

레일패드의 경화에 따른 궤도의 동적응답 변화 특성 분석

Dynamic responses of track according to the hardening of rail-pad

윤태형*, 최진유** 양신추*** 김은****

Yoon, Tae Hyoung Choi, Jin Yu Yang, Shin Chu Kim, Eun

ABSTRACT

A wheel force becomes large as increasing the stiffness of rail-pad, and it accelerates the deterioration of track, and it leads the maintenance cost rising. So, it is required to determine an appropriate replacement period for rail-pad. As a preliminary study to determine it, a numerical analysis was conducted to investigate the influence on a track behavior by the hardening of rail-pad. From the analysis, one knows that the dynamic wheel force is vary depend on the stiffness of rail-pad and the running speed of vehicle, the displacement and acceleration of rail is decreasing as increasing stiffness of rail-pad, and the displacement and acceleration increased in proportion to the rail-pad stiffness increasing.

1, 서론

일반적으로 궤도틀림의 진전 즉 궤도상태의 열화에 영향을 미치는 원인으로는 도상자갈 자체의 손상, 노반강성의 변동으로 인해 발생하는 도상의 불규칙한 침하, 용접부의 결함 등으로 인한 레일자체의 선형불량 그리고 차량에 의한 동적하중의 변동 등이 주요 원인으로 밝혀져 있다. 최근 들어 보다 정확한 궤도틀림을 예측하기 위하여 레일이나 도상자갈, 궤도패드 등 궤도재료열화의 영향이 고려된 보다 실제에 가까운 예측모델의 구체화가 요구되고 있다. 본 연구에서는 궤도틀림진전예측모델 수립을 위한 연구의 기초연구로서 여러 가지 궤도열화의 현상 중에서 레일패드의 경화가 궤도부담력에 미치는 영향을 수치해석을 통하여 분석하여 보았다.

레일패드의 강성이 증가하면 차량의 윤중이 증가하게 되고 이에 따라 궤도재료(레일, 체결구, 침목, 자갈도상 등)의 파손이 증가하여 궤도재료의 갱환주기를 단축시켜 궤도유지보수비를 증가시킴은 물론 진동을 증가시켜 철도연변의 생활환경을 저해할 수 있기 때문에 레일패드경화에 따라 패드강성이 크게 증가하지 않도록 레일패드 교체주기에 대한 적절한 기준을 수립할 필요가 있다. 현재 국내에서 사용 중인 레일패드의 강성은 경부고속철도의 경우 80~120kN/mm로 규정하고 있으며, 이를 단위m로 환산하면 133.3~200MN/m²이 된다. 통과톤수의 증가와 기후환경에 노출된 공용중인 레일패드가 경화될 경우, 강성이 50%이상 증가하는 것으로 알려져 있는데, 본 연구에서는 레일패드의 최초 강성이 150~200MN/m²의 범위 내에 존재한다고 보고 그 범위의 강성을 가지는 레일패드가 경화되었을 경우를 가정하여 패드강성의 범위를 150, 200, 250, 300, 350MN/m² 등 5가지의 경우에 대하여 매개변수해석을 수행하였다. 패드강성을 침목당 강성으로 변화하면 90, 120, 150, 180, 210MN/m가 된다. 레일패드의 경화가 궤도부담력에 미치는 영향을 분석을 위하여 동적 윤중, 레일의 변위와 가속도, 침목의 변위와 가속도를 분석하였다.

* 윤태형, 정회원, 서울산업대, 철도전문대학원

TEL : (02) 2077-5722 FAX : (02) 2077-6383

** 한국철도기술연구원 선임연구원

*** 한국철도기술연구원 책임연구원

**** 한국철도기술연구원 주임연구원

2. 수치해석

2.1 해석 개요

레일의 요철에 따른 영향을 분석하기 위하여 레일 요철의 크기와 파장을 변화시켜 가면서 해석을 수행하였다. 궤도시스템의 동적해석을 위한 해석프로그램으로는 네덜란드 델프트 공과대학에서 개발된 궤도시스템 전용 해석 프로그램인 DARTS를 사용하였다. 패드의 경화가 궤도부담력에 미치는 영향을 알아보기 위하여 동적윤증, 레일의 변위와 가속도, 침목의 변위와 가속도를 분석하였다.

2.2 동적수치해석을 위한 모델링

가. 궤도 모델

자갈도상궤도의 해석을 위한 모델의 기본형상은 (그림 1)과 같고 각 궤도구성요소의 물성치는 표 1과 같다. 레일은 전단을 고려한 Timoshenko Beam을 사용하였으며, 레일패드는 스프링과 댐퍼로, 침목은 강체거동을 하는 질량체로, 자갈도상과 궤도하부 노반은 하나의 스프링과 댐퍼로 모델링하였고 침목을 제외한 궤도 구성체의 질량은 무시하였다.

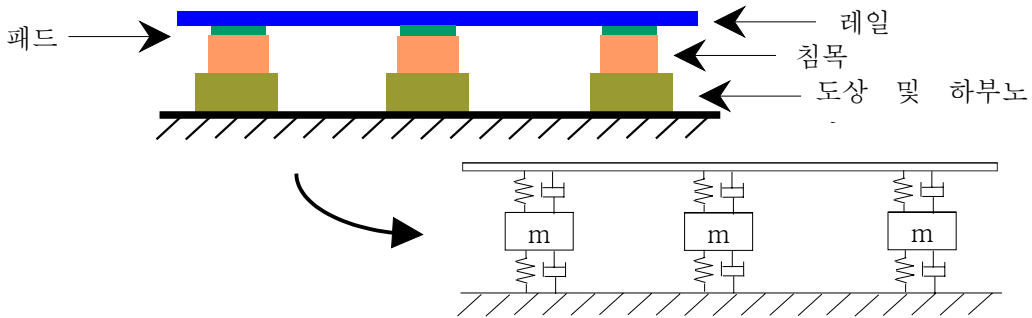


그림 1. 궤도해석의 기본 모델

표 1. 해석에 사용된 궤도 물성치

항목	물성치 및 제원	항목	물성치 및 제원
레일	UIC60	침목단위길이당 질량	0.24 ton/m
레일패드스프링계수	$90 \times 10^3 \sim 210 \times 10^3$ kN/m	침목침목간격	0.60 m
레일패드댐핑계수	3.0×10^1 kN/sec/m	도상 및 노반 탄성계수	1.26×10^5 kN/m
침목저면유효폭	0.27 m	도상 및 노반 댐핑계수	98 kN/sec/m

나. 차량 모델

차량은 KTX차량의 각종 제원을 기본으로 하였다. 차량의 주행안전성을 검토하기 위해서는 실제 주행하는 20량 1편성의 차량을 고려하여 해석하는 것이 합리적이지만 본 검토의 목적인 궤도의 거동을 살펴보는 목적으로는 가장 큰 중량을 가진 동력차만을 고려하여 해석하여도 결과에 영향이 없기 때문에 동력차 부분만을 고려하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 차량의 모델은 (그림 3)과 같으며 물성치 및 제원은 (표 2)와 같다. 차체는 강체거동을 하는 질량체로, 차체 아래의 2차 현가장치는 스프링과 댐퍼

로, 대차는 강체거동을 하는 질량체로, 대차아래의 1차 현가장치는 스프링과 댐퍼로 모델링하였다. 차량의 바퀴는 강체거동을 하는 질량체로 모델링하였으며, 휠과 레일의 접촉효과는 헤르쯔안 스프링으로 모델링하여 고려하였다.

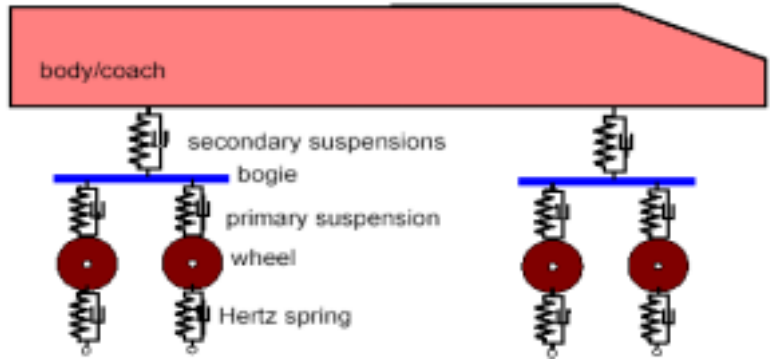


그림 2. 해석에 사용된 차량 모델

표 2. KTX 동력차 및 동력대차의 물성치 및 제원

항목	물성치 및 제원
차체질량(ton)	54.96
차체의 관성모멘트(Gallop motion, $\text{ton} \cdot \text{m}^2$)	1131.9
대차질량 (ton) (스프링하질량 포함)	2.42
대차의 관성모멘트 (Y-Y) ($\text{ton} \cdot \text{m}^2$)	2.593
스프링하질량(윤축질량) (ton)	2.048
1차 현가장치 스프링 (MN/m)	2.504
1차 현가장치 댐퍼 (MN/sec/m)	0.032
1차 현가장치 스프링 (MN/m)	2.536
1차 현가장치 댐퍼 (MN/sec/m)	0.057

2.3 해석경우

궤도의 동적응답은 차량의 운행속도 및 차량과 궤도시스템의 동특성과 연계되어 나타나게 된다. 본 연구에서는 궤도시스템의 동특성에 영향을 미치는 레일패드의 강성변화와 함께 차량의 운행속도를 변화시켜가면서 각 속도대역별로 레일패드의 강성이 변화할 경우를 고려하여 총 70가지 경우의 동적해석을 수행하여 궤도부담력의 변화를 분석하여 보았다.

- 레일패드 강성 변화 : 90, 120, 150, 180, 210 MN/m
- 속도 변화 : 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 275, 300, 325, 350 km/hr

3. 해석결과

3.1 동적윤증변화

패드의 강성 변화에 따른 윤증의 변화를 살펴보았다. 궤도시스템의 동특성은 궤도를 구성하는 요소들

의 동적 특성에 따라 변화하게 되는데 패드의 강성변화 역시 궤도시스템의 동특성에 영향을 미치게 된다. 패드의 강성이 증가하게 되면 궤도시스템의 강성이 증가하게 되고 이에 따라 궤도시스템의 고유주파수가 증가하게 된다. 한편 차량으로부터 궤도에 전달되는 가진주파수는 침목의 간격과 차량의 주행속도에 대한 영향이 가장 크게 작용하게 되는데 침목의 간격이 좁을수록 차량의 주행속도가 빠를수록 가진주파수가 증가하게 된다. 궤도 특히 스프링하질량 시스템의 고유주파수와 가진주파수가 근접하게 되면 공진현상이 발생하게 되는데 (그림 1)의 해석결과에서도 패드의 강성과 속도에 따라 운중의 피크치가 달라지는 것을 알 수 있다. 이는 앞에서 설명했듯이 가진주파수와 궤도의 고유주파수가 근접함에 따라 발생하는 현상을 보여주고 있는 것이다. 패드의 강성이 90kN/m 인 경우에는 시속 125km/hr에서 1차 극대치를 보여주고 있으며 120kN/m와 150kN/m 인 경우에는 시속 150km/hr에서 1차 극대치를 보여주고 있다. 만약 차량의 주행속도를 좀 더 세분화하여 해석할 경우에는 패드강성 120kN/m인 경우와 150kN/m인 경우 속도에 따른 피크치가 다르게 나타날 것이다. 즉, 패드강성의 증가에 따라 궤도시스템의 고유주파수가 증가하고 주행속도의 증가로 인해 가진주파수 역시 증가하기 때문에 레일패드의 강성변화에 따라 1차 피크치가 발생하는 대역이 달라지게 된다. 공진주파수를 벗어난 속도대역에서는 차량의 주행속도가 동일할 경우, 패드의 강성이 증가함에 따라서 운중이 증가하는 경향을 보임을 알 수 있는데 이는 패드의 강성이 증가할수록 궤도의 시스템 강성이 증가하고 이에 따른 충격량의 증가로 운중이 증가하는 것으로 분석된다.

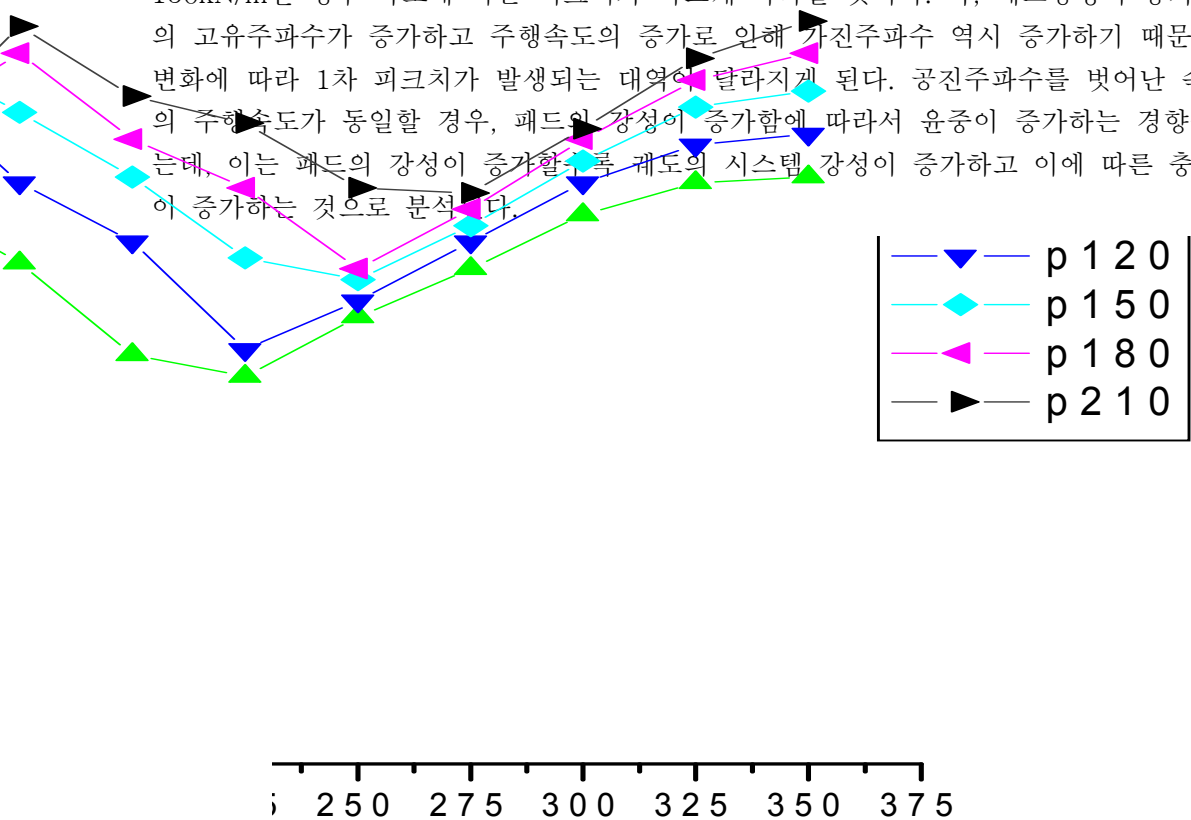


그림 1. 패드강성에 따른 운중 최대치

3.2 레일의 변위와 가속도

(그림 2)는 패드의 강성변화와 주행속도에 따른 레일의 변위를 나타내고 있다. 그림에서도 알 수 있듯이 레일의 변위는 속도의 변화에 의한 영향이 거의 없이 일정한 값을 보여주고 있다. 그러나 미소하지만 운중의 변화율에서 나타났던 하질량시스템의 고유주파수와 가진주파수의 공진현장을 보여주고 있다. 레일의 변위가 속도에 대한 영향이 적은 이유는 속도의 변화에 따라 운중이 변화하지만 하중의 지속시간 역시 변화하기 때문이다. 즉 운중의 변화가 레일의 변위에 영향을 미치기 위해서는 일정 시간이상으로 하중이 지속적으로 작용되어야 하지만 속도가 증가하게 되면 하중의 지속시간이 감소하게 되므로 속도의 영향을 작게 받게 되며, 경우에 따라서는 속도가 증가함에 따라서 변위가 감소하는 경우도 발생된다. 동일속도대역에서 레일패드의 강성변화에 따른 변위를 살펴보면 레일패드의 강성이 증가할수록 레

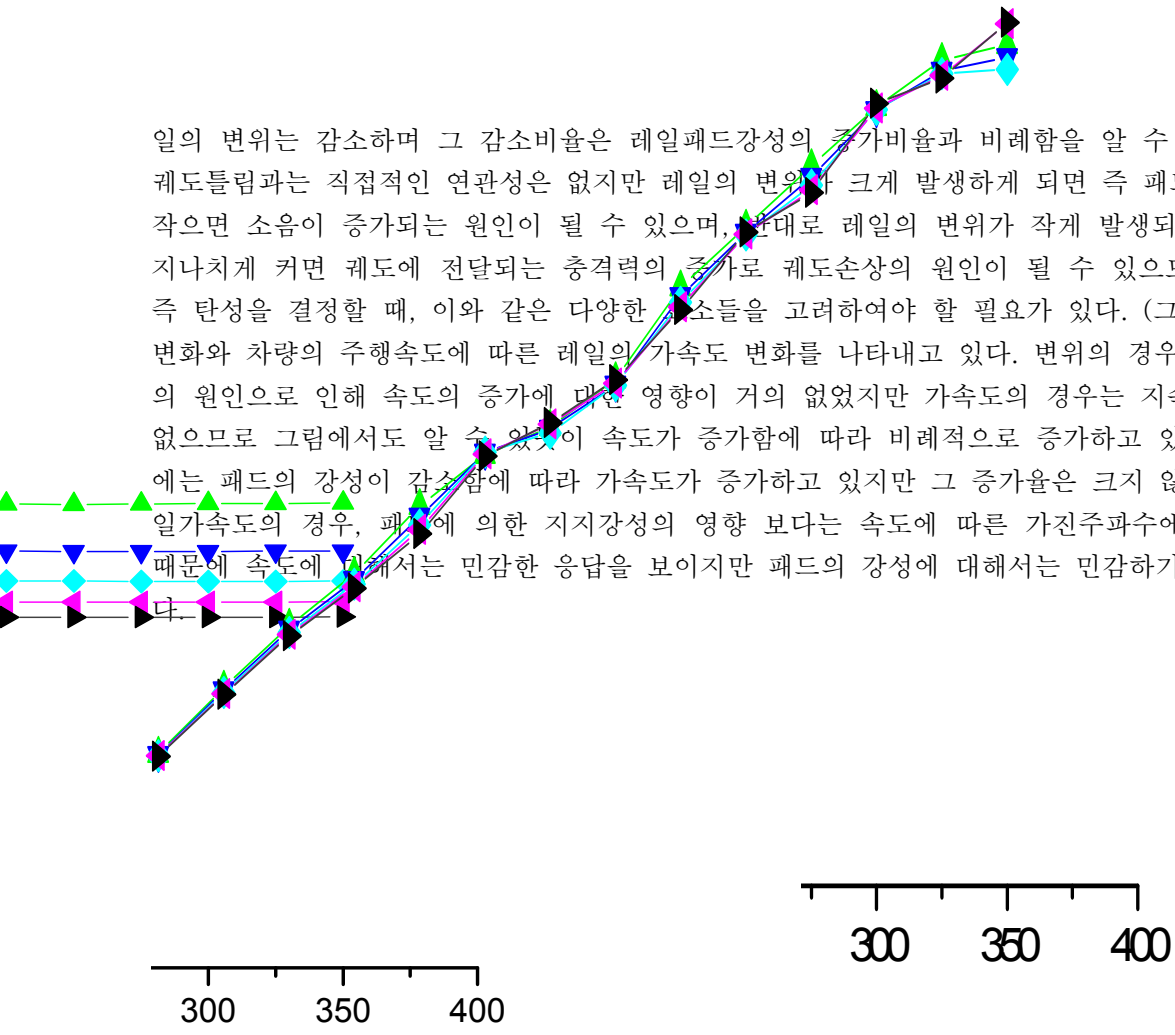


그림 3. 패드강성 변화에 따른 레일변위 최대치

그림 4. 패드강성 변화에 따른 레일가속도 최대치

3.3 침목의 변위와 가속도

패드의 강성과 속도변화에 따른 침목의 변위와 가속도를 살펴보았다. 속도의 변화에 따라서는 레일의 변위에서와 마찬가지로 미소하지만 하질량시스템의 고유주파수와 가진주파수의 공진현상을 보여주고 있음에도 불구하고 속도의 변화가 침목의 변위에 크게 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 동일 속도 대역에서의 패드강성에 따른 변화를 살펴보면 패드의 강성이 증가할수록 침목의 변위가 증가되는데 이는 패드의 강성이 클수록 더 많은 하중에 침목으로 전달됨을 의미한다. 즉 패드가 경화되면 침목의 변위가 증가하고 이로 인하여 도상으로 전달되는 하중과 변위, 그리고 다음에 설명할 가속도 증가되어 궤도틀림의 진행을 가속화시킬 수 있음을 보여주는 결과로서 패드 열화에 따른 강성의 증가 즉 탄성의 소실에 따른 영향을 보여주는 것이라 할 수 있다.

(그림 6)은 침목의 가속도 변화를 나타내고 있는데, 레일가속도의 경우와 마찬가지로 침목의 가속도 역시 속도가 증가함에 따라 가속도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 저속도 대역에서는 패드의 강성차이에 의한 가속도가 크지 않지만 고속대역에서는 패드의 강성에 따라 가속도의 차이가 크게 나타나고 있는데 이는 속도의 증가에 따라 패드의 진동차단효과가 커지는 것을 의미하므로 고속대역에서 패드강성관리의 중요성을 보여주는 것이라 하겠다. 또한 패드의 강성이 클수록 가속도가 증가하는데 침목의 가속도가 증가하면 앞에서 언급하였듯이 도상의 교란을 야기하여 궤도틀림의 진전을 가속화시킬 수 있으므로 고속대역일수록 레일패드의 역할이 중요함을 알 수 있다.

p e r

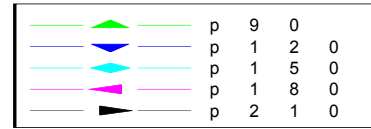
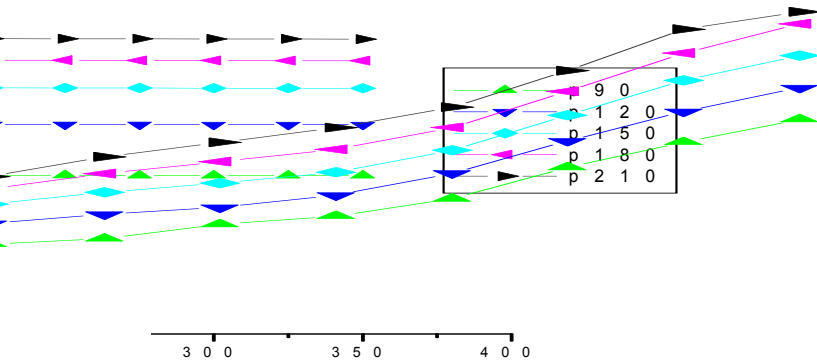


그림 5. 패드강성 변화에 따른 침목변위 최대치

그림 6. 패드강성 변화에 따른 침목가속도 최대치

4. 결론

이상의 분석을 통하여 패드의 강성변화가 궤도의 거동에 미치는 영향을 알아보았다. 레일패드의 강성에 따른 윤중의 변화, 레일의 변위와 가속도, 그리고 침목의 변위와 가속도의 변화정도를 살펴보았다. 레일 패드의 강성변화가 궤도의 응답에 미치는 영향을 요약하면 다음과 같다.

- ① 패드강성의 증가에 따라 궤도시스템의 고유주파수가 증가하고 주행속도의 증가로 인해 가진주파수가 역시 증가하기 때문에 레일패드의 강성변화에 따라 1차 피크치가 발생하는 대역이 달라지게 된다. 차량의 주행속도가 동일할 경우에는 패드의 강성이 증가함에 따라 윤중이 증가하는 경향을 보임을 알 수 있는데 같은 속도대역에서는 패드의 강성이 증가할수록 궤도의 시스템 강성이 증가하여 충격량이 증가함에 따라 윤중이 증가하는 것으로 분석된다.
- ② 레일패드의 강성변화와 속도에 따른 레일의 변위와 가속도를 살펴본 결과, 레일의 변위는 속도의 변화에 대한 영향은 작은 것으로 나타났으며, 동일속도대역에서는 레일패드의 강성이 증가할수록 레일의 변위는 감소하며 그 감소비율은 레일패드강성의 증가비율과 비례함을 알 수 있었고, 레일 패드의 강성이 작을수록 속도가 증가할수록 레일의 가속도가 증가함을 알 수 있었다.
- ④ 패드의 강성과 속도변화에 따른 침목의 변위와 가속도 변화를 살펴본 결과, 속도의 변화가 침목의 변위에 크게 영향을 미치지 못하는 반면에 동일 속도 대역에서의 패드강성에 따른 변화를 살펴보면 패드의 강성이 증가할수록 침목의 변위가 증가됨을 알 수 있었다. 즉 차량하중의 도상으로 전 달률이 높아져 되는 궤도틀림의 진행을 가속화시킬 수 있으므로 패드열화의 정도에 따른 패드교체의 필요성을 보여주고 있다. 침목가속도의 변화 경향을 살펴보면, 저속도 대역에서는 패드의 강성차이에 의한 가속도가 크지 않지만 고속대역에서는 패드의 강성에 따라 가속도의 차이가 크게 나타나고 있는데 이는 속도의 증가에 따라 패드의 진동차단효과가 커지는 것을 의미하므로 고속대역에서 패드강성관리가 중요함을 보여주고 있다.

5. 참고문헌

- 한국고속철도건설공단, 시운전시 궤도 노반시설물 성능검증 연구보고서, 2003
- 양신주, “차량/궤도 상호작용해석을 통한 레일패드강성 영향 분석”, 한국철도학회 2004추계학술대회 논문집, pp 197-205
- “Modern Railway Track, 2nd ed.” 2001, Coenraad Esveld, MRT Production
- “Railway Engineering”, 1995, V.A. Profillidis, Avebury Technical