

중립온도의 확률분포 특성에 따른 CWR 궤도의 안정성

Stability of CWR Tracks according to the Characteristics of the Probability Distribution of the Neutral Temperature

배 현 응* · 최 진 유** · 김 명 수*** · 이 진 옥**** · 임 남 형*****

Bae, Hyun-Ung · Choi, Jin-Yu · Kim, Myoung-Su · Lee, Chin-Ok · Lim, Nam-Hyung

요 약

장대레일 궤도의 부동구간에서 발생하는 과도한 축력은 흑서기 궤도의 좌굴을 유발시켜 주행하는 열차의 안정성을 위협할 수 있다. 궤도 제원을 제외한 압축응력과 관련된 레일온도 인자, 궤도 강성과 관련된 도상저항력, 궤도의 초기결함인 궤도틀림과 같은 인자들은 기후조건, 궤도 운영조건, 유지관리조건 등에 의해 임의적으로 변동되는 불확실성이 높은 궤도 매개변수이다. 그러므로 장대레일 궤도의 좌굴은 불확실성이 높은 현상임을 알 수 있다. 따라서 궤도 매개변수들의 불확실성 및 임의성을 합리적으로 고려하기 위해서는 확률론적 접근방법의 적용이 필수적이라 할 수 있다. 본 논문에서는 기존 본 연구진에 의해 개발된 장대레일 궤도의 좌굴확률 평가시스템을 이용하여 장대레일 축력을 산정하기 위한 필수요소인 중립온도의 확률분포 특성에 따른 좌굴 안정성을 분석하였다.

keywords : 장대레일, 좌굴, 중립온도, 설정온도, 확률분포

1. 서 론

장대레일(Continuous Welded Rail)은 기존 레일을 연속적으로 용접하여 이음매를 제거한 레일로, 신축이음을 용접함으로써 이음부에서 발생하는 소음 및 진동, 궤도재료의 손상, 승차감 불량, 잦은 궤도 보수주기 등의 문제점을 원천적으로 해소할 수 있는 장점을 가지고 있지만, 체결장치에 의해 도상, 침목 등에 이중 단성 체결되는 특성으로 인하여 레일양단 약 100m 이후의 구간에서 온도변동에 따른 신축의 영향을 받지 않는 부동구간이 발생하게 된다. 이 부동구간에서 발생하는 과도한 축력은 흑서기 궤도의 좌굴을 유발시켜 주행하는 열차의 안정성을 위협할 수 있다. 또한 궤도 제원을 제외한 압축응력과 관련된 레일온도 인자, 궤도 강성과 관련된 도상저항력, 궤도의 초기결함인 궤도틀림과 같은 인자들은 기후조건, 궤도 운영조건, 유지관리조건 등에 의해 임의적으로 변동되는 불확실성이 높은 궤도 매개변수이다. 이러한 불확실성이 큰 궤도 좌굴을 제어하기 위하여 기존에는 궤도 좌굴 인자들의 최악 조건을 상정하고 이를 이용하여 궤도 좌굴 위험성에 대비하는 일련의 과정을 결정론적으로 평가하고 관리하여 왔다. 그러나 불확실성이 높은 궤도 좌굴 매개변수(레일온도, 중립온도, 도상저항력, 궤도틀림 등)들의 특성을 확률변수로 고려하고 이를 이용하여 장대레일 궤도

* 학생회원 · 충남대학교 토목공학과 박사과정 dalmatian101@cnu.ac.kr

** 정회원 · 한국철도기술연구원 차륜궤도연구실 책임연구원 jychoi@krri.re.kr

*** 정회원 · 코레일 부산경남본부 시설처장 sumyoungkim@hanmail.net

**** 정회원 · 충남대학교 토목공학과 교수 colee@cnu.ac.kr

***** 정회원 · 충남대학교 토목공학과 부교수 nhrim@cnu.ac.kr - 교신저자

의 좌굴 위험성을 확률론적으로 평가하는 기술이 필요하다(Kish와 Samavedam, 1999).

불확실성이 높은 궤도 좌굴 매개변수 중 하나인 중립온도는 레일의 축력이 “0”일 때의 레일온도 즉, 무응력 온도로 현재 레일온도가 중립온도보다 낮으면 인장력이 발생되고, 반대로 중립온도보다 높으면 궤도의 좌굴을 유발시킬 수 있는 압축력이 발생한다. 하지만 중립온도는 고정된 값을 갖지 않고 유지관리 작업, 궤도의 상태, 기후조건 등 다양한 인자에 의해 변동된다. 이와 같은 중립온도의 변동에 의해 발생하는 축력 불균형을 해소하고 궤도의 안정성을 확보하기 위하여 재설정 작업을 실시하게 되는데, 국내 장대레일 설정온도는 선로정비지침(한국철도시설공단, 2008)에 따라 일반구간(터널구간 외)에서 $25\pm 3^{\circ}\text{C}$ 로 규정되어있다. 본 논문에서는 기존 본 연구진에 의해 개발된 장대레일 궤도의 좌굴확률 평가시스템을 이용하여 장대레일 축력을 산정하기 위한 필수요소인 중립온도의 확률분포 특성에 따른 좌굴 안정성을 분석하였다.

2. 좌굴확률 평가시스템

기존에 본 연구진에 의해 개발된 좌굴확률 평가시스템은 장대레일 궤도의 좌굴확률을 산정하기 위하여 구조물의 안정과 파괴를 판단할 수 있는 기준을 한계상태방정식(Limit State Equation)으로 표현한다. 한계상태방정식(g)에서, 구조물의 강도(보유성능;Capacity)에 해당하는 부분은 궤도의 허용좌굴온도(T_a), 하중(요구성능;Demand)에 해당하는 부분은 레일온도하중(T_L)으로써 허용좌굴온도 산정에 고려되는 주요변수는 곡선반경(Radius), 도상횡저항력(Lateral Ballast Resistance), 연직도상강성(Vertical Ballast Stiffness), 궤도 틀림량(Misalignment), 틀림길이(Half Wave Length), 열차운행속도(Velocity)이며, 레일온도하중은 현재레일온도(T_R)와 중립온도(T_N)의 차로 반영된다(식 1). 이 한계상태방정식과 확률변수들의 통계적 특성을 반영하는 신뢰도기법 중 하나인 AFOSM(Advanced First Order Second Moment) 방법을 이용하여 좌굴확률을 계산한다(배현웅 등, 2010).

$$g = C - D = T_a - T_L = f(R, LBR, VBS, MISA, HWL, V) - (T_R - T_N) = 0 \quad (1)$$

3. 해석결과의 분석

3.1 궤도 매개변수들의 결정론적 값 및 확률분포 특성치 결정

좌굴확률 평가시스템에 반영되는 각 확률변수들이 갖는 확률분포는 평균과 표준편차에 의해 결정되는 정규분포(Normal Distribution)로 가정하였고, 궤도의 기하학적 특성은 곡선반경 400~7,000m에 대해 고려하였으며 열차(KTX) 운행속도는 0km/h일 때를 고려하였다. 궤도의 틀림량과 틀림길이는 이에 대한 통계적 특성자료가 부족하여 확률변수로 고려하지 않고 결정론적 값으로 취급하였다. 본 연구에서는 악조건이 되는 초기결함을 고려하기 위해 궤도틀림에 대한 파고 10mm, 파장 10m로 결정하였다. 레일온도 확률분포의 평균값은 60°C , 표준편차는 본 연구진에 의해 구축된 기후요소 및 레일온도 데이터베이스(배현웅 등, 2010)를 근거로 하여 2.5°C 로 결정하였으며, 도상횡저항력 확률분포의 평균값은 12,000N/m/track(600kgf/m/rail)에 대해 고려하였고 표준편차는 실측데이터를 참고로 하여 평균값에서 $\pm 10\%$ 의 변동량을 갖는 것으로 보고 이 범위(10,800~13,200N/m/track) 안에 99.73%(표준정규분포상의 $\pm 3\sigma$)가 분포되는 것으로 결정하였다.

또한, 중립온도의 확률분포는 선로정비지침의 장대레일 설정온도 $25\pm 3^{\circ}\text{C}$ 를 기준으로 이 범위($22\sim 28^{\circ}\text{C}$) 안에 99.73%가 분포되는 것을 기본형으로 결정하였다. 그러나 앞서 언급했듯이 중립온도는 고정된 값을 갖지 않고 다양한 인자에 의해 변동되기 때문에 결정된 설정온도의 확률분포에 궤도조건에 따른 변동성이 부여되

어야한다. 이를 위해서는 중립온도 변화량에 대한 데이터베이스화가 필수적이지만 국내외적으로 이에 대한 기초 데이터가 아주 미흡한 실정이다. 때문에 본 연구에서는 실제 현장에서 측정된 레일온도차와 축력데이터(박옥정, 1995)로부터 장대레일 신축이론에 따른 이론축력과 측정축력의 차이를 이용하여 중립온도의 변화량을 간접적으로 산정하였다. 이 중립온도의 변화량은 평균 0.44°C , 표준편차 2.53°C 를 갖는 정규 확률분포로 이를 유지관리 작업 등의 궤도조건에 따라 발생할 수 있는 중립온도의 변동성으로 고려하였다(그림 1).

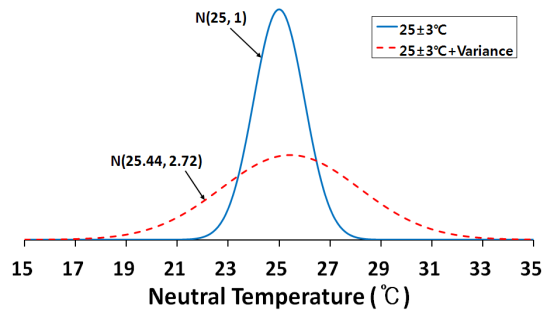


그림 1 중립온도의 확률분포

3.2 중립온도의 확률분포가 좌굴확률에 미치는 영향 분석

중립온도 확률분포 특성치(평균, 표준편차)의 변동에 따른 장대레일 궤도의 좌굴에 대한 안정성에 미치는 영향을 분석하였다. 그림 2는 중립온도의 표준편차를 고정된 상태에서 평균값 감소($28 \rightarrow 22^{\circ}\text{C}$)에 따른 좌굴확률을 나타낸 것으로 평균값이 감소하면서 좌굴확률이 증가하며, 궤도의 곡선반경이 커지면서 좌굴확률이 낮아지는 것을 볼 수 있다. 또한, 그림 2의 (a)는 중립온도 $25 \pm 3^{\circ}\text{C}$ ($\mu=25, \sigma=1$)에서 변동성을 고려하지 않았을 경우이고, (b)는 중립온도 $25 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 에서 변동성($\mu=0.44, \sigma=2.53$)을 고려한 경우로 중립온도의 변동성이 고려되면 즉, 표준편차가 커지면 중립온도의 동일한 평균값에서의 좌굴확률이 증가하는 것을 알 수 있다.

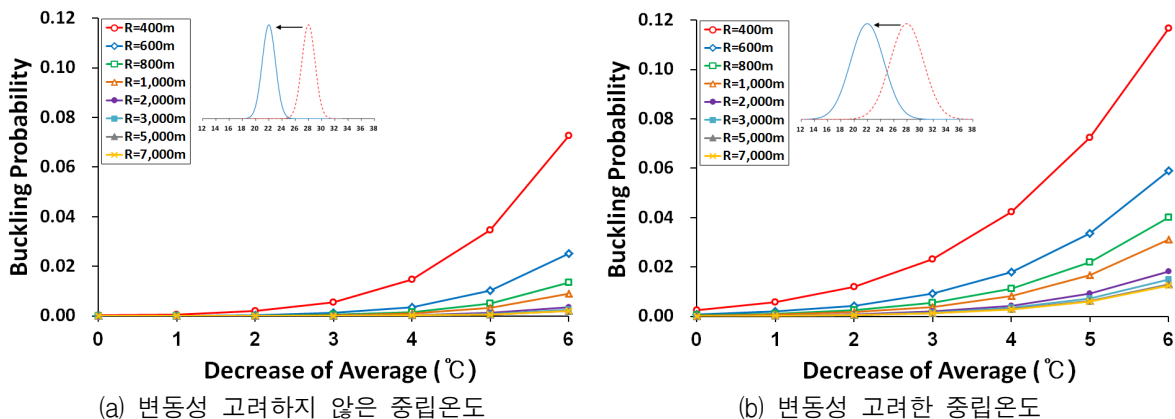


그림 2 중립온도의 평균값 감소에 따른 좌굴확률

그림 3은 그림 2와 동일한 조건에서 평균값 감소에 따른 좌굴확률의 증가비율을 나타낸 것으로 평균값이 감소할수록 좌굴확률비가 비선형적으로 증가하며, 곡선반경이 클수록 좌굴확률비가 커지는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 3의 (a)와 (b)는 그림 2와 마찬가지로 중립온도의 변동성을 고려하지 않았을 경우와 변동성을 고

려한 경우로, 중립온도의 변동성을 고려하여 표준편차가 증가되면 평균값 감소에 따른 좌굴확률의 증가비가 변동성을 고려하지 않은 경우보다 훨씬 작은 것을 볼 수 있다. 좌굴확률에 가장 민감하게 반응하는 곡선반경 7,000m일 때를 살펴보면, (a)의 경우 중립온도의 평균값이 6°C 감소하면 좌굴확률이 약 9600배로 증가하고, (b)의 경우는 약 210배 증가한다.

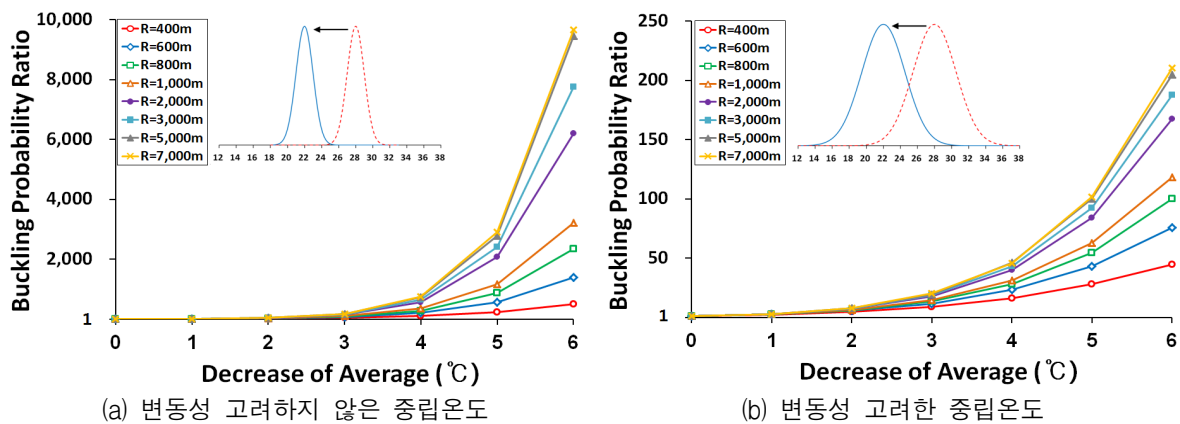


그림 2 중립온도의 평균값 감소에 따른 좌굴확률 민감도

4. 결 론

본 논문에서는 기존 개발된 장대레일 궤도의 좌굴확률 평가시스템을 이용하여 중립온도의 확률분포 특성에 따른 장대레일 궤도의 좌굴 안정성 분석을 수행하였다.

중립온도의 평균값 감소, 표준편차의 증가에 따른 좌굴확률의 증가비가 비선형적임을 확인할 수 있었으며, 동일한 중립온도의 평균값에서 표준편차가 증가하면 좌굴확률은 증가하게 되지만 그 증가비율은 평균값 감소에 의한 좌굴확률의 증가비보다 상대적으로 상당히 작은 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 박옥정 (1995) 장대레일의 안정성에 관한 연구, 석사학위논문, 경기대학교 산업정보대학원
- 배현웅, 최진유, 최상현, 임남형 (2010) 기후요소를 고려한 실시간 레일온도 DB구축, **한국방재학회 춘계학술대회**, 한국방재학회, pp.234~237
- 배현웅, 한승룡, 최진유, 임남형 (2010) 장대레일 궤도의 좌굴확률평가 시스템, **한국철도학회 춘계학술대회**, 한국철도학회, pp.305~309
- 한국철도시설공단 (2008) **선로정비지침**, 한국철도시설공단
- A. Kish and G. Samavedam (1999) Risk Analysis based CWR Track Buckling Safety Evaluations, *Proceedings of International Conference on Innovations in the Design & Assessment of Railway Track*, Delft University of Technology, The Netherlands