KSS Spring Conference 2006 / March 24~25, 2006 / Seoul / Korea

지반조건에 따른 고속철도 토공노반의 공진에 관한 연구
Study on the Resonance in Trackbed of High-Speed Railway Considering Ground Condition

이일화[1], Il-Wha Lee, 황선근[2], Seon-Keun Hwang, 최찬용[3], Chan-Young Choi

[1] 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원, Senior Researcher, Korea Railroad Research Institute
[2] 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 책임연구원, Chief Researcher, Korea Railroad Research Institute
[3] 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원, Senior Researcher, Korea Railroad Research Institute

SYNOPSIS : When the train running on the high-speed track, there is a speed band which track distortion is unusually increased according to the condition of track and roadbed. This speed is called critical velocity and physical parameter values are increased greatly. These phenomenon happened as high-speed train were developed, studied regularly through TGV 100 running test in France. As research result until now, the main reason is soft roadbed's bearing capacity. Wave propagation and track support capacity is varied by the ground characteristics. This paper achieved theoretical examination about resonance band(speed and frequency) that occurred in roadbed on the base rock in point of geotechnical engineering. The examination of resonance divides with ground response analysis, critical band analysis by the shear wave velocity of roadbed and train critical speed through the ground stratum.

Key words : High-speed, Railroad, Trackbed, Resonance, Vibration, Transfer function

1. 서 론

과거 열차의 운행속도가 낮았을 때에는 노반 공진에 대한 발생 가능성이 없었으나 최근 열차의 주행속도가 300km/h를 넘어서면서 궤도 및 노반의 조건에 따라 궤도틀림이 극단적으로 나타나 공진발생의 가능성이 제기되었다. 철도에서의 공진은 열차의 주행속도와 관련이 있어 속도영역에서의 연구가 주로 수행되었다. 공진이 발생하는 속도를 임계속도(critical velocity)라 칭하며, 물리적 변동값들이 매우 크게 변화한다. 이러한 현상은 고속철도가 개발되면서 발생되었는데, TGV 100 주행시험을 통하여 본격적으로 연구되었다. 연구결과, 주요 발생 원인은 노반의 연약화로서 지반의 강성특성에 의해 파의 전달특성 및 궤도지지특성이 변화하는 것으로 보고되었다. 현재까지는 주로 속도영역에서의 특성들이 연구되었는데, 본 논문에서는 지반공학적 관점에서 토노반구간에서 발생가능한 주파수영역에 대한 검토까지 포함하였다. 공진에 대한 검토방법은 노반구조에 따른 지반응답해석(주파수영역), 노반의 전단파속도에 따른 임계영역해석, 열차임계속도평가(속도영역)로 구분하여 검토하였다.

2. 고속철도 토공노반의 구조

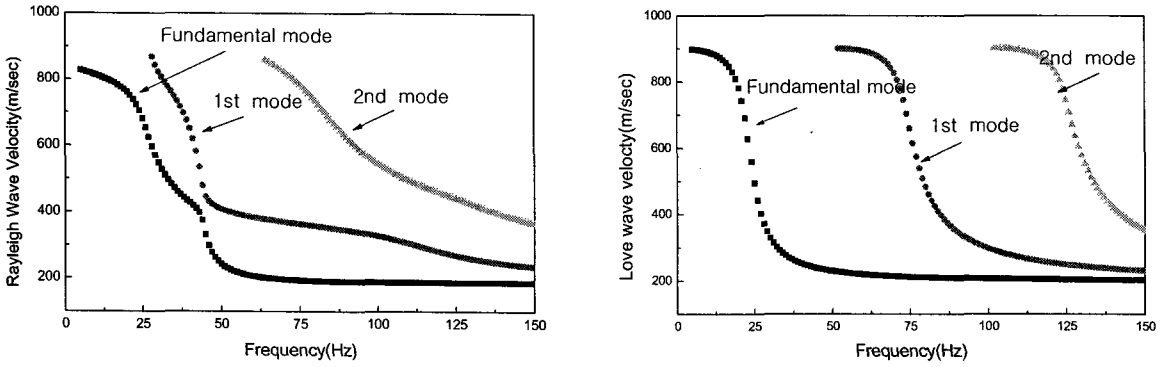
철도노반의 토공구간은 크게 흙쌓기부, 깎기부, 평지부로 구분할 수 있다. 흙쌓기 구간인 경우의 기본

구조는 원지반위에 별도의 다짐관리가 소요된 하부노반과 상부노반이 설치되고 입도조정쇄석으로 구성되는 강화노반의 설치된다. 하부노반의 다짐관리기준은 K_{30}치가 7kg/cm^{3}이상이며 강화노반을 포함하는 상부노반은 11kg/cm^{3}이상이다. 실제 다짐도는 기준보다 상당히 높게 다져진다. 땅깎기 구간인 경우에는 원지반 또는 암반을 굴착하고 강화노반이 바로 그 위에 설치되며 다짐기준은 흙쌓기 구간과 동일하다. 이와 같은 경우에는 원지반 또는 암반과 강화노반은 상당한 강성차를 가진다.

3. 노반에서의 파 전파 특성

지반진동은 진동원의 가진작용으로 지반으로 전달된 진동에너지가 탄성파에너지의 형태로 지반을 통하여 전파되어가는 과정에서 토립자들의 운동을 일으키는 현상이다. 각종 진동원에 의해 발생하는 지반진동파는 크게 체적파와 표면파로 나누어진다. 3차원의 균질한 무한체에서는 체적파와 전단파 두가지의 해만 존재하지만 자유장을 가지게 되면 반무한체의 지표면에서는 표면파가 발생하게 되며 대표적으로 레일리파, 러브파, 스톤리파 등이 있다. 레일리파는 반무한체의 자유장 부근에 국한되어 존재하며 깊이가 깊어질수록 크기는 급속히 감쇠된다. 러브파는 상부층내에 입사된 SH파의 다중반사(Multiple Reflections)에 의해 발생하는데 반무한체 상부에 강성이 상대적으로 약한 지반이 놓여있을 때에만 발생한다. 지반변형을 유발하는 진동파는 대부분이 표면파이며 이중 레일리파의 에너지가 가장 크기 때문에 통상적으로 환경진동은 레일리파의 의해 발생된 에너지라 할 수 있다. 레일리파에 의한 입자운동은 지표면을 기준으로 수직방향이며 러브파는 수평방향으로서 궤도틀림의 유발요인이 될 수 있다. 땅깎기 구간인 경우 노반의 구조는 강성이 매우 큰 기반암위에 강화노반이 1~2m 정도 시공이 되고 그 위에 궤도가 부설된다. 이 경우 강화노반은 파의 전파경로가 되며 에너지가 집중된다. 다음 그림 1은 상부강화노반의 두께가 2m이고 기반암층의 전단파속도가 900m/sec, 강화노반의 전단파속도가 200m/sec인 2층 노반구조에서의 파전파 특성으로서 강성차가 그다지 크지 않음에도 불구하고 대부분의 에너지는 상부층을 통하여 전파되는 것을 알 수 있다.

그림 1. 2층 노반구조에서의 파 전파 특성



(a) 레일리파의 위상속도 (b) 러브파의 위상속도

그림 2. 표면파의 모드별 분산 특성

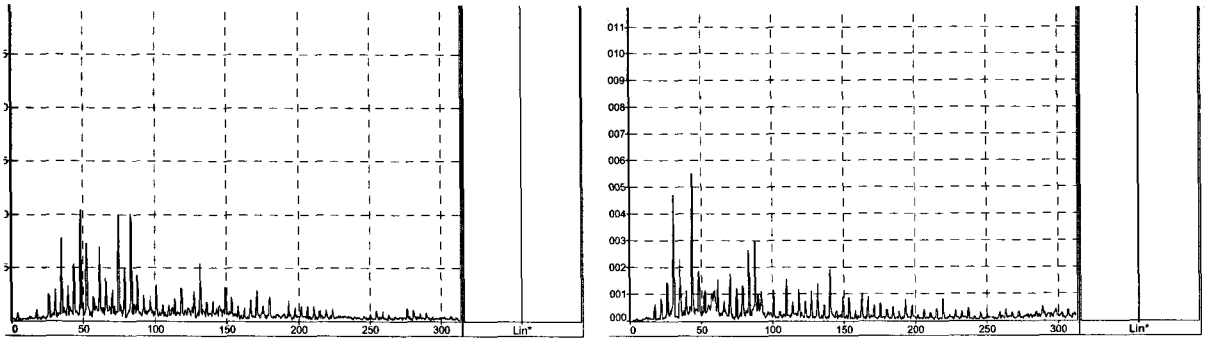
그림 1의 조건인 경우의 레일리파와 러브파의 분산특성을 그림 2에 나타내었다. 대상 지반조건은 2층

반무한체로서 주파수별 분산특성은 상부층의 전단파속도와 하부층의 전단파속도내에 분포하며 가장 에너지가 큰 fundamental 모드의 경우 대부분의 주파수대역에서 상부층의 강성에 종속적임을 알 수 있다.

이와 같이 노반층을 통하여 전파되는 파를 채널파(channel wave)라고도 하는데 주변매질의 속도보다 낮은 속도를 갖는 지층에서 발생되는 파동으로 저속도층에 제한되어 전파하며, Guide-Wave라고도 불린다. 열차로부터 전달된 하중은 궤도에서 파동원을 발생시키고 이로부터 Sv파, Sh파, 압축파가 전파하게 되면 기반암층이 높은 탄성파 속도를 가지므로 경계면은 높은 반사계수를 갖게 되고, 경계면에서 반사된 파동은 중첩을 이루어 새로운 형태의 파군을 이룬다. 이중 P파와 SV파의 반사에 의해 생성되는 파동을 레일리채널파라고 하며, SH파의 반사에 의해서 생성되는 파동은 러브채널파라고 한다. 일반적으로 채널파의 생성은 노반의 폭과 거리, 발생원의 주파수, 지속시간, 지층의 물성 및 배열상태 등과 상관되고 있으며, 이중 가장 핵심적인 요인은 노반조건이라 할 수 있다.

4. 열차 진동 특성

철도노반중 고속선의 경우, 기존의 진동패턴과 다른 결과를 나타낼 가능성이 크다. 일반적으로 철도환경진동은 일반구간인 경우 저역(8~20Hz), 중역(22~50Hz), 고역(55~73Hz)의 3가지 성분으로 구성되며 저역, 중역의 주파수는 속도에 대략 비례하고 전체 진동크기는 중역의 크기로 결정된다. 각 성분은 주로 속도, 바퀴간의 간격, 대차(Bogie)의 간격, 축배치 등 열차의 특성에 의해 좌우된다. 그러나 열차의 속도가 증가하게 되면 저역의 속도 증가가 상당히 크기 때문에 고속주행시 저역이 중역을 능가하며 전체 진동의 크기는 저역진동에 지배된다. 그림 3은 고속철도 토공구간에서 계측한 노반가속도로서 측정지점의 주파수의 대역은 약 30~90Hz정도이며 4~5개 정도의 피크군(群)이 형성된다. 하지만 구간에 따라 그 차이는 심하여 전체적인 분포를 보면 약 30~150Hz까지의 범위를 가진다. 각 피크군은 차량, 궤도, 지반특성이 반영된다라고 할 수 있다. 환경진동측면에서는 주파수의 대역이 일반구간에 비하여 고주파대역으로 이동되며, 거리에 따라 빠르게 감쇠된다.



(a) 궤도중심에서 3m (b) 궤도중심에서 10m

그림 3. 고속철도 토공구간에서의 노반가속도

5. 열차 임계속도(Critical Speed)

임계속도란 궤도 및 노반의 특성치를 고려하여 이동하중 재하시 궤도 동적응답의 증폭을 평가하는 계수로서 주로 노반의 지지강성에 종속적이다. Euler단순보의 일차원 파동방정식으로 유도된 임계속도를 구하는 식은 다음과 같다.

$$v_{cr}^2 = \frac{2}{m}\sqrt{kEI} \qquad \text{식 (1)}$$

여기서, m = rail mass per length, k = track stiffness, EI = bending stiffness

연속체인 궤도에서 최저임계속도가 가장 중요하며 등가하중보다 변동하중에 의한 임계속도가 작다. 임계속도는 측정을 통하여도 그 영향이 확인이 되었는데, 열차가 최저 임계 속도에 도달할 때의 처짐이 정적 처짐의 3배 이상으로 증가된다고 보고하였다[3]. 통상적으로 임계속도는 열차주행속도보다 매우 높기 때문에 궤도설계시 무시할 수 있지만, 지반조건이 매우 연약한 지반이거나 지층이 불량할 경우에는 200km/h이하로 낮아지기 때문에 궤도틀림의 원인이 될 수 있다.

또한, 열차의 하중에 의해 발생된 전단파의 속도가 열차의 주행속도와 유사할 경우에 에너지는 증폭될 수 있다. 노반이 매우 연약한 경우, 전단파의 속도는 일반적으로 50~80m/sec의 범위를 가지는데, 이 값은 열차속도가 180~360km/h와 동일한 값이므로 이 속도범위에서는 임계로 됨을 알 수 있다. 그러나 통상적으로 고속철도 노반의 전단파속도값은 200m/sec이상이므로 최소임계속도가 720km/h라 할 수 있다.

6. 토조에서의 공진시험

시험은 궤도구조에 대한 실물반복재하시험시 공진에 대한 영향을 검토하기 위하여 수행하였다. 궤도시험공시체는 실물크기이며 토조에 조성된 노반의 깊이는 3m이다. 노반의 구성은 도상 아래 강화노반층이 0~50cm가 부설되어 있으며, 그 아래에 노반이 다짐되어 있다. 노반의 평균 전단파속도는 230m/sec로 상부의 강화노반층이 상대적으로 높다. 공진시험은 반복재하시험과 동일한 조건으로 반복하중 1~2tf로서 1Hz~30Hz까지 재하 진동수를 원칙으로 하여 1Hz씩 증가시켜 시행한 노반 표면의 변위 응답배율을 측정하였다. 그림 4에서와 같은 시험조건하에서 공진주파수(Resonant Frequency)는 약 25Hz이후에서 발생하여 본 시험주파수인 4Hz보다 상당히 높은 대역에서 발생하는 것으로 나타났다. 그림 5는 각 노반조건별 공진곡선으로서 강화노반이 없는 경우(soil), 강화노반의 두께가 30cm인 경우(K11D30) 그리고 두께가 50cm인 경우(K11D50)로서 각 조건별 차이를 구분하기는 어려우나 발생대역은 25~29Hz구간이다. 측정된 공진대역은 지반조건뿐만 아니라 궤도조건, 토조조건 등이 복잡하게 작용하여 나타나게 되지만, 이론적인 지반응답해석(식 2)의 결과치와 유사한 경향을 나타내었다.

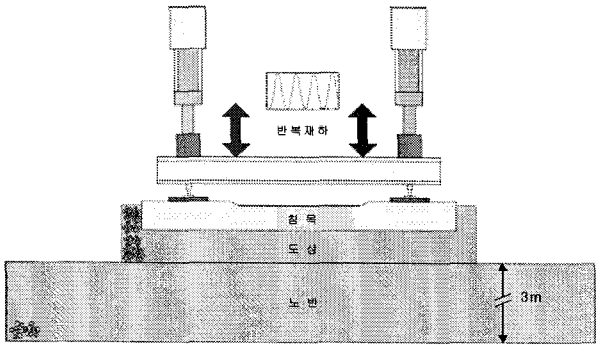


그림 4. 실물반복재하시험 조건

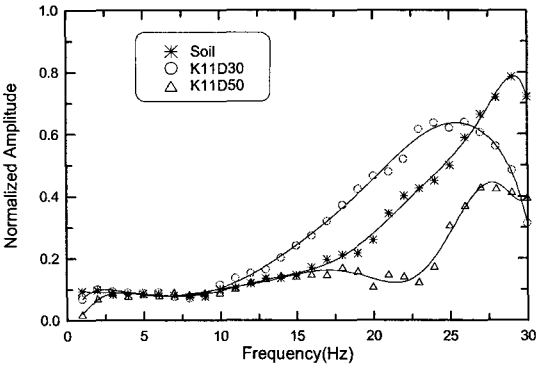


그림 5. 노반 표면 변위에 의한 공진 곡선

7. 전달함수를 이용한 노반의 응답해석

노반의 층상구조에 따른 동적 특성을 주파수대역에서 검토하기 위하여 단순화된 해석모델의 전달함수를 유도하여 평가하였다. 지반조건은 변위가 발생하지 않는 기반암층 위에 감쇄를 가지는 균일한 지층이 있는 경우의 2층 점탄성모델이다. 지반층이 전단특성을 가지고 있다고 가정하고 파동방정식으로 부터 전달함수를 유도하면 다음 식 2와 같다.

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\cos\ [\omega H / V_s(1+i\xi)]}} \qquad \text{식 (2)}$$

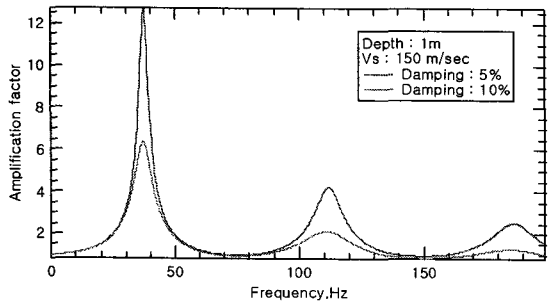
여기서 k : Complex wave number　　Vs : Shear wave velocity

H : Roadbed thickness　　ω : Angular frequency　　ξ : Damping factor

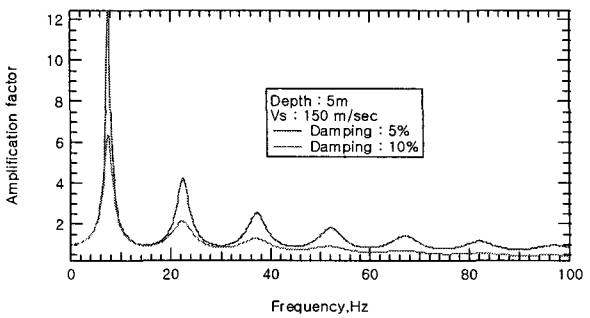
일반적으로 입도조정쇄석으로 시공된 강화노반층의 전단파속도의 범위는 그림 6과 같이 190~250m/sec 이므로 해석은 150~350m/sec를 대상으로 하였으며, 강화노반층의 두께는 1~30m를 검토하였다.

그림 6. 노반층별 전단파속도(SASW시험)

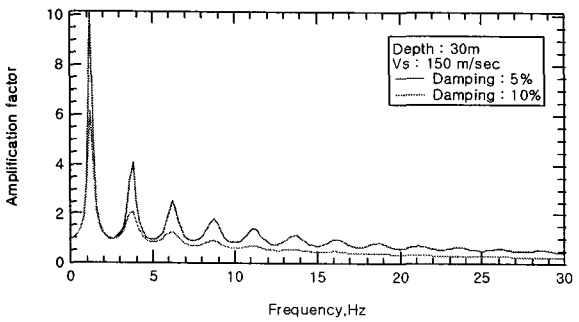
식 2로부터 노반의 조건을 바꾸어 가면서 응답해석을 수행하고 각 해석조건에 대한 탁월주파수를 계산한 결과를 그림 7에 나타내었다. 해석은 기반암이 존재하는 토노반구간에 대한 모델에 한하였다. 그림 7의 각 해석결과에서 고유주파수는 순서별로 38, 7.5, 1.25, 37Hz로서 상부지반층의 두께가 작아지거나 지반강성이 증가할 경우 고유주파수가 증가하는 것으로 나타났다. 그림에서 첫 번째 피크가 초기고유주파수(fundamental frequency)이고 그 다음이 1차, 2차, 3차 모드 순이다. 일반적으로 지반의 감쇠비는 5%미만이므로 초기고유주파수의 증폭효과는 보다 크게 나타난다.



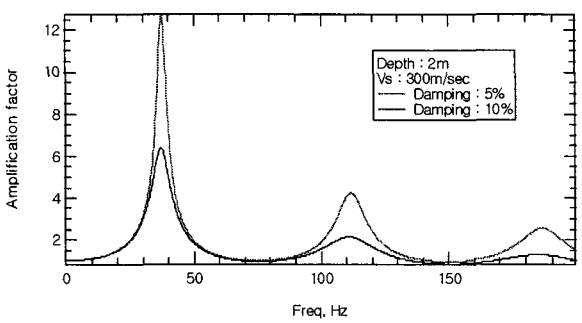
(a) 두께 1m, 전단파속도가150m/sec 인 경우



(b) 두께 5m, 전단파속도가 150m/sec인 경우



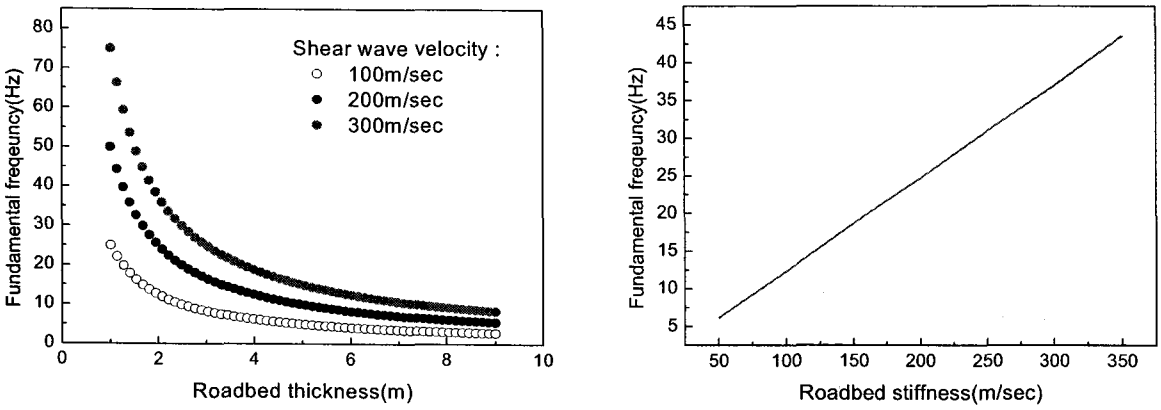
(c) 두께 30m, 전단파속도가 150m/sec인 경우



(d) 두께 2m, 전단파속도가 300m/sec인 경우

그림 7. 지반조건에 따른 주파수별 이론지반응답곡선

다음 그림 8은 그림 7의 결과를 바탕으로 노반조건별 고유주파수의 변화를 나타낸 그림이다. 그림 8(a)는 강화노반층의 전단파속도가 100, 200, 300m/sec이고 노반의 두께가 1~9m까지 변할 경우는 초기고유주파수의 변화를 나타낸 그림이고 그림 5(b)는 노반의 두께가 2m로 일정하고 전단파속도가 50m/sec에서부터 350m/sec로 변할 때의 초기고유주파수의 변화를 나타낸 그림이다. 그림 3을 바탕으로 철도진동의 주파수특성이 30~90Hz 대역에서 탁월한 것을 감안할 때 암반상 노반의 두께가 2m이하로 얇을 경우에는 이론적으로 지반의 고유주파수와 공진할 수 있는 가능성이 있다. 특이 암반상 노반의 연장이 긴 경우는 그 가능성은 더 커진다고 할 수 있다.



(a) 노반의 두께별 고유주파수 (b) 노반의 강성별 고유주파수

그림 8. 노반조건별 초기고유주파수의 변화

8. 결 론

본 논문에서는 지반공학적 관점에서 암반상 토노반의 공진(임계)을 검토하기 위하여 속도 및 주파수에 대한 검토를 수행하였다. 이를 위하여 층상구조에 대한 지반응답해석, 노반의 전단파속도에 따른 임계영역, 열차임계속도를 구하였다. 검토 결과, 속도영역의 경우에는 이론적으로는 임계 발생 가능성이 있으나, 발생조건이 지반의 전단파속도가 매우 낮은 경우로서 국내 고속철도 노반조건을 고려할 경우에는 발생가능성은 없다고 할 수 있다. 하지만 주파수대역에서의 지반응답해석결과에서는 3m이하의 노반두께를 가질 경우에는 고속열차의 주행에 의해 발생되는 주파수대역과 지반응답곡선의 대역이 열차진동주파수대역과 겹쳐지므로 공진의 가능성이 있다고 할 수 있다. 이를 보다 정확히 검토하기 위해서는 노반의 현장진동특성과 파동전파해석을 수행할 수 있는 적합한 궤도해석모델을 이용하는 것이 필요하다.

참 고 문 헌

1. 이일화, 김현기, 황선근, 조용권(2000), "고속전철 강화노반의 침하특성에 관한 연구" 대한토목학회 논문집, vol20, vol.6-d, pp 681-690.
2. 이일화, 조성호 (2004), "반무한체와 다층구조 지반에서 러브파와 레일리파의 위상속도 분산특성", 한국지반공학회 논문집 제20권, 1호, pp.61-73.
3. Madsuhs 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
4. Modern Railway Track(2001), Coenraad Esveld
5. Makoto Ishida, Shigeru Miura, Akiko Kono(1997), "The Influence of Track Stiffness on Track Dynamic Behaviour", QR of RTRI, Vol.38, No.3