

## 동적 콘 관입지수를 이용한 철도노반의 전단파속도 추정

### Shear Wave Velocity Estimation of Railway Roadbed Using Dynamic Cone Penetration Index

홍 원 택<sup>1</sup> Hong, Won-Taek  
최 찬 용<sup>3</sup> Choi, Chan Yong

변 용 훈<sup>2</sup> Byun, Yong-Hoon  
이 중 섭<sup>4</sup> Lee, Jong-Sub

#### Abstract

Elastic behavior of the railway roadbed which supports the repeating dynamic loads of the train is mainly affected by the shear modulus of the upper roadbed. Therefore, shear wave velocity estimation of the uniformly compacted roadbed can be used to estimate the elastic behavior of the railway roadbed. The objective of this study is to suggest the relationship between the dynamic cone penetration index (DCPI) and the shear wave velocity ( $V_s$ ) of the upper roadbed in order to estimate the shear wave velocity by using the dynamic cone penetration test (DCPT). To ensure the reliability of the relationship, the dynamic cone penetration test and the measurement of the shear wave velocity are conducted on the constructed upper roadbed. As a method for measurement of the shear wave velocity, cross hole is used and then the dynamic cone penetration test is performed at a center point between the source and the receiver of the cross hole. As a result of the correlation of the dynamic cone penetration index and the shear wave velocity at the same depths, the shear wave velocity is estimated as a form of involution of the dynamic cone penetration index with a determinant coefficient above 0.8. The result of this study can be used to estimate both the shear wave velocity and the strength of the railway roadbed using the dynamic cone penetrometer.

#### 요 지

연속 동하중을 지지하는 철도노반의 탄성거동은 대상 상부노반의 전단탄성계수에 주된 영향을 받으므로, 일정한 다짐도로 조성된 상부노반에서의 전단파속도 획득은 대상 지반의 탄성거동 예측에 활용될 수 있다. 본 연구에서는 상부노반에서 수행된 동적 콘 관입시험(DCPT) 결과로부터 전단파속도( $V_s$ )를 추정하기 위하여 동적 콘 관입지수(DCPI)와 전단파속도의 상호관계를 제시하고자 하였다. 상호관계의 신뢰도를 확보하기 위하여 동적 콘 관입시험 및 전단파속도 획득은 시공 완료된 철도 상부노반에서 수행되었다. 전단파속도 획득 방법으로서 cross hole 방법이 사용되었으며, 수신기와 발신기의 중간 위치에서 동적 콘 관입시험이 수행되었다. 동일한 심도에서의 동적 콘 관입지수 및 전단파속도 비교 결과, 전단파속도는 결정계수가 0.8 이상인 동적 콘 관입지수의 거듭제곱 형태로 나타났다. 본 연구결과는 동적 콘 관입기를 이용한 상부노반의 강도평가와 동시에 전단파속도 추정 방법으로써 유용하게 사용될 것이라 기대된다.

**Keywords :** Dynamic cone penetrometer, Railway roadbed, Shear modulus, Shear wave velocity

1 정희원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정 (Member, Ph.D. Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 정희원, 일리노이대학교 사회환경공학과 박사후연구원 (Member, Postdoctoral Fellow, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Univ. of Illinois at Urbana-Champaign)

3 정희원, 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, High Speed Research Division, Korea Railroad Research Institute)

4 정희원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ., Tel: +82-2-3290-3325, Fax: +82-2-928-7656, [jongsub@korea.ac.kr](mailto:jongsub@korea.ac.kr), Corresponding author, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2016년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

열차기술의 진보와 동반한 열차의 고속화 및 하중증가는 철도궤도 하부구조물에 대하여 증가된 운중, 횡압, 시·제동력을 가한다. 도상자갈 및 콘크리트 궤도로부터 전달된 하중에 대하여 적절한 지지력을 발휘하지 못하는 노반은 열차하중에 의하여 파괴에 이를 수 있으며, 파괴까지 유발되는 큰 변형이 발생되지 않더라도 안전관리기준을 벗어난 탄성변형은 열차의 탈선 등 큰 사고로 이어질 수 있다. 그러므로, 철도궤도 하부구조물에 대한 강도 및 강성특성 평가는 매우 중요한 사안중 하나이다. 이에 따라, 다양한 방법을 적용한 철도궤도 하부구조물 평가 방법이 시도되고 있다(Chebli et al., 2008).

비파괴 탐사방법으로써, Al-Qadi et al.(2010)은 지하투과레이더(ground penetrating radar: GPR)를 적용하여 도상자갈층의 세립분 함량을 평가하고자 하였으며, Anbazhagan et al.(2011)과 Vo et al.(2015)은 표면파(surface wave)기법을 이용하여 궤도 하부구조물의 상태를 평가하고자 하였다(Park et al., 2009a; Park et al., 2009b). 그러나, GPR은 적은 비용으로 단시간 내에 넓은 지역에 대한 탐사가 가능한 반면(Carpenter et al., 2004), 층 두께, 함수비, 세립분 함량만을 추정하므로 직접적인 궤도 하부구조물의 강도 및 강성 평가에 어려움이 있으며, 표면파 기법을 이용한 궤도 하부구조물 평가는 아직 실용화단계에 이르지 못하였다.

정·동적 하중재하를 통한 하부구조물 평가 방법으로써 동평판재하시험(light weight deflectometer test: LWDT) 및 평판재하시험(plate bearing test: PBT)이 제안되었다. LWDT와 PBT는 직접적으로 강성과 처짐량을 평가할 수 있는 방법이나, 평가범위가 제한적이며, 평가하고자 하는 다짐토의 두께가 얇을 경우, 하부지반 강성의 영향을 크게 받는다. 이와 같은 이유로, 비파괴 시험방법들에 참고값을 제시할 수 있으며, 심도에 따라 직접적으로 철도궤도 하부구조물을 평가할 수 있는 원위치 관입시험에 대한 연구가 필요하다.

대표적인 원위치 관입시험방법으로 표준관입시험(standard penetration test: SPT), 콘관입시험(cone penetration test: CPT), 딜라토미터시험(flat plate dilatometer test: DMT), 공내재하시험(pressuremeter test: PMT) 및 베인전단시험(vane shear test: VST)이 있다. 이들 시험법중, 별도의 시험공 굴착이 필요치 않으며, 심도에 따라 높은 해상도로 대상지반의 강도특성을 획득할 수 있는 CPT의 비중

이 증가하고 있다. 특히, Robertson et al.(1986)은 강도 특성 평가에 주된 목적이 있는 CPT를 개량하여 관입심도에 따라 전단파속도 획득 및 강성특성을 추정할 수 있는 탄성과 콘관입시험(seismic cone penetration test: SCPT)을 개발 및 소개하였다. 그러나 이들 원위치 관입시험방법은 큰 무게와 부피를 차지하는 관입장비가 동반되어야 하므로 본 연구의 대상지반인 철도노반으로의 접근이 용이하지 않으며, 필요에 따라 천공되어야 하는 시험공 및 관입로트의 큰 직경으로 인하여 시공 완료된 철도궤도 하부구조물에 대한 대단위 파괴 및 교란을 야기하므로 철도 상부노반에 대한 적용에 한계가 있다.

반면, Scala(1956)에 의해 소개된 동적 콘 관입기(dynamic cone penetrometer: DCP)는 다짐토의 상태평가를 위하여 고안된 소형화된 원위치 관입시험 방법으로서, 시험방법이 매우 간결하고 경제적이며, 장비의 유지관리 및 보관이 용이하고 대상지반을 크게 교란하지 않으므로 시공 완료된 상부노반에 대한 적용에 적합하다. 동적 콘 관입시험을 통하여 획득되는 동적 콘 관입지수(dynamic cone penetration index: DCPI)는 동적 콘 관입기를 1회 타격할 때 관입된 깊이로서, 대상 지반의 강도특성과 크게 연관된다. 이는 대상 궤도 하부구조물의 강도특성 평가에 유용하게 사용될 수 있으나, 탄성범위를 넘어선 변형을 가하여 획득된 지수이므로 강성특성 평가에는 한계가 있다.

본 연구에서는, 동적 콘 관입시험 방법 및 결과를 이용하여 상부노반의 강성특성을 추정하고자 시공 완료된 철도 상부노반에서 동적 콘 관입시험 및 전단파속도 획득을 위한 cross hole 시험을 수행하였으며, 각 시험결과를 상호비교 하였다. 본 논문은 수행된 시험에 대한 과정, 결과 및 분석내용을 다룬다.

## 2. 동적 콘 관입시험(dynamic cone penetration test)

Scala(1956)에 의하여 소개된 동적 콘 관입기(dynamic cone penetrometer: DCP)는 대상 지반의 강도특성을 획득하기 위하여 고안된 원위치 관입시험 장비이다. 동적 콘 관입시험은 Fig. 1과 같이 직경 20mm, 선단각 60°의 원추와 연결된 직경 16mm의 관입로트를 무게 78.4N 및 낙하고 575mm의 해머로 타격하여 동적으로 지반에 관입된다. 이때, 매 타격시 타격횟수 및 관입심도가 기록된다.

동적 콘 관입시험의 결과로서, 타격당 관입깊이인 동

적 콘 관입지수(dynamic cone penetration index: DCPI)가 획득되며, n회 타격시 동적 콘 관입지수(DCPI<sub>n</sub>)는 식 (1)과 같이 표현된다(ASTM D6951, 2009).

$$DCPI_n [mm/blow] = P_n - P_{n-1} \quad (1)$$

여기서, P<sub>n</sub>과 P<sub>n-1</sub>은 각각 n번째와 n-1번째 해머타격시의 총 관입심도를 나타낸다.

### 3. 전단파속도(shear wave velocity)

영구적인 침하가 발생하지 않는 지반에서 외부 하중에 의한 탄성침하 및 진동은 주로 해당 지반의 전단탄성계수에 영향을 받는다. 큰 변형에서의 전단탄성계수(G)는 stress-strain 관계에서 비선형 거동을 보이며, 이러한 거동특성 판단은 실내실험에 의하여 판단될 수 있다. 반면, 작은 변형에서의 전단탄성계수(G<sub>max</sub>)는 stress-strain 관계에서 매우 우수한 선형 관계를 보이며(Santamarina et al., 2001), 이는 지반에서의 진동해석 모델로서 이용될 수 있다. 또한, G<sub>max</sub>는 식 (2)와 같이 대상 지반의 밀도(ρ) 및 전단파속도(V<sub>s</sub>)를 이용하여 도출되므로, 일정한 다짐도 및 밀도로 시공된 현장에서의 전단파속도 획득은 대상현장의 강성특성 및 진동해석 모델 산정에 유

용하게 사용될 수 있다.

$$G_{max} = \rho \times V_s^2 \quad (2)$$

실내 모형시료를 대상으로 한 전단파속도 획득 방법으로서, 대표적으로 벤더엘리먼트 시험이 이용된다. 벤더엘리먼트는 대상 시료에 대하여 전단파를 수신 및 발신할 수 있는 트랜스듀서로서, 높은 정확도 및 해상도가 검증된 바 있다(Lee and Santamarina, 2005). 현장에서 전단파속도를 획득하는 방법으로서, 대표적으로 Cross hole 방법 및 Down hole 방법이 있다. 이들 방법 모두 전단파를 발신 및 수신함으로써, 획득된 전파시간(travel time, Δt)과, 수신기와 발신기 사이의 전파거리(travel distance, ΔS)를 이용하여 식 (3)과 같이 전단파속도를 산정한다.

$$V_s = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (3)$$

## 4. 현장실험

### 4.1 적용현장

조성된 시료를 대상으로 수행되는 실내실험의 경우, 사용된 재료, 다짐상태 및 횡방향 구속압 등 실제 시공된 현장 모사에 한계가 있다고 판단되는 바, 본 연구에서는 실제 시공 완료된 현장에서의 동적 콘 관입지수와 전단파속도의 상호관계 획득하고자 하였다. 선택된 현장은 강원도에 위치한 다짐완료된 상부노반으로서 Fig. 2와 같이 쌓기형태로 시공된 두 개소(Site-1, Site-2)이다. 본 연구의 대상현장인 Site-1과 Site-2 모두 고속철도 건설을 위한 상부노반에 해당하므로, 상부노반의 심도는 시공기면으로부터 3m로 시공되었을 것으로 판단된다.

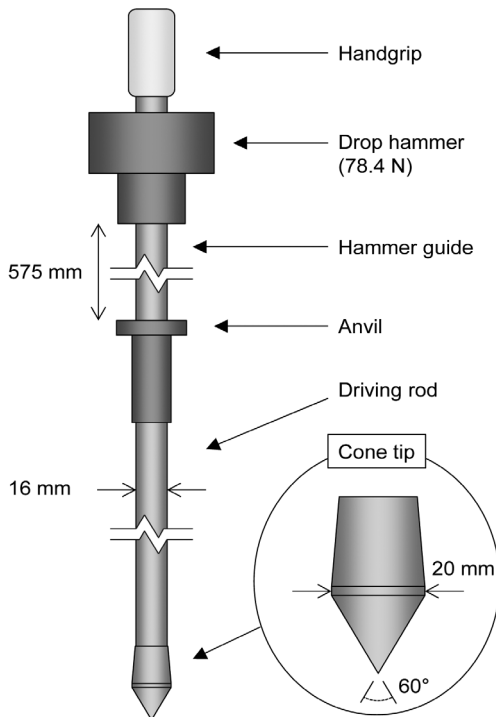


Fig. 1. Schematic drawing of dynamic cone penetrometer

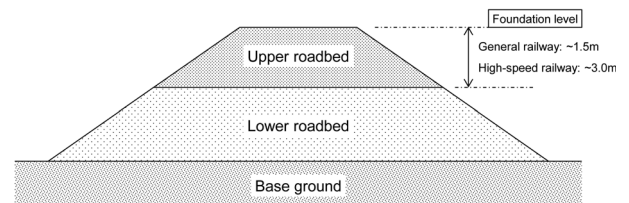


Fig. 2. Cross-section of the railway roadbed

Site-1 및 Site-2에서 재료로 사용된 흙의 물성값은 Table 1에 정리되었으며, 통일분류법에 의하여 각각 SW 및 SW-SM으로 구분되었다.

Table 1. Index properties of geo-materials used in upper roadbed at Site-1 and Site-2

Field	Coefficient of uniformity ( $C_u$ )	Coefficient of curvature ( $C_g$ )	Specific gravity ( $G_s$ )	Maximum dry density ( $\rho_{dmax}$ )	Optimum moisture content ( $\omega_{opt}$ )	USCS
Site-1	6.4	1.1	2.673	2.088	7.4	SW
Site-2	8.5	1.3	2.663	1.875	12.6	SW-SM

#### 4.2 실험과정 및 측정체계

대상 상부노반의 전단파속도 및 동적 콘 관입지수를 획득하기 위하여, Fig. 3과 같은 실험이 구성되었다. 전단파속도 획득 이전에 동적 콘 관입시험이 수행될 시, 동적 콘 관입기의 관입공으로 인한 전단파속도의 불확실성이 야기될 수 있으므로, cross hole 방법을 이용한 대상 상부노반의 전단파속도 획득이 선행되었다. cross hole 방법에 사용된 수신기와 발신기 모두 측정범위 10,000g의 연직방향 1축 가속도계가 설치되었다. 가속도계로부터 획득된 발신 시간 및 수신시간은 데이터로거(MX410, HBM)를 통하여 컴퓨터로 수집 및 기록되며, 발신 및 수신 시간차( $\Delta t$ )는 전단파의 전파속도(travel time)로써 사용된다.

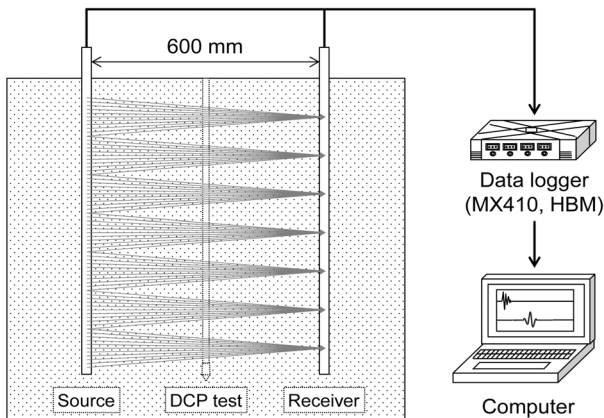


Fig. 3. Test procedure and measurement system

전단파속도 주상도 획득 과정으로서, 수신기는 전단파속도 측정 목표심도까지 선행하여 삽입되었으며, 발신기는 획득된 결과의 정확도를 상승시키기 위하여 Fig. 3과 같이 수신기 위치심도 상·하부 50mm 범위 내에 위치시켜 5회 이상의 전단파속도를 획득하였다. 여기서, 수신기와 발신기 사이의 거리( $\Delta S$ )는 600mm이며, 수신기와 발신기의 심도가 서로 다를 때에는, 심도차를 이용하여 전단파의 전파거리를 보정하였다. 이러한 과정을 통하여 획득된 전단파속도는 수신기와 발신기 위치의 중간심도를 대표하는 것으로 판단하였다.

cross hole 방법을 이용한 전단파속도 획득 이후, 수신

기와 발신기의 중간위치에서 동적 콘 관입시험이 수행되었다. 획득된 동적 콘 관입지수(DCPI) 주상도는 경향성을 상승시키기 위하여 세 개의 항에 대하여 이동평균법을 적용하였다.

#### 4.3 실험결과

Fig. 4는 본 연구에서 cross hole 방법을 이용하여 수집된 신호의 예시를 보여준다. 발신기는 해머 타격에 의하여 지반의 연직방향 진동을 유발하며, 신호 발생시의 시간은 발신기 내부에 설치된 가속도계를 통하여 명확하게 감지된다. 발신기뿐만 아니라 수신기 내부에 설치된 가속도계 또한 연직방향 1축 가속도계 이므로, 수신기는 발신기로부터 유발된 지반의 연직방향 진동인 전단파를 수집한다. Fig. 4에서 굵은 선으로 표시된 전단파는 명확한 초동을 나타내며, 초동시간과 발신시간의 차( $\Delta t$ ) 및 수신기와 발신기의 거리차( $\Delta S$ )를 이용하여 전단파를 산정할 수 있다.

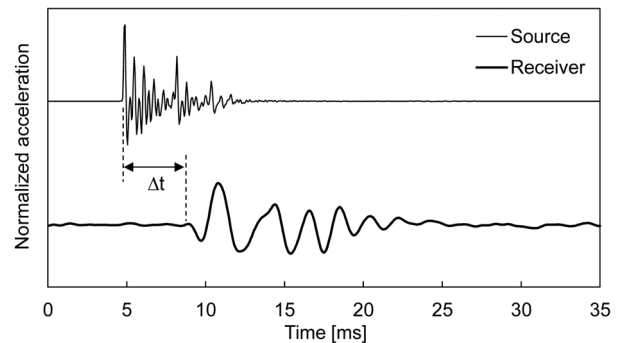


Fig. 4. Example of the gathered signal (In here,  $\Delta t$  denotes the travel time)

Fig. 5는 Site-1에서 획득된 동적 콘 관입지수 주상도 (Fig. 5(a)) 및 전단파속도 주상도(Fig. 5(b))를 보여준다. 동적 콘 관입지수는 관입 초반, 낮은 구속압의 효과로 매우 큰 값을 나타내나, 심도 약 70mm부터 900mm까지 5~7mm/blow로 수렴하여, 일정한 다짐으로 조성된 상부노반의 상태를 보여준다. 이후 심도 900mm부터 약 2.5mm/blow로 급격히 감소하여 단단하게 조성된 상태를 나타낸다.

전단파속도는 수신기 위치를 100mm부터 1,100mm까지 100mm 간격으로 하여 획득되었다. 획득된 전단파속도는 심도 100mm에서 약 160m/s를 나타내었으며, 이후 심도 200mm부터 800mm까지 약 200m/s에서 250m/s로 서서히 증가하는 경향을 보였다. 심도 900mm에서는 전단파속도가 약 300m/s로 급격히 증가하였으며, 이는 동적 콘 관입지수 주상도로부터 감지된 매우 단단히 조성된 상태와 부합하는 결과이다.

Site-2에서 수행된 동적 콘 관입시험 결과 및 전단파속도 획득 결과는 각각 Fig. 6(a) 및 Fig. 6(b)에 정리되었다. 동적 콘 관입지수는 심도 약 200mm까지 15mm/blow의 값을 보였다. 이는 Site-1의 결과와 비교할 때, 표층에서의 다짐이 충분히 이루어 지지 않은 것으로 판단되는 결과이다. 이후 심도 300mm까지 약 6mm/blow로 급격히 감소하였으며, 최종 관입심도인 900mm까지 약 4mm/blow로 서서히 감소하는 경향을 보였다.

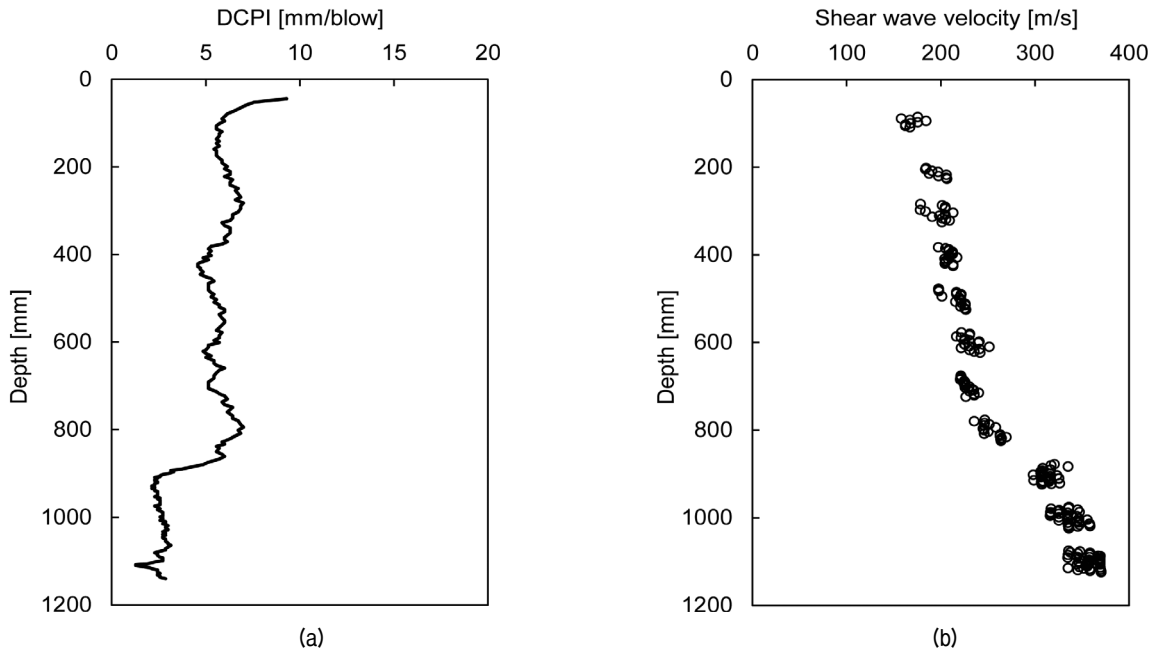


Fig. 5. Experimental results of Site-1: (a) DCPI vs. depth; (b)  $V_s$  vs. depth

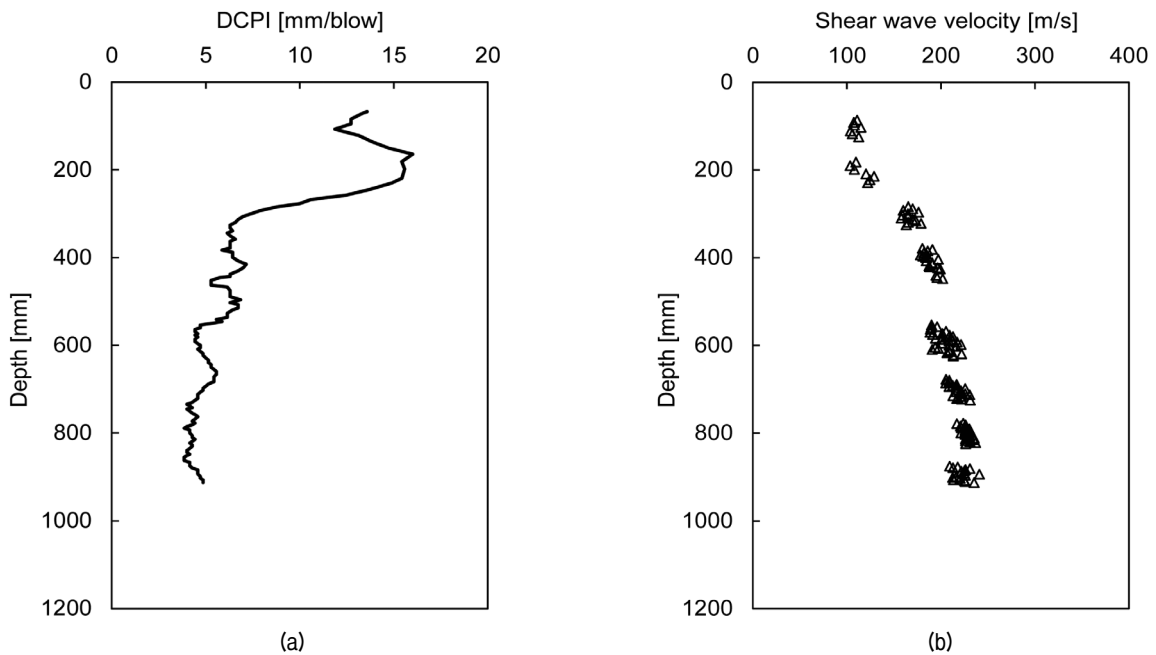


Fig. 6. Experimental results of Site-2: (a) DCPI vs. depth; (b)  $V_s$  vs. depth

전단파속도는 수신기가 심도 100, 200, 300, 400, 600, 700, 800 및 900mm에 위치할 때 획득되었다. 심도 100mm 및 200mm에서, 비교적 느슨한 상태로 판단되는 상부노반의 영향으로 약 100m/s의 값을 나타내었으며, 심도 300mm부터 최종 측정심도인 900mm까지 180m/s에서 230m/s로 서서히 증가하는 경향을 보였다.

### 5. 동적 콘 관입지수와 전단파속도의 상호관계

본 연구에서 수행된 동적 콘 관입시험은 소형화된 원위치 관입시험 방법으로서 장비의 유지 및 이동, 보관이 용이하며, 시험방법이 간결하여 시공된 상부노반으로의 적용에 적합하다. 또한, 결과로서 획득되는 동적 콘 관입지수는 심도에 따른 강도특성 및 다짐상태를 연속적으로 획득 가능하다는 장점이 있다.

전단파속도는 대상 지반의 강성특성을 나타내므로, 동적 콘 관입지수와 전단파속도의 상호관계 연구는 동적 콘 관입시험으로부터 획득에 한계가 있는 상부노반의 강성특성을 추정하는데 유용하게 사용될 수 있다. 본 연구에서 획득된 두 개소(Site-1, Site-2)의 동적 콘 관입지수와 전단파속도는 서로 반비례하여 증감하는 경향성을 보였으며, 동일한 심도에 대한 동적 콘 관입지수 및 전단파속도를 비교하여 Fig. 7에 나타내었다.

동일한 심도에서 전단파속도(m/s)와 동적 콘 관입지수(mm/blow)의 회귀분석 결과, 식 (4)와 같이 거듭제곱 형태의 관계를 보였으며, 식 (4)와 각각의 자료 사이의 적합도를 나타내는 결정계수( $R^2$ )는 0.8 이상으로 나타났다.

$$V_s [m/s] = 544 \times DCPI^{-0.559} \quad (4)$$

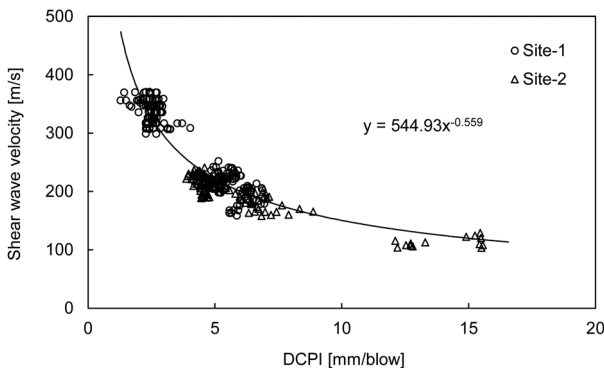


Fig. 7. Relationship between dynamic cone penetration index and shear wave velocity

### 6. 요약 및 결론

본 연구에서는 동적 콘 관입시험을 통하여 시공된 철도 상부노반에서의 강성특성을 추정하기 위하여 동적 콘 관입지수(DCPI)와 전단파속도( $V_s$ )의 상호관계를 제시하고자 하였다. 동적 콘 관입시험 및 전단파속도 획득은 조성된 상부노반의 재료, 다짐 및 횡방향 구속압 상태 등 실제와 동일한 조건 하에서의 상호관계 규명을 위하여 강원도에 위치한 시공 완료된 상부노반 두 개소(Site-1, Site-2)를 대상으로 수행되었다.

전단파속도 획득을 위한 방법으로서, cross hole 방법이 선택되었으며 수신기를 측정 목표심도에 고정 후, 발신기를 연직방향으로 타격하여 지반의 연직방향 진동을 가함과 동시에 연속적으로 전단파를 발신 및 수신하였다. 이후 수행된 동적 콘 관입시험은 cross hole 방법에서 사용된 수신기와 발신기 중간 지점에서 수행되었으며, 결과로서 동적 콘 관입지수가 획득되었다. Site-1의 경우 1,100mm 심도까지의 전단파속도 주상도 및 동적 콘 관입지수 주상도가 획득되었으며, Site-2의 경우 900mm까지의 전단파속도 주상도 및 동적 콘 관입지수 주상도가 획득되었다. 두 실험 위치 모두에서 동적 콘 관입지수가 감소할 때, 전단파속도는 증가하는 등 반비례 경향을 보였다.

동일한 심도에서의 동적 콘 관입지수와 전단파속도를 상호비교한 결과, 전단파속도는 동적 콘 관입지수의 거듭제곱 형태를 보였으며, 결정계수가 0.8 이상인 높은 상관관계를 나타내었다.

대상 지반의 강도 및 다짐도를 평가하기 위한 방법으로서 동적 콘 관입기는 널리 이용되고 있으나, 해당 지반의 강성 평가에는 한계가 있다. 연속 동하중을 지지하는 철도의 거동은 해당 상부노반의 전단탄성계수에 큰 영향을 받으므로 상부노반에 대한 강도 및 다짐도 평가와 더불어 강성특성에 대한 평가는 안전한 철도 운영을 위하여 매우 중요한 사안이라고 할 수 있으며, 일정한 다짐도 및 밀도로 시공된 상부노반에서의 전단파 속도 예측은 강성을 직접적으로 예측할 수 있는 방법이므로, 본 연구의 결과는 향후 상부노반 강성특성 평가에 유용하게 사용될 수 있을 것이라 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원(15RTRP-B067919-03)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌 (References)

1. Al-Qadi, I. L., Xie, W., Roberts, R., and Leng, Z. (2010), "Data Analysis Techniques for GPR Used for Assessing Railroad Ballast in High Radio-frequency Environment", *Journal of transportation engineering*, ASCE, Vol.136, No.4, pp.392-399.
2. Anbazhagan, P., Lijun, S., Buddihima, I., and Cholachat, R. (2011), "Model Track Studies on Fouled Ballast Using Ground Penetrating Radar and Multichannel Analysis of Surface Wave", *Journal of Applied Geophysics*, Elsevier, Vol.74, pp.175-184.
3. ASTM D6951 (2009), *Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications*, Annual Book of ASTM Standard 04.03, ASTM International, West Conshohocken, PA.
4. Carpenter, D., Jackson, P. J., and Jay, A. (2004), "Enhancement of the GPR Method of Railway Trackbed Investigation by the Installation of Radar Detectable Geosynthetics", *NDT & E International*, Vol.37, pp.95-103.
5. Chebli, H., Clouteau, D., and Schmitt, L. (2008), "Dynamic Response of High-speed Ballasted Railway Tracks: 3D Periodic Model and in Situ Measurements", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Elsevier, Vol.28, pp.118-131.
6. Lee, J. S. and Santamarina, J. C. (2005), "Bender Element: Performance and Signal Interpretation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.131, No.9, pp.1063-1070.
7. Park, C. S., Mok, Y. J., Hwang, S. K., and Park, I. B. (2009a), "A Methodology for Quality Control of Railroad Trackbed Fills Using Compressional Wave Velocities: 1. Preliminary Investigation", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.25, No.9, pp.45-55 (in Korean).
8. Park, C. S., Mok, Y. J., Hwang, S. K., and Park, I. B. (2009b), "A Methodology for Quality Control of Railroad Trackbed Fills Using Compressional Wave Velocities: 2. Verification of Applicability", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.25, No.9, pp.57-66 (in Korean).
9. Robertson, P. K., Campanella, R. G., Gillespie, D., and Rice, A. (1986), "Seismic CPT to Measure in Situ Shear Wave Velocity", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.112, No.8, pp. 791-803.
10. Santamarina, J. C., Klein, A., and Fam, M. A. (2001), *Soils and waves: Particulate materials behavior, characterization and process monitoring*, John Wiley and Sons, NY, 508.
11. Scala, A. J. (1956), "Simple Methods of Flexible Pavement Design Using Cone Penetrometers", *New Zealand Engineering*, Vol.11, No.2, pp.34-44.
12. Vo, P. T., Ngo, H. H., Guo, W., Zhou, J. L., Listowski, A., Du, B., Wei, Q., and Bui, X. T. (2015), "Stormwater Quality Management in Rail Transportation - Past, present and future", *Science of the Total Environment*, Elsevier, Vol.512-513, pp.353-363.

Received : July 30<sup>th</sup>, 2015

Revised : September 29<sup>th</sup>, 2015

Accepted : September 30<sup>th</sup>, 2015