

경부선 직하부를 나란히 통과하는 도심지 터널에 있어서 지표물리탐사 및 암반등급 평가 사례 연구

The geophysical survey and rock classification suitable for the design of a tunnel in urban area passing underneath the Gyeongbu Line(Railroad)

이 건* 김은덕* 사상호* 차영호** 김태영*** 정두석*** 황낙연***
Lee, Kun Kim, Eun-Duk Sha, Sang-Ho Cha, Young-Ho Kim, Tae-Young Jung, Doo-Suk Hwang, Nak-Yeon

ABSTRACT

Urban conditions such as underground facilities and ambient noises due to cultural activity restrict the application of conventional geophysical techniques in general. We used the linear array microtremor technique which uses these noises as strong energy source. The result parameter of the survey is shear wave velocity profile which had been applied as an fundamental information for the determination of the rock support type in tunnel design. This study was the first case in Korea which utilized a surface geophysical technique yielding successful result in urban area especially under the existing rail ways. The quantitative relation between the shear wave velocity from this method and the rock mass rating(RMR) determined from the inspection of the cores recovered from the same boreholes showed high statistical relationship. These correlations were then used to relate the shear-wave velocity to RMR along the entire profile.

1. 서론

터널지보패턴 설계를 위한 암반등급 산정시 시추조사와 병행하여 미시추구간의 지층상태 확인을 위해 지표물리탐사가 활용되고 있다. 그러나 산악터널과 달리 도심지구간에서는 일반적인 지표물리탐사로는 장애요인(전도성 지장물, 차량진동, 주변인가의 지장물)으로 인해 신뢰성있는 결과를 얻기가 곤란하였다.

본 연구는 이러한 문제점을 극복하기위해 지표물리탐사의 장애요인으로 작용하는 차량, 열차진동의 인공진동을 탐사의 음원으로 역 이용하는 상진동 탄성과 탐사를 채택하여 암반등급 산정에 활용하였다. 상진동 탄성과 탐사에서 나오는 결과는 기존 탄성과 탐사와는 달리 S파 속도단면을 제공하는데 우리나라에서는 S파를 이용한 암반분류 및 지층구분 사례가 미흡하여 현장시험, 실내시험, 인근현장 시공자료(암반분류, 암판정)와 비교·분석하여 S파의 적정성을 검증하였다.

* (주)Etech 토목설계부 부장, 정회원 * (주)Etech 토목설계부 대리 * (주)Etech 토목설계부 상무이사

** (주)지하정보기술 차장, 정회원

*** (주)대우건설 토목기술1팀 차장 *** (주)대우건설 토목기술1팀 부장 *** (주)대우건설 상무이사

2. 도심지구간에 적합한 물리탐사 선정

본 연구 대상지역(부산)에 지표물리탐사를 실시하였을 때 해석 결과에 영향을 미치는 원인을 탐사 종류별로 비교·분석하여 운행중인 열차의 진동을 역 이용하는 상시진동 탄성과 탐사를 채택하였다.

2.1 지표 탐사 실시시 해석 결과에 영향을 미치는 원인 분석

본 연구지역(부산)은 기존 철도노선 지하부를 통과하는 도심지 터널구간으로서 여러 가지 장애요인(전철고압선, 철로 주변인가의 지장물 및 노면상태, 열차의 진동, 철로주변 노면상태)이 존재한다. 장애요인중 전철고압선의 전류는 전기비저항탐사의 송신전류와 주파수의 파형이 달라 구분이 가능하지만 심부 전위 측정시 강력한 잡음으로 작용, 신뢰도를 저하시키며 탄성과 탐사의 경우 전철공급용 전선과 탄성파 케이블 사이에 전자기적 커플링이 발생하여 미약한 잡음으로 작용하고 이러한 잡음도 장거리 굴절신호와 후기 반사신호보다 클 가능성이 존재하여 신뢰성이 저하된다. 또한 철로 주변인가의 지장물은 전기비저항 측선과 근접하여 나란히 매설되어 있을 경우 이들이 전류통과 매체로 작용하여 탐사해석시 오류를 발생시킬수 있으며 노면상태(자갈, 콘크리트)는 표면파 탐사 및 상시진동 탄성과 탐사를 제외한 거의 모든 탐사 수행시 전극이나 지오폰 설치에 어려움이 발생, 지표 굴절법탐사 수행시 콘크리트층을 따라 진행하는 에너지가 초기파로 수신되어 지층해석시 오류로 작용한다. 그리고 열차의 진동은 매우 큰 에너지를 지니고 있기 때문에 거의 모든 탄성파탐사 수행시 장애요인으로 작용하지만 상시진동 탄성과 탐사의 경우에는 측선과 동일한 방향으로 진행하는 열차의 진동에너지를 강력한 신호원으로 역 이용할 수 있다. 도심지구간에서 적합한 물리탐사를 선정하기 위해 현장 조건을 고려하여 탐사 종류별로 비교·분석 하였다.(도표 1.)

도표 1. 탐사 종류별 비교·분석

| 탐사종류 현장여건 | 상시진동 탄성파탐사 | 일반탄성파탐사 | | | | 전기비저항탐사 |
|----------------------------|---------------|--------------------------|---------------|--------------------|-----------------|-----------------------------|
| | | 반사법 탄성파 탐사 | 굴절법 탄성파 탐사 | 심부수신굴절법 (공대지탐사) | 표면파탐사 (MASW) | |
| 전철고압선 | 영향 없음 | 영향 없음 | 영향 없음 | 영향 없음 | 영향 없음 | 영향받음 (천부탐사만가능) |
| 철로주변인가의 지장물 | 영향 없음 | 영향 없음 | 영향 없음 | 영향 없음 | 영향 없음 | 영향심각 (해석 불가) |
| 열차의 진동 | 영향 없음 | 영향 심각 | 영향 심각 | 영향 심각 | 영향 심각 | 영향 없음 |
| 철로주변 노면상태 (자갈, 콘크리트) | 영향 없음 | 부분적 영향 | 영향 심각 | 영향 없음 | 영향 없음 | 부분적 영향 |
| 유효탐사심도 | 50m 이상 | 50m 내외 | 20m 이내 | 시추깊이 | 30m 이내 | 전극간격의 1~2배 |
| 탐사수평범위 | 탐사측선 | 탐사측선 | 탐사측선 | 시추공좌우20m | 탐사측선 | 탐사측선 |
| 탐사결과 | 탄성파속도 (S파) | 탄성파속도 불연속면 (지층경계면) | 탄성파속도 (P파) | 탄성파속도 (P파) | 탄성파속도 (S파) | 전기비저항단면 (암반분류, 취약대파악) |

2.2 전기비저항, 굴절법 탐사의 부적합성 검증

본 연구에서는 산악터널구간에 일반적으로 사용하는 전기비저항탐사와 굴절법 탄성파 탐사를 실시하여 시추자료와 비교·분석 하였다.

전기비저항 탐사의 경우 시추자료와 비교·분석하여 불매 해석단면이 불일치하는 것으로 나타나는데 그 이유

는 현장에서 공급되는 전류가 터널 통과구간(침부) 측정시 감소으로 작용한 것으로 판단된다. 상부층의 지층은 비교적 일치하는 것을 보이지만 하부도 내려갈수록 측정값은 신뢰성이 매우 떨어지므로 전기비저항 탐사를 통한 지시추 구간의 지층상태 및 파쇄대 확인은 불가능한 것으로 나타났다(그림1).

굴절법 탄성과 탐사의 경우는 시추자료와 비교한 결과 탄성과 속도가 도층과 중회암 경계 2.900m/s 내외의 속도로 구분 가능하지만 그 이하의 지층은 구분이 불가능 하였다. 현장비저항자료에서 초동파쇄가 가능한 부분은 송신점에서 좌/우 약 20~30m 정도로 나타나며 이러한 자료를 이용하여 토모그래피 역산은 수행한 경우 그림 2.에서와 같이 하부 10~20m 정도의 침도모양 결과가 되므로 터널침도(G.L(-)50m 내외)지역에는 부적합한 것으로 판단된다(그림2).



그림1. 전기비저항 탐사 결과

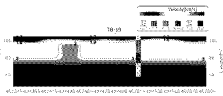


그림2. 굴절법 탄성과 탐사 결과

3. 현장 시험결과를 통한 상시진동탄성과 탐사의 적정성 검증

3.1 시추공 탐사 및 실내시험 결과를 이용한 S파의 상관성 확인

탄성과 속도는 암석의 종류, 구성성분 및 모질도, 밀도, 공극율, 이방성, 불활, 함수율, 온도, 풍화정도, 절리군 수 등 많은 인자에 따라 변한다(Tatham과 McCormack, 1991). 따라서 탄성과 속도는 많은 인자에 영향을 받기 때문에 Sjogren 외(1979)가 탄성과 P파 속도와 RQD, 난외절이 당 절리의 수와의 관련성을 유도할 때에도 변질이나 풍화대에 대한 자료를 제외하였다. 위에서 언급한 탄성과 속도에 영향을 주는 인자는 현지 지반의 특성을 반영하는 것으로 생각할 수 있으며 앞에서 언급된 RMR분류법의 요소들도 탄성과 속도에 영향을 주는 요소들과 많은 유사성을 갖는다.

시추공내에서 탄성과 속도를 측정하는 S-PS결층은 10~20cm 정도의 조밀한 간격으로 속도측정이 가능하고 시추교야를 이용한 선내시험결과나 시추공내에서 실시하는 각종 시험과의 대비가 용이하여 무엇보다도 모든 측정값이 현지 지반의 특성을 가장 잘 반영하는 원위치 측정값이라는 장점이 있다.

그림3,4는 5개의 시추공에서 측정된 탄성과 속도와 RMR값과의 관계를 나타낸 것으로, 이들 측정지역의 암종은 안산암정동회암, 화강암, 규장암을 모두 포함하여 P파와 RMR, S파와 RMR값과의 상관관계를 나타낸다.

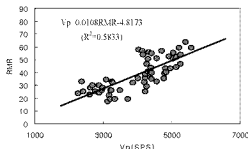


그림3. P파 속도와 RMR과의 상관관계

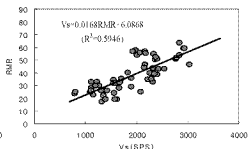


그림4. S파 속도와 RMR과의 상관관계

시추시료를 탄성파가 통과하는 데 소요된 시간을 측정하고 탄성파(P파, S파)의 전파속도를 구하여 일축압축강도와의 상관관계를 구하였다. 그림5,6은 P파와 일축압축강도, S파와 일축압축강도값과의 상관관계를 나타낸다.

3.5 인근현장(부산 지하철3-8공구)의 시공자료와 상시진동 탄성파 탐사 결과 비교

상시진동 탄성파 탐사의 현장 적용성 검증은 위해 부산 지하철 3-8공구 현장에서 탐사를 실시하였다. 상시진동 탄성파 탐사에서 나온 지층별 S파속도를 측정하여 표준 포아송비를 이용, P파로 변환한 단면을 작성하고 이를 부산 지하철 3-8공구의 시공자료(암반분류, 암관성)와 비교·검토하여 일반적인 P파에 따른 암반분류 기준과 부합하는지를 판단하고 상시진동 탄성파 탐사를 통한 암반분류 가능성 및 적정성을 확인하였다.

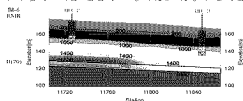


그림9. 1구간 S파 속도단면

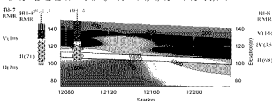


그림10. 2구간 S파 속도단면

1구간의 경우 봉화토와 봉화암층이 지형과 비슷한 지층형태를 나타내고 있지만, 종횡방향으로 간수복 약간의 깊이차는 경향(15~25m)을 보인다. 2구간은 1구간과 비교하여 봉화토와 봉화암층이 20~30m의 깊이로 좀더 깊게 나타나며, 하부 경암층의 S파 속도도 종횡방향으로 간수복 점점 낮아지는 경향을 보인다. 상부층의 RMR값은 IV~V등급의 범위를 보이며 기반암층의 RMR값은 II등급의 범위를 보이는데 이것은 S파 속도단면과 비슷한 경향을 보인다. 실제 공사를 통하여 확인된 암종과 암질의 상태도 S파속도 단면과 잘 일치하는 것으로 나타났다. 상시진동 탄성파 탐사에서 나온 지층별 S파속도를 P파속도 단면으로 작성하기 위해 S-PS결측 결과물 이용하였다. S-PS결측에서 포아송비와 S파속도 관계 유추를 통하여 P파속도를 추정할 관계는 그림11,12와 식(1)과 같다.

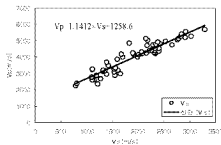


그림11. Vp-Vs 상관관계

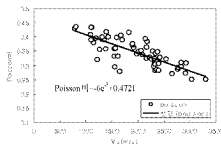


그림12. Poisson비 Vs 상관관계

$$V_P = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1+2\nu}} V_S^2 \quad \text{----(1)}$$

실제 및 시공시 확인된 암반분류 값과 상시진동 탄성파 탐사의 S파속도를 P파속도로 변환(그림13,14)한 후, P파속도와 RMR값을 비교한 결과는 II등급을 나타내며, 변환된 P파속도는 2,900m/s이상의 경향으로 나타났다.

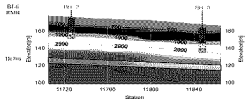


그림13. 1구간 S파속도를 P파로 변환

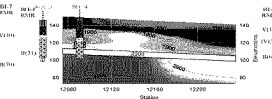


그림14. 2구간 S파속도를 P파로 변환

이것은 시공시 확인된 암반분류와 지표에서 수행한 상시진동 탄성과 탐사의 S파속도를 이용하여 변환된 P파속도가 잘 일치함을 보여준다. 상부 풍화토와 풍화암층의 경우 실제 확인된 경향(시점방향은 알고, 종점방향으로 갈수록 깊어짐)과 동일하게 나타난다. 따라서 상시진동 탄성과 탐사에서 획득한 S파속도를 이용한 지층구성과 현재 시공중인 부산 지하철3-8공구에서 확인된 풍화토, 풍화암층의 깊이, 터널 계획고의 암반분류가 일치함을 알 수 있었다.

4. 암반등급 산정

RMR에 의한 암반등급은 우선적으로 시추지점에 대하여 평가되며 미시추구간의 암반에 대한 등급평가는 별도의 간접적인 추정방법에 의하여 산정된다. 본 연구에서는 도심지구간이라는 특수한 지역에 위치하여 일반적으로 사용되는 지표물리탐사(전기비저항 탐사, 굴절법 탄성과 탐사)와 신뢰성저하로 인해 미시추구간의 암반등급산정을 상시진동 탄성과 탐사에서 얻어진 S파속도와 RMR과의 상관관계식을 이용하여 암반등급을 평가하였다(그림16).

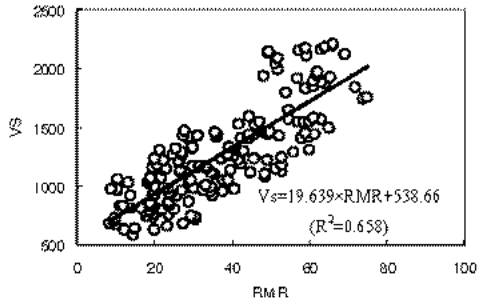


그림15. S파속도와 RMR과의 관계

도표 2. 암반등급 분류 기준

| 구 분 | 1 등급 | 2 등급 | 3 등급 | 4 등급 | 5 등급 |
|-------|---------|-----------|-----------|----------|--------|
| RMR | 100~81 | 80~61 | 60~41 | 40~21 | 20 이하 |
| S파 속도 | 2110 이상 | 1720~2110 | 1320~1720 | 930~1320 | 930 이하 |

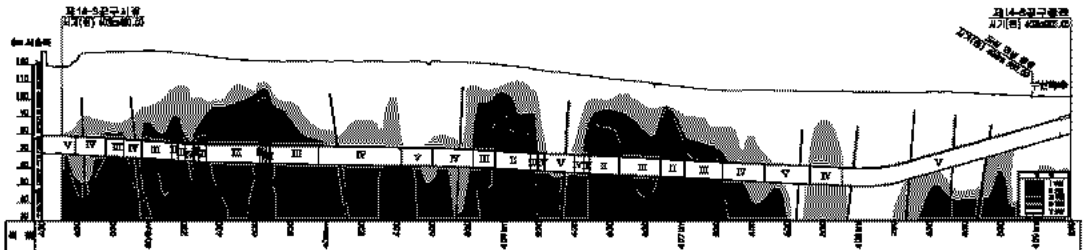


그림16. 터널 전 구간 암반등급 작성

5. 결론

암반등급 산정시 RMR값을 이용하여 미시추구간의 암반등급을 분류할 때 지표물리탐사는 중요한 부분을 차지하고 있다. 본 연구에서는 도심지구간에서의 신뢰성있는 암반등급을 산정하기 위해 국내에서는 처음 실시되는 상시진동 탄성과 탐사를 이용하였다. 상시진동 탄성과 탐사는 S파속도 단면을 제공하는데 국내에서는 S파를 이용한 암반분류 및 지층구분 사례가 미흡하여 현장시험, 실내시험, 인근현장시공자료를 분석하고 P파와 S파를 비교하였다. 그 결과 S파속도는 P파속도보다 심도면에서 신뢰성있는 결과를 보여주며 현재 시공중인 인근현장(부산 지하철3-8공구)에서 상시진동 탄성과 탐사를 실시한 결과 S파속도 단면을 이용하여 변환된 P파속도 단면이 시공자료와 일치하는 것을 볼 수 있었다. 따라서 상시진동 탄성과 탐사 결과에서 획득한 S파속도와 RMR과의 상관관계를 이용하여, 암반등급 분류기준을 작성하고 도심지터널 전 구간에 대한 신뢰성있는 암반등급을 산정할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 선우춘, 황세호 (2001) "압반분류방법간의 상관관계에 대한 고찰", 한국지반공학회논문집, 제17권 4호, PP.127~134.
2. 대우건설(주) "부산 지하철 3-8공구 지반조사 보고서"
3. Aki, L., 1957, Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors : Bulletin of the Earthquake Research Institute, 35, 415-456.
4. Bieniawski, Z. T., 1976, Rock mass classification in rock engineering applications : Proc. Symp. on Exploration for rock eng., Balkema, Rotterdam, vol. 12, pp 97-106.
5. Louie John N., 2001, Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays: Bull. Seismol. Soc. Amer., vol. 91, no. 2, 347-364.
6. Louie, John N., Robert E. Abbott, and Satish Pullammanappallil, 2002, Refraction microtremor and optimization methods as alternatives to boreholes for site strength and earthquake hazard assessments: Proceedings of 15th Annual Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems (SAGEEP '02), February 11-13, Las Vegas, Nevada.
7. Park, C. B., Miller, R. D. and Xia, J., 1999, Multi-channel analysis of surface waves: Geophysics, 64, 800-808.
8. Pullammanappallil, S., Honjas, B. and Louie J., 2003, Determination of 1-D shear wave velocities using the refraction microtremor method: Proceedings of the third international conference on the application of geophysical methodologies and NDT to transportation and infrastructure.
9. Rucker, M. L., 2003, Applying the refraction microtremor (ReMi) shear wave technique to geotechnical characterization: Proceedings of the third international conference on the application of geophysical methodologies and NDT to transportation and infrastructure.
10. Saito, M., 1979, Computations of reflectivity and surface wave dispersion curves for layered media; I, Sound wave and SH wave: Butsuri-Tanku, 32, 5-26.
11. Saito, M., 1988, Compound matrix method for the calculation of spheroidal oscillation of the Earth: Seismo. Res. Lett., 59, 29.
12. Thorson, J. R., and Claerbout, J. F., 1985, Velocity-stack and slant-stack stochastic inversion: Geophysics, 50, 2727-2741.