있을 것, 해석 결과에 재관성 유지할 것 등이다. 이들의 조건을 만족하는 해석방법을 확립하기 위해 시추공간에서

사용하였던 탄성과 토모그래피 해석기술을 응용하였다.

토모그래피 탐사 결과에 대한 자료해석을 위한 역산(Inversion) 방법중 하나인 주시 토모그래피(Travel time tomography)는 초동도달시간(First arrival time)을 이용하는 것으로서 이는 기록된 모든 데이터의 초동으로부터 얻어진 물리량인 전파주시를 사용하여 기록된 트레이스가 통과하여 온 매질의 속도를 산출하는 것이다. 즉 측정된 데이터 즉 초동의 주시와 가장 잘 맞는 속도 모형으로부터 지하구조를 파악하는 방법이다. 이때 얻어진 탄성과 속도분포는 매질의 물성을 지시하며 이를 나타낸 단면을 보통 속도 토모그램(Velocity tomogram)이라고 한다. 여기서는 파선이론(ray theory)을 기초로 파의 전파시간과 파선의 경로(ray path), 파선이 통과하는 매질의 속도와와의 관계를 이용하여 대상단면의 속도구조를 영상으로 재구성하는 반복적 비선형 주시 토모그래피(Nonlinear iterative travel time Tomography) 방법으로 하였다.

탄성과 발생원에서 생성된 탄성파가 각 매질을 통과하여 수진기에 도달한다면 $t_k = \sum_{j=1}^n W_{kj} \cdot S_j$ 가 성립된다. 이때 t_k 는 초동주행 시간, W_{kj} 는 각 cell에서 탄성파가 통과되는 거리, S_j 는 slowness ($1/v_j$), v_j 는 각 cell의 탄성파 속도이다.

비선형 주시 토모그래피는 진원점과 수진점 사이의 매질을 통과한 파동 전파경로를 추적하는 파선추적(Ray tracing)과 그 경로를 따라 주행한 이론적 시간과 관측 시간간과 오차에 따라 지하구조 해상도를 좌우하게 된다. 도달시간의 계산은 일반적인 속도 모형에 대하여도 빠르게 계산할 수 있는 파면 확장을 이용한 유한차분법(FDM, Qin et al., 1989)이 사용되었다. 격자점에서의 주시는 Eikonal 방정식에 대한 유한 차분으로 구하고 이들 격자점에서의 최소 주시는 파면 확장을 이용하여 구하게 된다. 그리고 진원점과 수진점사이의 도달시간으로부터 파선 추적은 평면파의 가정으로 파면에 수직으로 파가 전파한다는 가정에 주시를 이용하여 파선을 구하였다. 이와 같이 구한 주시와 파선을 이용하여 $\Delta t = Lds$ 와 같은 비선형 주시 토모그래피의 행렬식을 구성하게 된다. 이 식의 해를 구하

는 방법은 여러 가지가 있으나 일반적으로 주시 토모그래피에서 빠르게 계산할 수 있는 반복적 선형 역투영법(Iterative Linear Back Projection)인 SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique)법을 적용하였다.

측정 시스템은 최근 탐사장비와 컴퓨터의 발달로 다 채널 측정기와 디지털 자료, 대량의 자료처리가 가능하다. 굴절법 토모그래피 해석기법을 적용하기 위해서는 측선내 많은 진원점으로부터 자료를 취득해야 정밀한 지하구조를 얻을 수 있다. 필자들은 진원점 간격을 4개 수진점 마다 설정하고 양단 수진점으로부터 phantoming 주시에 해당하는 거리만큼 이격하여 설정할 것을 추천한다.

통상적인 굴절법 탐사에서는 속도구조를 층구조라고 가정하고 해석하기 때문에 심도와 더불어 속도가 커지는 경향이 있고, 동일층에서 속도가 수평방향으로 크게 변화하는 복잡한 지반에서 정확하게 속도구조를 계산하기 어려웠다. 토모그래피 해석기법을 적용할 경우 속도구조를 층 구조라고 가정하는 것이 아니기 때문에 이와 같이 복잡한 구조에서도 비교적 정확한 속도구조 도출이 가능하다. 기존의 굴절법 탐사 해석기법은 앞에서 언급한 바와 같이 우리나라 처럼 대부분 적용되는 토목지질 조사 지역에 지형기복이 있기 때문에 보다 정밀한 지하구조 해석에 어려움이 많다. Fig. 2는 기존의 전통적 굴절법 탐사와 토모그래피 해석기법을 적용한 고분해능 굴절법 탐사의 측정, 해석의 흐름을 대비한 것이다.

절토 사면부의 적용 사례

국내 토목지질조사에서 물리탐사 적용이라고 하면 대표적으로 탄성과 굴절법 탐사를 들 수 있다. 기존의 해석방법을 적용할 경우 전술한 바와 같이 지형기복 문제, 지층 분해능, 지반공학적 측면에서의 효용성 저하 등의 문제점이 노출되어 왔다. 금번 연구는 이러한 문제점들을 다소나마 극복하고자 토모그래피 해석기법을 굴절법 탐사에 적용하였고 대규모 택지조성 지역의 절토사면부에 현장 적용하여 보았다.

일반적으로 절토 사면부에 굴절법 탐사를 하는 목적은 기반암의 심도와 절취 토공법, 사면 경사를

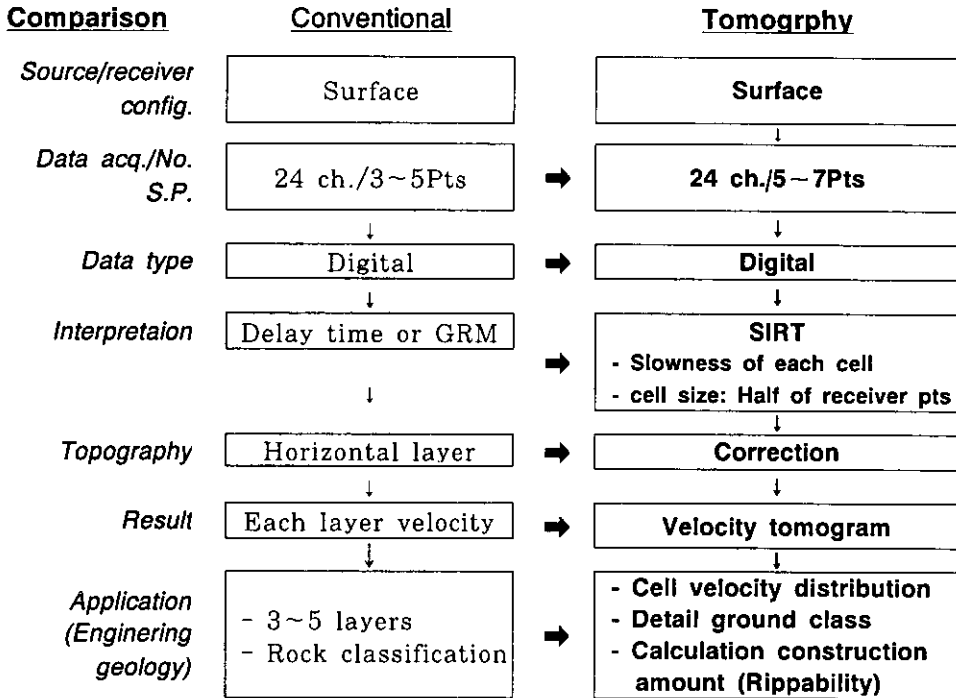


Fig. 2. Comparison of conventional and tomography methods

판단하는 데 있다. 특히 절취 토공법 결정에 있어서 rippability의 판단은 매우 중요하다. 지금까지 이의 결정은 탐사 측선내 시추자료로부터 분할된 암종, 즉 연암을 경계로 리핑암, 발파암으로 분류하고 탄성과 탐사로부터 해석된 해당 심도를 연장하여 토공량 계산에 활용하였다. 이 경우 지층 경계면을 일정하게 구분하기 때문에 시공시 빈번한 설계변경을 하게된다. 실제 국내 대부분의 지역은 기반암 경계부의 요철과 풍화대의 층후도 많은 변화가 있다. 금번에 적용된 토모그래피 기법을 적용할 경우 속도변화에 따른 지층 분할의 세분화로 지반 속도분포를 정확하게 추출할 수 있으므로 보다 정확한 토공량 및 공사비를 산출할 수 있다.

현장 조사에 사용된 장비는 기록기로 24 채널 탄성과 탐사기(StrataView R24, Geometrics Inc.)와 수신기($f_0=28\text{Hz}$, Mark Product), 그리고 진원으로 함머(무게 4.5kg)를 이용하여 5회이상 중첩하였다. 측정조건은 sampling rate $125\mu\text{s}$, record length 256ms이다. 현장자료 취득조건은 Table 3과 같이 "in-line" 방식으로 측선을 배열하여 각 전개

(spread)마다 진원점을 5점, 7점씩하여 얻었다. 기본 자료처리는 Linux용 SU 모듈(CWP, 1998)을 이용하였고, 지하구조 해석을 위한 역산은 유영준 등 (1999)에 의해 새로 개발된 굴절법 토모그래피 기법을 적용하였다. 지형기복 영향을 포함한 자료처리를 위해 각각의 수신점 및 진원점에 대하여 고도 측량을 실시하였다.

Table 3. Field data acquisition parameter

Items	Description
Site	Jukjeon, Yongin, Kyunggi
Measurement	Sampling rate $125\mu\text{s}$
Spread array	In-line
Profile array	Parallel and normal on land slope
Receiving spacing	3m
Source points spacing	15m
Source point per spread	5~7 points per spread
Source condition	Hammer(above 5 times for vertical stacking) Max. receiving distance : 92m

측선은 주요 지점의 시추공 위치와 교차하면서 절토 사면부와 평행/직교하게 설정하였다. Fig. 3은 조사지역에서 굴절법탐사를 시행한 구역별 측선도이다. 이것은 택지개발 조성사업 도면으로 등고선 이외에 측선명이 표시되지 않은 실선은 도로 및 절취사면 계획을 표시한 것이다. Fig. 4는 토모그래피 기법을 적용하여 구간별로 자료처리한 결과를 도시한 토모그램이다. Fig. 4의 (A)는 조사 1구간에서 절토부와 평행하게 측선을 설정하였고 측선의 양단에 시추공번 CB-45와 CB-46이 위치한다. 전개 JS-2와 JS-4는 진원점 7개소에서, 그리고 JS-3은 5개소에서 자료를 취득하였다. 여기서 속도분포 등치선 범위에 따른 채색 분포를 보면 황색계통인 속도 200~800m/s는 전반적으로 지형을 따라가면서 지층의 층후변화를 보이고 있고, 적회색 하부경계인 속도 1,800m/s는 거리 159m 하부를 제외하고는 황색계통과 거의 유사한 층후 변화를 보인다. 그러나 적색계통인 2,800m/s 이상에서는 수평적으로 극심한 속도변화를 보이는 데 이는 하부로 갈수록 각각의 진원점에서 송신된 파선들이 cell을 통과한 것이 부족하기 때문이다. 그래서 이 지층에 해당되는 속도 2,800m/s 이상의 지층 경계부는 전개 구간과 수평적으로 속도변화가 심한 구간은 상호 연결하게 되면 이 지층의 속도분포 경향을 파악할 수 있다. 따라서 전술한 바와 같이 전개구간당 진원점 수를 각각 증가시킬 때 심도 증가에 따른 지층 구분 해상도를 향상시킬 수 있다. 그리고 그림 (B)의 경우는 (A)의 측선 양단부에서 직교로 배열한 단일 전개 측선에 대한 토모그램이다.

Fig. 4의 (C)와 (D)는 각각 Fig. 3의 2, 3구간에서 시추공번 CB-49, CB-56에 맞추어서 배열한 측선으로 측선거리 141m에 해당되는 것은 2개의 spread를 연계하여 설정된 것이다. 이들을 보면 각각의 전개 연결부에서 속도 1,200m/s 이상에 해당되는 지층이 뚜렷하게 분리되는 것처럼 보인다. 이들 측선은 각 전개별 양단 수신점에서 이격거리가 1.5m로 연결되는 전개구간에서의 진원점이 전혀 없는 구간이다. 이 때문에 전개별 하부층의 속도 분포 연속성이 없어 보인다. 따라서 이러한 경우는 최종적으로 암중별 속도분포를 해석자가 기초사된 자료를 참고하여 지층을 구분하면 효과적으로 지반공학 자료 도출에 활용될 수 있다. 본 조사 당시의

자료취득은 전통적인 해석방법을 적용하기 위해 실시한 것이므로 토모그래피 해석기법을 이용하기 위해서는 이에 맞도록 원격 진원점을 추가로 사용하는 자료취득 방법을 택해야 할 것이다.

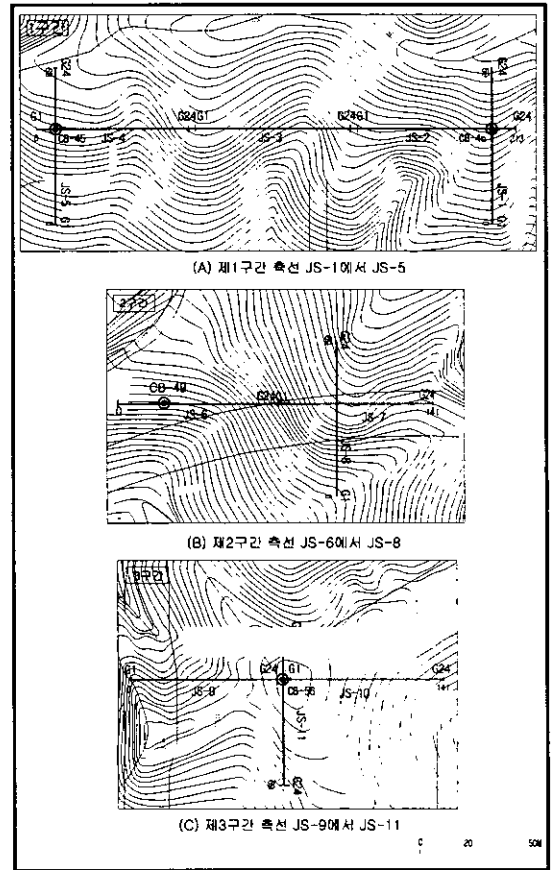
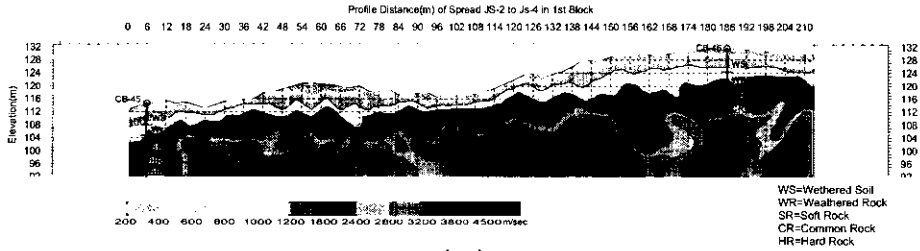


Fig. 3. Profile location on land slope in the 1st block(spread JS-1 to JS-5), 2nd block(JS-6 to JS-8) and 3rd block (JS-9 to JS-11) from above map.

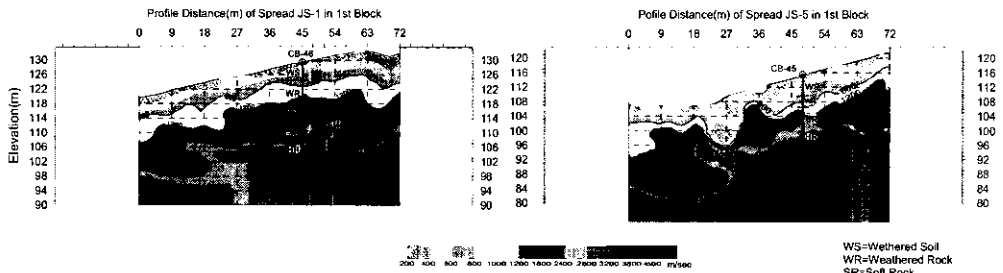
본 지역에서 굴절법 탐사 해석결과는 전술한 것처럼 토목공사에 있어서 절토 사면부의 토공량 및 시공법, 공사비 산출에 있다. 따라서 시추자료에 의한 단일 지점에서의 풍화암과 연암, 보통암 이상의 지반분류를 굴절법 탐사 측선 전개구간 전체에까지 연계하여 리퍼빌리티를 결정해야 한다. Table 1과 Table 2를 비교하여 속도 1,200m/s, 즉 풍화암을 경계로 그 이하일 때는 리핑암, 이상일 때는 발파

Seismic Refraction Tomography



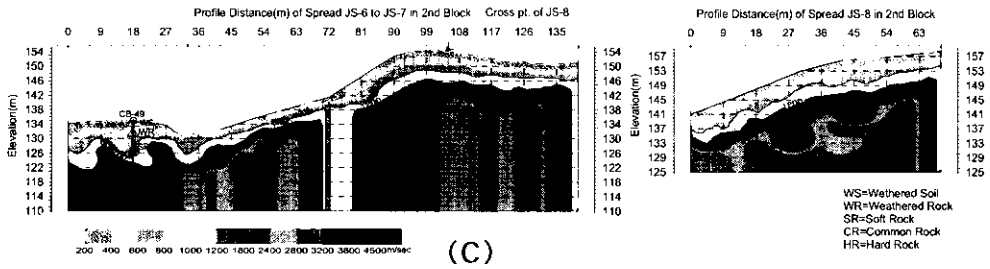
(A)

Seismic Refraction Tomography



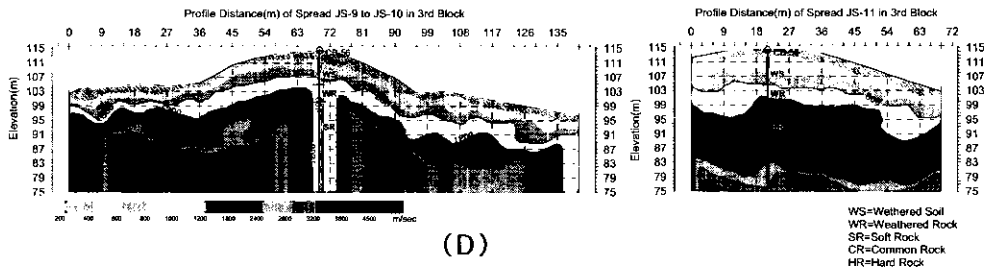
(B)

Seismic Refraction Tomography



(C)

Seismic Refraction Tomography



(D)

Fig. 4 Velocity tomograms on land slope in house land development site.

- (A) Profile JS-2 to JS-4 in the 1st block
- (B) Profile JS-1 and JS-5 in the 1st block
- (C) Profile JS-6 to JS-8 in the 2nd block
- (D) Profile JS-9 to JS-11 in the 3rd block

암으로 분류하는 것이 타당하다고 본다. 시추지점에서의 굴절법 탐사 결과와 비교할 때 이의 경계는 전체 축선에서 비교적 잘 일치한다.

따라서 향후 대규모 토지조성 지역에서 굴절법 탐사의 현장자료 취득 파라미터는 수진점 간격을 3~5m 정도로 하고 24채널 장비의 경우 진원점 간격을 12~20m, 양단 수진점에서 Offset 거리 최대 30m 정도로 할 때 양질의 지층구조를 파악할 수 있다고 생각한다.

결 론

탄성과 굴절법 탐사가 터널, 댐, 도로, 택지조성 등 토목구조물 기초지반 조사에 효율적으로 활용하기 위해서는 표토층 및 풍화대 깊이, 연암 또는 기반암의 깊이와 형상, 단층 파쇄대나 연약지반의 위치 및 규모, 폭, 지질경계의 위치, 지반의 공학적 분류, Rippability 등을 정량적으로 평가할 수 있어야 한다. 그래서 조사목적과 탐사심도에 맞는 축선 길이 및 배치, 수진점과 진원점 간격 및 배치, 지형 기록 여부 등 현장조사 파라미터 설정이 중요하다.

본 연구지역에 적용된 택지개발 조성지역의 경우 절토 사면부에서는 수진점 간격을 3~5m가 적합하다. 축선의 배열은 주축선과 주요 지점에서 이에 사교하는 부축선 배치가 필요하다. 굴절법 토모그래피 해석기법을 적용할 경우 진원점 위치는 조사장비의 채널 수에 1/4 이상과 지형기록 변곡점, Offset 거리는 Phantoming 주시만큼 설정하여 현장자료를 취득해야 자료처리시 지형경사의 영향에 의한 지하구조 왜곡 현상을 감소시킬 수 있다. 택지조성 지역에서 굴절법 토모그래피 해석기법을 적용하고 시추자료의 압중 분류와 비교한 결과 굴삭 난이도(rippability)는 심도변화 1m 내외의 해상도로 탄성과 P파 속도를 700~1,200m/s 범위의 풍화암에 대하여 리핑암, 그리고 그 이상의 속도인 연암을 발파암으로 평가하였다.

사 사

현장조사 및 자료이용에 도움을 준 한국토지공사 시험연구소 김달용 부장(현재, 충남지사), 한국지질자원연구원 지진센터 조창수 연구원에게 감사

를 드립니다.

참 고 문 헌

- 유영준, 조창수, 박용수, 유인길, 1999, 탄성과 굴절법 탐사를 이용한 지반속도 분포 해석-터널 및 절토사면 적용사례, 건설현장에 필요한 물리탐사기술 심포지움, 한국지구물리탐사학회, 48-64.
- 이두성, 1995, 유한차분법에 기초한 파선경로계산 알고리즘, 한국자원공학회, 31, 150-155.
- 조창수, 지 준, 이두성, 1998, Fresnel 영역을 고려한 비선형 주시 토모그래피, 물리탐사, 1, 43-48.
- 한국지반공학회, 1997, 구조물기초 설계기준, 507p.
- 佐々宏一, 芦田 讓, 菅野 強, 1993, 建設・防災技術者をための物理探査, 219p.
- 物理探査技術協會, 1977, 土木物理探査法, 日本物理探査學會.
- 物理探査學會, 1990, “土と岩の彈性波速度-測定と利用, 日本 物理探査學會, 327p.
- 羽龍 忠男, 伝法谷彰人, 2001, 高精密度屈折法地震探査における最適inversion, 物理探査, 54(1), 1-20.
- 林 宏一, 齊藤秀樹, 1998, 高精密度屈折法地震探査の開發と適用例, 物理探査, 51(5), 471-492.
- Bell, F.G., 1992, Engineering in rock masses, 580.
- CWP, 1998, SU(Seismic Unix) package-free distribution, Colorado School of Mines.
- Palmer, D., 1981, An introduction to the generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation, Geophysics, 46, 1508-1518.
- Qin, F., Olsen, K.B., Cai, W. and Shuster, G.T., 1989, Finite-difference solution of the eikonal equation along expanding wave-fronts, Geophysics, 57, 478-487.
- Redpath, B.B., 1973, Seismic refraction exploration for engineering site investigation, Nat. Tech. Inform. Serv.
- Zhang, J. and M.N. Toksoz, 1996, Nonlinear refraction tomography, 66th Ann. Int'l. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 2011-2014.

유영준

대한광업진흥공사 자원탐사처 물리탐사부 과장
서울 동작구 신대방동 686-48 (우:156-706)
Tel : 02-840-5747
Fax : 02-840-5810
e-mail : yjyou@kores.or.kr

유인걸

대한광업진흥공사 자원탐사처 물리탐사부 부장
서울 동작구 신대방동 686-48 (우:156-706)
Tel : 02-840-5749
Fax : 02-840-5810
e-mail : ikyoo@kores.or.kr

송무영

충남대학교 지질학과 교수
대전광역시 유성구 궁동 220
Tel : 042-821-6423
Fax : 042-823-3722
e-mail : mysong@cnu.ac.kr