

철도 전동 소음 관점의 궤도 진동 특성(II)

유 정 수

(울산대학교 조선해양공학부)

1. 머리말

필자는 지난 호 강좌에서 철도 전동 소음 해석에 사용되는 이론적 궤도 모델링 및 궤도의 진동 특성을 살펴보았다. 이론 해석과 실험으로 구한 레일의 진동 수준 비교를 통해 약 2~3 kHz 이하의 주파수 대역에서는 궤도를 탄성지지 구조를 가진 티모센코 보로 간주할 수 있음을 확인하였다.

그러나 레일의 단면이 변형하여 단면의 고차 변형 모드가 발생하는 약 1.5 kHz 이상의 주파수 대역에서는 더 이상 보 이론을 적용한 이론해석을 적용할 수 없으므로 수치해석을 이용한 궤도 진동 해석이 수행된다. 철도 궤도 진동을 해석하기 위한 수치 해석 기법으로는 기존의 유한요소법(finite element method)과 파동 해석을 기반으로 하는 도파관유한요소법(waveguide finite element method)을 들 수 있다⁽¹⁻³⁾. 이 중 이번 강좌에서는 파이프, 레일 등과 같이 단면의 형상이 길이 방향으로 일정하게 유지되는 도파관 구조물의 진동 해석에 효과적인 도파관유한요소법에 대해 소개하고 이를 국내 KTX 콘크리트 궤도에 적용해 구한 진동 해석 결과에 대해 소개한다.

2. 궤도 모델링

지난 호 강좌에서 확인한 것과 같이, 약 1~2 kHz 이상의 고주파수 대역에서는 궤도를 레일과

레일 패드만으로 구성된 1단 지지 구조로 가정할 수 있다. 수치 해석은 레일 단면의 고차 변형이 발생하는 약 2~3 kHz 이상의 고주파수 대역 해석을 위해 도입하므로 궤도를 레일과 레일패드의 1단 지지 구조로 모델링한다. 또한, 궤도의 이산 지지 구조는 pinned-pinned 주파수 부근에서만 영향을 미치므로 이번 강좌에서는 해석의 편의를 위해 궤도가 연속 지지 구조를 가진다고 가정하였다. 적용 예로서 KTX 콘크리트 도상 궤도를 대상으로 WFE 해석을 수행하였으며, 궤도 물성치는 참고문헌⁽⁴⁾에 제시된 값을 사용하였다.

3. 도파관유한요소 해석

도파관 구조물에서의 탄성과 전파 및 진동 해석은 도파관유한요소법(WFEM)을 이용해 효과적으로 해석할 수 있다. WFE 해석에서는 도파관 단면의 진동 모드가 길이 방향으로 전파한다고 가정하므로, 2차원 단면만을 유한요소 모델링하고 파동의 길이 방향 전파는 복소 지수 함수, e^{-jkx} 를 이용하여 표현한다. 여기서 x 는 도파관의 길이 방향 좌표축, k 는 도파관을 따라 전파하는 파동의 x 방향 파수(wavenumber)이다. WFE 방법은 구조물의 2차원 단면만을 유한요소 모델링하여 해석하므로 모델의 크기가 작고 연산 속도가 빠르다는 장점이 있다.

레일에 존재하는 파동의 전파 특성은 분산선도

기초강좌

(dispersion diagram)를 통해 파악할 수 있다. 그림 1에는 분산 선도를 구하기 위해 WFE 해석에 사용한 궤도 모델을 나타내었다. UIC60 레일은 좌우 대칭이므로 그림 1과 같이 레일의 대칭면을 기준으로 절반만 모델링하고 그 대칭면에 대칭/반대칭 경계 조건을 부여해 해석할 수 있다. 그림 2에는 그림 1의 모델로부터 구한 분산 선도를 나타내었다. 그림 2(a)를 보면 7 kHz 이하 대역에 네 개의 파동이 존재함을 알 수 있다. 5 kHz 이하에서 cut-on 되는 두 파동 S1과 S2는 순서대로 길이

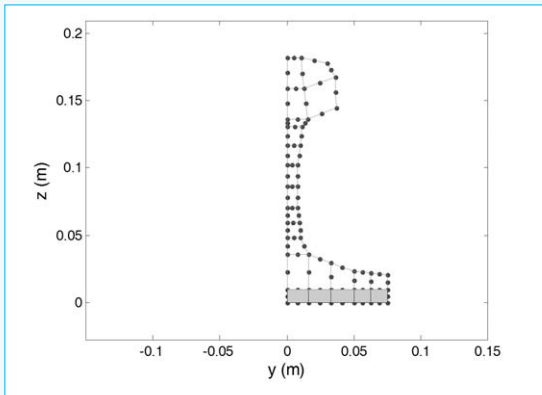
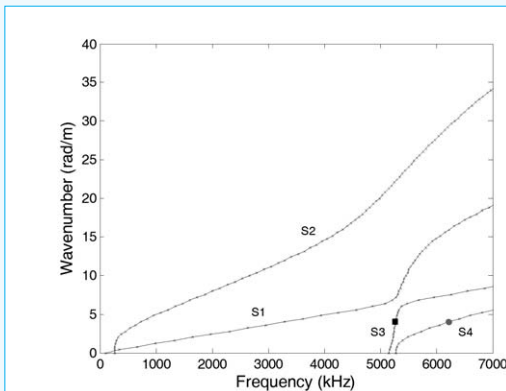


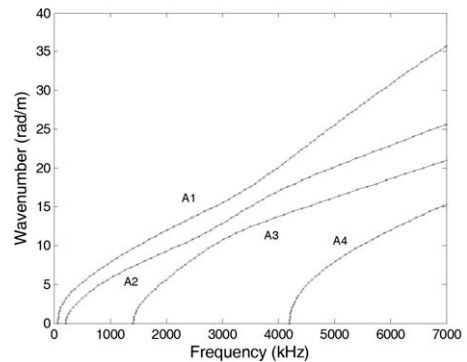
그림 1 WFE 해석을 위한 KTX 콘크리트 슬라브 궤도 단면 모델

방향 종파(longitudinal wave)와 수직 방향 굽힘파(vertical bending wave)이다. 약 5 kHz 부근에서 cut-on 되는 파동 S3은 레일 다리(railfoot)의 상하 굽힘 진동을 가지는 파동이며, S4는 길이 방향 2차 모드를 가지는 확장파이다. 두 파동 S3과 S4의 단면 변형 형태는 그림 3에 나타내었다. 그림 2(a)의 분산 선도로부터 약 5.2 kHz 부근에서 파동 S1과 S3의 분산 선이 교차하지 않고 두 파동의 변형 모드가 교환됨을 알 수 있다. 그림 2(b)의 반대칭 경계 조건에서 발생하는 파동의 경우, 네 파동 A1~A4의 단면 변형 형태는 그림 4에 나타내었다. 이들 네 파동은 순서대로 y 방향 굽힘파, 비틀림파(torsional wave), 그리고 1차, 2차 웹(web) 굽힘파이다. 그림 2(b)와 그림 4의 단면 형상으로부터 레일 단면의 고차 변형 모드가 약 1.5 kHz에서 cut-on 되는 것을 확인할 수 있다.

그림 5에는 WFE 방법으로 구한 가진점 모빌리티를 나타내었다. 하중이 레일 머리의 중앙에 작용한다고 가정하였으므로 그림 2(a)에 보인 네 파동만 발생한다. 그림 2(a)의 네 파동 중 두 개는 종파이므로 수직 방향 모빌리티에 거의 기여하지 않으며, 나머지 두 개의 굽힘파가 cut-on 되는



(a) 수직방향 굽힘파와 좌우 대칭 종파



(b) 수평방향 굽힘파, 좌우 반대칭 종파 그리고 비틀림파

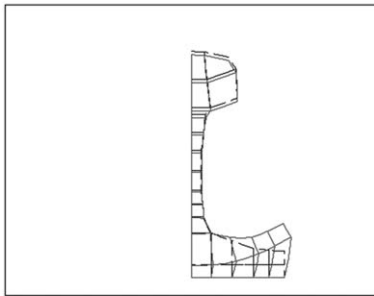
그림 2 WFE 해석으로 구한 KTX 콘크리트 슬라브 궤도를 따라 전파하는 파동의 분산선도

주파수인 약 300 Hz와 5 kHz 부근에서 모빌리티가 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 5 kHz에서 cut-on 되는 파동은 그림 3(a)의 레일 다리가 상하로 변형하는 굽힘파이다.

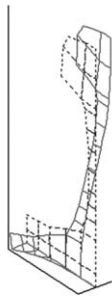
그림 5에는 그림 1의 궤도 모델에서 레일 머리의 중앙에 하중이 작용할 때 WFE 방법으로 구한

가진점 모빌리티를 이론 해석 및 측정 결과와 비교하여 나타내었다. 하중이 레일 머리의 중앙에 작용할 때는 단면의 변형이 좌우 대칭인 파동, 즉 그림 2(a)에 나타난 파동만이 발생하며, 레일의 수직 방향 굽힘파가 cut-on 되는 주파수에서 모빌리티가 높게 나타나고 있다. 그림 5의 비교를 통해 WFE 해석 결과가 이론 해석 및 측정치와 유사한 경향을 가짐을 알 수 있다. 특히 이론 해석 결과가 오차를 보이는 약 1.5 kHz 이상의 고주파수 대역에서 측정치와 수치 해석 결과가 유사한 것을 확인할 수 있다. 수치 해석 결과와 측정치 비교를 통해, 그림 5의 5 kHz 근방에서 모빌리티가 높게 나타나는 것은 레일 다리가 상하로 변형하는 굽힘파(그림 3(a))가 cut-on 되기 때문임을 알 수 있다. 또한, 레일패드의 이산 지지에 의한 효과는 약 900 Hz 부근의 pinned-pinned 주파수에서만 국한되어 발생함을 확인할 수 있다.

그림 6에는 그림 1의 궤도 모델에 대해 구한 파동의 감쇠율을 나타내었다. 그림 2(a)의 파동 S1은 종파이므로 레일의 수직 방향 응답에 크게 기여하지 못하며 수직 방향 굽힘파인 파동 S2가 레일의 수직 방향 진동에 지배적으로 작용한다. 그림 6은 파동 S2의 감쇠율과 KTX 콘크리트 도상 궤도의 감쇠율 측정치를 비교하여 나타내었다. 일반적인 레일의 감쇠 손실 계수 $\eta=0.02$ 의 경우 수직 방향 굽힘파(S2)는 약 1 kHz 부근에서 감쇠

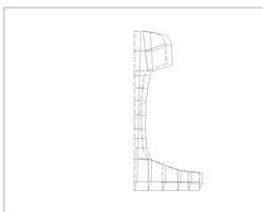


(a) 5278 Hz, 3.8 rad./sec. (사각형 기호)

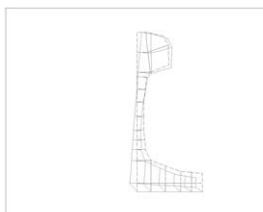


(b) 6136 Hz, 3.8 rad./sec. (원형 기호)

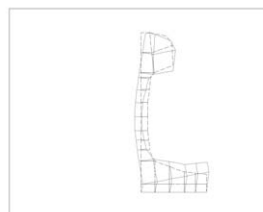
그림 3 그림 2(a)에 기호로 표시한 두 파동의 단면 변형 형태



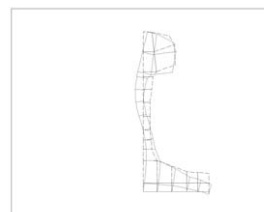
(a) 91 Hz



(b) 257 Hz



(c) 1442 Hz



(d) 4208 Hz

그림 4 반대칭 경계 조건에서 발생하는 파동의 cut-on ($k=0$) 시 단면 변형 형태

기초강좌

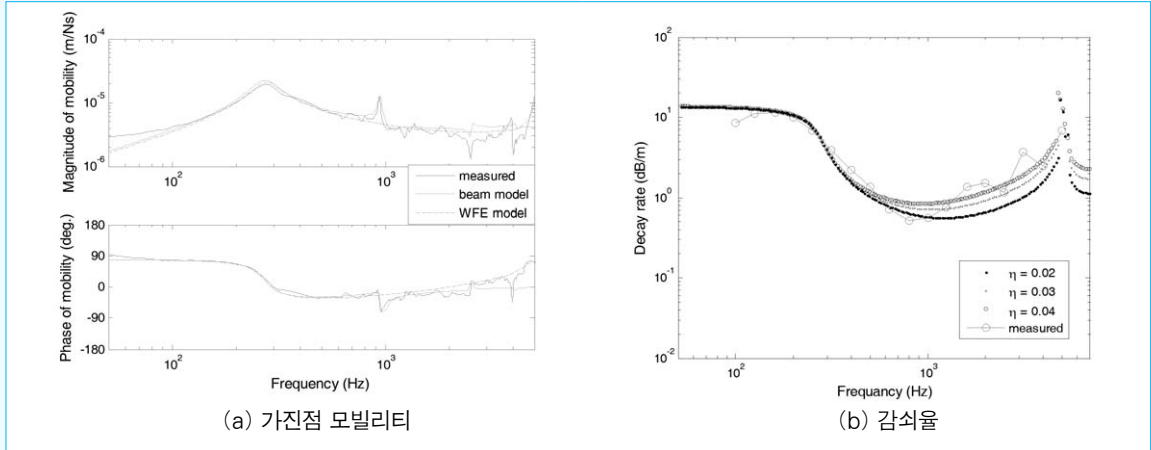


그림 5 KTX 콘크리트 슬라브 궤도에 대한 측정치와 WFE 해석치 비교

율이 약 0.56 dB/m 정도로 가장 낮은 값을 보이며, 그 이후로는 주파수가 증가함에 따라 감쇠율이 증가하는 경향을 보이고 있다. 특히, 약 5 kHz 부근에서 수직 방향 굽힘파의 감쇠율이 크게 증가하는데 이것은 레일 다리가 변형하는 파동이 cut-on 되기 때문임을 그림 2(a)와 그림 3으로부터 알 수 있다.

또한 레일의 댐핑을 증가시켜 가면서 감쇠율을 WFE 해석하고 그림 6에서 측정치와 비교하였다. 그림 6의 해석 결과로부터 고주파수 대역의 감쇠율이 레일의 댐핑에 의해 변화함을 확인할 수 있으며, 측정치와 유사한 감쇠율이 얻어지는 레일의 감쇠 손실 계수는 약 0.04 정도로 예측되었다.

4. 맺음말

이번 두 번째 강좌에서는 철도 전동 소음의 관점에서 수치적인 궤도 모델링 및 레일 진동 특성을 살펴보았다. 수치해석 방법으로 도파관유한요소법을 소개하였으며, KTX 콘크리트 궤도에 대한 측정치와의 비교를 통해 WFE 방법이 레일 진동 해석에 적용 가능성을 기술하였다. 이 강좌

에서 소개한 WFE 방법은 경계요소(boundary element)와 연성하여 레일의 방사 소음 해석 또는 지반 진동의 해석에도 사용되고 있다. [KSNVE](#)

참고문헌

- (1) Nilsson, C.-M., 2004, Waveguide Finite Element Applied on a Car Tyre, PhD Thesis, MWL, KTH, Stockholm.
- (2) Finnveden, S., Nilsson, C.-M., 2007, Input Power to Waveguides Calculated by a Finite Element Method, Journal of Sound and Vibration, Vol. 305, No. 4-5, pp. 641~658.
- (3) Ryue, J., Thompson, D. J., White, P. R., Thompson, D. R., 2008, Investigation of Propagating Wave Types in Railway Tracks at High Frequencies, Journal of Sound and Vibration, Vol. 315, No. 1-2, pp. 157~175.
- (4) 유정수, 장승호, 2013, 국내 고속 철도 콘크리트 슬라브 궤도의 진동 및 방사 소음 해석, 한국소음진동공학회논문집, 제 23권, 제 7호, pp. 605~616.