

# 강성특성치를 이용한 고속전철 콘크리트궤도의 처짐가능성 평가

## Evaluation of Concrete-Track Deformation for High-Speed Railways by Characteristic Stiffness

조성호\*† 이일화\*\* 황선근\*\* 강태호\*\*\* 김석철\*\*\*

Joh, Sung-Ho Lee, Il-Wha Hwang, Seon Keun Kang, Tae-Ho Kim, Seok-Chul

### ABSTRACT

Concrete tracks are superior to ballast tracks in the aspect of durability, maintenance and safety. However, deteriorated stiffness of railroad bed and settlement of soft ground induced by trapped or seepage water lead to problems in safety of train operation. In this research, characteristic stiffness of concrete tracks, which is determined from FRACTAL (Flexural-Rigidity Assessment of Concrete Tracks by Antisymmetric Lamb Waves) technique, was employed as an index of track displacement. The characteristic stiffness is defined using Poisson's ratio, moment of inertia and stiffness ratio of subgrade to slab. To verify validity and reliability of the proposed characteristic stiffness, experimental and theoretical researches were performed. Feasibility of the characteristic stiffness based on FRACTAL technique was proved at a real concrete track for Korean high-speed trains. Validity of the FRACTAL technique was also verified by comparing the results of impulse-response tests performed at the same measurement array and the results of SASW tests and DC resistivity survey performed at a shoulder nearby the track.

### 1. 서론

콘크리트궤도는 시공성, 경제성 등의 측면에서 자갈도상보다 우위에 있지만, 한편으로 하부노반과의 상호작용으로 발생하는 부차적인 문제를 피할 수 없다. 즉, 콘크리트궤도는 상대적으로 강성이 약한 지반 위에 단순히 올려놓게 되며, 지반과의 밀착을 위한 보조적인 대책은 고려되지 않고 있다. 따라서 과도한 궤도의 순간침하, 열차의 반복하중 재하로 인한 지반의 다짐, 우수, 지하수 등으로 인한 지반내 물의 흐름 등으로 인하여 궤도 하부 노반은 점차적으로 약화되며 궁극적으로 지반침하로 이어지게 된다. 이와 같은 지반침하는 콘크리트궤도의 지지력 손실을 초래하게 되어, 콘크리트궤도의 구조적 손상, 열차운행의 안정성 저하 등의 문제를 초래하게 된다. 본 연구에서는 하부지층에 대한 콘크리트 궤도의 휨강성을 비파괴적으로 평가할 수 있는 기법인 FRACTAL 기법을 이용하여, 슬래브 궤도의 처짐가능성을 상대적으로 평가할 수 있는 강성특성치(Characteristic Stiffness)를 제안하였다. 본 연구에서 제안하는 강성특성치는 단면 2차 모멘트, 포아송비, 콘크리트궤도의 탄성계수와 하부노반의 탄성계수의 비 등을 이용하여 정의된다. 본 연구에서 제안한 강성특성치의 타당성을 확인하기 위하여 이론적 고찰과 실증적 검증을 수행하였다.

† 책임저자 : 정희원, 중앙대학교 토목공학과, 교수

E-mail : shjoh@cau.ac.kr

TEL : (031)670-4664 FAX : (031)675-1387

\*\* 정희원, 한국철도기술연구원, 궤도토목연구실, 선임연구원

\*\*\* 정희원, 한국철도기술연구원, 궤도토목연구실, 책임연구원

\*\*\*\* 정희원, 한국철도기술연구원, 궤도토목연구실, 박사후연구원

\*\*\*\*\* 학생회원, 중앙대학교, 토목환경공학과, 석사과정

즉, 하부 지지층의 강성저하로 인한 궤도의 처짐, 콘크리트궤도에서의 Lamb 파 전파특성과 궤도의 상대강성의 관계를 이론적으로 검토하였다. 그리고 실제 고속전철 신규건설구간에 대하여 FRACTAL 기법을 적용하여 평가한 강성특성치의 신뢰성, 실용성 등을 평가해 보았다. 또한 슬래브궤도의 인접지반에 대하여 SASW 시험을 수행하고, 이로부터 확인된 지층구조의 분석을 통하여 제안된 강성특성치의 신뢰성을 확인하였다.

### 2. 콘크리트 슬래브궤도의 상대강성 평가를 위한 FRACTAL 기법

조미라 등 (2008)은 콘크리트 슬래브 상대강성 평가를 위해서 표면파의 측정기법을 원용한 FRACTAL (Flexural Rigidity Assessment of Concrete Tracks by Antisymmetric Lamb Waves) 기법을 제안하였다. FRACTAL 기법은 콘크리트 슬래브궤도의 상대강성을 연속적으로 평가하여 침하의 가능성이 있는 부분을 시각적으로 확인할 수 있도록 하는 기법으로, Lamb파의 위상속도를 기본 평가 지수로 활용하며, Impulse-Response 기법으로 평가한 동적강성을 보조적 평가지수로 활용하도록 하였다. FRACTAL 기법의 실험구성으로는 그림 1에 도시되어 있는 바와 같이, 감진기 간격 2 m, 감진기로부터의 발진원 이격거리 8m를 사용하도록 하였다. 발진원으로는 0~100 Hz 대역의 충격해머, 감진기는 공진주파수 4.5 Hz의 지오폰을 사용하고, 감진기 장착은 현장 콘크리트 상태와 환경조건 등으로 인하여 증력커플링 방식으로 설치하도록 하는 것이 효과적이라고 제안했다. 그리고 FRACTAL 시험은 특정 국부지역에 국한하지 않고, 연속적으로 측정하여 Lamb파의 위상속도의 분포경향을 2차원적으로 도시함으로써 콘크리트 슬래브궤도의 휨강성의 실용적 평가에 도움이 될 수 있도록 하였다. 표면파 시험에서와 같이 FRACTAL 시험은 기본적으로 두 감진기 간의 위상각차 스펙트럼을 측정하게 되는데, 이 위상각차 스펙트럼과 감지기간 간격으로 위상속도를 결정할 수 있다. FRACTAL 시험은 Rayleigh파와 Lamb파를 동시에 측정하게 되는데, 그림 3에서 2,933 Hz보다 작은 주파수 대역에 발생하는 위상각의 불연속점을 경계로 저주파 대역은 Lamb파, 고주파 대역은 Rayleigh 파이므로, 저주파 대역만 취하여서 Lamb파의 위상속도를 결정하는 것으로 한다. 조미라 등 (2008)의 수치해석 연구에 의하면, Impulse-Response 시험도 콘크리트 슬래브궤도의 휨강성을 평가하는데 효과적인 것으로 평가되기 때문에, FRACTAL 시험과 더불어 Impulse-Response 시험도 병행하여 수행하는 것이 바람직하다. Impulse-Response 시험은 FRACTAL 시험을 위한 실험구성에서 단순히 타격지점만 첫 번째 감진기에서 2m 떨어진 곳으로 이동하여 추가적으로 타격해 주기만 하기 때문에, Impulse-Response 시험을 위하여 추가적으로 소요되는 노력은 그리 크지 않다고 할 수 있다.

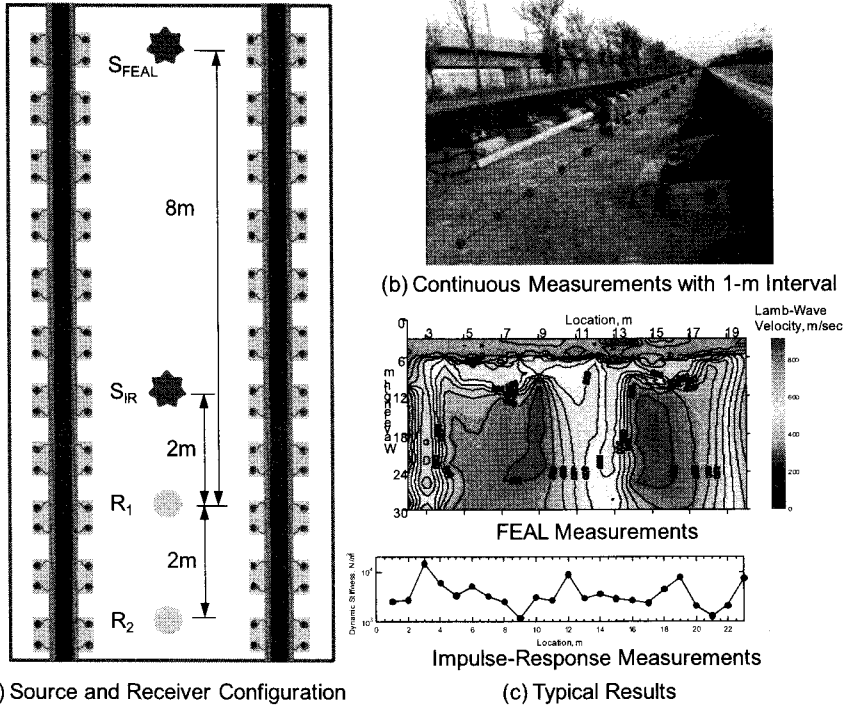
### 3. 슬래브 궤도의 처짐과 상대강성의 관계

본 절에서는 Winkler 기초개념을 도입하여 콘크리트궤도와 노반간 상대강성 측면에서 궤도의 처짐을 정량적으로 이해하고자 하였다. Winkler 기초는 노반을 스프링의 조합으로 이해하는 것으로 그림 2에 도시된 바와 같다. 그림 2의 슬래브 중심에 하중  $P$ 가 작용하였을 때 발생하는 처짐  $y$ 는 식 (1)과 같이 표현된다 (Hetenyi, 1946).

$$y = \frac{P\lambda}{2k_s B} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x + \sin \lambda x) \quad (1)$$

여기서,  $\lambda = \sqrt{k_s B / (4E_s I)}$ ,  $k_s$ 는 지반반력계수,  $B$ 는 기초의 폭,  $I$ 는 기초의 단면 2차 모멘트,  $E_s$ 는 지반의 영탄성계수,  $E_f$ 는 콘크리트 슬래브궤도의 탄성계수,  $\nu$ 는 콘크리트 슬래브 궤도의 포아송비이다. 그리고  $k_s = E_s / \{B(1-\nu^2)\}$ 의 관계를 고려하여 보았을 때,  $\lambda$ 와 슬래브궤도 처짐  $y$ 는  $E_f/E_s$ 의 함수라고 할 수 있다. 예를 들어, 콘크리트궤도에 1 ton의 하중이 가해졌을 때, 지반의 영탄성계수가 감소함에 따라 그림 2에서와 같이 슬래브궤도의 처짐은 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 콘크리트궤도의 처짐은 콘크리트궤도의 품질이 양호할 때 노반의 탄성계수에 지배된다고 할 수 있고, 또한 궤도의 처

짐 가능성에 대한 지표로서 노반에 대한 계도의 상대강성을 사용하여도 타당함을 의미한다고 할 수 있다.



(a) Source and Receiver Configuration

(c) Typical Results

그림 1. 콘크리트계도의 휨강성 평가를 위한 비파괴 탄성과 기법, FRACTAL 기법을 위한 실험구성

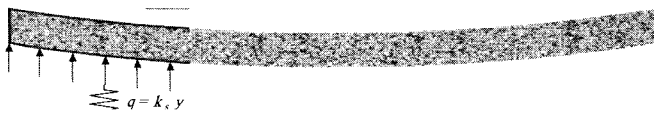


그림 2. 토노반상 콘크리트계도의 처짐

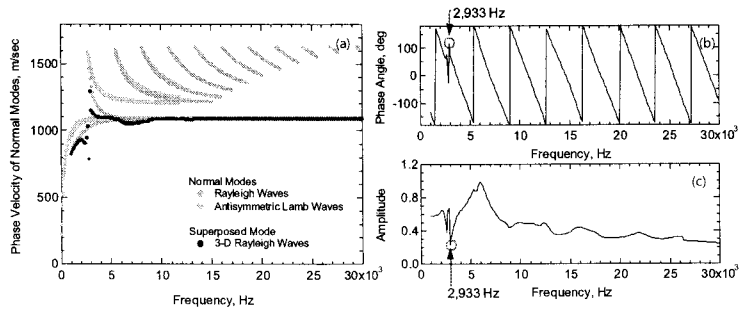


그림 3. 콘크리트계도에서의 Lamb파 전파특성

#### 4. 슬래브 처짐 평가를 위한 강성 특성치

본 절에서는 2절의 Winkler 기초 개념을 준용하여 노반에 대한 콘크리트궤도의 휨강성을 비파괴적으로 평가할 수 있는 강성특성치(Characteristic Stiffness)를 제안하였다. 강성특성치는 식 (1)로부터 식 (2)를 유도해 낼 수 있는데, 이를 본 연구에서는 강성특성치라고 하였다.

$$\psi(\lambda) = \frac{8E_{slab}}{I} \frac{\lambda^3 e^{\lambda x}}{(\cos \lambda x + \sin \lambda x)} \quad (2)$$

여기서,  $\lambda = \frac{1}{4(1-\nu^2)I} \left( \frac{v_{Ssubgrade}}{v_{Sslab}} \right)^2$ ,  $v_S$ 는 매질의 전단파 속도이다. 그리고  $E_{slab} = 2(1+\nu)\rho v_{Sslab}^2$  으로 표현되며,  $\nu$ 는 콘크리트 슬래브의 포아송비이다.

식 (2)의 강성특성치,  $\psi$ 는 식 (1)을  $P/y$  항으로 정리한 것으로서 스프링계수에 해당되는 개념이다. 즉 슬래브를 스프링으로 간주한다면 강성특성치는 스프링 탄성계수에 해당되는 값이 된다. 따라서  $\psi$ 의 단위는  $FL^{-1}$ 의 항으로 정리된다고 할 수 있다. 식 (2)를 적용하여 강성특성치를 결정하는 측면에 있어서 콘크리트 슬래브의 전단파 속도는 현장 콘크리트 슬래브에서 SASW 시험으로 간단하게 측정할 수 있는 항목이고, 슬래브하부 노반의 등가 전단파 속도는 FRACTAL 시험으로 측정된 Lamb 파 속도를 역해석하여 결정할 수 있는 항목이다. 식 (2)에 대한 실제 적용사례를 다음 절에서 소개하였다.

#### 5. 고속철도 콘크리트궤도에 대한 FRACTAL 기법의 적용

본 절에서는 FRACTAL 기법의 신뢰성을 검증하기 위하여, 대구 인근지역 신규 KTX 노선에 있는 콘크리트궤도에 대하여 FRACTAL 시험과 Impulse-Response 시험을 수행하였고, 콘크리트 궤도에 인접하여 있는 노견지반에 대하여 SASW 시험을 수행하여 성토층과 원지반층의 층상구조 및 매질의 변화를 측정하였다. FRACTAL 시험은 2m 축선을 1m 간격으로 중첩하여 모두 21회 측정을 수행하였고, Impulse-Response 시험은 1m 간격으로 연속적으로 측정하여 모두 21개 지점에 대한 평가를 수행하였다. 연속적으로 수행한 FRACTAL 시험의 Lamb파 위상속도를 2차원으로 정리한 결과를 그림 4에 도시하였고, 연속 Impulse-Response 시험결과도 비교하여 도시하였다. 콘크리트궤도에 인접하여 수행한 SASW 시험결과도 그림 4에 2차원 컨투어 형태로 도시하였다. 3개 시험결과를 비교하여 보면, 일관성 있는 경향을 살펴볼 수 있다. 예를 들어 FRACTAL 시험으로 측정된 휨강성이 큰 부분, 3~4m, 14~16m 구간은 Impulse-Response의 동적강성도 크게 측정되었고, 같은 구간에서 SASW 시험에 의한 전단파속도 700 m/sec 이상의 지층이 심도 5m 이하에 존재하는 것을 볼 수 있다. 이렇게 FRACTAL 시험과 Impulse-Response 시험결과가 상호 일치하는 사실은 FRACTAL 시험의 신뢰도를 입증해주는 근거라고 할 수 있다. 또한 SASW 시험은 슬래브 하부 노반을 조사한 것이고, FRACTAL 시험과 Impulse-Response 시험은 콘크리트 슬래브와 하부노반의 종합시스템을 조사한 것이라는 것을 염두에 둘 때, FRACTAL 시험과 Impulse-Response 시험에 의한 상대강성 또는 휨강성은 슬래브 하부노반에 의해 지배적으로 영향 받는다는 것을 확인할 수 있다.

한편, 그림 5에는 본선 콘크리트궤도 일부 구간에 대하여 FRACTAL 시험을 수행하고, 그 결과를 Lamb파 속도와 강성특성치 형태로 정리하였다. 두 변수는 경향이 유사하게 나타나고 있으며, Lamb파 속도가 작게 측정된 슬래브의 경우 강성특성치도 작게 평가되었다. FRACTAL 시험으로부터 도출한 강성특성치의 변화인 그림 5(b)의 경향으로부터 확인할 수 있는 것은 11m, 18m 위치에서 특히 강성특성치가 작고 다른 구간에 비해서 처짐 가능성이 크다는 것을 추정할 수 있다. 만약 처짐관리 기준치를 강성특성치로 환산할 수 있으면, 그 기준치에 미달하는 슬래브를 찾아낼 수 있을 것이며, 이에 대한 보수 보강 조치를 취할 수 있으리라 판단된다.

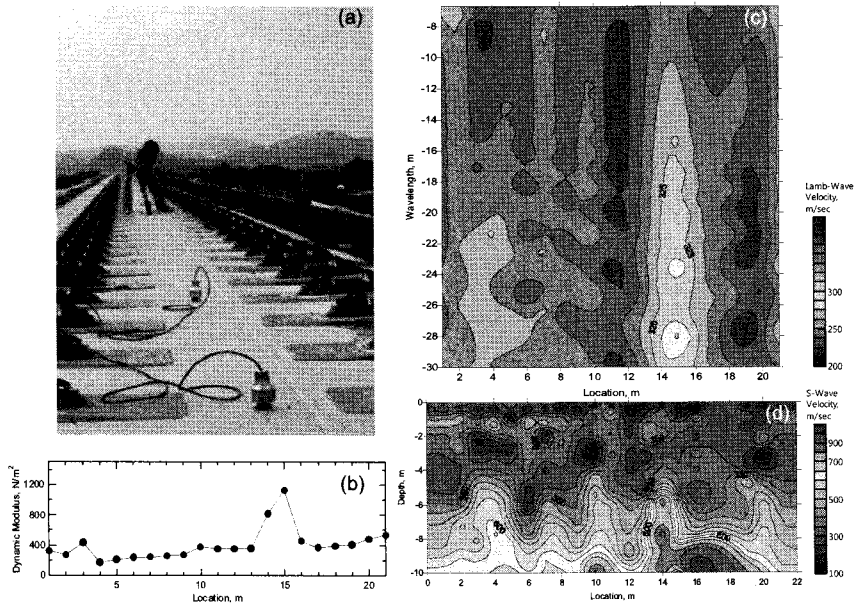


그림 4. 콘크리트궤도에서의 FRACTAL 시험, Impulse-Response 시험, SASW 시험 결과의 비교

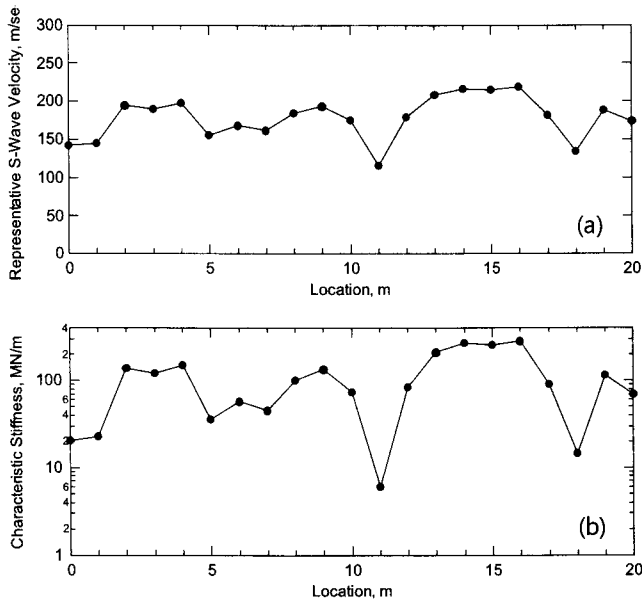


그림 5. 콘크리트궤도에서의 FRACTAL 시험결과: (a)Lamb파 속도, (b)강성특성치

## 6. 요약 및 결론

본 연구에서는 콘크리트궤도의 상대 강성을 평가하기 위하여 제안된 FRACTAL 기법을 이용하여 슬래브 처짐 가능성을 평가하기 위한 이론적 접근방법을 제시하였다. 콘크리트궤도의 처짐 가능성을 강성특성치라는 지수를 이용하여 궤도 특정 위치의 처짐 가능성을 정량화할 수 있었다. 본선 콘크리트궤도에 대한 FRACTAL 시험 적용 결과, 궤도의 강성특성치는 Lamb파 속도 분포, 동적강성 분포, 하부 구조의 전단파 속도 분포 등과 일치하는 경향으로 측정되었다. 따라서 향후 콘크리트궤도의 처짐가능

성에 대한 평가 및 유지관리는 본 연구에서 제안한 FRACTAL 기법으로 도출할 수 있는 강성특성치로 수행가능하리라고 판단된다.

#### Acknowledgement

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(AH08004A)에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. 조성호, 장대우, 강태호, 이일화 (2005) CAP-SASW 기법에 의한 지반절편의 전단강성구조 평가. 한국지반공학회 논문집, 한국지반공학회, 제 21권, 4호, pp. 71-81.
2. Haskell, N.A. (1953) The Dispersion of Surface Waves on Multilayered Media. Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 43, pp. 17-34.
3. Joh, S.H.(1996) Advanced in Interpretation and Analysis Techniques for Spectral-Analysis-of-Surface-Waves(SASW) Measurements. Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin.
4. Kausel, E. and Peek, R. (1982) Dynamic Loads in the Interior of a Layered Stratum: An Explicit Solution. Bull. Seismol. Soc. Am. Vol. 75, No. 5, pp. 1459-1508.
5. Kausel, E. and Roesset, J. M.(1981) Stiffness Matrices for Layered Soils. Bull. Seismol. Soc. Am. Vol. 71, pp.1743-1761.
6. Stokoe, K.H., II, Wright, S.G., Bay, J.A., and Roesset (1995). Characterization of geotechnical sites by SASW method. Geophysical Characteristics of Sites, ISSMFE, Technical Committee 10 for XIII ICSMFE, International Science Publishers, New York, 1994, pp. 15-25.
7. Thomson, W.T. (1950) Transmission of Elastic Waves through a Stratified Soil Medium. J. of Appl. Phys. Vol. 21, pp. 89-93.7.