

고속철도 노반지지조건에 따른 임계속도효과의 동적응답

Dynamic Response for Critical Velocity Effect Depending on Supporting Stiffness of High-Speed Railway Trackbed

이 일 화¹ Lee, Il-Wha

Abstract

The critical velocity effect on railway trackbed means the amplification of vibration energy when the train running-speed and group velocity of ground surface wave are superimposed. It is called a pseudo-resonance phenomenon of time domain. In the past, it was not issued because the train speed was low and the ground group velocity was higher. But since the high-speed train is introduced, critical velocity reported causing a track irregularity. So far, theoretical analysis has been performed because of the complexity of formation process. However it requires reasonable consideration which is similar to actual track and trackbed conditions. In the present paper, finite element analysis to verify the critical velocity effect is performed considering each track structure and trackbed supporting stiffness. As a result, the deformation amplification caused by the critical velocity effect is verified to analyze each supporting stiffness and track system.

요 지

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 고속화되면서 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 유한요소 해석을 이용하여 궤도 및 노반의 지지조건을 고려한 임계속도해석을 수행하였다. 궤도조건은 자갈궤도와 콘크리트궤도로 구분하였으며 노반의 지지강성은 10~300MPa범위에서의 임계속도영향을 평가하였다. 해석결과 노반의 지지강성에 따른 변형증폭을 확인하였으며, 궤도지지조건에 대한 임계속도영향도 매우 큰 것으로 나타났다.

Keywords : Critical velocity, Supporting stiffness, Dynamic response, Wave propagation, High-Speed railway

1. 서 론

열차의 주행속도가 지지강성에 의해 결정되는 노반의 특정 표면파속도에 도달하면 구조물의 진동에너지가 크게 증폭한다. 이러한 현상을 임계속도효과(critical speed effect)라고 표현하는데, 일종의 시간영역 유사-공진현상으로 이해할 수 있다. 임계속도효과로 인하여 발생한 변형은 매우 클 수 있기 때문에 열차주행과 구조물

가 크게 증폭한다. 이러한 현상을 임계속도효과(critical speed effect)라고 표현하는데, 일종의 시간영역 유사-공진현상으로 이해할 수 있다. 임계속도효과로 인하여 발생한 변형은 매우 클 수 있기 때문에 열차주행과 구조물

¹ 정회원, 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 (Member, Senior researcher, High-speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute, Tel: +82-31-460-5326, Fax: +82-31-460-5032, iwlee@krii.re.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 7월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

에 위협요소로 작용하며 잠재적으로는 궤도유지보수에 악영향을 미친다(De Nie, 1948; Fortin, 1982; Krylov, 1994; Madshus, 2000 and Woldringh, 1997). 강성이 낮은 지지계수를 가진 노반 위를 열차가 고속으로 주행할 때 일정대역의 열차속도는 궤도변형에 영향을 미치게 되는데, 그 원인은 오래전부터 노반의 임계속도효과를 의심해 왔으나 열차속도가 저속대역에서는 문제되지 않았다. 임계속도에 의한 궤도변형의 증폭현상은 고속철도가 개발되면서부터 확인되었는데 TGV100 주행시험을 통하여 본격적으로 연구되었다. 연구결과, 주요 발생 원인은 노반의 약한 지지강성 때문으로서 지반의 강성에 의해 파의 전달특성이 변화하고 이러한 변화가 궤도변형의 증폭을 유발하는 것으로 보고되었다. De Nie (1948)는 이 문제에 관하여 현장측정과 해석을 실시한 결과, 실제 임계속도가 이론값보다 상당히 낮아 궤도지지조건에 따라서는 고려할 필요가 있다고 보고하였다. 이러한 현상은 고속화에 따라 일부 구간에서 실제 발생되는 것으로 보고되고 있다. 최초의 임계속도효과는 스웨덴의 West-coast main line의 X2000고속열차(200km/h)가 개통되었을 때 확인되었다. Ledsgard구간은 연약지반 지역으로 지반의 레일리파 속도가 45m/s로 매우 낮아 열차속도가 180km/h로 증가하면서 지반 진동치가 10배까지 증폭되었다(Krylov, 1994; Madshus, 2000). 또한 영국의 Stilton Fen지역의 해저터널 철도에서도 이러한 현상이 보고되었으며, 네덜란드 Amsterdam과 Utrecht의 연약지반구간에서는 TGV를 이용한 실험결과, 도상변위가 최대 3배까지 증폭되는 것으로 확인되었다(Madshus; Kaynia, 2000). 그러므로 임계속도에 의한 영향이 예상될 경우에는 이에 대한 대책을 마련할 필요가 있다. 실제로 1996년 네덜란드 HSL-S(300km/h)프로젝트에서는 이러한 현상에 대한 대책으로 성토지지말뚝공법과 같은 특수공법을 적용하기도 하였다(Woldringh, 1997).

현재까지의 연구 및 경험에 의하면, 이상적인 차륜궤도시스템에서 노반임계속도의 범위는 194m/s(700km/h) 이상으로서 영향이 없으나, 궤도 및 노반의 구조형상이나 지지강성이 취약할 경우에는 63m/s(230km/h) 이하까지 떨어지는 것으로 나타났다. 따라서 정상적인 경우에는 임계속도의 영향이 없다고 판단해도 무방하지만 열차의 주행속도가 700km/h 이상의 초고속으로 주행할 경우 또는 노반의 지지강성이 매우 낮은 경우에는 임계속도효과의 가능성이 매우 커진다. 또한 임계속도효과

는 궤도의 지지구조형식에 따라서도 많은 차이가 있는 것으로 나타났다. 콘크리트궤도에서 레일은 연속적으로 높은 강성의 콘크리트슬래브로 지지되기 때문에 Hilling (1996)은 콘크리트궤도가 자갈궤도보다 고속주행으로 인한 궤도의 변형을 줄여주는 것으로 보고하였다.

노반의 임계속도효과는 과거에는 이론적으로만 존재하는 현상이었으나, 열차속도의 고속화로 인하여 실제 철도노반에서 발생하는 물리적 현상으로 나타나고 있다. 따라서 고속화에 대한 노반안정성 확보 등을 위해서는 임계속도효과에 대한 연구가 필요하다. 임계속도해석에 대한 접근방법은 이론적 방법과 수치적 방법이 있는데, 이론적인 방법은 복잡한 궤도지지조건을 고려할 수 없기 때문에 실질적인 임계속도영향을 평가하기 위해서는 궤도 및 노반조건을 현장조건과 유사하게 고려한 수치적 평가가 필요하다. 그래서 본 논문에서는 현장조건을 유사하게 표현할 수 있는 유한요소해석을 사용하여 궤도 및 노반의 지지강성조건을 고려한 임계속도해석을 수행하고자 하였다.

2. 노반에서의 파동전파와 임계속도

2.1 지반 내 탄성파의 전파 특성

지반 내 매질을 전파하는 탄성파는 크게 P파(primary)와 S파(secondary)로 구분할 수 있다. S파는 전파되는 면을 기준으로 보았을 때, 수직으로 매질을 전단시키는 SV파(수직파)와 수평으로 매질을 전단시키는 SH파(수평파)로 구분되며 지표면의 조건에 따라서 표면파가 발생한다. 표면파는 경계면의 조건에 따라 다르게 발생되며 레일리파(Rayleigh wave), 러브파(Love wave), 램파(Lamb wave) 및 스톤리파(Stonly wave)로 구분된다. 이 중 지반강성에 따라 응답하는 표면파는 지표면(자유장)을 따라 전파되는 러브파와 레일리파이다. 러브파는 상부층의 강성이 상대적으로 약한 경우에만 발생하며, 레일리파는 지표면이 있을 경우 항상 발생하는 파이다. 레일리파는 표면파 중 가장 큰 에너지를 가지고 있어 노반의 동적변동을 유발하는 주요 응력파이다. 표면파의 에너지는 지표면 부근에 집중되며 하부심도로 갈수록 지수함수적인 감쇠를 나타내어 대략 한파장 정도의 심도 이상에서는 거의 소멸되는 특성을 갖고 있다. 이는 표면파의 전파속도가 한 파장 이내 구간의 지층상태에 따라 영향을 받는다는 것을 의미한다(Ko et al., 2004)

2.2 임계속도효과(Critical velocity effect)

임계속도효과는 노반의 임계속도대역이 열차의 주행 속도대역과 중첩되면서 에너지가 증폭되어 구조물의 변형을 유발하는 것이다. 임계속도효과와 유사한 현상으로 비행기의 소닉붐(sonic boom) 현상을 예로 들 수 있다. 소닉붐은 비행기가 초음속(340m/sec)을 통과하는 순간에 발생하며 이때 발생하는 에너지는 200dB 이상의 진동을 유발한다.

고속의 교통수단이 통과하는 철도노반에서도 이와 유사한 현상이 발생하는데 임계속도(critical velocity), 언듈레이션(undulation), 활파(bow wave) 효과 등으로 불린다(Woldringh, 1997). 노반에서의 임계속도는 열차하중에 의해서 발생하는 노반 표면파의 전파속도를 의미하는데 엄밀히 구분하면 노반의 임계속도는 레일리파의 군속도(group velocity)라고 할 수 있다. 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.

Fig. 1은 비교적 연약한 노반에 부설된 궤도의 경우에 열차 속도가 노반의 표면파 속도와 유사할 때 임계 체제에 도달하는 것을 설명한 것이다.

임계속도는 궤도 및 노반의 특성치를 고려하여 이동하중 재하시 궤도 동적응답의 증폭을 평가하는 계수로도 사용된다. 오일러 단순보의 일차원 파동방정식으로 유도된 임계속도(c_T)를 구하는 식은 다음과 같다(Timoshenko, 1942).

$$c_T^2 = \frac{2}{m} \sqrt{kEI} \quad (1)$$

여기서, m =단위중량, k =스프링강성, EI =휨강성이다. 연속체인 궤도에서는 최저임계속도가 가장 중요하다.

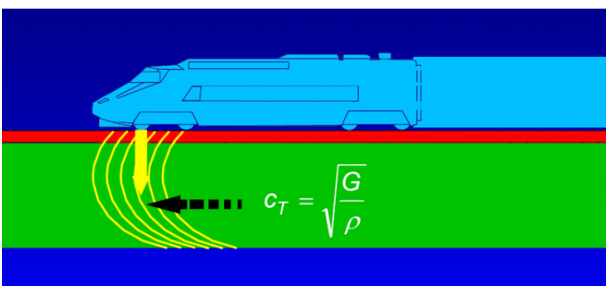


Fig. 1. The concept of the critical velocity effect

임계속도는 통상적으로 열차주행속도보다 매우 높기 때문에 궤도설계시 무시할 수 있지만, 지반조건이 매우 연약한 지반이거나 지층이 불량할 경우에는 임계속도 발생대역이 200km/h대로 낮아지기 때문에 궤도틀림의 주요 원인이 될 수 있다. 노반이 매우 연약한 경우, 표면파의 속도는 일반적으로 50~80m/sec의 범위를 가지는데, 이 값은 열차속도가 180~360km/h(=50~100m/sec)와 동일한 범위이므로 이 속도범위에서는 임계조건에 도달함을 알 수 있다. 그러나 통상적으로 국내 신설철도 노반의 표면파속도값은 150m/sec이상이므로 최소임계속도가 720km/h라 할 수 있다.

2.3 표면파의 위상속도와 군속도

표면파의 속도는 각 주파수별 위상속도(phase velocity)와 군속도(group velocity)로 표현할 수 있다. 위상속도는 일정한 위상을 가지는 파가 매질을 통과할 때의 파의 전파속도이다. 군속도는 파 에너지의 전파속도 혹은 파동심의 이동속도를 나타낸다. 즉 여러 주파수 성분의 파가 집단으로 전파할 때 이 파의 에너지가 전파하는 속도를 말한다. 군속도 c_g 는 다음의 식 (2)로 나타낼 수 있다(Esveld, 2001).

$$c_g = c + k \frac{dc}{dk} \quad (2)$$

여기서, c 는 위상속도, k 는 파수이며 비분산매질에서는 dc/dk 가 0 이므로 군속도와 위상속도가 같으며, 일반적인 지반조건에서는 주파수가 증가할수록 표면파의 속도는 감소하므로 dc/dk 는 음수를 가지게 되어 군속도는 위상속도보다 작게 된다.

3. 임계속도효과 평가를 위한 유한요소해석 조건

본 절에서는 궤도지지강성조건에 따른 노반의 임계속도효과가 노반변형에 미치는 영향을 파악하기 위한 2차원 선형탄성유한요소해석을 수행하였다. 임계속도는 궤도 및 노반의 지지강성에 종속적이기 때문에 본 해석에서는 열차의 주행속도가 일정할 때 궤도형식 및 노반의 지지 강성에 따른 노반의 동적응답을 평가하고자 하였다.

해석내용은 노반층의 강성(6~300MPa)별 및 궤도구조별 시간영역에서의 진동에너지 특성 및 주파수영역

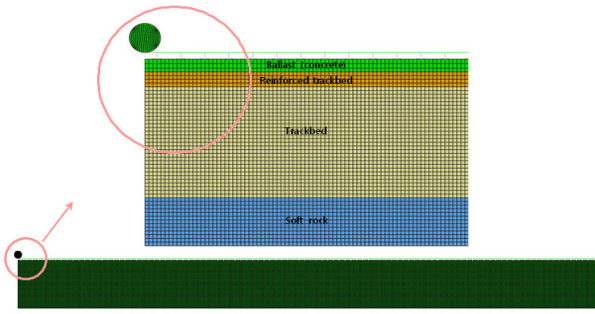


Fig. 2. Model of finite element analysis

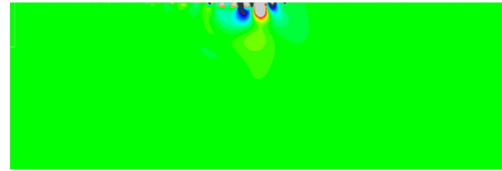
에서의 응답특성 등을 검토하였다. 노반에서의 임계속도에 의한 변형증폭을 유도하기 위하여 열차의 주행속도를 300km/h로 일정하게 고정하고 궤도 및 노반의 지지강성을 변화시켰다. 노반의 강성 즉, 탄성계수는 다음의 식 (3)을 이용하여 결정하였다(Kramer, 1996). 특정 강성에서의 임계유도는 전단파속도로부터 균속도를 계산하여 열차주행속도와 동일대역에 중첩시켰다.

$$E = 2 \times (1 + \nu) \times \rho \times V_s^2 \quad (3)$$

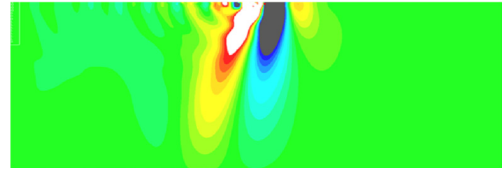
여기서 ν : 포아손비, ρ : 밀도, V_s : 전단파속도이다.

해석의 정확성을 향상시키기 위하여 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.

해석모델은 Fig. 2와 같으며 전체 모델의 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



(a) Non-critical velocity band



(b) Critical velocity band

Fig. 3. Vertical acceleration response for critical velocity effect

(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 4×10^4 kN/m이다. 해석에 사용된 궤도노반의 상세한 물성은 Table 1에 정리하였다.

4. 임계속도효과로 인한 진동의 증폭

자갈궤도에서 레일리파 균속도 영향에 따른 노반의 변형응답을 검토하기 위하여 임계속도대역과 비임계속도대역에서의 수직진동가속도의 응답특성을 비교하였다. Fig. 3(a)는 비임계속도영역의 수직진동가속도로서 열차 주행속도가 300km/h로 일정하고 노반에서의 레일리파의 균속도가 140m/sec(500km/h)로서 균속도가 열차속도를 초과하는 경우의 수직진동가속도의 응답특성이다. Fig. 3(b)는 임계속도영역에서의 응답특성으로서 레일리파의 균속도가 83.3m/sec(300km/h)로 열차주행속도와 동일한 대역에 존재하는 경우이다. 그림에서 진하게 표시된 부분은 수직진동가속도의 크기가 큰 것을 의미하며 Fig. 3(a)보다 Fig. 3(b)의 에너지가 큰 것을 알

Table 1. Parameters used in numerical analysis

Track component	Elastic modulus(N/m ²)	Unit weight (N/m ³)	Poisson's ratio	Thickness (m)
Rail	2.1×10^{11}	78,500	0.30	
Ballast	1.0×10^8	21,000	0.21	0.3
Concrete slab	3.0×10^9	25,000	0.21	
Reinforced trackbed	8.0×10^7	21,000	0.21	0.5
Trackbed	$6 \sim 300 \times 10^6$	18,000	0.33	
Soft rock	1.0×10^9	22,000	0.21	

수 있다. 열차의 운행속도와 노반의 레일리파 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.

5. 궤도지지조건별 임계속도효과 해석결과

5.1 자갈궤도에서의 임계속도 영향

자갈궤도구조를 대상으로 임계속도의 영향을 평가하였다. 궤도구조는 경부고속철도 단면을 기본으로 자갈 도상층이 0.3m, 강화노반층이 0.5m, 노반층의 두께가 9m이며 하부에는 연암층이 위치한다.

5.1.1 시간영역 변위응답 특성

Fig. 4는 노반층 1.5m심도에서 측정한 시간영역의 변위응답으로서 대표적인 노반강성별(24, 33, 96, 300MPa)

결과를 비교하였다. Fig. 4(a)는 노반 균속도가 열차주행 속도(300km/h)보다 낮은 경우이고 Fig. 4(b)는 노반 균속도와 열차주행속도가 겹쳐지는 경우이며, Fig. 4(c)와 Fig. 4(d)는 주행속도보다 균속도가 빠른 조건으로서 일반적인 철도노반조건이다. 노반강성별 응답특성을 보면 Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)에서는 열차의 주행하중에 의한 진동파형이 먼저 도달하는 형태를 보여주며 Fig. 4(c)와 Fig. 4(d)에서는 노반의 고유진동수를 가지는 단파장의 표면파가 먼저 도착하고 열차하중이 나중에 전달되는 패턴을 보여주고 있다. 노반의 고유진동수는 노반의 두께와 재료강성에 의해 결정된다. Fig. 4(b)에서 균속도와 열차속도가 임계되면 변위응답의 크기가 증폭하여 최대 0.47mm 변위를 보이며, 가장 작은 경우인 Fig. 4(d)에서는 0.01mm의 변위응답을 보이고 있다.

5.1.2 노반표면에서의 임계속도영향

Fig. 5는 노반 표면에서의 강성별 변위응답곡선을 나타내 것이다. 노반의 강성은 10~300MPa범위이며, 열차의 주행속도는 일정하다. Fig. 5(a)에서 노반의 강성이 증가하면 파의 전달속도는 일정하게 빨라지며 변위응

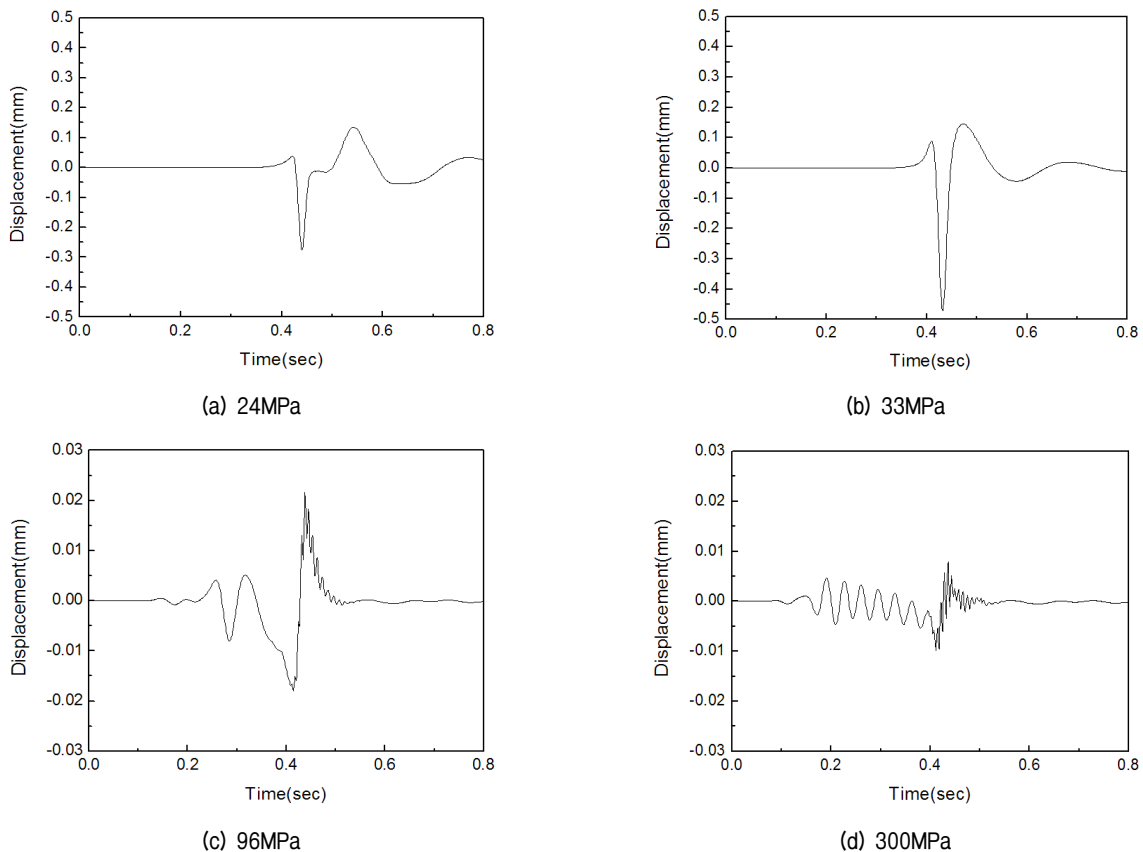
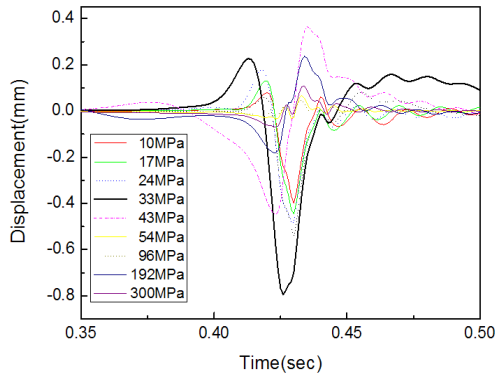
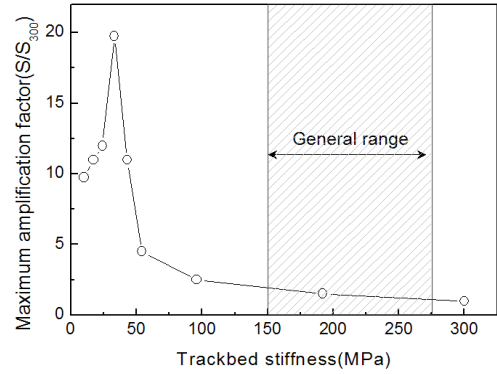


Fig. 4. Displacement response for ballast track at each trackedbed stiffness



(a) Time history



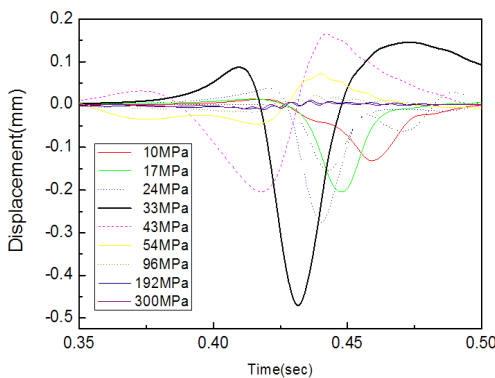
(b) Amplification factor

Fig. 5. Displacement response for each trackbed stiffness on trackbed (ballast track)

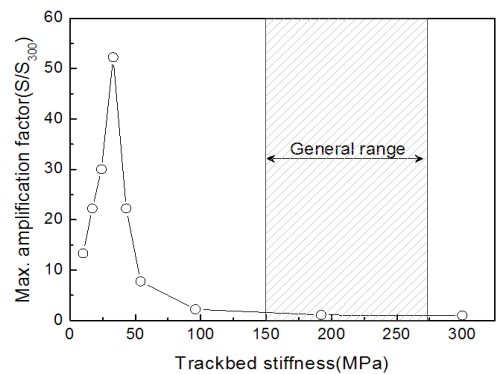
답의 크기는 레일리파의 균속도와 열차의 주행속도가 동일해지는 임계속도영역에서 최대값을 나타내고 그 이후에는 감소하게 된다. Fig. 5(b)는 노반의 강성조건별 최대변위의 증폭계수(S/S_{300})를 나타낸 그림이다. 여기서 S_{300} 은노반의 강성이 300MPa일때의 변위를 나타낸다. 임계속도효과는 노반강성이 33MPa일 때 발생하며 선형탄성조건이라고 가정할 경우, 균속도로 환산하면 83.33m/sec이고 열차주행속도(300km/h)와 동일하다. 임계속도에서의 최대증폭계수는 19.75로서 최소변위증폭량의 약 20배에 달한다. 변위량은 임계속도대역을 중심으로 크게 증폭되며 노반의 지지강성이 임계속도대역보다 커지면 최대변위량은 지수함수적으로 감소하게 된다. 본 해석의 경우에는 50MPa이상에서는 최대증폭계수가 4.5이하로 급격히 감소한다. 일반적으로 국내 신설철도노반의 강성범위는 150~275MPa(Ko Hak-song et al., 2004)로서 이 조건이 연속적으로 만족된다면 임계속도효과는 발생하지 않는다.

5.1.3 노반층 내부에서의 임계속도영향

Fig. 6(a)는 노반층 내부에서의 강성별 임계속도영향을 분석하기 위하여 노반표면에서부터 1.5m심도에서의 변위응답특성을 나타낸 것이다. 해석 조건은 노반표면에서의 해석조건과 동일하다. 노반층 내부에서의 변위응답곡선은 노반층의 감쇠효과로 인하여 표면보다 크기는 작아지고 완만한 곡선을 나타내지만 전체적인 경향은 표면에서의 응답곡선과 유사하게 나타난다. Fig. 6(b)는 노반내부에서의 강성조건별 최대증폭계수의 변화를 나타낸 것이다. 임계속도는 노반표면해석 결과와 동일하게 노반강성이 33MPa일 때 발생한다. 임계속도영역에서의 최대증폭계수는 52.2로서 노반강성이 300MPa일 때 보다 약 52배가 크며, 임계속도대역을 중심으로 크게 증폭되는 것을 알 수 있다. 절대변위량의 크기는 노반표면에서의 값과 비교하여 최대값이 30% 정도 감소하는데, 이는 표면파의 에너지가 상부층에 집중되고 하부로 내려갈수록 에너지의 크기가 지수함수형태로 감쇠되기 때문이다(Lee, 2011).



(a) Time history



(b) Amplification factor

Fig. 6. Displacement response for each trackbed stiffness in trackbed (ballast track)

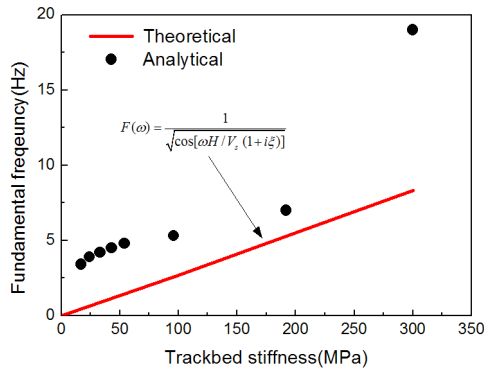


Fig. 7. Theoretical and analytical dominant frequency each trackbed stiffness

5.1.4 노반변위응답의 주파수 특성

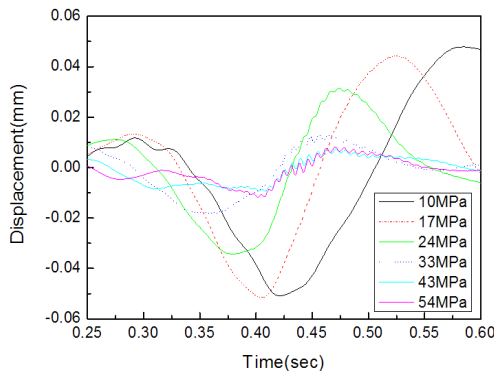
주파수특성검토는 주파수영역에서의 증폭요인을 검토하기 위함으로 노반의 구조 및 강성에 따라 증폭의 가능성을 평가하기 위하여 수행하였다. 검토하기 위하여 노반층 내에서의 변위응답곡선의 탁월주파수를 산정해 보았다. 탁월주파수는 노반층 내부에서 측정된 변위응답곡선에 대하여 FFT변환 과정을 거쳐 주파수영역

에서의 가장 크기가 큰 저차모드의 주파수로 결정하였다.

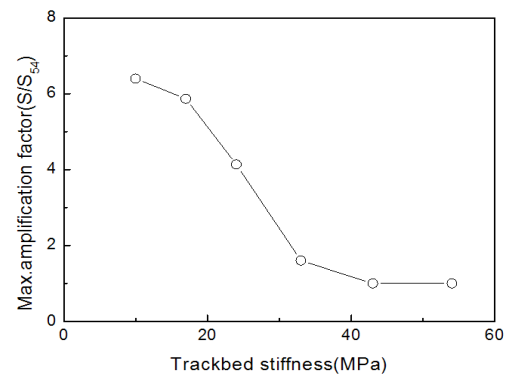
Fig. 7은 이론식과 수치해석으로 각각 계산된 노반의 탁월주파수를 비교한 그림이다. 이론적으로 노반의 두께가 두꺼워지면 탁월주파수는 지수함수형태로 감소하고 노반 강성이 증가하면 탁월주파수는 선형적으로 증가한다(Lee, 2011). 수치해석의 결과는 이론값보다 전반적으로 크게 계산되었으며 주파수의 범위는 3~20Hz이다. 이론값은 2층 반무한체를 가정하여 산정하였기 때문에 하부노반의 변위가 발생하지 않지만, 수치해석 모델은 연암층까지 모델링이 되어 있으므로, 감쇠비를 비롯한 경계조건 등의 차이로 이론값과 수치해석 결과의 차이가 발생한 것으로 판단된다.

5.2 콘크리트궤도에서의 임계속도 영향

콘크리트궤도구조를 대상으로 임계속도효과를 평가하였다. 궤도구조는 경부고속철도 2단계 구간에 적용된 단면을 기본으로 하였으며 해석모델은 Fig. 2 및 Table 1과 동일하다. Fig. 8(a)는 노반층내에서의 강성별 임계속도

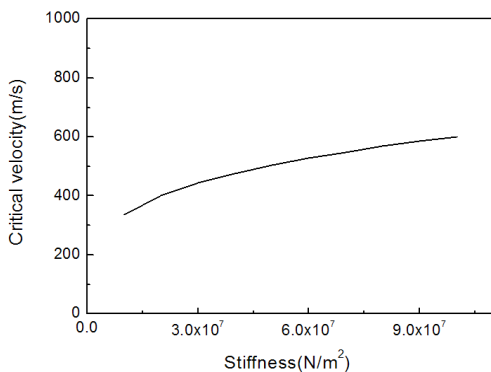


(a) Time history

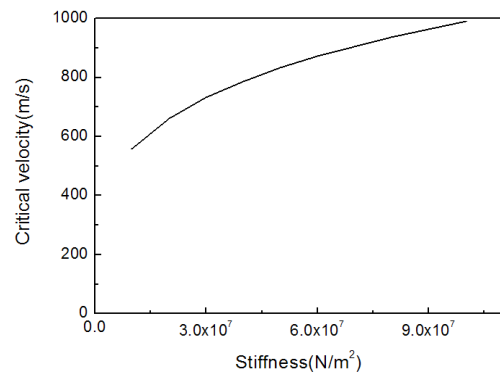


(b) Amplification factor

Fig. 8. Displacement response for each trackbed stiffness (concrete track)



(a) Ballast track



(b) Concrete track

Fig. 9. Theoretical critical velocity for each track structure

영향을 분석하기 위하여 노반표면에서부터 1.5m깊이에서의 변위응답특성을 노반강성별로 나타낸 그림이다. 콘크리트궤도에서의 변위응답곡선은 자갈궤도보다 전반적으로 장파장의 파형을 가지고 그 응답의 크기는 작아졌다. Fig. 8(b)는 각 변위응답에서의 최대증폭계수값을 노반강성별로 표시한 그림으로서 노반의 강성이 증가하면서 증폭계수는 감소하는 것으로 나타났으며, 임계속도영역인 33MPa대역에서도 특별한 변화가 발생하지 않았다.

콘크리트궤도의 경우, 임계대역에서의 증폭이 발생하지 않았는데 그 원인은 궤도구조의 스프링강성 및 휨강성에 의한 차이라고 판단되어 그 차이를 검토하였다. Fig. 9는 식 (1)을 이용하여 각 궤도구조의 지지강성(k , EI)별 임계속도의 차이를 나타낸 그림이다. 임계속도를 계산하기 위해 자갈궤도의 강성 EI 는 $4.6 \times 10^6 \text{N} \cdot \text{m}^2$, m 은 60kg/m , k 는 $1 \times 10^7 \text{N/m}^2$ 에서부터 $k=10 \times 10^7 \text{N/m}^2$ 의 값을 각각 적용하였다. 콘크리트궤도는 EI 를 $3.4 \times 10^7 \text{N} \cdot \text{m}^2$ 로 적용하였으며 나머지 변수는 동일하다. 검토 결과, 지지강성차이로 인하여 콘크리트궤도가 자갈궤도보다 임계속도값이 약 2배 정도 크게 계산되어 임계속도에 의한 응답특성이 자갈궤도와 다른 것으로 나타났다. 또한 동일한 궤도구조에서도 궤도의 스프링지지계수가 작아지면 임계속도는 비선형적으로 감소하여 자갈궤도의 경우 k 값이 $1 \times 10^7 \text{N/m}^2$ 이면 임계속도는 33m/sec까지 감소하였다. 따라서 궤도의 강성이 노반임계속도로 인한 증폭대역을 결정하지는 않지만, 콘크리트궤도의 경우, 궤도강성의 영향으로 인하여 실제 노반의 임계속도보다 높은 대역에서 임계조건에 도달할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 논문에서는 노반의 임계속도효과가 노반변형에 미치는 영향을 파악하기 위하여 궤도지지강성 및 구조별 임계속도에 의한 증폭효과를 평가하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 열차의 속도가 300km/h일때 자갈도상궤도의 노반 표면 및 내부에서의 노반강성별(10~300MPa) 변위 응답해석 결과, 표면에서의 임계속도영역(33MPa) 시 최대변위는 0.79mm로서 비임계속도영역보다 최대 20배까지 증폭하였으며 노반 내부에서의 최대변위는 0.47mm로서 비임계속도영역보다 최대 50배

증폭하였다. 노반변위량은 임계속도대역을 중심으로 크게 증폭되며 노반의 지지강성(전단파의 군속도)이 임계속도보다 커지게 되면 최대변위량은 지수함수적으로 감소하는 것을 확인하였다.

- (2) 콘크리트궤도의 지지강성별 응답해석 결과, 자갈도상궤도와 동일한 증폭현상은 발생하지 않았는데 콘크리트궤도 자체의 높은 지지강성 및 휨강성이 전체 궤도시스템의 강성에 영향을 미친 것으로 판단된다. 따라서 궤도강성이 높은 경우에는 임계속도효과는 상대적으로 보다 고속대역에서 발생할 것으로 예상된다.
- (3) 국내 신설철도노반의 강성범위는 150~275MPa로서 이 조건이 연속적으로 만족된다면 임계속도의 영향은 없다고 할 수 있지만, 불규칙한 지형조건과 연약대가 존재한다면 임계속도의 영향을 받을 가능성이 있다. 특히 향후 열차 주행속도가 초고속대역까지 향상될 경우에는 노반의 지지강성이 충분히 확보되더라도 열차주행속도에 의한 임계속도효과가 발생하기 때문에 이에 대한 대비가 필요하다.

참고 문헌

1. Coenraad, Esveld (2001), Modern Railway Track, 2001 MRT Productions.
2. 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.
3. Fortin, J. P. (1982), La déformée dynamique de la voie ferrée, *Revue Générale des Chemins de Fer, Février, 101e année*, pp.93-102.
4. Hilling, J. (1996), Geotechnische Anforderungen an den Eisenbahnnunterbau, *Eisenbahningenieur* 47, Marz, pp.24-31.
5. Ko, H. S., Joh, S. H., Hwang, S. K., and Lee, I. W. (2004), "The Evaluation of Roadbed Stiffness using Continuous Surface-Wave (CSW) Method", *Autumn Conference of Korea Society for Railway*.
6. Krylov, V. V. (1994), Ground vibrations generated by superfast trains. *Noise & Vibration worldwide*, June, Vol.25, No.6, pp.7-9.
7. Lee, I. W. (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. Madshus, C. and 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.
9. Steven, L. Kramer (1996), *Geotechnical Earthquake engineering*, Prentice-Hall Inc.
10. Timoshenko, S. (1942), *Strength of Materials*, Part 2. Van Nostrand, New York.
11. Woldringh, R. F. (1997), Notes on low embankments for high-speed lines on compressible subsoil. *PAOCourse "High Speed Track"*, 11 June, Delft.

(접수일자 2012. 3. 5, 심사완료일 2013. 1. 4)