

탄성과 Full-Waveform Inversion 기법을 이용한 자갈궤도 도상 및 노반의 특성 분석

Characterization of Railway Subgrades Using an Elastic Full-Waveform Inversion Method

김보영*, 강준원*†, 최영태**, 장승엽***

Boyoung Kim*, Jun Won Kang*†, Yeong-Tae Choi**, Seung Yup Jang***

초 록 이 연구에서는 철도 자갈궤도 표면에서 탄성파를 발생시켜 자갈도상과 강화노반을 통해 전파 및 반사하는 탄성파를 측정하고 이를 2차원 Full-Waveform Inversion (FWI) 기법에 적용해 자갈궤도의 각 층을 구분하고 진단탄성계수의 분포를 추정할 수 있는 기법을 제시한다. 탄성과 지배방정식을 구속조건으로 한 계산응답과 실제 측정응답의 차이를 나타내는 목적함수를 최소화하도록 FWI 문제를 정식화할 수 있다. 이를 위해 탄성과 방정식과 라그랑지 승수의 조합으로 Karhsh-Kuhn-Tucker 최적화 조건을 사용하였다. 자갈도상과 같은 반무한 영역의 탄성파 전파를 모델링하기 위해 유한 범위로 한정된 영역의 경계에 수치적 파동흡수 경계모델인 Perfectly Matched Layer (PML)를 도입하였다. 경부고속철도 특정 구간의 자갈궤도 도상에서 측정한 탄성파 가진이력과 도상 응답을 FWI 기법에 적용하였으며, 그 결과 자갈도상과 강화노반의 경계면 위치와 진단탄성계수 분포를 추정하는데 FWI 기법을 적용할 수 있음을 확인하였다.

주요어 : 탄성파, Full-Waveform Inversion (FWI), 진단탄성계수, 자갈도상, 강화노반

1. 서 론

자갈궤도는 지속적인 열차 하중에 따른 도상자갈의 마모와 파쇄 등으로 인해 도상 층에 세립자가 축적되면서 배수불량, 궤도틀림, mud-pumping 등의 현상이 발생할 수 있다. 이에 대한 유지보수 대책을 수립하기 위해서는 자갈도상의 마모도, 자갈층의 깊이, 노반의 상태 등을 정확하게 파악하는 것이 중요하다. 이러한 목적으로 Ground Penetrating Radar (GPR), 콘관입시험, 표면파 스펙트럼 해석 등 다양한 기법들을 적용하고 있다. 그러나 이러한 기법들은 자갈도상이나 하부노반의 물성을 간접적이거나 경험적인 방법으로 추정하는 한계가 있다.

이 연구에서는 자갈궤도 탐사의 한 방법으로서 자갈도상과 강화노반을 통해 전파 및 반사하는 탄성파를 측정하고 이를 Full-Waveform Inversion (FWI) 기법을 이용해 자갈궤도의 각 층을 구분하고 영역의 물성치 분포를 추정할 수 있는 기법을 제시한다.

2. 본 론

2.1 탄성파 FWI 기법

진단파속도(c_s)나 Lamé 상수와 같은 탄성 매질의 기계적 물성 분포를 재구성하기 위한 FWI 문제는 탄성파의 지배방정식을 구속조건으로 하고 측정응답과 계산응답의 차이로 표현되는 목적함수를 최소화하는 최적화 문제로 정식화될 수 있다. 이는 PDE-constrained optimization problem 이며, 이 문제의 최적 해를 구하기 위해 다음과 같이 목적함수와 구속조건을 통합하는 라그랑지안

† 교신저자: 홍익대학교 공과대학 토목공학과 부교수 (jwkang@hongik.ac.kr)

* 홍익대학교 공과대학 토목공학과

** 한국철도기술연구원 첨단궤도토목연구본부

*** 한국교통대학교 교통대학원 교통시스템공학과

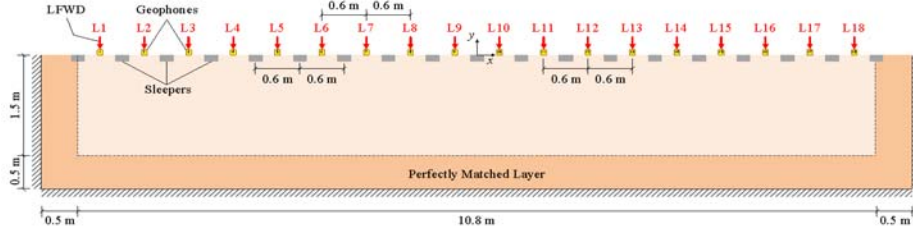


Fig. 1 Two-dimensional PML-truncated computational domain

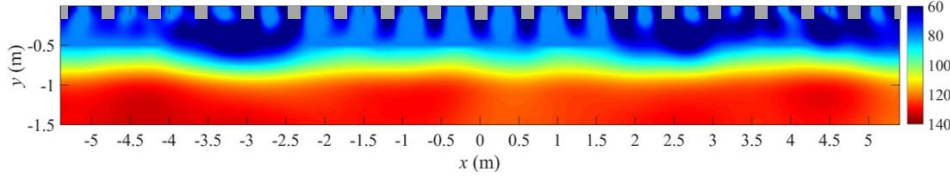


Fig. 2 Reconstructed shear modulus profile (MPa)

범함수(L)를 구성한다.

$$L = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{N_s} \int_0^T \int_{\Gamma_m} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_m)^2 \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_m) d\Gamma_m dt + R + \int_{\Omega} \int_0^T \lambda [\text{Elastic wave equations}] dt d\Omega$$

라그랑지안의 일차 최적화 조건을 이용해 계산 응답과 측정 응답의 차이가 충분히 감소될 때까지 전단탄성계수의 공간적 분포를 반복적으로 갱신하였다. FWI 해의 수렴성을 향상시키고 ill-posedness의 문제점을 완화시키기 위해 최적화 변수에 대한 정규화 기법을 도입하였으며, 이 연구에서는 Tikhonov (TN)와 Total Variation (TV) 정규화 기법을 사용하였다.

2.2 FWI 기법을 이용한 자갈궤도의 내부구조 추정

실측 데이터를 이용해 탄성과 FWI를 수행하기 위해 경부고속철도 자갈궤도에서 탄성과 실험을 수행하였다. Fig. 1은 자갈궤도 탄성과 해석영역과 하중 및 지오폰의 위치를 나타낸다. 자갈궤도 영역의 수평 길이는 10.8 m이고 수직 깊이는 1.5 m이며 PML의 두께는 0.5 m이다. LFWD에 의한 하중이력과 지오폰에 의한 측정 응답을 FWI 알고리즘에 적용하여 각 구간별 철도 궤도구조에 대해 자갈도상과 강화노반 층의 정성적 위치를 구분하고 기계적 물성 분포를 평가하여 Fig. 2에 나타냈다.

3. 결론

이 연구에서는 팽성 1코가, 옥천 금강교 시점, 아산 용와터널의 토공부에 대해 탄성과 측정 실험과 FWI 해석을 수행한 결과, Fig. 2와 같이 전단탄성계수가 자갈도상 층에서 약 60~80 MPa, 강화노반 층에서 약 120~140 MPa로 추정된다. 이는 자갈도상과 강화노반의 일반적인 기계적 물성치와 유사하다. 또한 FWI 해석으로부터 도출한 자갈도상 층의 전단파속도를 Spectral Analysis of Surface Waves (SASW) 기법을 이용해 계산한 전단파속도와 비교한 결과, 위치 별 변화의 경향이 유사함을 알 수 있었다. 탄성과 FWI를 이용하는 방법은 샘플링을 통해 자갈궤도의 상태를 파악하는 방법보다 빠르고 비용이 적게 들면서 보다 넓은 범위에서 궤도 하부에 대한 자료를 획득할 수 있으므로, 향후 자갈궤도 건전성 평가에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

후기

본 연구는 국토교통부 철도기술연구개발사업 (18RTRP-B065581-06)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Kang, J. W., & Kallivokas, L. F. (2011). The inverse medium problem in heterogeneous PML-truncated domains using scalar probing waves. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 200(1), 265-283.