

탄성파 굴절법 탐사를 이용한 지반 속도분포 해석-터널 및 절토 사면에서의 적용 사례

유영준¹⁾ · 조창수²⁾ · 박용수¹⁾ · 유인걸¹⁾

¹⁾대한광업진흥공사 물리탐사부, ²⁾서울대학교 자원공학과

Interpretation on the subsurface velocity structure by seismic refraction survey in tunnel and slope

Youngjune You¹⁾ · Chang Soo Cho²⁾ · Yong Soo Park¹⁾ · In Kol Yoo¹⁾

¹⁾Korea Resources Corporation, Geophysical Exploration Div.

²⁾Seoul National University, School of Civil Urban & Geosystem Eng.

요약 : 탄성파 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. 양질의 자료 취득을 위하여는 조사목적과 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, 터널 지역에서는 5~10m 정도가 적합하며 축선의 배열은 주축선과 주요 지점에서 이에 사교하는 부축선 배치가 필요하다. 굴절법 토모그라피 해석기법의 적용시, 조사장비의 가용 채널 수에 1/2 이상의 진원점으로부터 자료를 취득해야 자료처리시 지형의 영향을 받지 않는다. 편마암 지대인 절토사면부에서 시추자료와 비교하여 탄성파 속도에 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. 터널 지역에서는 전통적인 해석기법을 적용하였으며 터널 계획고와 탄성파 속도 1,200m/s~1,900m/s에 해당되는 연암층과 접하는 구간에서는 지질조사 및 비저항 탐사결과로부터 해석된 3개의 지질 구조선과 만나고 있으므로 터널 설계/시공 시 이의 결과 반영이 필요하다.

【주요어】 탄성파 굴절법 토모그라피, 자료취득 파라미터, 속도구조, 리퍼빌리티

Abstract : 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 for house land development and 5 to 10m in the tunnel site. In refraction tomography technique, the number of source points should be more than a half of available channel number of instrument, which can make topographic effect ignorable. 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. And the upper

limit of P-wave velocity for rippability is estimated 1,200 to 1,800m/s in land slope area of gneiss. In case of tunnel site, it is recommended in tunnel design and construction to consider that tunnel is in contact with soft rock layer where three lineaments intersecting each other are recognized from the results of the other survey.

【Keywords】 Refraction tomography, field parameters, rippability, velocity structure,

1. 서 론

탄성과 탐사란 탄성과동의 전파 특성을 이용하여 지하구조를 추정하는 물리탐사 기술이다. 이는 이용하는 탄성파의 종류나 측정형태(진원점과 수신기의 설치장소)에 따라 여러 가지 방법으로 분류되는데 이중 굴절법 탐사는 지표 또는 지하에서 인공적인 탄성파를 발생시켜 종파(P파) 또는 횡파(S파)가 직접 또는 다른 지층간에 굴절되어 지층속을 전파, 지표에 설치된 측정장치에서 관측된 결과를 해석하여 지하구조를 해명하는 방법이다. 물리탐사가 지반공학 분야에서 이용되기 위해서는 탐사결과를 해석하여 토목 건설분야에서 요구하는 지반의 공학적 특성을 정량적으로 평가해 주어야 하나 아직까지의 현실은 탐사에서 얻어진 물리량의 분포 패턴으로부터 지반의 상태를 정성적으로 평가하고 있는 실정이다.

비록 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 있으나 탄성과 굴절법 탐사법의 현장 측정 기법이나 해석기법등이 기술 발전의 수요에 맞추어 크게 진보되지 못함으로써 토목, 건설분야에서 탄성과 탐사를 비롯한 물리탐사의 신뢰도를 확보하기에는 아직 요원한 상황이라 하겠다. 심지어 최근 언제부터인가는 지반조사에 굴절법 탐사가 표준적으로 이용되는 조사임에도 불구하고 그 필요성은 인정하지만 효율성과 이용가치가 떨어진다는 이야기를 많이 하게 되어 “굴절법 탐사는 필요없다”라는 소리가 나올 정도가 되었다.

하지만 이러한 문제점이 나타나게 된 근본적인 원인은 일반적으로 보아 여러번의 하도급 계약에 따른 조사경비 삭감등으로 인하여 형식적인 현장조사 및 자료처리를 할 수밖에 없다는 현실과 탄성과 탐사와 관련된 기술자의 전문성과 기술력 저하 또는 결여등이라 할 수 있겠다.

그럼에도 불구하고 탄성과 탐사 결과 얻어지는 탄성과 속도는 암반이나 토질 지반의 물리적 성질이나 역학적 특성을 잘 반영한다고 알려져 있어 지반의 탄성과 속도를 파악하는 것은 향후의 토목 구조물의 설계/시공에 없어서는 안될 주요 요소로써 작용되며 굴절법 탐사는 비교적 간단하고 싼 방법으로 “속도라고 하는 물성치로 지반을 구분할 수 있다”라는 장점 때문에 현재 뿐만 아니라 앞으로도 토목지질조사에 있어서 유효한 탐사방법의 하나로 자리매김을 하게 될 것이다. 그래서 탄성과 굴절법 탐사는 토목지질조사 분야에서 특히 잘 이용되고 있으며, 터널, 댐 부지, 도로, 택지조성 등 토목 구조물 기초지반 조사에 필수적이라 하겠다. 이러한 이유는 ① 지표에서 실시할 수 있는 탐사이고 사실상 어떠한 지형에서도 적

용이 가능하며, ② 탄성파동의 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 등의 기법을 적용하고 보다 발전적으로 GRM 기법을 개발, 자료의 해석을 하여 왔으나 이들 방법 모두 주시곡선에 나타난 특징을 이용하여 속도구조를 구하는 점에 있어서 원천적인 한계가 있으며 지형이나 지하구조가 복잡하게 되면 해석오차가 커지게 됨은 불가피한 현실이다.

따라서 본 연구에서는 전통적인 굴절법 탐사 자료처리 및 해석에서 야기되는 지형요철, 지하 굴절 경계면의 복잡성, 지반구조 세분화의 한계성 등에 따르는 문제점, 예를들면 터널 지역의 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 점등으로써 이러한 제반 문제점을 극복하고 토목 지질조사 분야에서 실질적으로 이용할 수 있고 이용가치가 높은 양질의 기초자료를 제공하고자 탄성파 굴절법 토모그래피 해석기법을 개발, 실제 터널 및 택지조성 지역의 대절토 사면부 현장에 대하여 적용하고 이 결과에 따라 토목/건설분야에서 요구되는 정량적인 설계/시공자료를 제공할 수 있는 기법을 제시하고자 한다.

2. 측선설계 및 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 필요하다.

2.1 측선설계

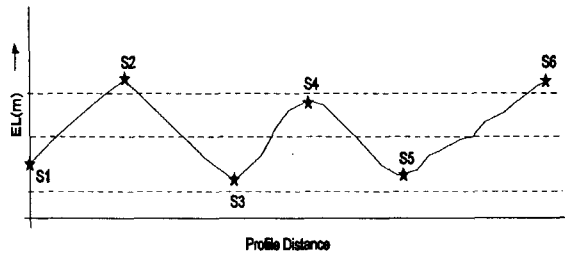
측선이란 측정을 실시하는 위치를 보기 위해 지표상에 설정한 선이다. 측정결과의 해석에는 원칙적으로 지표면이 수평이고 하나의 직선상에서 절단한 단면내에 파동의 전파경로가 있는 경우를 전제로 할 때 성립된다. 그래서 해석의 용이성과 해석 정밀도의 향상을 위해 해석법의 전제조건을 가능한 한 만족하도록 설정할 필요가 있다.

조사대상 지역에 대하여 측선 1개 전개(spread)가 가장 이상적인 경우는 <그림 1>에서 S1과 S2사이 이다. 대부분의 산악지형의 경우 이러한 경우는 매우 흔하지 않으므로 가능한 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. <그림 1>은 지형 기복이 있는 경우 터널 예정선과 같이 선상으로 측선배열을 도식한 것으로 S1과 S6를 연결한 것과 같은 측선의 경우가 많다. 이 경우 적어도 진원점의 위치는 지형의 정상

부, 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 측선의 위치, 길이를 결정하는 경우가 많다. 지형도에 표시한 측선 길이(수평거리)가 일반적으로 조사측선 길이에 해당된다. 그래서 지형이 거의 수평인 경우 지형도상의 측선길이가 조사된 실제 길이(사거리)가 거의 같지만, 지형경사 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 측선의 표시는 수평거리 측선, 사거리 측선을 구분하여 표시하는 것이 좋다.



<그림 1> 지형기복이 있는 경우 전개구간과 진원점의 위치

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

2.2 수진점과 진원점

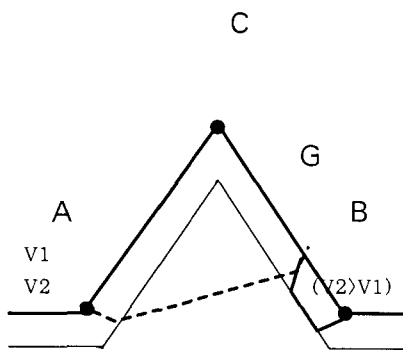
일반적으로 토목지질 조사에 사용되는 수진점 간격은 5~10m 범위에서 선택적으로 사용한다. 이 수진점 간격은 전개길이 및 탐사심도와 밀접한 관계가 있다. 보통 비교적 천부의 탐사심도에 대하여는 5m, 심부인 경우는 10m의 수진점 간격을 채택하곤 한다. 한편 이 수진점 간격은 진원의 세기와도 관계가 있다. 필자의 경험에 의하면 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 함머(무게 약 5kg) 타격의 경우 일반적인 지질조건과 주변 잡음이 전혀 없는 경우 최대 수진거리가 100m 내외이므로 24채널 전개인 경우 수진점 간격이 5m 이내가 바람직하다. 또한 심도 50cm 정도의 깊이에서 화약 125g을 사용하는 경우 최대 수진거리가 240m 내외이다.

진원점 간격은 지하구조의 해석정도와 밀접한 관계가 있으므로 그의 위치는 1개 전개구간에 대하여 적어도 양단과 중앙점에 위치해야하고, 가능하다면 양단으로부터 일정거리 이상 이격된 원격 진원점을 설정한다. 이때 원격 진원점은 조사 전개구간내 전체의 기반암 속

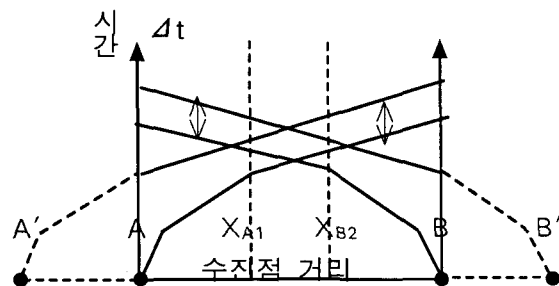
도주시 자료를 얻을 수 있도록 양단의 진원점에서 일정거리 이격한다. 이때 얻은 주시자료는 양단에서 얻은 해당 속도주시의 시간차만큼 이동시키는 것을 phantoming 도달시간 (Redpath, 1973)이라 한다(그림 3 참조). 보다 정확한 기반암 분포 형상을 파악하고자 할 때는 원격 진원점을 설정해야 하며 그때 이격거리는 phantoming 도달시간 거리만큼 하면된다. 현장 자료부족으로 인한 지하구조 왜곡현상을 줄이기 위해서는 1개 전개구간당 적어도 7점 이상의 위치에서 자료를 취득하는 것이 좋다. 그리고 터널 등과 같이 선상의 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 필자의 경험에 의하면 수진점 2개소 간격 정도로 진원점을 배열해야 한다. 물론 이 경우에도 선상으로 축선을 전개할 때 전술한 바와 같이 전개구간별 서로 중첩시키면서 진원점의 위치를 설정해야 한다. 이 경우 현장 자료량은 전통적인 해석방법에 비해 적어도 3배 이상되나 이는 최근 컴퓨터의 발달로 충분히 카바될 수 있다.

2.1에서 설명한 바 있는 축선 상에 지형기복이 있는 경우 진원점 설정 장소에 관하여 설명하겠다. <그림 2>에서 간단한 2층 구조의 예를 보면, 진원점 A,B 사이에 현저한 “**凸**”의 지형이 있으면 진원점 B로부터 수진점 G에 도달하는 굴절파는 제2층 경계면상에서 임계굴절파 이지만 A로부터의 굴절파는 제2층 내부를 전파한 파로 되기 때문에 수진점 G에서 관측된 A,B로부터의 주시자료를 이용하여 전통적인 해석법으로 적용할 수 없다. 또한 토모그래피 기법을 적용한 해석에서도 점 A와 G사이의 각 cell을 통과한 파선부족으로 지하구조의 왜곡을 유발시킬 수 있다. 이러한 지형의 경우에는 정상부 C점에 진원점을 추가하여 자료를 취득해야 한다. 그리고 “**凹**”의 지형에서도 마찬가지이다.

전개 구간내에 설정한 진원점 간격과는 별도로 양단 수진점으로부터 일정거리 이격하여 설정하는 원격 진원점의 위치에 관하여 간단히 설명하겠다. 이는 앞에서 간단히 설명한 phantoming 거리와도 관계가 있다. <그림 3>에서 보는 것 처럼 1개 전개구간에 대하여 진원점 A,B가 있는 경우 진원점 A와 X_{A2} , B와 X_{B2} 사이에서는 제3층의 주시자료가 없으므로 전통적인 방법의 경우 이 구간의 3층 속도는 X_{A2} 와 X_{B2} 사이의 속도로 가정하여 계산에 이용된다.



<그림 2> 지형경사 지역의 진원점 배치



<그림 3> 원격 진원점에 의한 주시곡선

토모그래피 기법에서는 phnatoming 주시자료가 없을 경우 이 구간의 cell을 통과한 파선이 없기 때문에 전혀 다른 지하구조를 보일 수 있다. 따라서 이러한 문제점을 극복하기 위해서는 양단 진원점 A와 X_{A2} , B와 X_{B2} 의 거리만큼 양단 수신점으로부터 이격시킨 진원점 A', B'에서의 속도주시를 얻어야 한다.

탄성과 진원장치에 따라 수신점 및 진원점 이격거리 등이 결정된다. 일반적으로 굴절법 탐사에 사용되고 있는 진원의 종류는 화약, 합머, 중추낙하, 에어건 등이며 이중 화약과 합머가 가장 널리 이용된다. 화약의 경우 장약량을 증가시키면 수신거리는 대수적으로 비례하면서 증가한다. 터널지역에 적용한 결과 장약량 125g 사용시 최대 240m 정도는 전파하였다. 그러나 그 이외의 진원의 경우 보통 200m 이내이며 특히 합머의 경우 수신거리가 100m 내외정도이므로 신호/잡음의 비(S/N ratio)를 향상시키면서 중합하면 수신거리를 어느 정도까지는 증대시킬 수 있다.

2.3 조사측선 설계

한국지반공학회 『구조물 기초 설계기준』(1997)에 따르면 “탄성과 굴절법 조사방법은 수신점 5~10m, 진원점 간격 30~60m로 하고 진원은 화약이나 합머를 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 수신점 간격은 5~10m이다.”라고 기재되어 있다.

가. 터널조사

측선설정은 지표탐사 등의 예비조사를 실시한 결과에 의해 계획을 세우지 않으면 안된다. 가장 간단한 측선은 터널 중심선을 따라 측선을 설정하는 것이다. 암반대를 통과한 굴절파의 초동은 최단시간의 경로를 따라 전파된 것이기 때문에 중심선과 평행하게 존재하는 파쇄대나 연암대는 탐지될 수 없다. 한편 측선의 바로 직하부에는 없어도 측선 부근에 고속도층이 있으면 그것을 통과한 굴절파의 초동이 먼저 나타나므로 지하구조 해석에 오류를 범할 수 있다. 이를 방지하기 위해서는 기본적으로 중심선의 측선 이외에 교차 측선의 설정이 필요하다. 그리고 이 교차 측선은 단층 등이 예상되는 경우나 지형상 계곡부하고 터널 입출구 부에서도 설정하는 것이 좋다. 필자들은 경춘선 복선전철 예정노선 중 서천터널의 일부에 대하여 터널 중심선을 따라 측선을 배열하여 조사하였다.

실제 우리나라에서 시행되고 있는 터널지역의 굴절법 탐사는 대부분 터널길이와 조사측선 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 조사측선의 위치, 방향, 조사 물량 등을 결정해야 한다.

나. 사면붕괴 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 발생원인, 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 필요가 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.

다. 토지조성

토지조성에 있어서 탄성과 탐사의 목적은 지반의 시공성(rippability), 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. 필자들은 경기도 용인시 죽전리 소재 죽전지구 택지개발 조성지역에서 대절토 사면지역을 중심으로 축선을 배열하여 조사하였다. 이때 축선 배열의 주안점은 시추자료와 비교하기 위해 시추공 위치와 연계하여 설정하였다.

3. 탄성과 속도와 지질공학적 특성

3.1 지반의 탄성과 속도

일반적으로 선진국에서는 건설 기초 공학 분야에서 탄성과 속도값이 널리 이용되고 있다. 탄성과 속도값이 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(그림 4). 따라서 댐, 터널 등의 구조물에서는 건설 시공의 기초 자료로서 탄성과 속도가 이용된다. 탄성과 속도의 측정은 굴절법, 검층법, 공간속도 측정법 등의 방법으로 행하여지지만 개략 조사의 단계에서는 P파 굴절법 탐사가, 정밀조사 단계에 들어가면 검층법 등이 적용된다.

현재까지 국내외적으로 알려진 탄성과 속도의 분류를 보면 V_p 가 3000~6000m/s에 약 75%의 자료가 집중되고 있다. 지반의 굴착방법의 선택에 있어서 탄성과 속도를 이용할 수

있다. <그림 5>와 <그림 6>은 Rippability와 Diggability를 탄성파 속도의 범위로써 표시한 것이다.

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, 이들의 집합체인 암석내에는 광물입자 사이에 존재하고 있는 미세균열이나 고결 당시 발생한 공극 등이 존재한다. 공기의 P파 속도는 331.45m/s(0℃, 1기압)이고 물의 P파 속도는 1,500m/s로 어떠한 조암광물의 P파 속도보다 느리다. 따라서 암석내에 공극이 많으면 암석의 탄성파 속도는 떨어진다. 그리고 탄성파 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 전파속도를 저하시킨다.

3.2 지질공학적 특성

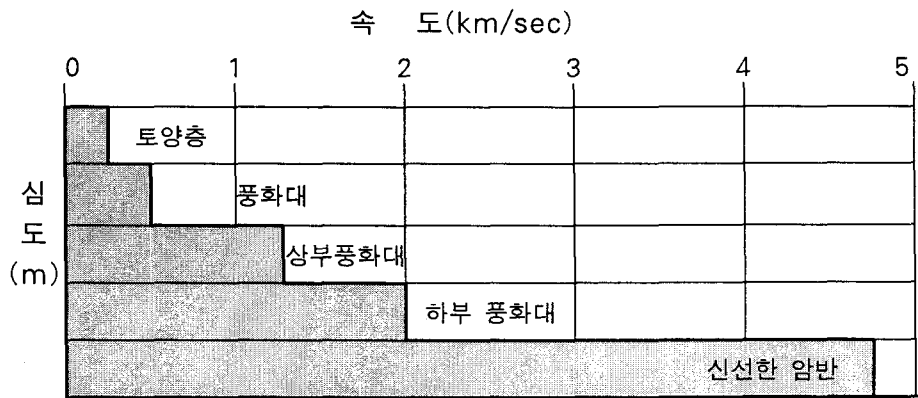
탄성파 전파속도는 탄성정수와 관계가 있다는 것은 이미 널리 알려진 사실이다. 탄성파 전파속도와 밀도를 측정하게 되면 탄성정수를 산출할 수 있는 데 이를 동탄성정수(dynamic elastic modulus)라고 부르며, 시편을 이용하여 재료시험 장비로부터 측정된 탄성정수는 정탄성정수(static elastic modulus)로 구별하여 사용된다. 일반적으로 동탄성정수는 정탄성정수보다 크며, (동탄성정수/정탄성정수) 비는 미고결층에서 15~50, 암석의 경우 1~20 정도로 탄성정수의 값이 작아지면 그 비의 값은 커진다.

암반을 구성하고 있는 암석이 견고하고 강도가 커지게 되어도 많은 균열이 존재하면 암반으로서의 강도는 저하한다. 암반의 P파 속도는 암반의 강도특성을 나타내는 풍화정도와 균열의 빈도(RQD)와 밀접하게 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.

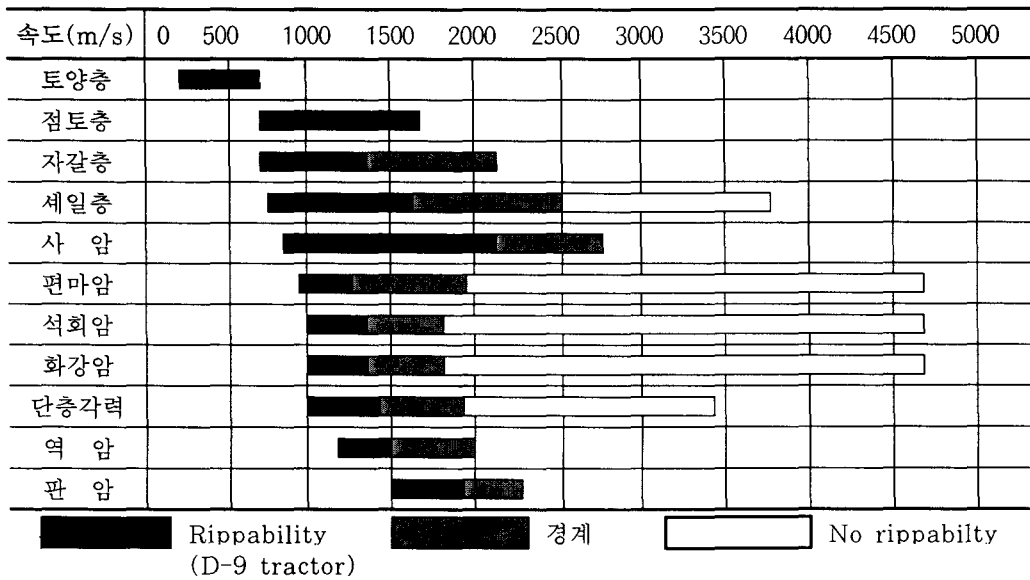
한국지반공학회 『구조물 기초 설계기준』(1997)에 따르면 속도지수(velocity index)와 RQD에 의한 암반분류(표 1), Rippability 분류(표 2, 한국도로공사 기준(1996); 표 3, Weaver(1975)) 기준을 마련하였다.

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 공사기록의 조사, 현장 탄성파 탐사, 암석에 대한 일축압축강도와 탄성파 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 탄성파 속도, 암반내압강도 등을 고려한 암종이 연암을 경계로 리퍼빌리티를 판단한다.

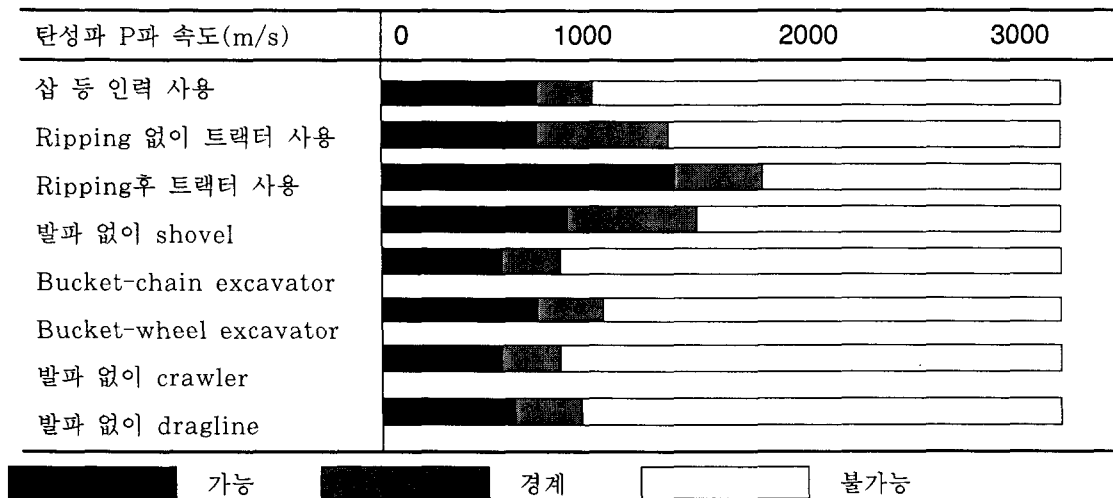
<표 2>는 탄성파 P파 속도, RQD, TCR을, <표 3>은 탄성파 P파 속도, 일축압축강도, 풍화도, 불연속면 간격과 연속성, 불연속면의 상태 및 주향과 경사 등을 고려하여 Rippability를 분류하였다.



〈그림 4〉 지층별 탄성과 속도



〈그림 5〉 탄성과 속도범위에 의한 rippability (Bell, 1992)



〈그림 7〉 탄성과 속도범위에 따른 diggability (Bell, 1980)

〈표 1〉 RQD와 속도지수(Velocity index)에 의한 분류

RQD (%)	속도 지수 ^{주)}	암 질
90~100	0.8~1.0	매우 우수
75~90	0.6~0.8	양 호
50~75	0.4~0.6	보 통
25~50	0.2~0.4	불 량
0~25	0~0.2	매우 불량

주) 속도지수 = $(V_f/V_1)^2$, (V_f : 현장 P파 속도, V_1 : 실내 시험속도)

〈표 2〉 불연속면 발달빈도에 따른 리핑암과 발파암의 분류(한국도로공사, 1996)

구 분		토 공 작 업		
		토 사	리 핑 암	발 파 암
탄성파 P파 속도(m/s)	A 그룹	700 이하	700~1,200	1,200 이상
	B 그룹	1,000 이하	1,000~1,800	1,800 이상
표준관입시험치(N)		50/10 미만	50/10 이상	-
불연속면 발달빈도	RX	-	TCR=5% 이하	TCR=5~10% 이상
		-	RQD=0	RQD=0~10%
	NX	-	TCR=25% 이하	TCR=25% 이상
		-	RQD=0	RQD=0~10% 이상

〈표 3〉 Rippability 분류(Bell, 1992)

암 질	매우양호	양호	보통	불량	매우불량
풍화도	신선	다소풍화	보통풍화	많이풍화	완전풍화
P파 속도(m/s)	>2,150	1,850-2,150	1,500-1,850	1,200-1,500	450-1,200
Rippability	발파	리핑 극히 곤란, 발파	리핑 매우 어려움	리핑 어려움	쉽게 리핑

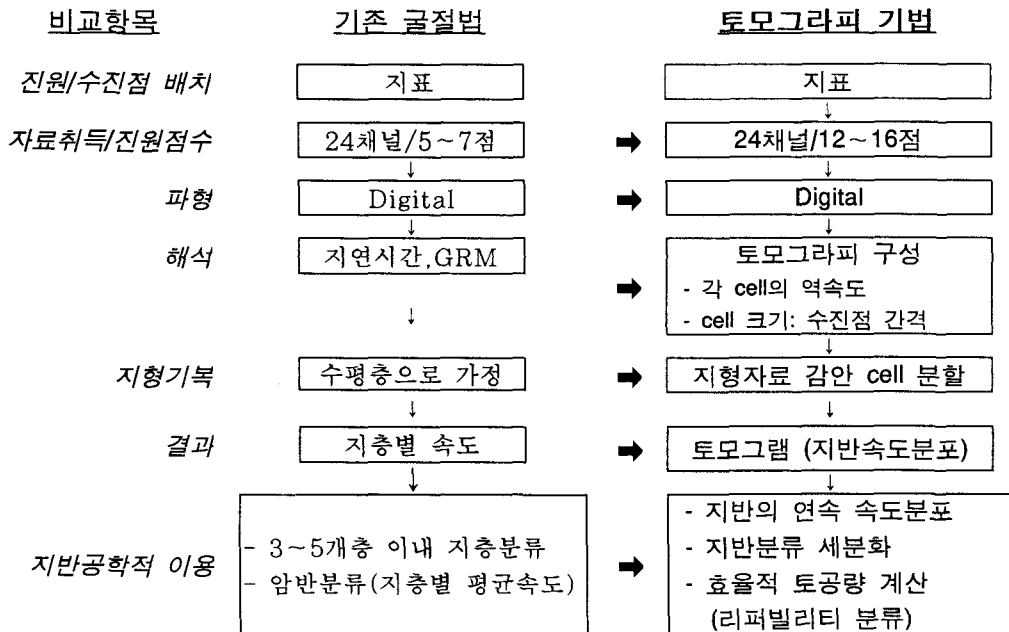
3. 굴절법 토모그래피 탄성파 탐사

3.1 자료해석 특징

최근 토모그래피 기법을 적용한 탐사기술의 발달이 많이 진보하였고 조사영역도 초기의 석유자원 탐사에서 지반조사, 공동조사, 유적조사 등 다양해졌다. 이들 분야에 대한 대부분은 시추공을 이용한 공대공 탐사기법이다. 필자들은 급변에 공대공 토모그래피 탐사 해석기법에 적용하였던 알고리즘을 굴절법 탐사의 해석에 적용을 시도하였다. 기존의 굴절법 탐사 해석기법은 모두에서 언급한 바와 같이 우리나라 처럼 대부분 적용되는 토목지질 조사지역에 지형기복이 있기 때문에 보다 정밀한 지하구조 해석에 어려움이 많았다. 〈그림 8〉은 기존의 굴절법 탐사와 고분해능 굴절법 탐사의 측정, 해석의 흐름을 대비한 것이다.

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 2개 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. 본 고분해능 토모그래피 해석기법을 적용할 경우 속도구조를 층 구조라고 가정하는 것이 아니기 때문에 이와 같이 복잡한 구조에서도 비교적 정확한 속도구조 도출이 가능하다.



〈그림 8〉 굴절법 탐사 자료해석 방법 비교

3.2 해석방법

굴절법 탐사자료의 해석에 있어서 필요조건은 해석 정밀도가 높을 것, 복잡한 지하구조에서도 해석이 가능할 것, 단시간에 해석할 수 있을 것, 해석결과에 객관성 유지할 것 등이다. 이들의 조건을 만족하는 해석방법을 확립하기 위해 시추공간에서 사용하였던 탄성과 토모그래피 해석기술을 응용하여 알고리즘을 개발하였다. 이것은 임의의 초기모델을 설정하고 이론주기를 계산한 후, 계산된 이론주기와 관측주기를 비교하여 그의 잔차가 최소가 되도록 수정하여 정확한 속도구조를 도출해내는 방법이다.

비선형 주시 토모그래피는 반복적으로 주어진 속도구조에서 진원점과 수진점 사이의 도달시간과 경로를 계산해야 한다. 이 경로를 계산하기 위한 파선추적(ray tracing)이 그 성능을 좌우하게 된다. 도달시간의 계산은 일반적인 속도 모형에 대하여도 빠르게 계산할 수 있는 파면 확장을 이용한 유한차분법(FDM, Qin et al., 1992; 이두성, 1995; 조창수 등 1998)이 사용되었다. 역산은 반복적 선형 역투영법인 SIRT법을 적용하여 모든 파선에 대한 각 격자의 보정치들을 구하고 이들의 평균치로 보정하여 각 cell의 역속도(slowness) 분포를 얻었다.

4. 토목지질조사에서의 적용 사례

국내 토목지질조사에서 물리탐사 적용이라고 하면 탄성과 굴절법 탐사가 가장 많다. 기존의 해석방법을 적용할 경우 전술한 바와 같이 지형기록 문제, 지층 분해능, 지반공학적인 측면에서의 효용성 저하 등의 문제점이 노출되어 왔다. 금번에 필자들은 이러한 문제점들을 다

소나마 극복하고자 토모그래피 해석기법을 굴절법 탐사에 적용하였고 대규모 택지조성 지역의 절토사면부와 경춘선 복선전철 터널구간에 현장 적용하여 보았다.

현장 조사장비는 24채널 탄성과 탐사기(StrataView R24, Geometrics Inc., USA), 수신기($f_0=14\text{Hz}$), 합머(무게 4.5kg), 화약이다. 합머 타격의 경우 5회이상 중합을 하였으며, 화약 사용시 장약량은 양단 진원점의 경우 125g, 전개(spread)내에서는 60g 정도 순간발파 뇌관을 사용하였다. 측정조건은 sampling rate $125\mu\text{s}$, record length 256ms 이다. 현장자료 취득조건은 <표 4>와 같이 "in-line" 방식으로 측선을 배열하여 각 전개(spread)마다 진원점을 5점, 7점씩하여 얻었으며 자료처리 및 해석은 새로 개발된 토모그래피 기법을 적용하였다. 지형기복 영향을 포함한 자료처리를 위해 각각의 수신점 및 진원점에 대하여 고도측량을 실시하였다.

<표 4> 택지 조성 및 터널 지역에서의 현장 자료취득 조건

구 분	택지조성	터 널
위 치	경기 용인 수지 죽전	강원 춘천 남산
측선배열	사면부에 평행/직교	터널 중심선
수진점 간격	3m	5~10m
진원점 간격	15m	25~50m
전개당 진원점수	5~7점	5점
진원방법	합머(5회 이상 중합) 최대 수신거리 : 92m	화약(60~125g) 최대 수신거리 : 240m

4.1 택지조성 지역

경기도 용인시 수지읍 죽전리 소재 죽전지구 택지개발 조성지역에 대한 지반조사 일환으로 탄성과 굴절법 탐사를 대절토 사면부에서 실시하고 이로부터 탄성과 속도분포에 의한 지하구조 해석, 지반분류, 시공성(rippability)을 파악하였다.

일반적으로 절토 사면부에 굴절법 탐사를 하는 목적은 기반암의 심도와 절취 토공법, 사면 경사를 판단하는 데 있다. 특히 절취 토공법 결정에 있어서 rippability의 판단은 매우 중요하다. 지금까지 이의 결정은 탐사 측선내 시추자료로부터 분할된 압중, 즉 연암을 경계로 리핑암, 발파암으로 분류하고 탄성과 탐사로부터 해석된 해당 심도를 연장하여 토공량 계산에 활용하였다. 이 경우 지층 경계면을 일정하게 구분을 하기 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.

측선은 주요 지점의 시추공 위치와 교차하면서 절토 사면부와 평행/직교하게 설정하였다. <그림 9>는 조사지역에서 굴절법탐사를 시행한 구간별 측선도이며 <그림 10>은 토모그래피 기법을 적용하여 구간별로 자료처리한 결과를 도시한 토모그램이다. <그림 10>의 (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 유사

한 층후 변화를 보인다. 그러나 적색계통인 2,800m/s 이상에서는 수평적으로 극심한 속도 변화를 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 증가함에 따른 지층 분해능을 향상시킬 수 있다. 그리고 그림 (B)의 경우는 (A)의 축선 양단부에서 직교로 배열한 단일 전개 축선에 대한 토모그램이다.

〈그림 10〉의 (C)와 (D)는 각각 〈그림 9〉의 2, 3구간에서 시추공번 CB-49, CB-56에 맞추어서 배열한 축선으로 축선거리 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 축선은 각 전개별 양단 수진점에서 이격거리가 1.5m로 연결되는 전개구간에서의 진원점이 전혀 없는 구간이다. 이 때문에 전개별 하부층의 속도 분포 연속성이 없어 보인다. 따라서 이러한 경우는 최종적으로 암종별 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.

본 지역에서 굴절법 탐사 해석결과는 전술한 것 처럼 토목공사에 있어서 절토 사면부의 토공량 및 시공법, 공사비 산출에 있다. 따라서 시추자료에 의한 단일 지점에서의 풍화암과 연암, 보통암 이상의 지반분류를 굴절법 탐사 축선 전개구간 전체에 까지 연계하여 리퍼빌리티를 결정해야 한다. 〈표 2〉와 〈표 3〉을 비교하여 속도 1,200m/s, 즉 풍화암을 경계로 그 이하일 때는 리핑암, 이상일 때는 발파암으로 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 6~10m, 양단 수진점에서 6~10m 간격으로 최대 30m 정도로 할 때 양질의 지층구조를 파악할 수 있다고 생각한다.

4.2 터널 지역

강원도 춘천시 남성면 소재하는 경춘선 복선전철의 00터널(L=2,640m)로 원격탐사 자료분석, 지표지질조사를 통한 지질구조, 전기비저항 탐사, 탄성과 굴절법 탐사를 실시하였으며 금번에는 굴절법 탐사결과를 중심으로 설명하고 이때 지질구조와 연계하여 해석한다. 터널 구간 부근의 지질은 장락층군 내의 삼산현층으로 흑운모편마암을 주로 분포하나 석영편암, 석회암이 협재되고 있다. 남북방향의 소규모 단층과 동서방향의 비교적 큰 규모의 단층이 확인되며 후자는 원격탐사 결과로도 확인되는 단층이다. 특히 일부 구간은 단층과 함께 석영편암의 협재로 암반상태가 매우 불량한 상태이다.

〈그림 11〉에 나타난 것 처럼 탄성과탐사 자료해석 결과, 탄성과속도는 『규암 < 편마암류<석회암』 순서로 나타나고 있으며, 삼산현 편마암 및 호상 편마암에서의 탄성과속도는 유사하나 후자 구간에서 다소 높은 수치를 보인다. 이와같은 현상은 지질구조조사 및 비저항 탐사결과와도 일치한다. 본 터널 구간에서의 각 지층별 속도와 심도는 제1층의 경우 262~787m/s와 0.3~8.9m이고 제2층은 939~3,408m/s와 2.2~36.6m이며 그 하부층인 제3층은 1,857~6,800m/s로 해석되며 전반적으로 탄성과속도는 『규암 < 삼산현층편마암

〈호상편마암〈석회암〉으로 나타난다. 이는 규암구간이 풍화나 절리 등의 발달로 불량한 것으로 추정되며, 지질구조 조사시 암반 분류 결과와도 대체적으로 일치하고 있다. 터널계획고와 탄성파속도 1,200~1,900m/s 범위의 연암층에 속하는 제2층 또는 하부경계면과 접하는 구간은 5개소로 터널 시공/설계시 고려해야할 구간으로 추천한다.

본 터널에서 축선의 설정은 터널 예정노선 중심선을 따라 수행되었다. 상기에서 설명한바와 같이 탄성과 탐사 결과도면에서 기반암면에 요철이 심하거나 저속도대 또는 단층 파쇄대로 추정되는 구간과 원격탐사, 지질조사 결과로부터 확인된 단층이나 선구조의 교차 구간등에서는 본 축선에 교차되는 축선의 추가설정을 하여 보다 분명한 규명이 필요하다. 또한 필요에 따라서는 시추공 물리탐사의 병행이 요구된다.

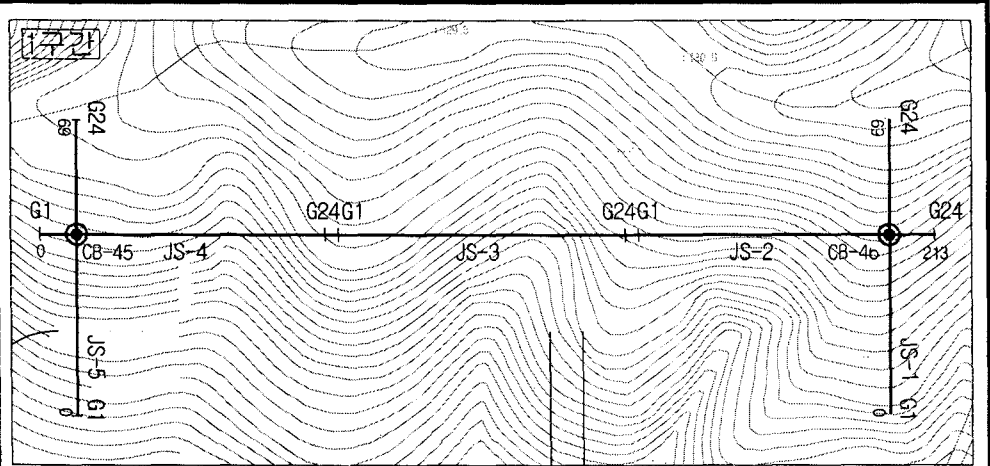
5. 결론

탄성과 굴절법 탐사가 터널, 댐, 도로, 택지조성 등 토목구조물 기초지반 조사에 효율적으로 활용하기 위해서는 표도층 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 축선길이 및 배치, 수신점과 진원점 간격 및 배치, 지형기복 여부 등 현장조사 파라미터 설정이 중요하다. 택지개발과 같은 토지조성 지역이나 절토 사면부에서는 수신점 간격을 3~5m, 터널 지역에서는 5~10m 정도가 적합하다. 축선의 배열은 주축선과 주요 지점에서 이에 사교하는 부축선 배치가 필요하다. 굴절법 토모그래피 해석기법을 적용할 경우 조사장비의 채널 수에 1/2 이상의 진원점으로부터 자료를 취득해야하고 이를 이용한 자료처리시 지형경사의 영향을 받지 않는다.

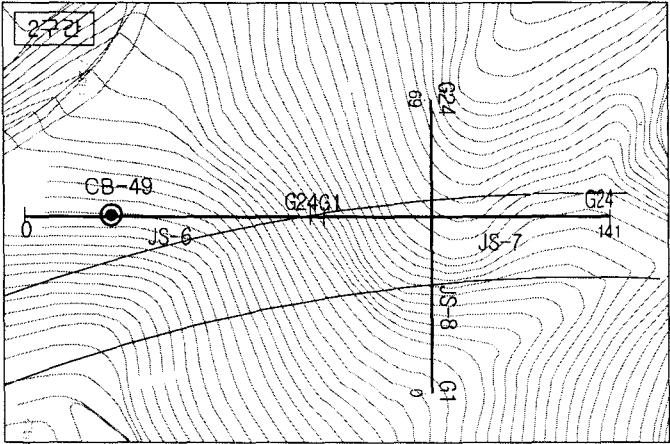
택지조성 지역에서 굴절법 토모그래피 해석기법을 적용하고 시추자료의 암종 분류와 비교한 결과 굴삭난이도(rippability)는 탄성과 P파 속도가 700~1,200m/s 범위의 풍화암을 리핑암, 그리고 그 이상의 연암을 발파암으로 평가하였다. 터널 지역에서는 전통적인 해석기법을 적용하였으며 터널 계획고와 탄성과 속도 1,200m/s~1,900m/s에 해당되는 연암층과 접하는 구간에서는 지질조사 및 비저항 탐사결과로부터 해석된 3개의 지질 구조선과 만나고 있으므로 터널 설계/시공시 이의 결과반영이 요구된다.

〈참고문헌〉

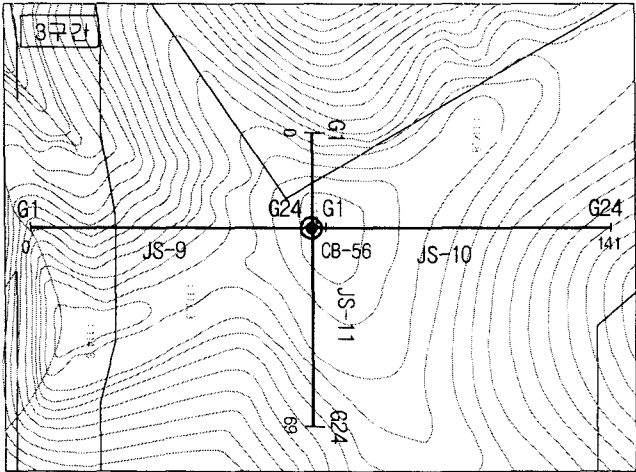
- 이두성, 1995, 유한차분법에 기초한 파선경로계산 알고리즘, 한국자원공학회, 31, 150-155
조창수,지준,이두성,1998, Fresnel 영역을 고려한 비선형 주시 토모그래피, 물리탐사, 1, 43-48
한국지반공학회, 1997, 구조물기초 설계기준, P.507
佐々宏一,芦田 讓,菅野 强, 1993, 建設・防災技術者を 위한 物理探査, P.219
物理探査技術協會, 1977, 土木物理探査法, 日本物理探査學會
Bell, F.G., 1992, Engineering in rock masses, P.580
Redpath, B.B., 1973, Seismic refraction exploration for engineering site investigation, Nat. Tech. Inform. Serv.
Qin, F., Olsen, K.B., Cai, W. and Shuster, G.T., 1989, Finite-difference solution of the eikonal equation along expanding wavefronts, Geophysics, 57, 478-487



(A) 제1구간 측선 JS-1에서 JS-5



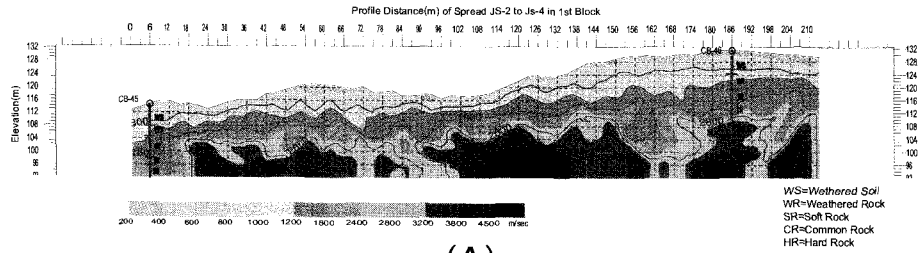
(B) 제2구간 측선 JS-6에서 JS-8



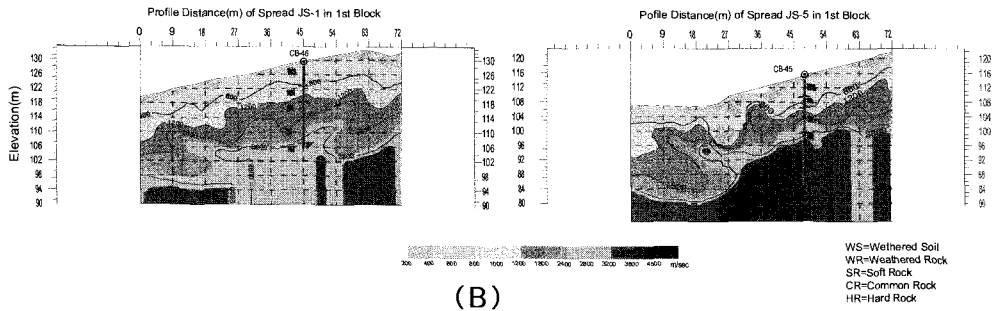
(C) 제3구간 측선 JS-9에서 JS-11

<그림 9> 택지조성 지역 절토 사면부의 측선도

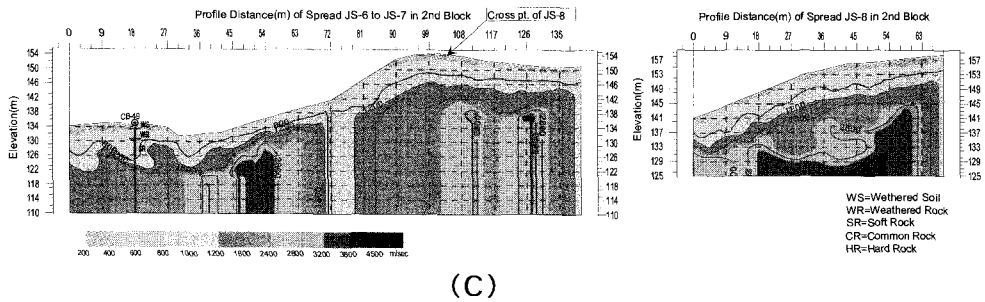
Seismic Refraction Tomography



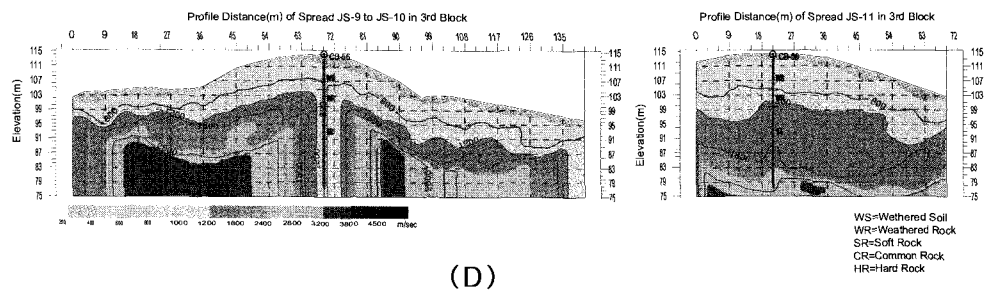
(A)



(B)



(C)

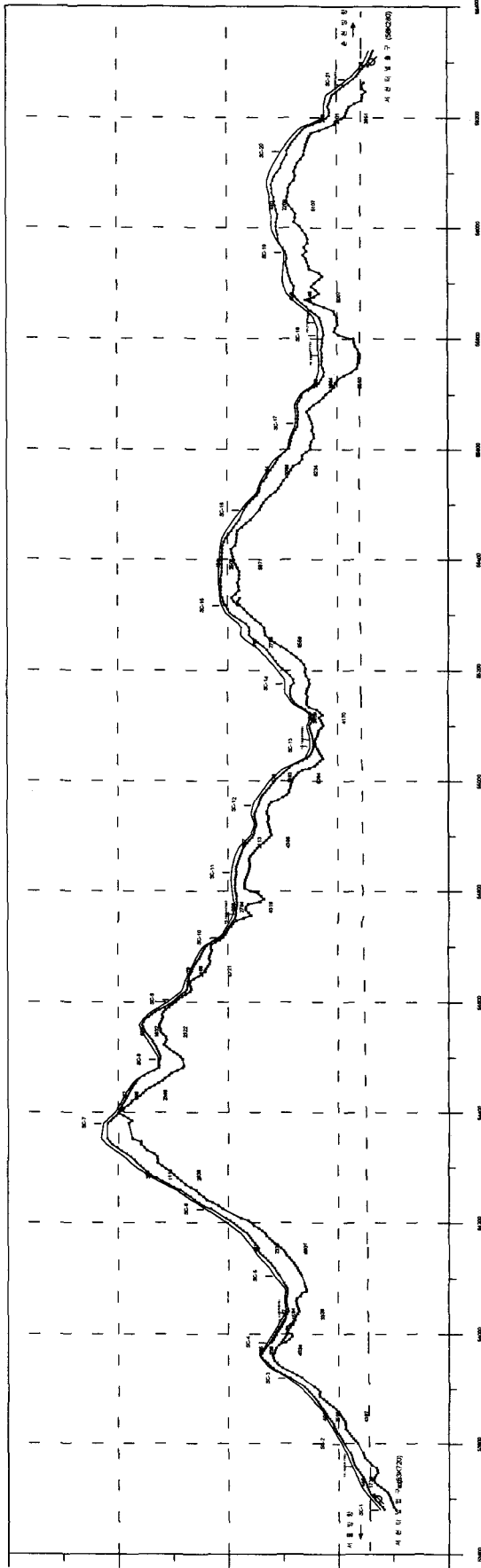


(D)

<그림 10> 택지조성 지역 절토사면부 굴절법 탐사 토모그램

- (A) 제1구간 측선 JS-2에서 JS-4
- (B) 제1구간 측선 JS-1과 JS-5
- (C) 제2구간 측선 JS-6에서 JS-8
- (D) 제1구간 측선 JS-9에서 JS-11

담양마을권범람사해석단면도(경술선 68구 서원터널)



<그림 77> 경술선 서원터널 범람사해석 단면도 (기점거리 : 53X680-56X321)(속진명 : SC1-SC21)

<그림 11> 터널지역 품질범람사해석단면도