

도심지 터널 암반분류를 위한 선형배열 상시진동 탄성파탐사 적용

차영호¹⁾, 강종석¹⁾, 조철현¹⁾, 이건²⁾

¹⁾지하정보기술(주), yhcha@geeha.co.kr

²⁾(주)이제이텍

Application of linear array microtremor survey for rock mass classification in urban tunnel design

Young Ho Cha¹⁾, Jong Suk Kang¹⁾, Churl Hyun Jo¹⁾, Kun Lee²⁾

¹⁾Subsurface Information Technologies, Inc.

²⁾EJTech

요약 : 일반적인 물리탐사기법은 도심지내에서 구조물, 전도성 지장물, 차량 등 인공 잡음으로 인하여 그 적용성에 많은 제약을 받는다. 전철이 운행하는 철로 하부에 대한 탐사 역시 전선 및 열차진동이 일반 물리탐사 적용을 제한한다. 본 과업에서는 그 대안으로 선형배열 상시진동탄성파탐사를 적용하였다. 상시진동탐사(microtremor survey)기법에는 철로를 운행하는 기차와 주변 도로위의 차량에 의한 진동이 오히려 양호한 송신원으로 활용 될 수 있다. 선형배열 상시진동탐사기법에서는 일반적인 굴절법 장비를 이용하여 일상적인 진동을 기록하고, 파동장의 변환을 수행하여 표면파의 분산곡선을 얻는다. 이후 발채한 분산곡선에 대한 반복적인 수치모델링을 통하여 전단파속도를 구한다. 본 과업에서는 기존 철로를 따라 하부의 터널심도까지의 전단파속도를 전체 터널구간에 대하여 얻기 위하여 40m간격으로 선형배열을 이동하면서 자료를 획득하였다. 측선상의 시추공에서 수행한 SPS검층을 통하여 획득한 전단파속도와 RMR의 비교한 결과 전단파속도와 RMR이 높은 상관관계에 있음을 확인할 수 있었으며, 상시진동탐사기법을 통하여 획득한 전단파속도 역시 RMR과의 양호한 상관관계를 나타냄을 알 수 있었다. 이러한 상관관계를 이용하여 도심지 철도터널 전체 구간에서 암반분류를 위한 RMR 추정이 가능하였다.

주요어 : 선형배열상시진동탄성파탐사, 전단파속도, RMR, 표면파, 철도터널

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 refraction microtremor (REMI) technique as an alternative way to get the geotechnical information, in particular shear-wave (S-wave) velocity information, at a site along an existing rail road. The REMI method uses ambient noises recorded using standard refraction equipment to derived shear-wave velocity information at a site. It does a wavefield transformation on the recorded wavefield to produce Rayleigh wave dispersion curve, which are then picked and modeled to get the shear-wave velocity structure. At this site the

vibrations from the running trains provided strong noise sources that allowed REMI to be very effective.

REMI was performed along the planned new underground rail tunnel. In addition, Suspension PS logging (SPS) were carried out at selected boreholes along the profile in order to draw out the quantitative relation between the shear wave velocity from the PS logging and the rock mass rating (RMR) determined from the inspection of the cores recovered from the same boreholes. These correlations were then used to relate the shear-wave velocity derived from REMI to RMR along the entire profile. The correlation between shear wave velocity and RMR was very good and so it was possible to estimate the RMR of the total zone of interest for the design of underground tunnel.

Keywords : refraction microtremor (REMI), shear wave velocity, rock mass rating (RMR), surface wave, rail road tunnel.

1. 서론

터널설계시 지보패턴을 선정하기 위해 시추조사와 더불어 물리탐사자료해석에 기반을 둔 암반분류가 일반화되고 있다. 그러나 도심지에서는 여러 지하시설물 및 잡음으로 인해 일반적인 물리탐사의 수행이 제한적이다. Fig. 1(a) 과 (b)의 도심지를 통과하는 노선도와 현장 사진과 같이 기존철로를 통행하는 열차의 진동과 협소한 공간, 철로에 밀집되어 있는 가옥과 지장물은 통상적인 전기비저항탐사나 탄성파굴절법탐사의 적용에 어려운 조건을 형성한다.

모든 진동을 신호로 받아들이는 선형배열 상시진동탄성파탐사 (refraction microtremor; REMI technique, Louie, 2001) 는 철로를 따라 운행하는 열차의 진동을 음원으로 사용할 수 있어 본 현장 여건에 매우 적합한 기법일 가능성에 주목하였다. 또한 대상 탐사지역은 새로 건설될 노선과 평행하게 진행되는 구철도 노선이 위치하며 주변에서는 노선과 나란하거나 수직된 도로의 교통량이 많아 풍부한 상시진동원이 존재하여 탐사기법 적용에 적합하였다. 상시진동탄성파탐사는 미진동 탄성파탐사 (microseismic surveys Aki, 1957, Okada, 2003) 의 일종으로서 일상생활에서 발생하는 진동자체를 에너지원으로 사용하는 탐사기법으로서 대상지역에서 운행하는 열차진동은 일반 탄성파탐사에서는 잡음으로 작용하여 탐사를 곤란하게 만들 수 있지만, 본 기법을 사용하면 오히려 매우 효율적인 음원으로 기능할 수 있다.

본 논문은 도심지 터널 중에서도 기존의 철도 하부에 터널로 신설되는 신규철도의 설계시 암반분류를 위해 적용된 상시진동기법에 대하여 서술하고자 한다.

2. 대상지역

신설 경부고속철도 노선은 부산시내에서는 기존 경부선 철로 하부에 설정되었다. Fig. 1(a)에 이러한 노선도를 나타내었다. Fig. 2에는 기존 지질도, 인공위성자료분석, 시추결과를 정리하여 지질중단면도를 작성하였다. 지표상부에는 퇴적층이 약 10~20m 의 두께로 기반암 위에 쌓여있고, 기반암은 주로 화강암과 화산암(웅회암, 안산암 류)으로 이루어져 있어, 화강암과 안산암 모암에 화산암 관입이 수반된 지질조건임을 보여준다. 노선과 그 주변에는 수 개의 단층파쇄대가 존재하기도 한다.

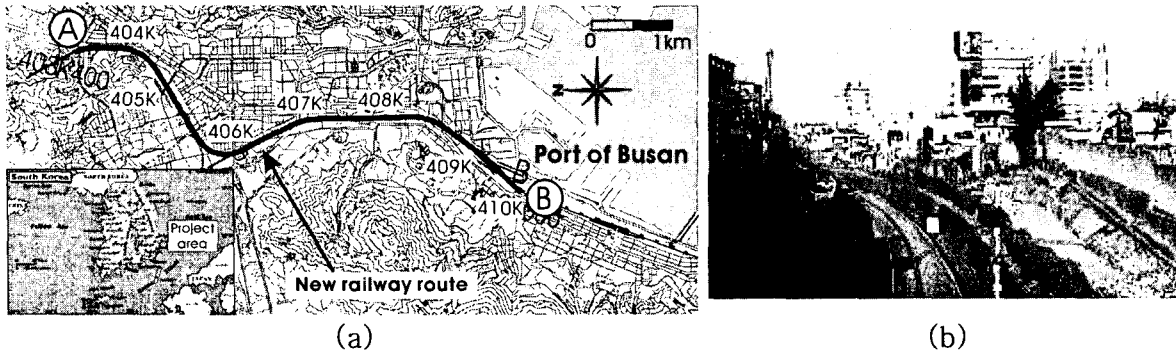


Fig. 1. (a) The location map of the new railroad (b) a photographic view of the site.

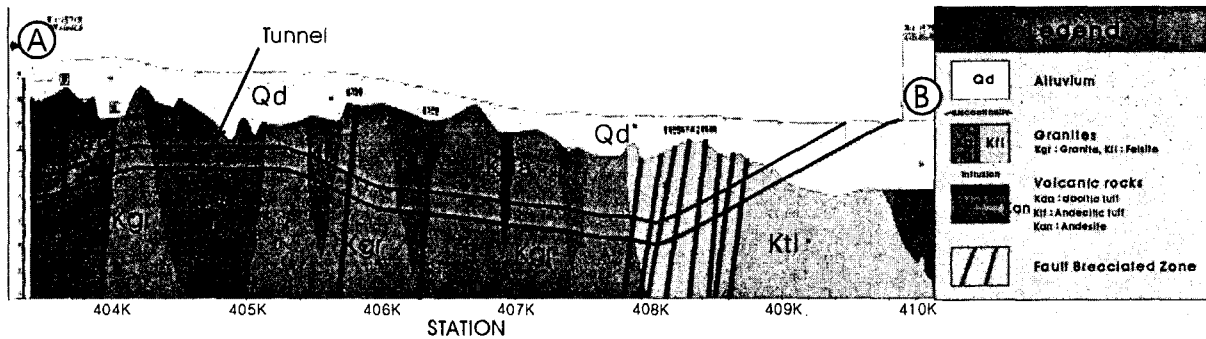


Fig. 2. A sectional view (A-B in Fig. 1(a)) of geological map along the planed railway.

3. 이론 및 자료취득/처리

상시진동탐사는 파도, 지진과 같은 자연 진동과 차량, 공사진동 등의 인위적 진동을 수동적으로 측정 분석하는 표면파분석법의 일종으로 Aki(1957)에 의해 이론적인 기반이 마련되고 Louie(2001), Okada(2003) 등에 의해 현장에 적용된 물리탐사법이다. Okada(2003)에 의해 제안된 탐사배열은 2차원적인 평면을 구성하고 있으므로 본 현장 처럼 공간적으로 협소한 조건(Fig 1(b) 참조)에서는 채택하기가 곤란하다. 따라서 Louie(2001)이 제안하는 선형 배열을 이용하는 상시진동탐사를 수행하였다. 선형배열 상시진동탐사법은 굴절법탐사에서 사용되는 선형배열과 일반 탄성파탐사장비를 사용하여 심도 약 100m 까지 횡파속도를 파악할 수 있는 기법으로서 Rucker 등(2003), Pullammanappallil 등(2003), Louie(2002)에 의하여 검증되었다. 상시진동탐사자료의 역산과정에서 레일리파의 분산곡선은 파동장변환에 의해 추출되어 흔히 사용되고 있는 다채널표면파탐사(MASW, Park et al., 1999)와 유사한 과정에 의해 지하의 횡파단면을 구할 수 있게 된다.

선형배열 상시진동탄성파탐사자료처리는 다음과 같은 세단계로 이루어진다.(Fig. 3)

- 1 단계 : 수직입자속도의 파선변수-시간절편변환(p-tau transformation, slant stack operation Thorson and Cellaerhout, 1985)과 푸리에 변환에 의한 파선변수-시간절편영역에서 파선변수-주파수영역으로의 변환 작업(Fig 3(b))
- 2 단계 : 속도스펙트럼 분석(레일리파의 위상-속도 분산곡선의 결정). 겹보기 위상속도의 하한을 참값의 위상속도로 간주함(Fig 3(b); Louie, 2001).

3단계 : 횡파속도 모델링. 선형배열 상시진동탄성파탐사는 Saito (1979, 1988) 에 의해 개발된 모델링 알고리즘을 채택하여 파선변수-주파수영역에서 선택된 분산자료와 부합되는 모델을 파악한다. 모델링은 여러 주파수에서 수행되어 해당되는 심도의 속도모델을 파악한다.(Fig 3(c), (d))

본 연구에서는 12개의 지오폰을 사용하여 110m 길이의 선형배열을 구성하여 약 70m 심도의 계획 터널부근의 전단파속도를 얻고자 하였다. 지오폰 주파수 특성은 4.5Hz의 고유진동수를 가지고 있어 가탐심도를 증대하도록 하였다. 사용된 탄성파기록계는 24 bit의 분해능을 지니고 있어 파형정보의 신뢰도를 높이고자 하였다. 기록시간은 15초 기록(Fig 3(a))을 10에서 20 회 정도 장시간 기록함으로써 배열방향으로 진행되는 상시진동파를 가능한 한 많이 기록할 수 있도록 하였다. 배열은 40m 씩 이동하였으며 배열의 중심을 역산된 횡파속도 곡선을 취합하여 2차원 적인 횡파속도 단면을 구성하였다. 본 현장에서는 움직이는 열차와 버스는 도플러 효과를 일으킨다. 그러나 열차 운행속도가 약 80km/hr (약 20m/s) 정도 일 때, 암반의 횡파속도 800m/s에 비해서는 그 효과가 2.5% 정도의 속도오차를 발생시킬 수 있다.

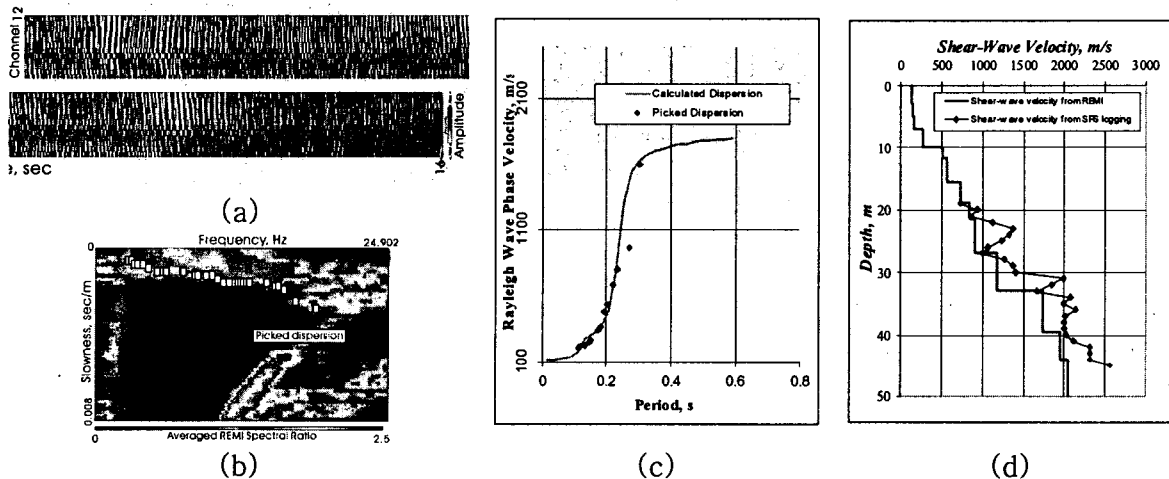


Fig. 3. Refraction microtremor data and data analysis of linear array microtremor method. (a) microtremor field recorded data (b) p-f amplitude spectrum with dispersion picks (c) dispersion curve showing picks and fits (d) Shear-wave velocity profile.

4. 결과 분석

RMR은 암반분류 기법의 하나로서 0 부터 100까지 값을 지니며 암반강도, RQD, 절리간격, 절리상태, 지하수 상태 등 같은 5가지의 기준인자로 구성되어 있다(Bieniawski, 1976). 이는 터널 지보패턴 선정에 기본 자료로 활용되고 있으므로 본 탐사의 결과물인 횡파속도와 RMR이 통계적으로 어떠한 상관관계를 보이고 있는지에 대한 분석을 진행한다. 이를 위해 실험실 암편에서 구한 횡파속도와 암반 일축강도와의 관계, 부유식 음파검층(S-PS logging)으로부터 계산된 횡파속도와 동일한 시추공에서 산정된 RMR과의 관계, 그리고 선형배열 상시진동탄성파탐사에서 얻어진 횡파속도와 RMR과의 관계를 각각 살펴보았다. 이들은 코어처럼 미소 범위에서부터 시추공처럼 중간 범위를 거쳐 노선

전 구간을 다루는 넓은 범위까지 횡파속도정보가 암반분류와 어느 정도 상관관계를 나타내는지 그리고 그 변화는 어느 정도인지를 평가하는데 도움을 줄 수 있다.

1) 일축압축강도와 횡파속도의 관계 - 실험실 시험, 코어범위

실험실에서는 코어 일부 미소 부분에 대한 검사가 이루어지므로 RMR값의 대표성문제가 있으므로 RMR 값 대신 특정 암편의 일축압축강도와 그 횡파속도와의 관계만을 살펴보았다. Fig. 4 에 이 결과를 나타내었으며 종파와 횡파 모두가 암반강도와 양호한 상관관계를 보임을 알 수 있다.

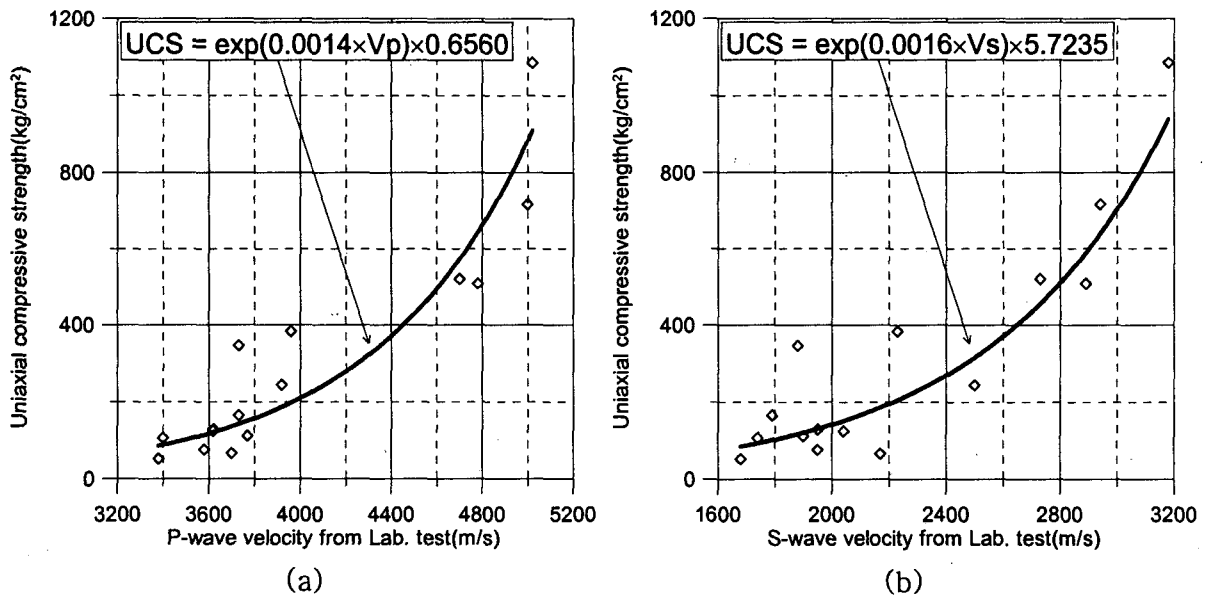


Fig. 4. Relationship between the seismic velocity and uniaxial compressive strength by using the result of the laboratory test. (a) P-wave velocity (b) S-wave velocity

2) RMR 과 부유식PS검층에서 구한 횡파속도의관계 - 시추공 시험, 단일 시추공 범위

5개 시추공에서 부유식 PS검층을 수행하였다. 이들 결과와 RMR과의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 이 역시 양호한 상관관계를 보임을 알 수 있다. 암편의 탄성파속도와 일축압축강도가 비선형관계를 보이는데 반해 선형에 가까운 특성을 보이고 있음을 알 수 있다.

3) RMR 과 선형배열상시진동탄성파탐사에서 구한 횡파속도와의 관계 - 현장시험, 광대역

측선장 110m의 선형배열탄성파탐사를 40m 씩 이동함으로써 전 구간에 대하여 횡파단면을 구하였다. Fig. 6은 선형배열상시진동탄성파탐사 결과로부터 구한 횡파속도와 탐사 구간 내에서 수행한 시추코어분석에 의한 RMR 값과의 관계이다. 부유형 PS 검층logging (Fig. 5(b)) 과 유사한 선형관계를 나타내지만 동일한 RMR에 대하여 다소 낮은 속도범위를 보인다. 이는 시추공 혹은 암편단위로, 즉 미세한 범위로 갈수록 신선한 부위를 통하여 도달하는 고주파 성분이 측정 가능하여 높은 속도를 보이지만, 현장크기로 갈수록 파동은 많은 불균질성 및 결함 부위를 통과하기 때문에 저주파 성분만이 측정될 수 있고 이들 저주파 성분의 파동은 결함부위와 신선함 부위의 평균값을 대변하기 때문에 상대적으로 낮은 속도를 보이기 때문으로 설명할 수 있다. 통계분석을 통하여 이들의 관계는 다음의 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$RMR = 0.0362 \times Vs - 10.0210 \quad (1)$$

Table 1에는 이러한 관계식에 기반을 두어 RMR 분류 기준이 되는 횡파속도를 나타내었다. Fig. 7에는 전 탐사구간에 대하여 해석된 횡파속도 단면을 제시하였다. 시추자료와 비교하여 볼 때 매우 높은 일치성을 보이고 있음을 알 수 있다. 상관관계분석과 Table 1에 제시된 기준속도에 의해 구한 RMR에 의해 제안된 암반분류를 Fig. 8에 나타내었다.

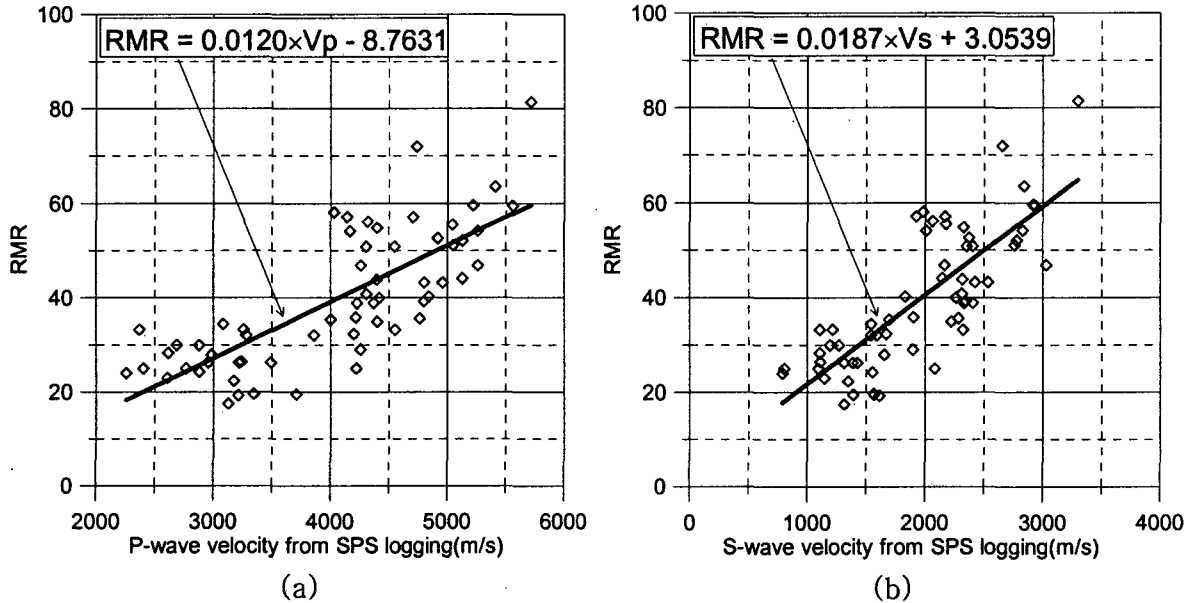


Fig. 5. Relationship between the seismic velocity from the result of SPS logging and RMR (a) P-wave velocity (b) S-wave velocity

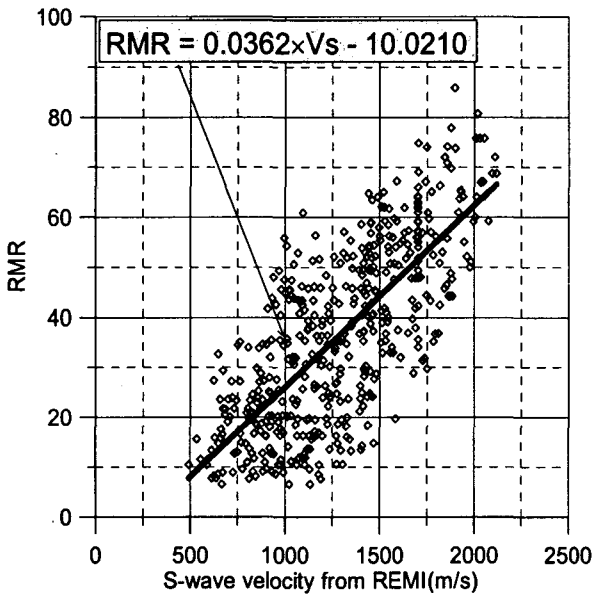


Fig. 6. The shear-wave velocity section from Refraction microtremor

Table 1. Criteria of RMR by shear-wave velocity from refraction microtremor

RMR	Shear wave velocity (m/s)
0 ~ 20	< 830
20~40	< 1380
40~60	< 1930
60~80	< 2490

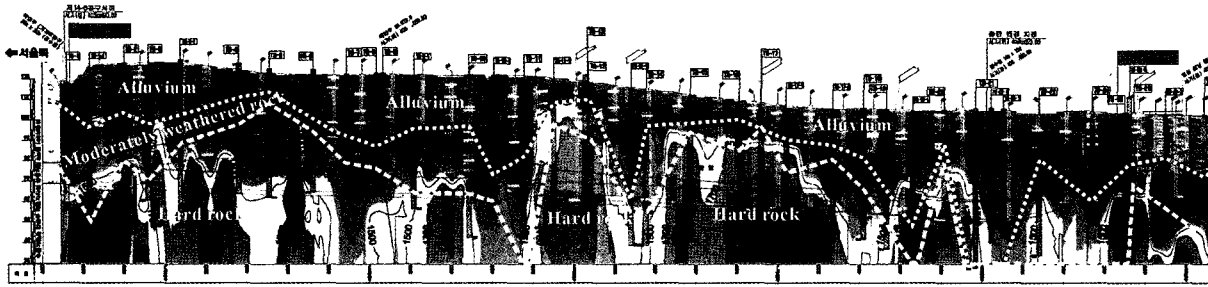


Fig. 7. Relationship between the shear-wave velocity from REMI and RMR determined from the inspection of the cores recovered.

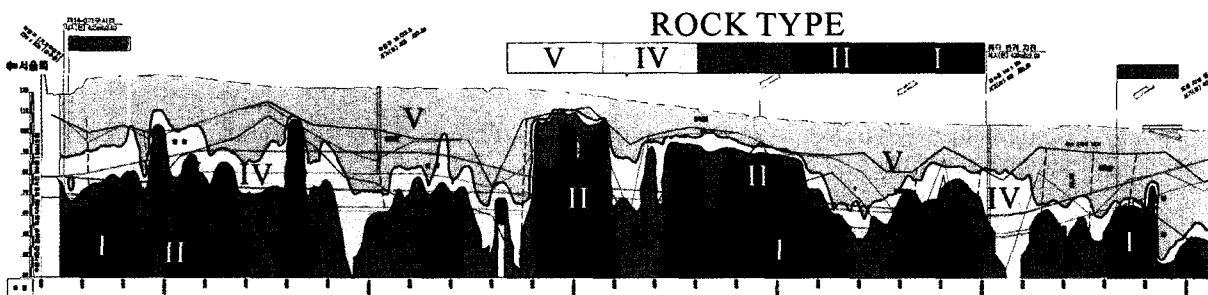


Fig. 8. The RMR section estimated from the relationship between RMR and the shear velocity of Refraction microtremor.

결론

도심지, 그것도 기존 철도가 운행되는 지역에서는 통상적인 지표탐사로는 정확한 결과를 기대하기가 곤란하다. 이를 극복하기 위해 선형배열상시진동탐사를 채택하여 그 유용성을 검토하여 보았다. 지보패턴 선정의 기본이 되는 RMR값을 구하기 위해 실험실, 시추공, 현장 스케일 범위에서 정량적인 횡파속도에 대한 고찰을 수행하였다. 실험실에서는 일축압축강도와 횡파속도, 단일시추공 범위에서는 RMR과 부유형PS검층에 의해 구해진 횡파속도, 그리고 현장스케일에서는 다수의 시추공에서 구한 RMR과 선형배열상시진동탄성파탐사결과에 의한 횡파속도를 분석하였다. 모든 규모에서 높은 상관관계를 얻을 수 있었다. 이로부터 암반 분류에는 탄성과 횡파속도가 더 신뢰도 높은 자료가 됨을 알 수 있었으며 또한 도심지의 매우 열악한 지표탐사환경에서 선형배열상시진동탄성파탐사가 신뢰도 높은 암반분류를 위한 결과 제출이 가능함을 알 수 있었다.

감사의 글

자료측정, 본 사업의 원활한 진행과 마무리에 도움을 주신 대우건설의 황낙연 전무님, 김태영 차장님과 현대건설의 서영호 부장님에게 감사를 드립니다.

참고문헌

- 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.
- Bieniawski, Z. T., 1976, Rock mass classification in rock engineering applications, *Proc. Symp. on Exploration for rock eng., Balkema, Rotterdam*, 12, 97-106.
- Louie John N., 2001, Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from

- refraction microtremor arrays, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 91, 347–364.
- 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*.
- Okada, H., 2003, The microtremor survey method, *Society of Exploration Geophysicists*.
- Park, C. B., Miller, R. D. and Xia, J., 1999, Multi-channel analysis of surface waves, *Geophysics*, 64, 800–808.
- 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*.
- 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*.
- Saito, M., 1979, Computations of reflectivity and surface wave dispersion curves for layered media; I, Sound wave and SH wave: Butsuri-Tanko, 32, 5–26.
- Saito, M., 1988, Compound matrix method for the calculation of spheroidal oscillation of the Earth: *Seismo. Res. Lett.*, 59, 29.
- Thorson, J. R., and Claerbout, J. F., 1985, Velocity-stack and slant-stack stochastic inversion, *Geophysics*, 50, 2727–2741.