

# 혹서기 좌굴사고 방지를 위한 합리적인 열차속도 규제에 관한 연구

## A Study on the Train Speed Restriction to Prevent Track Buckling in the Hot Summer

배현웅\*  
Hyun-Ung Bae

최진유\*\*  
Jin-Yu Choi

김명수\*\*\*  
Myoung-Su Kim

이진옥\*\*\*\*  
Chin-Ok Lee

임남형†  
Nam-Hyoung Lim

### ABSTRACT

Recently, the rise of the rail temperature is accelerating further due to the global warming, and the track stability(buckling) problem result from the axial force in the continuous welded rail(CWR) have become the most important issue. This track stability threatens the security of running trains in the hot summer. In order to prevent the track buckling in the hot summer and ensure the safety of the running train, as a part of the safety control plan for KORAIL high-speed railway, the train speed restriction according to the rail temperature was introduced in 2004. However, the conceptual and theoretical background of train-speed restriction is uncertain. In this paper, the theoretical study about the reasonable train-speed restriction is performed. For this purpose, the risk-based probabilistic stability evaluation of the track buckling is applied.

### 1. 서론

최근 지구 온난화에 의한 대기온도의 상승으로 레일온도 상승이 가속화되고 있으며, 이에 따른 장대레일(Continuous Welded Rail)에 작용하는 축력으로 인한 궤도 안정성(좌굴) 문제에 대한 관심이 고조되고 있다. 이러한 궤도 안정성은 혹서기에 주행하는 열차의 안전을 위협할 수 있다. 고속철도 안전관리 대책의 일환으로 한국철도공사에서는 2004년에 레일온도에 따른 혹서기 운행속도 제한<sup>1)</sup>을 도입하였다(표 1). 그러나 열차속도 제한에 대한 개념적, 이론적 배경이 불명확하다. 1999, 2009년 미국에서 Kish 등에 의해 수행된 연구<sup>2),3)</sup>에서는 레일온도 증가에 따른 궤도의 안정성을 확률론적 방법을 적용하여 좌굴확률로 나타내고, 이를 바탕으로 위험도 기반의 레일온도 증가에 따른 열차속도 규제방법을 제시하였다. 본 논문에서는 국내의 합리적인 열차속도 규제를 목적으로 본 연구진에 의해 개발된 확률론적 좌굴확률 평가프로그램을 이용하여 국외에서 제안된 열차속도 규제방법을 적용, 분석하였다.

표 1. 국내 레일온도에 따른 혹서기 운행속도 제한(2004)

레일온도	구간	운행제한속도
45℃	궤도보수 구간에 한하여 작업 후 선로가 안정화될 때까지	100km/h
55℃	전구간	230km/h
60℃	전구간	70km/h
64℃	전구간	운행중지

† 교신저자, 충남대학교, 토목공학과, 부교수  
E-mail : nhrim@cnu.ac.kr

\* 충남대학교, 토목공학과, 박사과정

\*\* 한국철도기술연구원, 기술기획부, 책임연구원

\*\*\* 코레일, 부산경남본부 시설처, 처장

\*\*\*\* 충남대학교, 토목공학과, 교수

## 2. 본론

### 2.1 국외에서 제안된 열차속도 규제 방법<sup>3)</sup>

2009년 Kish 등은 레일온도 증가에 따른 열차속도를 합리적으로 제한하기 위하여 열차속도를 감소시켜야 하는 레일온도 구간을 설정하였다. 특정 궤도 조건 하의 레일온도-좌굴확률 곡선에서 좌굴확률  $10^{-6}$ 일 때의 레일온도를 열차가 최고속도로 운행할 수 있는 한계 레일온도(Critical temperature)로 설정하고, 이를 초과하면 좌굴확률  $10^{-3}$ 에 상응하는 레일온도(Limiting temperature)까지 열차속도를 감소시키도록 하였다. 좌굴확률  $10^{-3}$  이상에서는 16~32km/h의 저속운행을 할 것을 제안하고 있다. Critical temperature와 Limiting temperature 사이에서의 열차속도 감소는, 좌굴에 의한 데미지가 차량 운동에너지에 비례한다고 가정하였을 때 이 에너지는 속도의 제곱에 비례하므로 좌굴확률이 증가함에 따라 열차속도가 제곱근에 비례하여 감소되어야 한다고 제시하였다. 레일온도가 증가하면서(또는 좌굴확률이 증가) 궤도에 동일한 안정도를 확보하기 위한, 즉 모든 속도에 대해 동일한 손상수준(위험도)을 갖는 열차속도 공식을 아래와 같이 제안하였다.

$$\frac{V}{V_{\max}} = \sqrt{1 - \frac{P_b(T)}{P_b(T_L)}} \quad (1)$$

여기서,  $V$ 는 감소된 속도,  $V_{\max}$ 는 해당 구간에서의 최고속도를 말하며,  $P_b(T)$ 는 레일온도  $T$ 일 때의 좌굴확률,  $P_b(T_L)$ 은 Limiting temperature일 때의 좌굴확률( $10^{-3}$ )을 말한다.

### 2.2 확률론적 좌굴확률 평가프로그램

장대레일 궤도의 좌굴확률을 산정하기 위하여 기존 본 연구진에 의해 개발된 좌굴확률 평가프로그램<sup>4)</sup>을 이용하였다. 국외 연구에서는 궤도의 좌굴확률을 구하기 위해 좌굴에 영향을 미치는 도상횡저항력, 궤도틀림, 중립온도를 확률변수로 고려하여 궤도의 하중(Load)에 대한 확률분포와 강도(Strength)에 대한 확률분포의 중첩되는 영역을 Interference method를 이용하여 좌굴확률로 산정하였다. 본 논문에서 사용된 좌굴확률 평가프로그램에서는 좌굴에 영향을 미치는 도상횡저항력, 중립온도, 레일온도를 확률변수로 고려하고 곡선반경, 궤도틀림 등의 변수들은 결정론적 값으로 설정하였으며 궤도의 하중과 강도에 대한 한계상태방정식(Limit State Equation)으로부터 AFOSM(Advanced First Order Second Moment) 방법을 이용하여 좌굴확률을 산정한다.

### 2.3 열차속도 규제 방법 적용 및 분석

좌굴확률 평가시스템에 반영되는 각 확률변수들이 갖는 확률분포는 모두 평균과 표준편차에 의해 결정되는 정규분포로 가정하였다. 열차는 KTX제원을 사용하였고 궤도 곡선반경은 철도건설규칙<sup>5)</sup>의 설계속도에 따른 곡선반경 기준을 참고로 하여 열차의 최고속도 300km/h를 낼 수 있는 곡선반경으로 7,000m를 고려하였으며, 궤도틀림은 파고 10mm, 파장 10m로 결정하였다. 중립온도의 확률분포는 선로정비지침<sup>6)</sup>의 설정온도 기준  $25 \pm 3^\circ\text{C}$ 를 고려하여 반영하였고, 레일온도의 표준편차는 실측된 기후요소(대기온도, 습도, 일사량)에 따른 레일온도 데이터베이스<sup>7)</sup>를 토대로  $2.5^\circ\text{C}$ 로 고려하였으며, 도상횡저항력의 평균값은 고속철도 기준 900kgf/m/rail보다 안전측으로 하여 700kgf/m/rail로 고려하였고 표준편차는 실측데이터를 참고로 하여 평균값에서  $\pm 10\%$ 의 변동이 있는 것으로 고려하여 반영하였다.

상기의 궤도 조건 하에서 국외 연구에서 제안한 열차속도 규제 방법을 적용하였을 경우(그림 1), 좌굴확률  $10^{-6}$ 에 해당하는 레일온도(Critical temperature,  $T_C$ )는  $56.3^\circ\text{C}$ 로 이 온도까지는 300km/h의 운행이 가능하며, 좌굴확률  $10^{-3}$ 에 해당하는 레일온도(Limiting temperature,  $T_L$ )는  $62.6^\circ\text{C}$ 로 이 온도 이상에서는 16~32km/h의 저속운행을 하여야 한다.  $T_C$ 와  $T_L$ 의 사이( $56.3 \sim 62.6^\circ\text{C}$ )에서 열차속도의 감소곡선을 보면 레일온도 약  $60^\circ\text{C}$  이상부터 급격한 속도감소가 요구된다. 국내의 레일온도에 따른 혹서기 운행속도 제한 기준의 경우에는 레일온도  $55^\circ\text{C}$ 에서 230km/h로 운행속도 규제가 적용되고 레일온도  $60^\circ\text{C}$ 에서 70km/h로 운

행속도 규제가 적용되고 있어 제안된 열차속도 감소곡선과 비교하여 다소 보수적으로 제한되고 있음을 알 수 있다.

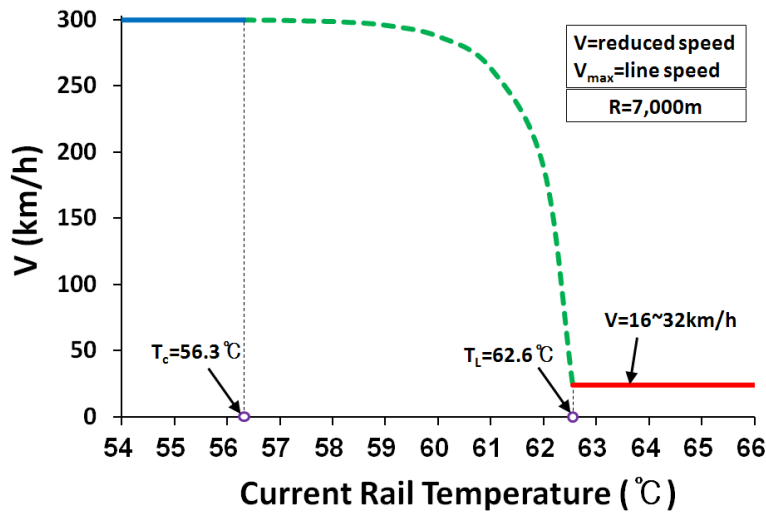


그림 1. 열차속도 규제 방법

### 3. 결론

본 연구에서는 기존 본 연구진에 의해 개발된 확률론적 좌굴확률 평가프로그램을 이용하여 위험도 기반의 혹서기 합리적인 열차속도 규제에 관한 연구를 수행하였다.

현재 국내에서 이용되고 있는 레일온도에 따른 운행속도 제한 기준은 개념적, 이론적인 배경이 불명확한 경험적인 방법으로 보수적인 열차속도 규제가 될 수 있으며 이에 따른 초고속 서비스의 불충족, 열차 지연 등 운행 상의 손해가 상당히 발생될 수 있다. 따라서 궤도 안정성을 합리적으로 평가할 수 있는 위험도 기반의 확률론적인 궤도 안정성 평가기법이 요구되며, 이를 위해서는 좌굴에 영향을 미치는 주요 변수들의 확률분포산정을 위한 데이터베이스의 지속적 구축이 반드시 필요한 숙제이다. 차후 이에 대한 연구가 지속적으로 수행된다면 선행된 국외 연구에 의한 속도감소 곡선, Limiting temperature 이상에서의 저속운행 속도 등을 국내 실정에 맞는 합리적인 규제 방법으로 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것입니다(2011-0022755).

### 참고문헌

1. 홍계진, “철도청, 고속철도 안전관리 대책 마련”, 한국건설신문, 2004.
2. Andrew Kish and Gopal Samavedam, “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, 1999.
3. Andrew Kish and Dwight W. Clark, “Track Buckling Derailment Prevention Through Risk-Based Train Speed Reductions”, AREMA 2009 Annual Conference & Exposition, 2009.
4. 배현웅, “장대레일 궤도의 좌굴 위험도 분석을 위한 좌굴확률 평가시스템”, 충남대학교 대학원 석사학위 논문, 2011.

5. “철도건설규칙”, 국토해양부, 2009.
6. “선로정비지침”, 한국철도시설공단, 2008.
7. 배현웅, 최진유, 최상현, 임남형, “기후요소를 고려한 실시간 레일온도 DB구축”, 한국방재학회 춘계학술대회 논문집, pp.234-237, 2010.