

http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2018.4.4.413  
JCCT 2018-5-55

## 도시철도 콘크리트궤도(STEDEF)의 레일파상마모 발생원인 분석을 위한 실험적 연구

### An Experimental Study on Causes Evaluation of Rail Corrugation for Concrete track(STEDEF) in Urban Transit

최정열\*, 공형식\*\*, 김준형\*\*\*, 김학선\*\*\*\*, 정지승\*

Jung-Youl Choi\*, Hyung-Sik Gong\*\*, Jun-Hyung Kim\*\*\*,  
Hak-Seon Kim\*\*\*\*, Jee-Seung Chung\*

**요약** 본 연구에서는 도시철도 콘크리트 궤도(STEDEF)구조에 발생한 레일파상마모의 발생원인과 이에 따른 궤도부담력의 수준을 분석하고자 실 운행열차를 대상으로 현장측정을 수행하여 동적 윤중, 레일저부휨응력 및 침묵변위를 측정하였다. 동적 윤중 측정데이터를 이용한 주파수 분석을 통해 측정구간에 발생한 파상마모의 발생원인을 실험적으로 입증하였으며, 파상마모가 동적 윤중, 레일휨응력 및 침묵변위 증가에 미치는 영향을 분석하였다. 연구결과, 레일 표면에 발생한 주기적인 요철형상의 파상마모는 동적 윤중을 증폭시키고 이에 따라 레일 휨응력 및 침묵변위를 최대 1.7배 이상 크게 증가시킬 수 있는 것으로 분석되었다.

**주요어** : 도시철도, 콘크리트 궤도, 레일 파상마모, 현장측정, 궤도부담력

**Abstract** The purpose of this study is to investigate the cause of rail corrugation and the track force for concrete track (STEDEF) in the urban transit. From the field measurements, the dynamic wheel load, vertical displacement of sleeper and rail bending stress were measured and it was evaluated by regarding to the rail corrugation. As a result of the study, the causes of rail corrugation was experimentally proved by frequency analysis using measured dynamic wheel load data. The influence of corrugation on dynamic wheel load, rail bending stress and sleeper displacement was evaluated that the periodic irregularities of rail corrugation on the rail surface amplified the dynamic track force such as the dynamic wheel load, and thus the rail bending stress and the vertical displacement of sleeper could be increased by a maximum of 1.7 times.

**Key words** : Urban transit, Concrete track (STEDEF), Rail corrugation. Field measurement, Track force

## 1. 서 론

도시철도 콘크리트궤도에 적용된 다양한 궤도구조

형식 중 STEDEF 궤도구조는 침묵상자에 의해 도상콘크리트와 콘크리트침묵이 분리되고 침묵하면에는 고탄성 방진패드와 삽입되어 궤도에 작용하는 열차하중 및

\*정회원, 동양대학교 철도건설안전공학과  
\*\*정회원, 서울교통공사 궤도2사업소 (교신저자)  
\*\*\*정회원, ㈜모든택 철도인프라연구소  
\*\*\*\*정회원, 서울교통공사 토목2사업소  
접수일: 2018년 9월 22일, 수정완료일: 2018년 10월 11일  
게재확정일: 2018년 10월 28일

Received: September 22, 2018 / Revised: October 11, 2018  
Accepted: October 28, 2018  
\*\*Corresponding Author: ghs0512@smrt.co.kr  
Dept. of 2 Track Engineering office, Seoul Metro, Korea

진동특성이 구조물로 전달되는 것을 방지하기 위해 고안된 침목플로팅궤도 중 하나이다. 콘크리트궤도는 자갈궤도보다 궤도틀림 발생 및 주기적인 도상자갈의 관리가 불필요하여 궤도유지관리 측면에서 다소 유리한 것으로 알려져 있다. 그러나 콘크리트궤도로 부설된 실제 도시철도 운행선에서는 다양한 형식의 레일표면결함이 발생되고 이에 따라 승차감 저하 및 궤도충격 등이 발생되고 있는 실정이다.

구름접촉피로(Rolling contact fatigue, RCF)에 의해 레일 표면에 발생하는 대표적인 손상유형(Headcheck, spalling, shelling, etc)은 대부분 주기적인 레일연마 또는 밀링 등으로 제거가 가능하며 반복적인 차륜의 구름 접촉에 의해 발생하는 차륜-레일 접촉면의 소성변형층을 주기적으로 제거한다면 RCF손상을 사전에 예방할 수도 있다. 그러나 레일표면에 주기적인 파장의 형태로 발생하는 레일마모의 유형인 파상마모(Corrugation)은 연마나 밀링으로 일시적으로 제거가 가능할 수도 있으나 파상마모의 깊이가 깊을 경우 제거가 어려우며 뿐만 아니라 이내 재발되어 일정주기로 형성된 레일표면의 요철로 인해 차량의 승차감을 악화시키고 소음, 진동 및 충격 등을 증폭시켜 궤도구성품의 열화 및 손상을 가속시킬 수 있다.

레일두부에 발생하는 결함과 관련하여 하관용과 김희식은 도시철도 차량의 운전모드에 의한 레일마모 현상에 관한 연구를 수행하여, 열차가속도의 견인력과 감속도의 제동력에 의해 발생하는 레일 마모량을 비교, 분석하여 궤도관리 방안을 제시하였으며, 양신추와 장승엽은 실제 고속철도 자갈궤도에서 측정된 레일 요철을 입력으로 차량-궤도 동적상호작용 해석프로그램을 이용하여 고속철도 레일표면 결함 관리기준에 관해 분석하였다[1-2]. 또한 김만철과 유원희는 도시철도 운영 환경에서 파상마모에 의한 레일체결장치 클립의 진동 특성을 분석하였다[3].

본 연구에서는 파상마모가 발생된 STEDEF 궤도구조를 대상으로 파상마모 유무에 따라 궤도구조에 발생하는 동적 윤중, 레일수직변위 및 레일저부응력 등을 측정하여 파상마모가 궤도부담력에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 동적 윤중 측정결과를 이용한 주파수분석을 통해 측정구간에 발생한 파상마모의 발생원인을 분석하였다.

## II. 레일 파상마모 발생 메커니즘

레일 파상마모의 발생원인은 현재까지 다양한 연구자들에 의해 연구되고 있으며 현재까지 알려진 바에 의하면 파상마모의 발생 원인은 물리적인 접촉에 의한 마모가 아닌 차량-궤도시스템간의 동적인 공진현상인 것으로 나타났다[4-5]. 레일표면에 주기 또는 불규칙한 주기패턴을 갖는 요철이 고정된 형태를 파상마모라 부르며 이는 차량-궤도의 강성 및 질량과 궤도의 자유도 특성이 복합적으로 작용하여 열차의 주행속도 및 기타 가진요인에 의해 유발되어 발생하는 동적 레일마모의 대표적 현상을 의미한다[4,6-8].

대표적인 파상마모의 발생메커니즘은 차량-궤도시스템에서 공진유발 주파수 대역에 따라 크게 3가지로 구분될 수 있다[6-8]. 저주파대역의 P2 공진의 경우 차륜-레일 상호작용력의 일종인 P2 하중이 레일용접부 또는 표면요철 등의 가진요인에 의해 증폭되어 약 50~100Hz 대역의 공진을 유발시키는 것을 의미하며, 차량의 스프링하 질량에 해당하는 차축의 2차 비틀림 공진현상에 의해 발생하는 약 250~500Hz 대역의 공진현상도 파상마모의 주요 메커니즘이다[6].

또한 레일지지점을 기준으로 발생하는 Pin-Pin공진이 고주파 대역의 공진유발 주파수로써 일정간격으로 이산지지되어 있는 철도 레일의 수직방향 휨모드의 1차, 2차 모드에 해당하는 주파수로 인해 레일이 공진되어 발생됨으로써 일정한 주기와 요철을 갖는 파상마모가 레일표면에 형성되는 것을 의미한다[6,7].

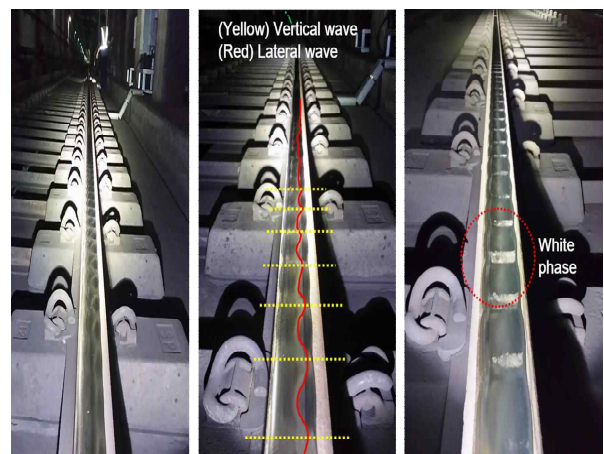


그림 1. 방진상자형 침목플로팅궤도의 파상마모 전경  
Figure 1. Photographs of corrugation of booted track

본 연구의 대상궤도구조인 침목플로팅 궤도구조(STEDEF)에 발생한 레일 파상마모의 전경은 그림 1과 같다. 그림 1과 같이 방진상자에 의해 도상콘크리트 층과 분리되어 침목의 자유도(Degree of freedom, DOF)가 수직, 수평 및 종방향으로 형성되는 궤도구조에서 자유도의 방향중 침목의 횡방향 공진과 차량의 스프링 하 질량인 차축과 궤도지지강성간의 공진현상에 의해 레일표면에는 횡방향 파장이 발생되고 해당 파장의 주기와 일치하는 수직방향 요철이 형성된 것으로 나타났다[6]. 또한 그림 1과 같이 수직방향 요철이 큰 경우 요철의 피크부분이 주행차륜에 의해 타격받으면서 발생되는 찰상현상으로 인해 White phase 현상이 함께 발생된 것으로 조사되었다[4].

### III. 현장측정

#### 1. 현장측정 개요

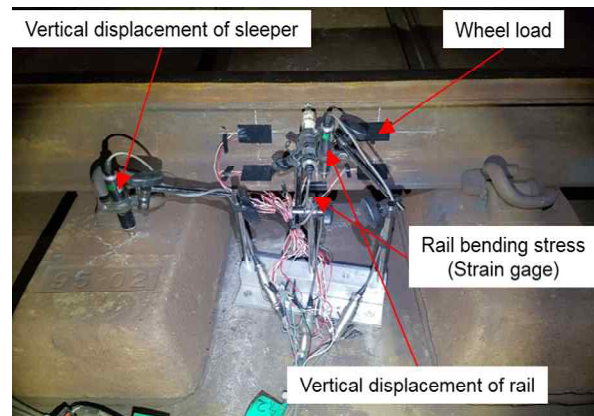
본 연구에서는 도시철도 콘크리트궤도(STEDEF)의 파상마모 발생원인 분석을 위해 현장측정을 시행하였다. 현장측정 개소는 곡선터널구간(R=400m)으로써 현장 부설칸트는 144mm이며 2018년 10월 현재 대상선로의 누적 통과톤수는 약 5.54억톤이다. 측정구간에서 운영되는 차량은 8량 편성의 정적 운중은 80kN인 열차이며 측정구간을 주행하는 평균속도는 42km/h이고 고정 축간거리는 2.1m이다.

그림 2(a)는 측정대상 구간에 발생한 파상마모의 전경으로써 해당구간의 내측레일에는 일정주기의 요철이 형성된 파상마모가 발생된 것으로 조사되었다. 또한 그림 1에서 설명한 바와 같이 레일의 축방향(열차진행방향)으로 형성된 일정주기의 파장이 조사되었으며 수직방향 및 횡방향 주기형상이 뚜렷하게 발견되었다.

그림 2(b)는 측정구간의 전경 및 센서설치 전경을 나타낸다. 본 연구에서는 레일파상마모가 동적운중, 레일 및 침목의 변위를 비롯하여 레일저부응력에 미치는 영향을 분석하고자 그림 2(b)와 같이 운중센서 및 변위계, 변형율계를 설치하여 열차주행 시 레일파상마모 개소에서 발생하는 궤도부담력을 측정하였다[9,10].



(a) Photographs of tested section



(b) Sensors instrumentation

그림 2. 측정구간 센서 설치전경

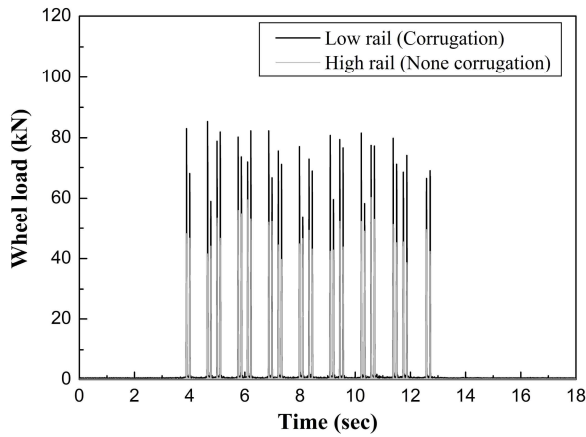
Figure 2. Photographs of sensors instrumentation

#### 2. 측정결과 및 분석

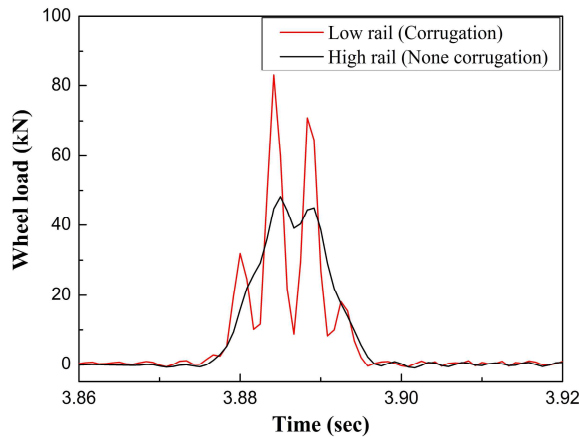
Fig. 3(a)는 동적 운중 측정파형의 예로써 파상마모가 있는 내측레일에서 측정된 동적운중이 파상마모가 없는 외측레일에서 측정된 운중보다 확연히 큰 것으로 나타났다. 또한 파상마모에 따른 동적 운중 측정파형의 형상을 분석하고자 윤축하나에 해당하는 측정파형을 그림 3(b)와 같이 나타내었다. 그림 3(c)와 같이 동적 운중측정을 위해 설치한 운중센서의 설치구간에 형성된 4개의 파장이 그림 3(b)와 같이 동적 운중 측정파형의 피크값의 증폭 및 피크의 개수에 직접적인 영향을 미치는 것으로 나타났다.

그림 3(c)와 같이 운중센서가 설치된 200mm의 범위에 주기가 약 30~40mm인 파상마모의 파장이 총 4개 존재하였으며, 해당위치를 열차가 주행하면서 발생시킨 동적 운중의 피크값에 레일표면에 형성된 파상마모의 4개의 피크가 반영되어 파상마모가 없는 외측레일의 운

중보다 약 1.7배 증가된 동적 윤증이 발생된 것으로 분석되었다.



(a) Dynamic wheel load measured



(b) Zoom of peak dynamic wheel load



(c) Photos of corrugation on tested section

그림 3. 동적 윤증 측정결과

Figure 3. Measured results of dynamic wheel load

레일표면에 발생된 주기적인 요철(파상마모)은 동적 윤증을 최대 1.7배 이상 증폭시킴과 동시에 파장의 개수만큼 레일을 가력함으로써 파상마모가 생성된 레일 및 궤도구성품의 부담력을 가중시킬 수 있을 것으로 분석되었다. 따라서 파상마모는 일반적인 장대레일의 레일용접부에서 발생하는 궤도충격효과 보다 상대적으로

큰 수준의 궤도충격을 유발시킬 수 있을 것으로 분석되었다.

그림 4는 동적 윤증 측정데이터를 이용하여 주파수 분석(FFT)을 통해 파상마모 발생유무에 따른 궤도의 가진주파수 차이를 분석한 결과를 나타낸다[9,10].

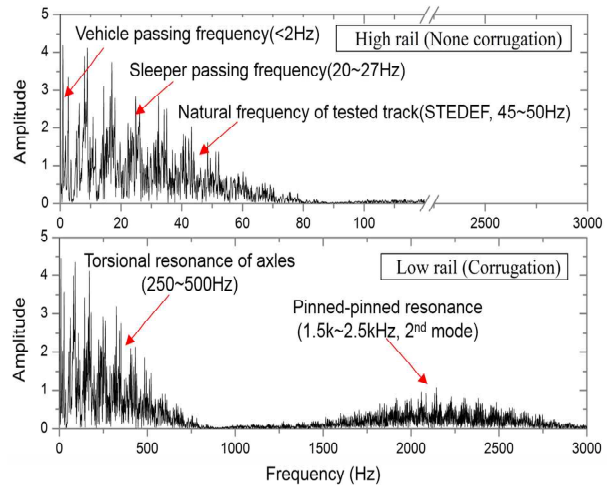


그림 4. 파상마모 유무에 따른 주파수 분석결과

Figure 4. Frequency analysis results according to corrugation

그림 4와 같이 파상마모가 없는 경우 궤도에 발생하는 주파수 대역이 전반적으로 100Hz 이하로 나타났으며, 차량의 고정축거에 의해 가진되는 차량통과 주파수 대역과 침목통과 주파수 대역 및 궤도의 고유진동수 대역이 주요 발생주파수로 분석되었으나, 파상마모가 있는 내측레일의 경우 일반적인 파상마모 발생 메커니즘인 차축의 비틀림 2차 공진주파수 대역 및 Pin-Pin 공진주파수 대역과 같은 중, 고주파 대역의 가진주파수가 발생하는 것으로 분석되었다.

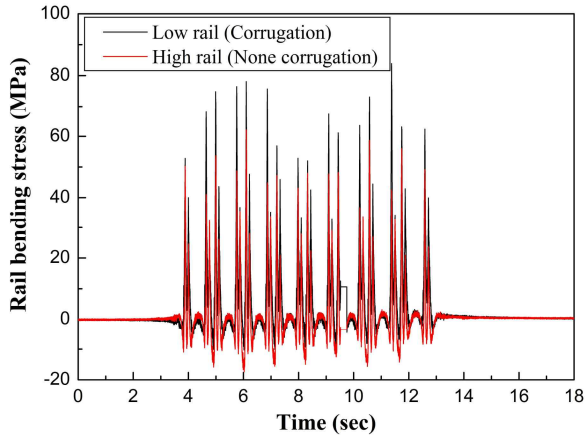
또한 파상마모가 있는 경우에는 없는 경우 보다 상대적으로 높은 주파수 대역의 가진주파수의 영향을 받게 되어 궤도재료의 열화 및 진동특성이 불리하게 작용될 수 있을 것으로 분석되었다.

그림 5는 파상마모에 의한 동적 레일저부응력의 증폭현상을 분석한 예로써 그림 5(b)와 같이 파상마모가 발생된 레일의 동적 휨응력이 동적 윤증 증가수준과 유사하게 최대 1.8배 이상 증폭되는 것으로 분석되었다.

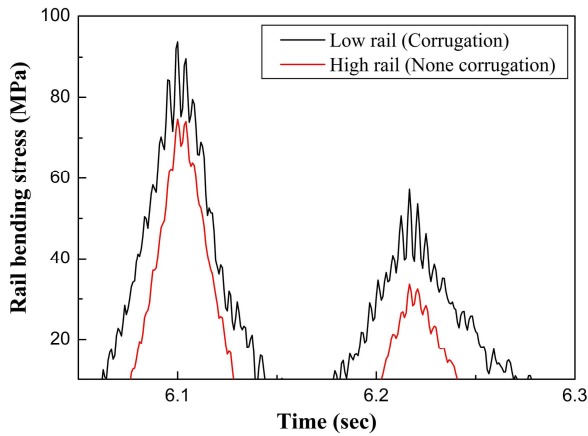
따라서 레일 파상마모는 동적 윤증과 같은 차륜-레일의 접촉하중(Dynamic wheel-rail contact force)의 증가뿐만 아니라 레일 휨응력의 변동수준을 증폭시키고



이에 따라 레일에 발생하는 변동응력의 범위가 증가하여 레일저부에 발생하는 휨응력의 범위로 결정되어 지는 레일의 휨 피로수명을 단축시키는 데에 영향을 미칠 수 있을 것으로 분석되었다.



(a) Rail bending stress measured



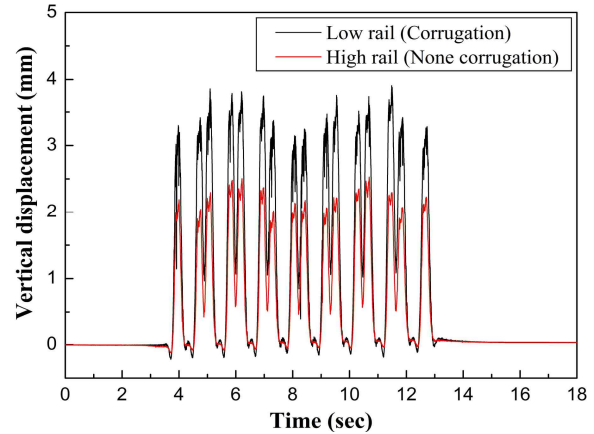
(b) Zoom of peak rail bending stress

그림 5. 동적 레일저부응력 측정결과  
 Figure 5. Measured results of dynamic rail bending stress

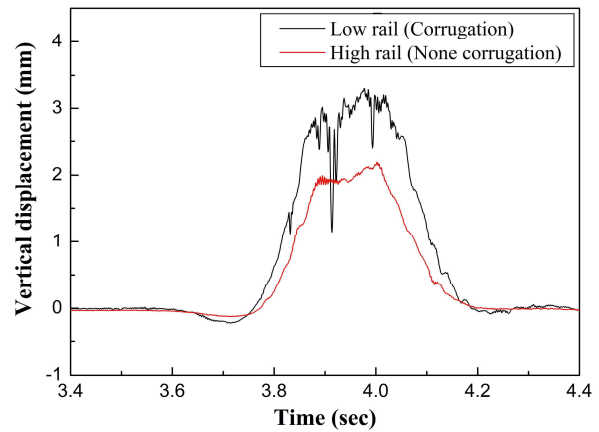
그림 6은 파상마모 발생 유무에 따른 동적 침목 수직변위 측정결과를 나타낸다. 그림 6과 같이 파상마모는 동적윤중 및 레일저부응력의 증가와 함께 침목 수직변위의 발생수준을 최대 1.6배 이상 증폭시키는 것으로 분석되었다. 따라서 레일표면에 발생된 파상마모는 동적 윤중을 증가시키고 이에 따라 레일의 휨응력 및 침목 수직변위의 증가를 초래할 수 있음을 실험적으로 입증하였다.

또한 본 연구의 대상궤도구조와 같이 콘크리트침목

직하부에 고탄성 침목방진패드가 설치되어 있는 STEDEF 궤도구조의 경우 침목의 수직변위 증가는 침목방진패드의 부담력이 가중됨을 의미하며 동일한 열차가 주행하더라도 파상마모가 있는 레일 직하부 침목방진패드는 상대적으로 큰 피로하중을 부담할 수 있음을 의미한다.



(a) Vertical displacement of sleeper measured



(b) Zoom of peak vertical displacement of sleeper

그림 6. 동적 침목 수직변위 측정결과  
 Figure 6. Measured results of dynamic vertical displacement of sleeper

#### IV. 결 론

본 연구에서는 도시철도 콘크리트궤도(STEDEF)에 발생된 레일 파상마모의 발생원인 및 파상마모가 궤도 부담력에 미치는 영향을 분석하고자 현장측정을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 동적 윤중 측정과형을 이용하여 수행한 파상마모

발생유무에 따른 궤도의 가진 주파수 분석(FFT) 결과를 이용하여 측정구간에 발생한 파상마모의 원인을 차축의 비틀림 2차 공진 및 Pin-Pin 공진임을 실험적으로 입증하였다. 따라서 본 연구의 측정구간의 경우 차축의 비틀림 공진을 방지하기 위한 고성능 댐퍼설치 또는 차량의 1차 현가장치(스프링)의 성능개선이 필요한 것으로 분석되었다.

궤도측면에서의 대책으로는 Pin-Pin공진현상을 방지하기 위해 궤도의 고유진동수를 현재의 공진주파수 대역을 벗어나도록 튜닝할 필요가 있으며 이를 위해 침목 방진패드 또는 레일패드의 스프링강성을 현재의 것과 다른 스프링강성으로 변화시켜 공진유발주파수 대역을 회피하는 방안을 강구함이 바람직한 것으로 판단된다. 또한 해당개소의 내측레일에 발생된 파상마모가 내측 침목방진패드의 열화에서 기인된 현상일 가능성도 배제할 수 없으므로 향후 해당개소에서 채취한 침목방진패드를 이용한 스프링강성 시험결과를 함께 분석해야 할 것으로 판단되었다.

2) 파상마모가 궤도부담력에 미치는 영향을 분석한 결과, 파상마모는 동적 윤증을 최대 1.7배 이상, 레일의 동적 휨응력은 최대 1.8배 이상 증폭되는 것으로 분석되었으며, 침목변위의 발생수준을 최대 1.6배 이상 증폭시켜 레일지지점(침목)을 형성하고 있는 탄성재료(침목 방진패드)의 열화에 영향을 미칠 수 있으며 이에 따라 탄성재료의 사용수명 단축에도 영향을 미칠 수 있을 것으로 분석되었다.

Cause and Treatments”, Proceeding IMechE Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 223, pp. 1-17, 2009

[5] P.A. Meehan, W.J.T. Daniel, T. Campey, “Prediction of the Growth of Wear-Type Rail Corrugation”, Wear, 258, pp. 1001-1013, 2005

[6] C. Collettea, P. Vanhonacker, R. Bastaits, D. Levy, “Comparison between Time and Frequency Studies of a Corrugated Curve of RER Paris Network”, Wear, 265, pp. 1249-1258, 2008

[7] I. Gómez, E.G. Vadillo, “A Linear Model to Explain Short Pitch Corrugation on Rails”, Wear, 255, pp. 1127-1142, 2003

[8] J.I. Egana, J. Vinolas, M. Seco, “Investigation of the Influence of Rail Pad Stiffness on Rail Corrugation on a Transit System”, Wear, 261, pp. 216 - 224, 2006

[9] J.Y. Choi, “Qualitative Analysis for Dynamic Behavior of Railway Ballasted track”, Ph.D dissertation, Technical University of Berlin, 2014

[10] J.Y. Choi, P.S. Kim, J.S. Chung, “A Study on Optimum Spacing of Rail Joint for Personal Rapid Transit(PRT) Track System,” The Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT), Vol. 4, No. 3, p.213-220, August 31, 2018

## References

[1] K.Y. Ha, H.S. Kim. “A Study of Rail Wear by Change of Acceleration and Deceleration”, Journal of the Korean Society for Railway, 10(5), pp. 607-612, 2007

[2] S.C. Yang, S.Y. Jang, “Investigation of the Maintenance Criteria for the Rail Surface Defects in High-Speed Railways”, Journal of the Korean Society for Railway, 14(6), pp. 535-544, 2011

[3] M.C. Kim, W.H. You, “Rail Corrugation Effects on the Dynamic Behavior of Clips of Rail Fastening System in Operation Environment of Urban Railway”, Journal of the Korean Society for Railway, 19(4), pp. 489-497, 2016

[4] S.L. Grassie, “Rail Corrugation: Characteristics,