

# 초고속대역에서 노반의 전단파속도에 의해 결정되는 콘크리트궤도시스템의 시간영역 공진

Time domain resonance effect of concrete track system

be decided by the shear wave velocity of trackbed in ultra high-speed band

이일화<sup>†</sup>, 민경찬\* 김기재\* 이성진\*\*

Il-Wha Lee<sup>†</sup>, Kyung-Chan Min\* Ki-Ja Kim\* Sung-Jin Lee\*\*

**Abstract** he critical velocity effect at railway trackbed means the amplification of vibration energy when the train running speed and group velocity of ground surface wave band are superimposed. It is called a pseudo-resonance phenomenon of time domain. In the past, it is not issued because the train running speed is low and the ground group velocity is higher. But the ultra-highspeed train is introduced, it is reported that critical velocity affect to track irregularity. Until now, only theoretical analysis is performed because of the complexity for formation process. However it need to reasonable consideration similar with actual track and trackbed conditions. In this paper, the finite element analysis to verify the critical velocity effect is performed considering the each trackbed supporting stiffness (30~200MPa) and train running speed (100~800km/h). As a result, the deformation amplification is verified which is happened by the critical velocity effect. In case of the trackbed stiffness is 131MPa and train running speed is 600km/h, the vertical vibration velocity is amplified up to 4.1 times.

**Keywords** : Critical velocity, Supporting stiffness, Dynamic response, Wave propagation

**초 록** 철도노반에서 임계속도효과는 시간영역에서의 유사-공진현상으로서 차량의 주행속도와 노반표면파의 군속도대역이 중첩되면서 에너지가 증폭되는 현상을 의미한다. 과거에는 열차의 주행속도가 낮고 지반의 군속도가 높았기 때문에 문제가 되지 않았으나, 열차속도가 초고속화되면서 임계속도효과가 궤도틀림에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. 현재까지는 임계속도에 대하여 주로 이론적인 분석만 제시되었는데 실질적인 임계속도효과를 효율적으로 평가하기 위해서는 궤도 및 노반의 지지강성을 현장조건과 유사하게 고려하는 것이 필요하다. 그래서 본 논문에서는 유한요소해석을 이용하여 궤도 및 노반의 지지조건을 고려한 임계속도해석을 수행하였다. 콘크리트궤도를 대상으로 노반의 강성은 30~200MPa범위로 하였으며 열차주행속도는 100~800km/h를 대상으로 임계속도영향을 평가하였다. 해석결과, 임계속도효과를 확인하였는데 이상적인 해석조건하에서 노반강성이 131MPa이고 열차주행속도가 600km/h인 경우, 최대 4.1배까지 진동속도가 증폭되는 것으로 나타났다.

**주요어** : 임계속도, 지지강성, 동적응답, 파전파

## 1. 서 론

열차의 주행속도가 노반의 특정 표면파속도에 도달하면 진동에너지가 크게 증폭한다. 이러한 현상을 임계속도효과(Critical speed effect)라고 하는데, 철도노반에서는 차량의 주행속도와 노반표면파의 군속도대역이 중첩되면서 에너지가 증폭되는 현상을 뜻하며, 일종의 시간영역 유사-공진현상으로 이해할 수 있다.

<sup>†</sup> 교신저자: 한국철도기술연구원 첨단인프라연구단 책임연구원([iwlce@krii.re.kr](mailto:iwlce@krii.re.kr))

\* 한국철도기술연구원 첨단인프라연구단 연구원

\*\* 한국철도기술연구원 첨단인프라연구단 선임연구원

임계속도효과로 인하여 발생한 변형은 매우 클 수 있기 때문에 열차주행과 구조물에 위험요소로 작용하며 잠재적으로는 궤도유지보수에 악영향을 미친다.

노반의 임계속도효과는 과거에는 이론적으로만 존재하는 현상이었으나, 열차속도의 고속화로 인하여 실제 철도노반에서 발생하는 것으로 보고되고 있기 때문에 500km/h 이상의 초고속대역에서는 안정성 확보 등을 위해서는 임계속도효과에 대한 검토가 반드시 필요하다[1,2,3,4,5]. 임계속도해석에 대한 접근방법은 이론적 방법과 수치적 방법이 있는데, 이론적인 방법[3]은 복잡한 궤도조건 및 상호작용을 고려하기 어렵기 때문에 실질적인 임계속도영향을 평가하기 위해서는 궤도 및 노반조건을 현장조건과 유사하게 고려한 수치해석적 평가가 필요하다. 그래서 본 논문에서는 유한요소해석을 사용하여 콘크리트궤도를 대상으로 궤도/노반의 지지강성조건을 고려한 임계속도해석을 수행하고자 하였다

## 2. 임계속도효과(Critical velocity effect)

임계속도효과는 노반의 임계속도대역이 열차의 주행속도대역과 중첩되면서 에너지가 증폭되어 노반에 과도한 변형을 유발하는 것이다. 임계속도효과와 유사한 현상으로 비행기의 소닉붐 (Sonic boom) 현상을 예로 들 수 있다. 소닉붐은 비행기가 초음속을 통과하는 순간에 발생하며 이때 발생하는 에너지는 200dB 이상의 진동을 유발한다. 일반적으로 공기 중 음속은 340m/sec로서 비행기의 앞쪽에서 압축된 음속의 배리어를 통과하면서 발생한다.

고속의 교통하중이 통과하는 철도노반에서도 이와 유사한 현상이 발생하는데 노반에서의 임계속도는 열차하중에 의해서 발생하는 노반 표면파의 전파속도를 의미한다. 표면파의 주요 성분은 레일리파이며 엄밀히 말하면 레일리파의 군속도(Group velocity)라고 할 수 있다 [7,8]. 노반에서의 임계속도는 노반조건이 동일하다면 항상 일정한 값을 가지게 되지만, 실제 노반의 임계속도는 일정하지 않고 항상 변화한다. 그 이유는 지반의 지형 및 지질조건이 연속적으로 변화하고 노반의 형상 및 재료의 특성도 다르기 때문이다.

## 3. 임계속도효과 평가를 위한 유한요소해석 조건

궤도지지강성조건에 따른 노반의 임계속도효과가 노반변형에 미치는 영향을 파악하기 위한 2차원 선형탄성 유한요소해석을 수행하였다. 임계속도는 궤도 및 노반의 강성과 열차속도에 종속적이기 때문에 노반층의 강성(30~200MPa)별 및 열차의 주행속도(100~800km/h)별 시간영역에서의 진동에너지 특성 및 주파수영역에서의 응답특성 등을 검토하였다. 해석의 정확성을 향상시키기 위하여 실제 열차바퀴를 실물크기(78cm)로 모델링하여 레일에 8.75kN의 수직하중을 작용시키면서 이동시켰다. 하중 재하는 실제 축중조건을 그대로 반영하는 것이 타당하지만, 다중재하에 따른 반사파나 굴절파의 영향을 배제하고 열차의 대차간격, 바퀴간격 및 궤도침목의 간격 등으로 인한 주파수특성을 배제하기 위하여 하나의 바퀴만 사용하였다. 해석모델의 크기는 10×60m이고 요소의 크기는 10×10cm이다. 총 해석시간은 1.2초이며

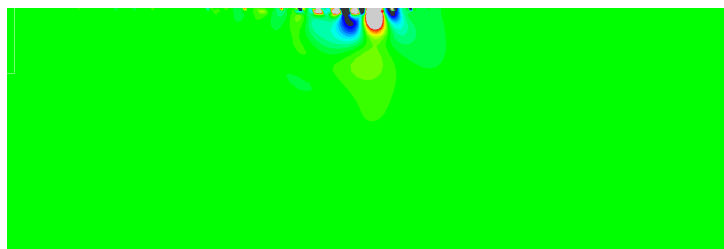
적분시간간격은 노반의 강성에 따라  $1 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-4}$ 초이다. 궤도는 경부고속철도 궤도 및 노반구조를 사용하여 레일(rail), 패드(pad), 침목(sleeper), 도상(ballast & concrete), 강화노반(reinforced trackbed), 노반(trackbed), 연암층(soft rock)으로 구성하였다. 해석단면의 양쪽 측면과 하부 경계는 응력파의 반사 및 굴절을 제거하기 위하여 무한 요소를 적용하였다. 레일과 침목을 연결하는 패드의 스프링계수는  $4 \times 10^4 \text{kN/m}$ 이다. 해석에 사용된 궤도노반의 상세한 물성은 Table 1에 정리하였다.

**Table 1. Analysis parameters**

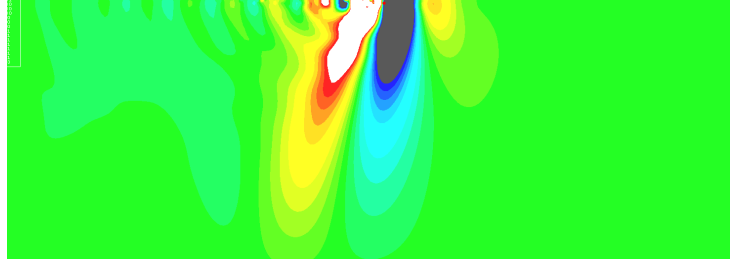
Track component	Elastic modulus(N/m <sup>2</sup> )	Unit weight (N/m <sup>3</sup> )	Poisson's ratio
Rail	$2.1 \times 10^{11}$	78,500	0.30
Concrete slab (TCL, HSB)	$3.0 \times 10^9$	25,000	0.21
Reinforced trackbed	$8.0 \times 10^7$	21,000	0.21
Trackbed	$6 \times 10^6 \sim 300 \times 10^6$	18,000	0.33
Soft rock	$1.0 \times 10^9$	22,000	0.21

#### 4. 임계속도효과로 인한 진동의 증폭

레일리와 균속도 영향에 따른 노반의 변형응답을 검토하기 위하여 상대적으로 증폭이 큰 자갈궤도를 대상으로 임계속도대역과 비임계속도대역에서의 수직진동가속도의 응답특성을 비교하였다. 자갈궤도의 경우, 임계속도대역에서 최대 50배까지 증폭되는 것으로 보고되었다 [8]. Fig. 1 (a)는 비임계속도영역의 수직진동가속도로서 열차 주행속도가 300km/h로 일정하고 노반에서의 레일리와 균속도가 140m/sec(500km/h)로서 균속도가 열차속도를 초과하는 경우의 수직진동가속도의 응답특성이다. Fig. 1 (b)는 임계속도영역에서의 응답특성으로서 레일리와 균속도가 83.3m/sec (300km/h)로 열차주행속도와 동일한 대역에 존재하는 경우이다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 열차의 운행속도와 노반의 레일리와 균속도가 동일대역에 존재하게 되면 진동에너지의 영향범위와 크기가 매우 크게 증폭되는 것을 확인할 수 있다. 본 해석에서는 하나의 축만 재하하는 것으로 해석하였기 때문에 열차하중조건에 따른 재하특성이 나타나지 않지만, 실제 하중조건하에서는 변형이 상당히 복잡한 형태로 나타날 것으로 예상된다.



(a) Vertical acceleration of non-critical speed band



(b) Vertical acceleration of critical speed band

Fig. 1 Response of vertical acceleration as group velocity of Rayleigh wave

## 5. 콘크리트궤도에서의 임계속도 효과

600km/h급 초고속철도의 주행에 의한 노반의 임계속도효과를 평가하기 위하여 3절의 해석 조건하에서 시간 및 주파수영역 해석을 수행하였다. 초고속대역에서의 궤도는 콘크리트궤도 형식으로 적용될 것이 예상되기 때문에 현재 경부고속철도에 적용한 RHEDA 2000 모델을 사용하였다. 해석내용은 궤도구조, 지반강성, 주행속도를 대상으로 임계속도효과를 검증하였다.

### 5.1 노반강성 및 주행속도별 임계속도효과

Fig. 2는 콘크리트궤도를 대상으로 노반의 강성 및 열차주행속도별 임계속도효과를 분석하기 위하여 노반층 내부(심도 1.5m)에서 속도응답특성을 나타낸 것이다. 열차의 주행속도는 100 ~ 800km/h이며 노반의 강성(탄성계수)은 30 ~ 200MPa 범위이다.

Fig. 2에서 노반의 강성(탄성계수)가 30MPa인 경우에는 속도가 증가할수록 지반의 진동속도는 증가하여 300km/h일 때 최대값을 나타내며, 그 이후에는 감소하는 경향을 나타낸다. 주행속도 300km/h인 경우에는 33MPa이 임계속도이다. 노반의 강성이 131MPa인 경우에는 속도가 증가하면 300km/h까지는 선형적인 증가를 보인다가 400km/h 이상에서는 상대적으로 크게 증폭하여 600km/h일 때 최대값을 나타낸다. 주행속도가 600km/h 인 경우, 노반의 임계속도효과가 나타나는 이론적인 노반의 강성은 131MPa이다. 노반의 강성이 131MPa인 경우, 600km/h주행속도에서 임계속도효과가 발생하며 300km/h대비 진동속도가 4.1배 증가하는 것으로 나타났으며 속도가 800km/h 까지 증가하면 진동속도는 감소하는 경향을 나타낸다. 속도대역별 지반속도의 증가 및 감소경향은 전형적인 임계속도효과의 영향을 보이고 있다. 콘크리트궤도의 경우에서도 자갈궤도와 유사한 경향을 나타내지만 자갈궤도에서의 임계속도효과에 의한 진동증폭량의 20% 수준으로 나타났다[8]. 이는 콘크리트궤도의 높은 강성과 전면 지지방식에 의한 열차하중의 분산효과일 것으로 판단된다.

지반의 강성이 증가하면 전체적인 임계속도효과에 의한 진동속도의 증폭량은 감소하며 임계속도효과가 발생하는 차량속도는 증가한다.

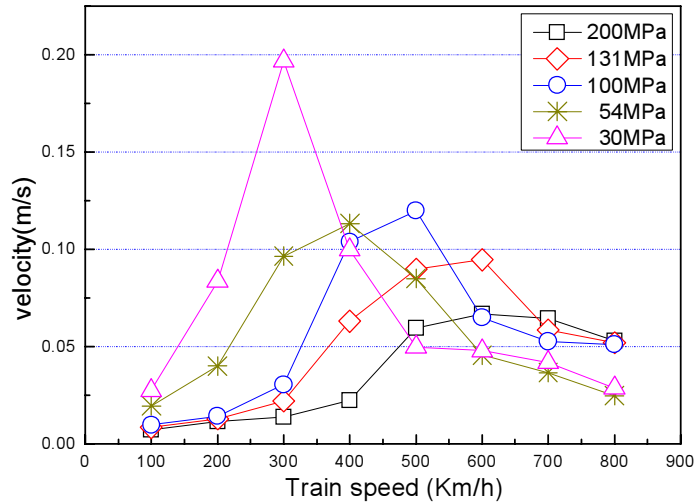
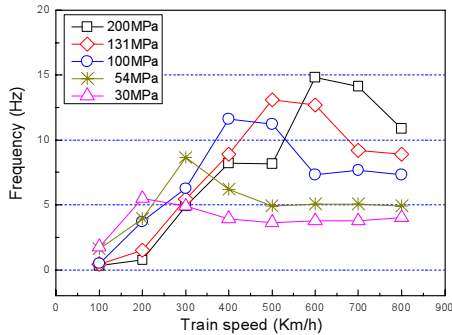


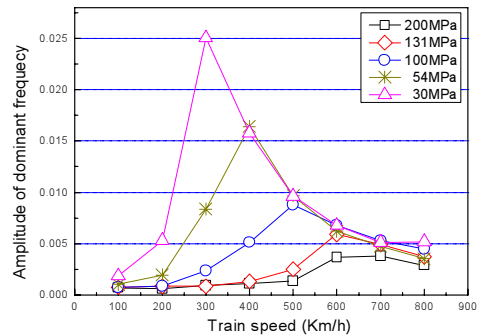
Fig. 2 Vibration velocity variation for trackbed stiffness and train running speed

## 5.2 주행속도 및 노반강성별 탁월주파수

다음 Fig. 3은 주행속도 및 노반강성별 진동속도의 탁월주파수 특성을 나타낸 그림으로서 궤도 및 노반의 강성과 구조에 의해서 값이 결정되는 것을 알 수 있다. Fig. 3의 (a)는 노반의 강성 및 주행속도별 탁월주파수를 나타낸 그림으로서 노반의 강성이 30MPa일 때 약 5.5Hz의 탁월주파수를 나타내며 200MPa로 증가하면 약 14.8Hz까지 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 3의 (b)는 각 탁월주파수의 크기를 강성 및 속도별로 나타낸 그림으로서 속도가 증가할수록 탁월주파수의 크기는 감소하는 것으로 나타났다.



(a) Dominant frequency



(b) Amplitude of dominant frequency

Fig. 3 Variation of dominant frequency for trackbed stiffness and train running speed

## 6. 결 론

본 논문에서는 초고속대역에서 노반의 임계속도효과가 노반변형에 미치는 영향을 파악하기 위하여 궤도지지강성 및 주행속도별 임계속도에 의한 증폭효과를 평가하였다. 해석 결과, 열차가 600km/h로 주행하는 경우, 가장 진동속도가 크게 나타난 노반강성은 131MPa로서 진동속도가 주행속도 300km/h 대비 4.1배 증가하였다. 임계속도 이상에서는 진동속도가 감소하는 경향을 나타내는 것으로 판단할 때 최대 진동속도는 임계속도효과에 의해서 발생한 것으로 판단된다. 국내 신설 철도노반의 강성범위는 120~250MPa로서 강성조건이 연속적으로 만족된다면 600km/h의 주행속도대역에서는 임계속도효과에 의한 진동증폭현상이 발생할 수 있는 것으로 나타났다.

## 참고문헌

- [1] De Nie, F.C.(1948), Undulation of railway embankments on soft sub-soil during passing of trains. Proceedings of the 2-nd Conf. on Soil Mech. and Found. Engineering, Vol. II: pp. 8-12
- [2] Fortin, J.P.(1982), La déformée dynamique de la voie ferrée, Revue Générale des Chemins de Fer, Février, 101e année: pp. 93-102.
- [3] Krylov, V.V.(1994), Ground vibrations generated by superfast trains. Noise & Vibration worldwide, June, Vol.25, No.6: pp. 7-9.
- [4] Madshus, C. & Kaynia A.M.(2000), High-speed Railway Lines on Soft Ground: dynamic behaviour at critical train speed, Journal of Sound and Vibration, Vol. 231, pp. 689-701.
- [5] Woldringh, R.F.(1997), Notes on low embankments for high-speed lines on compressible subsoil. PAOCourse "High Speed Track", 11 June : Delft.
- [6] Hilling, J.(1996), Geotechnische Anforderungen an den Eisenbahnunterbau, Eisenbahningenieur 47, Marz, pp. 24-31.
- [7] I.W. Lee(2011), Dynamic Response Characteristics for Two-layered Trackbed Structure by Train Load, Journal of the Korea Society for Railway, Vol. 14, No. 2, pp. 160-166.
- [8] I.W. Lee(2013), Dynamic Response Analysis of Critical Velocity Effect for Track Supporting Stiffness Condition, Journal of Korea Geotechnical Society, Vol. 29, No. 1, pp.5-12.