

## 매립형 궤도의 소음/진동 해석에 대한 연구

### A Study about Noise/Vibration Analysis of Embedded Rail Track

김정훈\*, 김대혁\*, 강윤석\*\*, 강영종\*†

Jeong-Hun Kim\*, Dae-Hyeok Kim\*, Yun-Suk Kang\*\*, Young-Jong Kang\*†

**Abstract** According to increase of the interest about environmental problem nowadays, social requirements about environmental friendliness rapidly increase in the railway. Along with changes, these have increased such as the civil complaint, conflict and enforcement of environmental standard. An embedded rail track among track systems in the railway has a very superior performance about noise and vibration more than an existing track. However, the noise/vibration research of this track is significantly inadequate in Korea. Therefore, development of the noise/vibration core technology about this track is needed. Therefore, a study about noise/vibration analysis in the embedded rail track is performed and analyzed together in this study. Also, the analysis results were compared and analyzed with the existing track.

**Keywords** : Embedded rail track, Noise/vibration analysis, environmental friendliness

**초 록** 최근 국민 소득의 증가와 생활수준의 향상으로 인해 환경 문제에 대한 관심이 증대됨에 따라 철도의 친환경성에 대한 사회적 요구가 점차 급증하고 있다. 이러한 사회적 변화에 따라 민원 및 분쟁이 증가하고 있으며 환경기준 또한 강화되어 소음/진동저감 대책이 시급한 상황이다. 그 중 매립형 궤도는 기존 궤도보다 소음/진동 성능이 매우 우수한 신공법 궤도지만 국내의 경우, 매립형 궤도의 소음/진동에 대한 연구는 상당히 미흡한 실정이다. 그러므로 매립형 궤도의 신뢰성 및 타당성을 확보하기 위해서는 소음/진동의 해석적 연구가 반드시 필요하다. 따라서 본 연구에서는 매립형 궤도에 대한 소음/진동 해석을 수행하여 그 결과를 분석하였다. 또한, 기존 궤도에 대한 소음/진동 해석 결과와 비교 및 평가를 수행하였다.

**주요어** : 매립형 궤도, 소음/진동 해석, 친환경성

## 1. 서 론

오늘날 환경오염은 생활의 편의를 위한 문명의 부산물로 지구촌 곳곳에서 인간의 삶의 질을 저해하는 요인으로 등장하여 심각한 사회문제를 야기시키고 있다. 그 중 소음/진동 공해는 일상생활 중에서 가장 빈번히 접하는 환경오염으로 인간의 심리적, 정신적, 신체적 피로와 스트레스뿐만 아니라 궁극적으로 구조물의 안전성 및 사용성의 저하를 가중시키고 있다. 따라서, 소음/진동의 저감을 통한 정온한 생활환경 유지는 급속히 고밀도화

† 교신저자: 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부(yjkang@korea.ac.kr)

\* 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부

\*\* 한국철도기술연구원 첨단인프라연구단

되고 있는 도시에서 시급히 해결해야 할 과제로 대두되고 있다. 이중 교통수단에 의한 소음/진동의 저감은 이용하는 승객이나 주변 주민에게 미치는 피해뿐만 아니라 안정적인 도시기능의 유지 및 소모적인 민원 방지를 위하여 필수적인 요소이다. 또한, 현재 궤도 설계 시 철도설계기준에 의해 궤도의 안전성 및 사용성에 대한 설계를 수행하고 있으나 궤도의 소음/진동에 관련된 환경성에 대한 검토는 미비한 실정이며, 궤도의 소음/진동에 대한 가이드라인의 부족과 해석의 어려움으로 측정에 의존하고 있다. 따라서 설계 단계에서 궤도의 안전성 및 사용성과 더불어 소음/진동의 해석과 예측이 가능하다면 더욱 효율적이며 합리적인 설계가 가능할 것으로 판단되며, 해석을 통해 미리 평가한 후에 실측이 병행된다면 보다 많은 비용과 시간을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

철도 궤도타입 중 레일 매립형은 기존 궤도보다 소음/진동 성능이 우수하면서도 효율적인 도심구간 저심도 철도건설을 위한 신공법 궤도이다. 이러한 매립형 궤도의 신뢰성 및 타당성을 확보하기 위해서는 소음/진동의 해석적 연구가 반드시 이루어져야 할 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 철도 소음/진동의 핵심기술 개발을 위하여 매립형 궤도의 소음/진동 전용 해석프로그램(KU-NVAP)을 활용하여 기존 콘크리트 궤도와 매립형 궤도와의 해석결과에 대해 비교 및 분석을 수행하였다. 그리고 매립형 궤도의 다방향 연속으로 지지되어있는 패드의 특성을 살펴보기 위해 댐핑에 대한 매개변수 해석을 수행하여 그 결과를 분석하였다.

철도 소음에 관한 해석적 연구로써는 Paul J. Remington에 의해 휠과 레일 표면조도에 대한 소음의 이론적 해석 모델이 정립되었으며[1], 이 해석 모델은 D.J. Thompson에 의해 더욱 확장 및 발전되었다[2,3,4]. 또한, 진동의 해석적 연구로써 일본의 Sato, Yoshihiko는 궤도의 고주파 진동 해석에 대한 연구를 수행하였으며[5], 국내에서의 해석적 연구는 한국철도기술연구원의 양신추 등에 의해 연구가 수행되었다[6]. 이들 연구에서 궤도시스템의 감쇠를 대부분 구조(이력)감쇠를 적용하였으나, 본 연구는 점성감쇠를 적용한 해석을 수행하였으며 그 결과를 분석하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 궤도 소음/진동 해석 알고리즘

철도 궤도에 대한 소음/진동 해석적 연구의 기본 이론은 휠과 레일의 리셉턴스 방법(Receptance Method)으로 진동을 해석하는 Paul J. Remington and D.J. Thompson의 이론을 근간으로 한다. 리셉턴스 방법이란 구조물의 시간 및 공간 영역에서의 변위-힘 관계식으로부터 주파수 응답함수를 직접 얻는 방법이다. 즉, 기존 구조물의 주파수 응답함수와 구조물의 질량, 감쇠 그리고 강성을 이용하여 주파수 응답함수를 구하는 문제인 진동수 영역 방법(주파수 해석)으로 궤도의 동적 특성을 알 수 있다. 또한, 지금까지의 선행 연구 결과들을 살펴보면, 열차의 이동하중은 저주파 진동(20~80Hz)을 유발시키며 레일의 조도성분하중은 고주파 진동(100~1000Hz)을 유발시키는 것으로 나타났다. 이 중 궤도시스템에서의 소음은 주로 고주파 진동에 의한 영향으로 발생되었으며 해석 절차는 Fig. 1과 같

이 선행연구와 유사하다. 이는 레일의 조도성분하중에 의해 유발된 휠과 레일의 상호작용력(Contact forces)을 구한 뒤, 이로부터 궤도시스템의 동적 응답(고주파 소음/진동)을 구해서 해석하는 방법을 사용하였다.

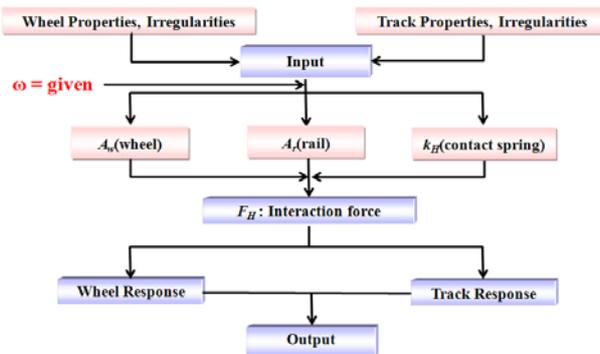


Fig. 1 휠과 레일 및 침목의 소음/진동 해석 알고리즘

휠과 레일의 수학적 해석모델은 Fig. 2와 같으며, 해석에 사용될 궤도 모형은 연속지지 모델로 실제로 이산되어 있는 침목을 연속 분포된 것으로 가정하였으며, 레일은 질량과 강성을 가진 보로써, 침목은 휨강성이 없는 연속 강체로 모형화하였다. 또한, 이는 모두 중방향으로 궤도조건이 동일한 경우이며, 휠은 2중 질량으로 모형화하였다. 이러한 궤도의 수학적 해석 모델은 자갈도상 궤도 및 콘크리트 도상 궤도에 대해 모두 적용 가능하다.

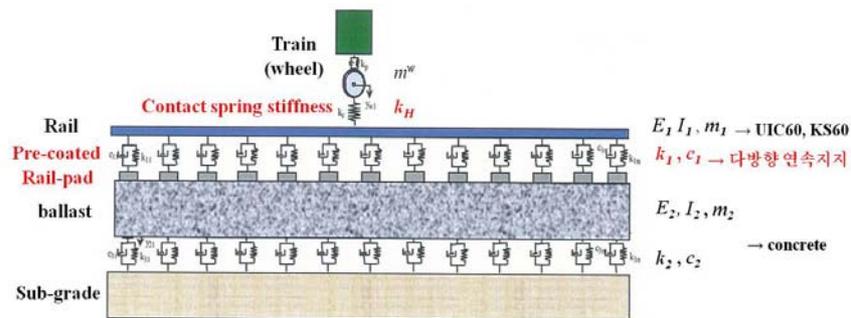


Fig. 2 휠과 레일의 수치해석 모델

## 2.2 휠과 레일에 대한 소음/진동 전용 해석 프로그램

본 연구에서는 궤도 소음/진동의 해석적 연구를 수행하기 위하여 2.1절에서 언급한 해석 알고리즘을 바탕으로한 전용 해석 프로그램(KU-NVAP)을 활용하였으며, 이에 대한 설명은 다음과 같다.

### (1) 프로그램명

- KU-NVAP (Korea University Noise and Vibration Analysis Program)

### (2) 프로그램 언어

- MATLAB 2007

### (3) 해석 모델

- 휠 : 1중 질량 또는 2중 질량
- 궤도 : 2중 보 모델 (콘크리트 궤도 또는 자갈도상 궤도)
- 감쇠 : 구조(Hysteretic) 또는 점성(Viscous) 감쇠

### 2.3 매립형 궤도의 휠과 레일에 대한 소음/진동 해석

본 연구에서 수행된 프리코티드(Pre-coated) 타입 궤도는 Fig. 3과 같은 매립형 궤도구조로서 다방향 연속지지형 수직고정 체결장치를 사용한 소음/진동 저감형 궤도구조이다. 수치해석 모델의 경우, 연속체로 모형화 하였으므로 이에 대한 적용이 가능하다. 궤도타입은 콘크리트 도상이며, 이는 Fig. 2와 같이 이동하중을 재하한 이중 보 모델이다. 휠의 경우는 2중 질량으로 모형화하였으며, 접촉강성은 선형화한 강성을 사용하였다. 그리고 궤도 감쇠의 경우, 점성(Viscous) 감쇠를 적용하였으며, 소음/진동 해석에 대한 입력데이터는 Table 1과 같다. 또한, 매립형 궤도의 다방향 연속으로 지지되어있는 패드의 특성을 살펴보기 위해 댐핑에 대한 매개변수는 Table 2와 같이 설정하였다.

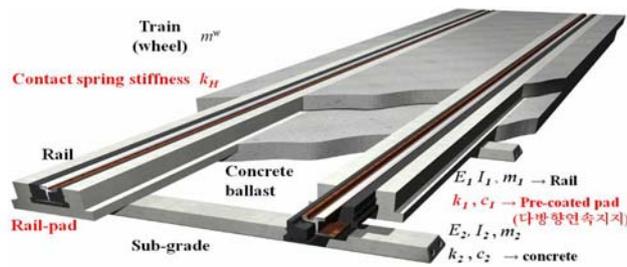


Fig 3. 매립형 궤도의 해석 모델

Table 1 Input data

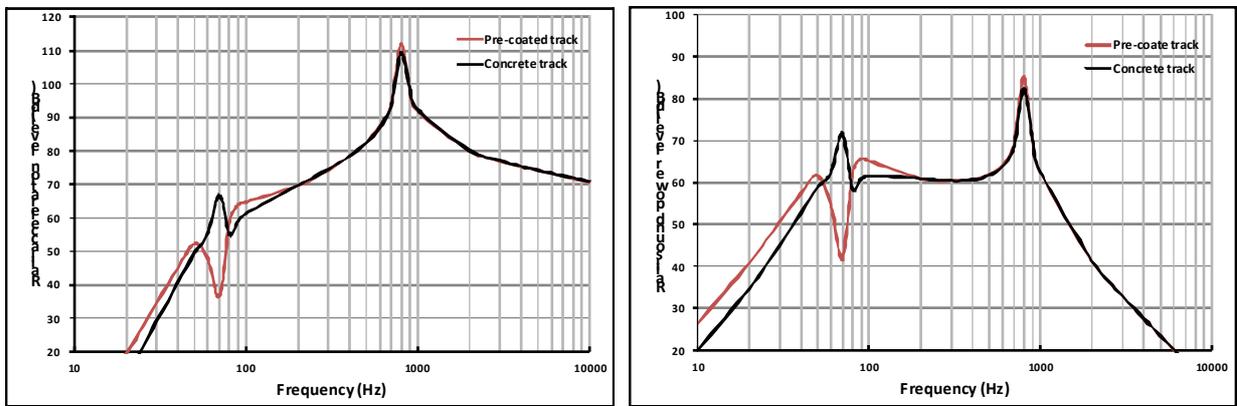
Rail	$E_1 I_1 = 6.42 \times 10^3 \text{ kN}\cdot\text{m}^2$
	$m_1 = 0.0615 \text{ kN/m}^2$
Pre-coated & rail-pad	$k_1 = 2.594 \times 10^4 \text{ kN/m}$ (Pre-coated track)
	$k_1 = 8 \times 10^4 \text{ kN/m}$ (Concrete track)
	$c_1 = 20 \text{ kNs/m}$
Concrete Ballast	$E_2 = 5 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$
	$I_2 = 7 \times 10^3 \text{ m}^4$
	$m_2 = 0.5 \text{ kN/m}^2$
	$k_2 = 1 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$
	$c_2 = 98 \text{ kNs/m}^2$
Wheel	$m^w = 1.2 \text{ kN/m}$
	$M^t = 0.6122 \text{ kN/m}$
	$k_{sp} = 1.252 \times 10^3 \text{ kN/m}$
	$c_{sp} = 16 \text{ kNs/m}$
Hertzian spring	$k_H = 1.6 \times 10^6 \text{ kN/m}$

Table 2 Damping Parameter

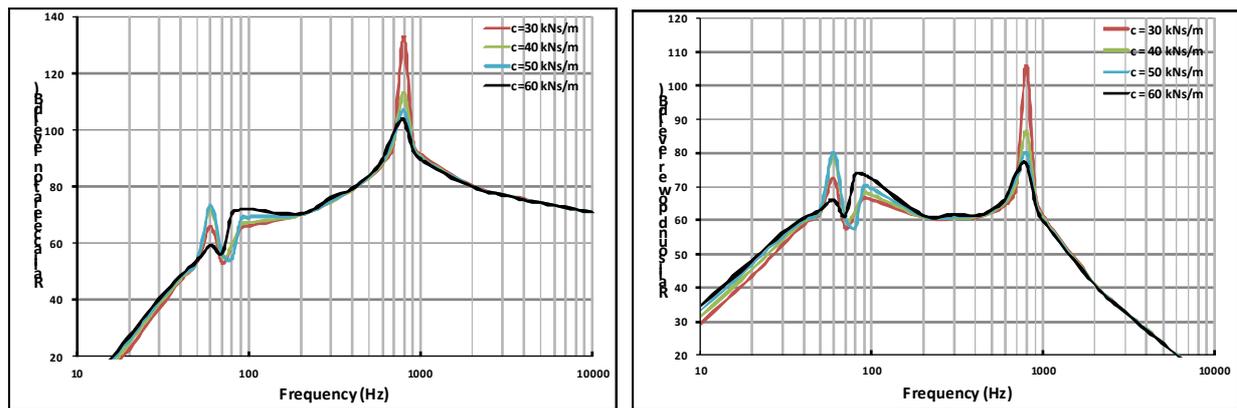
Pre-coated & rail-pad (Parameter)	$k_1 = 2.594 \times 10^4 \text{ kN/m}$ (Pre-coated track)
	$c_1 = 30 \text{ kNs/m}$
	$c_1 = 40 \text{ kNs/m}$
	$c_1 = 50 \text{ kNs/m}$
	$c_1 = 60 \text{ kNs/m}$

Fig. 4는 기존 콘크리트 궤도와 매립형 궤도의 패드 강성에 따른 해석결과를 나타내고 있다. 매립형 궤도의 경우, 일반 콘크리트 궤도보다 작은 강성으로 인해 저주파 탁월주파수 대역에서 레일 가속도 레벨이 대략 15dB, 레일 음향파워 레벨이 대략 10dB 작게 나타나 기존 궤도보다 소음/진동 성능이 우수한 것으로 나타났다.

매립형 궤도의 다방향 연속으로 지지되어 있는 패드의 특성을 살펴보기 위해 댐핑에 대한 매개변수 해석을 수행한 결과는 Fig. 5와 같다. 매립형 궤도의 댐핑 영향에 대한 해석을 수행한 결과, 저주파 및 고주파 탁월 주파수 대역 모두 댐핑의 값이 증가됨에 따라 레벨이 감소하는 경향을 보이지만 궤도의 안전성이 확보될 수 있는 범위 내에서 적절하게 반영해야 할 것으로 판단된다. 그리고 패드의 강성 보다는 댐핑에 따라 저주파 및 고주파 탁월 주파수 대역은 매우 민감한 반응을 보였다.



(a) 레일가속도에 대한 1/3 옥타브밴드 레벨 (b)레일 음향파위에 대한 1/3 옥타브밴드 레벨  
Fig. 4 매립형 궤도의 소음진동 해석 결과 (패드 강성( $k_1$ )에 대한 영향)



(a) 레일가속도에 대한 1/3 옥타브밴드 레벨 (b)레일 음향파위에 대한 1/3 옥타브밴드 레벨  
Fig. 5 매립형 궤도의 소음진동 해석 결과 (댐핑에 대한 영향)

### 3. 결론

본 연구는 철도 소음/진동의 핵심기술 개발을 위한 매립형 궤도의 소음/진동에 대한 해석적 연구이며, 소음/진동 전용 해석프로그램(KU-NVAP)을 활용하여 기존 콘크리트 궤도와 매립형 궤도와의 해석결과에 대해 비교 및 분석을 수행하였다. 그리고 매립형 궤도의 다방향 연속으로 지지되어 있는 패드의 특성을 살펴보기 위해 댐핑에 대한 매개변수 해석을 수행하여 그 결과를 분석하였다. 매립형 궤도의 경우, 일반 콘크리트 궤도보다 작은 강성으로 인해 저주파 탁월주파수 대역에서 기존 궤도보다 소음/진동 성능이 우수한 것으로 나타났다. 또한, 저주파 및 고주파 탁월 주파수 대역 모두 댐핑의 값이 증가됨에 따라 레벨이 감소하는 경향으로 나타났으며, 패드의 강성 보다는 댐핑에 따라 저주파 및 고주파 탁월 주파수 대역은 매우 민감한 반응을 보였다. 본 연구를 통해 추후 매립형 궤도 설계 시 소음/진동에 대한 가이드 라인을 구축하는데 있어서 해석적인 방법 및 기초 자료로써 활용이 가능하며, 앞으로 더욱 지속적인 철도 인프라 소음/진동 연구를 통해 실측과 동일한 해석 결과를 산출하기 위해서 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 과제는 한국철도기술연구원에서 수행한 주요사업인 ‘저심도 철도시스템 핵심기술 개발’의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

- [1] Paul J. Remington (1987) Wheel/rail rolling noise, I: Theoretical analysis, Journal of the Acoustical Society of America
- [2] D. J. Thompson (1993) Wheel-rail noise generation, Journal of Sound and Vibration
- [3] D. J. Thompson (1996) Experimental validation of the TWINS prediction program for rolling noise, Journal of Sound and Vibration
- [4] D. J. Thompson (2000) A review of the modeling of wheel/rail noise generation, Journal of Sound and Vibration
- [5] Sato, Yoshihiko. (1976) Railway technical research report - Study on high frequency vibrations in track, The Railway Technical Research Institute(Japan)
- [6] 양신추 (2002) 콘크리트 궤도 유형별 진동성능평가에 대한 연구, 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 911-916.
- [7] 김정훈 (2012) 철도 궤도의 진동 해석에 대한 연구, 한국철도학회 춘계학술대회 논문집
- [8] Coenraad Esveld (2001) Modern Railway Track, Second Edition.