장대레일 좌굴 신뢰도에 기반한 국내 고속열차 운행속도 제한의 신뢰도 평가

Reliability Evaluation of the Speed Reduction Scheme in Korean High-speed Train based on the Reliability of the CWR Buckling

김명수* · 배현웅** · 최진유*** · 임남형****

Kim, Myoung Soo · Bae, Hyun Ung · Choi, Jin Yu · Lim, Nam Hyung

Abstract

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 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 unclear. In this paper, the buckling probability evaluation program(ProCWR) developed by this researchers was improved to take maximum and minimum buckling temperature into account for the calculation of allowable temperature. From the theoretical background of the international research and the buckling probability considering domestic railroad conditions, the validity and reliability of Korean high-speed train speed reduction scheme were investigated.

Key words : Continuous welded rail, Track buckling, Buckling probability, Train speed

요 지

혹서기에 궤도 좌굴을 방지하고 열차의 주행 안정성을 확보하기 위하여 국내 고속열차 구간에서는 2004년부터 고속철도 안전관리를 위해 레일온도에 따른 혹서기 열차 운행속도 제한을 시행하고 있다. 그러나 이에 대한 개념적, 이론적 배경이 불명확하다. 본 논문에서는 기존 본 연구진에 의해 개발된 장대레일 좌굴확률 평가프로그램에서 허용온도 계산 시 상한 및 하한좌굴온도를 고려하도록 개선하였으며, 국외 연구의 이론적 배경과 국내 선로조건이 고려된 좌굴확률을 근거로 국내 고속열차 운행속도 제한의 타당성과 신뢰성을 고찰하였다.

핵심용어 : 장대레일, 궤도좌굴, 좌굴확률, 열차속도

1. 서 론

세계의 철도운영기관들에서는 강풍, 지진, 폭설폭우로 인한 침수, 폭염에 의한 레일온도 증가 등의 이상기후 조건 발생 시 고속열차의 안전한 운행을 위한 열차 속도제한 규정(Speed reduction schemes)을 도입하고 있다. 특히 최근 지구온난화에 따른 레일온도 상승의 가속화로 혹서기 장대레일(Continuous Welded Rail, CWR)의 부동구간에서 발생되는 과도한 축력에 의한 궤도의 좌굴 발생 가능성에 대한 관심이 높아지고 있다. 궤도의 좌굴은 주행하는 열차의 탈선사고(Fig.

1)를 유발시킬 수 있는 리스크가 상당히 큰 안전성 문제로 인식되어, 국내 철도운영기관에서는 2004년부터 기상변화에 대한 고속철도 안전관리 대책에 따라 레일온도 상승에 대한 주행열차의 안전성을 확보하고 있다(Table 1). 그러나 레일온도 상승에 의한 속도제한 규정은 국외사례 및 경험적 근거를 바탕으로 한 것으로 이에 대한 개념적, 이론적 배경이 불명확하여 보수적 또는 과소평가가 될 수 있다.

일본의 경우 도상항저항력이 약 15,000 N/m/track(750 kgf/m/rail) 이상의 구간에 있어서 레일온도 50°C 이상에서는 온도관측, 60°C 이상에서는 70 km/h 서행, 64°C 이상에서는

*정회원. 한국철도공사 마산시설사업소 소장, 충남대학교 토목공학과 박사과정(E-mail: myoungsu@korail.com)

Member, Head of Masan Civil Engineering Division, Korea Railroad, Ph.D Candidate, Department of Civil Engineering, Chungnam National University

**정회원. 충남대학교 토목공학과 박사과정

Member, Ph.D Candidate, Department of Civil Engineering, Chungnam National University

***정회원. 한국철도기술연구원 기획전략본부 본부장, 책임연구원

Member, Ph.D, Director of Planning Strategy Head Office, Korea Railroad Research Institute

****교신저자. 정회원. 충남대학교 토목공학과 교수(Tel: +82-42-821-7005, Fax: +82-42-821-8867, E-mail: nhrim@cnu.ac.kr)

Corresponding Author: Member, Ph.D, Professor, Department of Civil Engineering, Chungnam National University

Fig. 1. Train Derailment due to Track Buckling

Table 1. Train Speed Reduction for Rail Temperature in Heat Wave (Korail, 2012)

Rail Temperature	Train Speed
50°C	Observation
55°C	230 km/h
60°C	70 km/h
64°C	Stop

Table 2. Train Speed Reduction for Rail Temperature in Heat Wave (Japan, 2010)

Rail Temperature	Train Speed
50°C	Observation
60°C	70 km/h
64°C	Stop

운행중지로 제한하고 있다(Table 2). 국내의 레일온도 상승에 따른 속도제한 규정은 일본의 사례를 바탕으로 하여 열차 속도 230 km/h에 대한 레일온도 55°C를 추가한 것으로 판단된다.

미국의 Kish 등의 연구(Kish and Samavedam, 1999; Kish and Clark, 2009; Kish and Samavedam, 2013)에서는 장대레일 궤도의 좌굴 안정성을 합리적으로 평가하기 위하여 확률론적인 접근(Probabilistic approach) 방법으로 좌굴 확률(Buckling probability)을 산정하였으며, 레일온도 증가에 따른 열차 속도제한에 대한 이론적 배경을 바탕으로 열차 운행속도를 제한하는 방안을 제시하였다.

본 논문에서는 기존 본 연구진에 의해 개발된 장대레일 좌굴 확률 평가프로그램(Bae *et al.*, 2011; Bae, 2011; Yi *et al.*, 2012; IAC, 2013)에서 허용온도 계산 시 상한 및 하한 좌굴온도를 고려하도록 개선하였으며, 국외 연구(Kish and Samavedam, 1999; Kish and Clark, 2009; Kish and Samavedam, 2013)의 이론적 배경과 국내 선로조건이 고려된 좌굴확률을 근거로, 한국 열차 운행속도 제한의 타당성과 신뢰성을 고찰하였다.

2. 장대레일 궤도 좌굴확률 평가

2.1 장대레일 좌굴확률 평가프로그램

장대레일 궤도의 좌굴에 영향을 미치는 압축응력과 관련된 레일온도와 중립온도, 궤도 강성과 관련된 도상저항력, 궤도의 초기결함인 궤도틀림과 같은 인자들은 기후조건, 궤도 운영조건, 유지관리 조건 등에 의해 변동되는 불확실성이 높은 궤도 매개변수이다. 이러한 불확실성을 합리적으로 고려하여

장대레일 궤도의 좌굴 위험성을 확률론적으로 평가하기 위해 본 연구진은 장대레일 좌굴확률 평가프로그램(ProCWR-Ver.01)을 개발하였다(Bae *et al.*, 2011; Bae, 2011; Yi *et al.*, 2012; IAC, 2013).

ProCWR-Ver.01에서는 구조물의 보유성능(Capacity, C)에 해당하는 부분을 좌굴이 발생될 때의 레일온도로 간주되는 허용좌굴온도(T_a)로써 반영하고, 요구성능(Demand, D)에 해당하는 부분을 레일온도하중(T_L)으로써 반영한다. 따라서 허용좌굴온도와 레일온도하중의 차가 0이 될 때를 Eq. (1)과 같이 한계상태방정식(Limit state equation, g)으로 구성된다.

$$g = C - D = T_a - T_L = 0 \quad (1)$$

허용좌굴온도(T_a)는 궤도의 곡선반경(Radius, R), 도상횡저항력(Lateral Ballast Resistance, LBR), 연직도상강성(Vertical Ballast Stiffness, VBS), 궤도틀림 크기(Misalignment, $MISA$), 궤도틀림 길이(Half-Wave Length, HWL), 열차속도(Velocity, V)와 같은 6가지의 주요 변수를 고려하는 다변수 회귀식(Multi variable regression model)에 의해 결정되며, 이 값은 유한요소해석에 의한 하중-변위 곡선에서 하한좌굴온도(T_{min})를 기준으로 하였다. 또한, 고려된 열차 제원은 국내의 KTX 열차를 기준으로 하였다.

레일온도하중(T_L)은 현재 레일온도(T_R)와 레일 중립온도(T_N)의 차로 결정된다. 여기서 레일 중립온도(Neutral temperature)란 레일에 작용하는 축력이 0일 때의 레일온도를 말한다. 따라서 Eq. (1)을 Eq. (2)와 같이 다시 표현할 수 있다. 여기서, 궤도의 좌굴에 영향을 미치는 총 8개의 주요 매개변수들은 그 특성에 따라 확률변수(Random variable)로 취급될 수 있으며, 결정론적인 값(Deterministic value)으로도 취급될 수 있다. ProCWR-Ver.01에서는 모든 확률변수를 정규분포로 고려한다.

$$g = f(R, LBR, VBS, MISA, HWL, V) - (T_R - T_N) = 0 \quad (2)$$

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (3)$$

이 한계상태방정식으로부터 확률변수들의 통계적 특성을 반영하기 위한 확률론적 신뢰도 기법 중 하나인 AFOSM (Advanced First Order Second Moment) 방법을 이용하여 Eq. (3)과 같이 좌굴확률(P_f)을 계산한다. 여기서, Φ 는 표준정규분포의 누적분포함수(Cumulative distribution function, CDF)이며, β 는 신뢰도지수이다.

2.2 상한 및 하한좌굴온도를 고려한 허용좌굴온도

유럽의 UIC Code 720 R(UIC, 2005)에서는 장대레일 궤도의 좌굴이 발생될 때의 레일온도로 간주되는 허용좌굴온도(T_a) 산정 시 궤도의 상태에 따라 구분하여 적용하는 방법을 제안하고 있다. 장대레일 궤도의 좌굴에 대한 하중-변위 곡선의 상한좌굴온도(T_{max})와 하한좌굴온도(T_{min})의 차(Δ)로부터 약한 궤도(Weak Track), 중간상태의 궤도(Marginal Track), 강한 궤도(Strong Track)로 구분한다(Fig. 2).

상한좌굴온도와 하한좌굴온도의 차인 ΔT 가 0~5°C일 경우,

Fig. 2. Allowable Buckling Temperature (UIC720R)

궤도의 상태가 매우 약한 궤도(Weak Track)로 분류되어 허용좌굴온도를 하한좌굴온도보다 5°C 낮게 산정하며($T_a = T_{\min} - 5^\circ\text{C}$), Δ 가 5~20°C일 경우에는, 중간상태의 궤도(Marginal Track)로 분류되어 허용좌굴온도를 하한좌굴온도로 산정한다($T_a = T_{\min}$). Δ 가 20°C를 초과할 경우는, 궤도의 상태가 매우 강한 궤도(Strong Track)로 분류되어 허용좌굴온도를 하한좌굴온도에서 상한과 하한좌굴온도의 차인 Δ 의 25% 만큼 높게 산정한다($T_a = T_{\min} + 0.25\Delta$).

본 논문에서는 이와 같이 허용좌굴온도를 궤도의 상태에 따라 합리적으로 산정하기 위하여, 기존 허용좌굴온도 산정 시 하한좌굴온도만을 고려하는 장대레일 좌굴확률 평가프로그램(ProCWR-Ver.01)에서 UIC Code 720 R을 준용하여 상한 및 하한좌굴온도를 고려하도록 개선하여 연구결과에 반영하였다.

3. 흑서기 열차 운행속도 제한

3.1 열차속도 제한 방법

미국의 Kish와 Clark의 연구(Kish and Clark, 2009)에서는 좌굴 발생에 의한 피해정도가 차량 운동에너지에 비례한다는 이론적 가정을 통해, 차량 운동에너지는 속도의 제곱에 비례하므로 좌굴확률이 증가함에 따라 열차의 속도가 제곱근에 비례하여 감소되어야 한다고 제시하였다. 따라서 레일온도가 증가하면서(좌굴확률이 증가) 궤도에 동일한 좌굴 안정도를 확보하기 위한, 즉 모든 속도에 대해 동일한 손상수준(위험도)을 갖는 열차 운행속도 공식을 Eq. (4)와 같이 제안하였다.

$$\frac{V}{V_{\max}} = \sqrt{1 - \frac{P_f(T)}{P_f(T_{Lm})}} \quad (4)$$

여기서, V 는 감소된 속도, $V_{\max}$ 는 해당 구간에서의 최고속도, $P_f(T)$ 는 레일온도 T 일 때의 좌굴확률, $P_f(T_{Lm})$ 은 제한 레일온도(Limit temperature)일 때의 좌굴확률(10^{-3})이다.

Eq. (4)를 토대로 레일온도 증가에 따른 열차 운행속도를 합리적으로 제한하기 위해 열차 운행속도를 감소시켜야 하는 레일온도 구간을 설정하였다. Fig. 3과 4는 열차 운행속도 제한에 대한 개념을 예로써 나타낸 것이다. 특정 궤도 조건 하에서의 레일온도-좌굴확률 곡선(Fragility curve)에서 좌굴확률 10^{-6} 에 상응하는 레일온도를 열차가 최고속도로 운행할 수

Fig. 3. Concept of Train Speed Reduction Scheme

Fig. 4. Examples of Train Speed Reduction Scheme

있는 한계 레일온도(Critical temperature, T_{Cr})로 설정하고, 이를 초과하면 좌굴확률 10^{-3} 에 상응하는 제한 레일온도(Limiting temperature, T_{Lm})까지 열차 운행속도를 Eq. (4)를 이용하여 감소시킬 수 있다. Kish와 Clark(2009)의 연구에서는 좌굴확률 10^{-3} 이상에서는 16~32 km/h의 저속운행을 할 것을 제안하고 있으나 본 논문에서는 운행중지로 판단하였다. 열차 운행속도 규제는 Fig. 4와 같이 Eq. (4)에 의한 곡선을 바탕으로 직선 속도제한(Linearized speed reduction) 또는 계단식 속도제한(Stepped speed reduction)이 가능하다. 국내의 경우 계단식의 열차 운행속도 규제가 적용되고 있다(Table 1).

3.2 허용/목표 파괴확률 수준의 설정

앞서 언급한 열차 운행속도 제한 방법에서는 열차가 최고속도로 운행할 수 있는 한계 레일온도(T_{Cr})와 열차가 정지되어야 하는 제한 레일온도(T_{Lm})에 대한 허용/목표 좌굴확률을 각각 10^{-6} , 10^{-3} 으로 보고 있다. 이 확률 수준의 설정은 열차 운행속도 제한에 큰 영향을 미치므로 허용/목표 파괴확률 수준의 설정 또한 매우 중요한 사항임을 알 수 있다. 허용/목표 파괴확률(P_f) 또는 허용/목표 신뢰도지수(β_f)는 파괴의 결과와 본질, 경제적 손실, 사회적인 불편성, 파괴확률을 줄이는데 필요한 비용과 노력의 양 등에 따라 결정된다. 적절한 신뢰성을 확보하기 위해서는 과거의 경험으로부터 알려진 잘 정립된 경우들을 이용하여 허용/목표 파괴확률 또는 허용/목

Table 3. Allowable/Target Reliability Index (ISO 2394)

Relative costs of safety measures	Consequences of failure (life-time)			
	Small	Some	Moderate	Great
High	0	1.5	2.3	3.1
Moderate	1.3	2.3	3.1	3.8
Low	2.3	3.1	3.8	4.3

Table 4. Allowable/Target Reliability Index (EN1990: 2002)

Consequences of Failure	Allowable/Target reliability index	
	1 year	50 years
High	5.2	4.3
Moderate	4.7	3.8
Low	4.2	3.3

Table 5. Allowable/Target Reliability Index (JCSS)

Relative costs of safety measures	Consequences of failure (1 year)		
	Minor	Moderate	Large
Large	3.1 ($P_{fT} \approx 10^{-3}$)	3.3 ($P_f \approx 5 \times 10^{-4}$)	3.7 ($P_{fT} \approx 10^{-4}$)
Normal	3.7 ($P_{fT} \approx 10^{-4}$)	4.2 ($P_{fT} \approx 10^{-5}$)	4.4 ($P_f \approx 5 \times 10^{-6}$)
Small	4.2 ($P_{fT} \approx 10^{-5}$)	4.4 ($P_f \approx 5 \times 10^{-6}$)	4.7 ($P_{fT} \approx 10^{-6}$)

표 신뢰도지수를 조정하여야 한다(Bae, 2011).

ISO 2394-General Principles on Reliability for Structures (ISO, 1998)에서는 인명, 사회, 경제적인 파급효과를 나타낸 파괴의 결과(Consequences of failure)와 구성인자들의 불확실성 정도 및 유지보수 그리고 적정 신뢰도를 확보하기 위한 비용 등을 고려한 안전 확보의 상대적 비용(Relative cost of safety measure)에 따라 구조물의 사용연한(Life-time)을 참조 기간으로 설정한 허용/목표 신뢰도지수(β_T)를 Table 3과 같이 제안하고 있다.

미국 AISC-LRFD 기준(AISC, 1986)에서는 허용/목표 신뢰도지수(β_T)를 2.6에서 4.0을 사용하고 있으며, Eurocode-Basis of Structural Design-EN1990:2002(CEN, 2002)에서는 파괴의 결과와 참조기간에 따른 허용/목표 신뢰도지수(β_T)를 Table 4와 같이 제안하고 있다.

유럽 JCSS-Joint Committee on Structural Safety(JCSS, 2001)의 Probabilistic Model Code에서는 인명, 사회, 경제적인 파급효과를 나타낸 파괴의 결과와 구성 인자들의 불확실성 정도 및 유지보수 그리고 적정 신뢰도를 확보하기 위한 비용 등을 고려한 안전 확보의 상대적 비용에 따라 참조기간을 1년으로 설정한 허용/목표 신뢰도지수(β_T)를 Table 5와 같이 제안하고 있으며, 일반적인 경우의 허용 신뢰도지수는 4.2를 추천하고 있다.

3.3 궤도 상태에 따른 T_{Cr} 과 T_{Lm}

국내의 레일온도에 따른 고속열차 운행속도 규정(Table

Table 6. Random Variables and Deterministic Values for Buckling Probability Evaluation

Random variable	Mean	Std. Deviation
Rail temperature (T_R)	-	2.5°C
Rail neutral temperature (T_N)	25°C	4.78°C
Lateral ballast resistance (LBR)	18,000 N/m/track	600 N/m/track
Vertical ballast stiffness (VBS)	3.5e+07 N/m/m/track	1.67e+06 N/m/m/track
Deterministic variable		
Radius (R)	7,000 m	
Amplitude of misalignment ($MISA$)	0.01 m	
Half-wave length of misalignment (HWL)	10 m	
Velocity of a train (V)	300 km/h	

1)을 검토하기 위하여, 궤도 상태에 따른 T_{Cr} 과 T_{Lm} 을 산정하였다. 이를 산정하기 위해 좌굴확률 평가프로그램에 사용된 변수는 국내 실정을 최대한 반영하였으며, 그 값들은 Table 6과 같다.

궤도 곡선반경(R)은 철도건설규칙의 설계속도에 따른 곡선반경 기준(MLTM, 2009)을 참고로 하여 고속철도 열차의 최고속도 300 km/h를 낼 수 있는 최소곡선 반경 7,000 m를 고려하였다. 궤도틀림은 악조건을 고려하여 파고 10 mm ($MISA$), 파장 10 m(HWL)로 결정하였다. 레일온도(T_R)의 표준편차는 실측된 기후요소(대기온도, 습도, 일사량)에 따른 레일온도 데이터베이스(Bae *et al.*, 2010; Lee, 2011a)를 토대로 모든 레일온도의 평균값에 대하여 2.5°C로 고려하였으며, 중립온도(T_N)의 확률분포는 선로정비지침(KR, 2008)의 설정 온도 기준을 고려하여 평균 25°C, 국외 측정자료(Kish and Clark, 2009)를 참고로 하여 표준편차는 4.78°C로 반영하였다. 또한 도상횡저항력(LBR)의 평균값은 고속철도 기준 18,000 N/m/track(900 kgf/m/rail)으로 반영하였고, 표준편차는 실측데이터(Lim *et al.*, 2004)를 참고로 하여 평균값에서 $\pm 10\%$ 의 변동이 있는 것으로 고려하여 Three-sigma rule을 적용하였다. 따라서 도상횡저항력의 표준편차는 600 N/m/

Fig. 5. Evaluating T_{Cr} and T_{Lm}

track(30 kgf/m/rail)으로 반영하였다. 연직도상강성(VBS)은 일반적인 궤도계수가 $3.0\text{e}+07\sim4.0\text{e}+07\text{ N/m/m/track}(150\sim200\text{ kgf/cm/cm/rail})$ 임에 따라(Lee, 2011b)이 범위를 Three-sigma rule을 적용하여 확률분포를 결정하였다.

Table 6에 의해 도출된 좌굴확률을 이용하여 Eq. (4)에 따른 열차속도 규제 방법을 적용하였다. Fig. 5는 좌굴확률 10^{-6} 과 10^{-3} 에 상응하는 레일온도를 찾기 위한 레일온도 증가에 따른 좌굴확률 곡선을 나타낸 것이다. 좌굴확률 10^{-6} 에 상응하는 한계 레일온도(Critical temperature, T_{Cr})는 52.1°C , 좌굴확률 10^{-3} 에 상응하는 제한 레일온도(Limiting temperature, T_{Lm})는 61.1°C 로 산정되었다.

3.4 국내 고속열차 운행속도 규정 고찰

Fig. 6은 국내 고속철도의 레일온도에 따른 좌굴확률 곡선(Table 6)에서 국내 고속열차 운행속도 규정(Table 1)의 T_{Cr} 과 T_{Lm} 을 도시한 것이다. 300 km/h 의 최고속도 운행이 가능한 한계 레일온도(T_{Cr})가 55°C 이므로 이때의 좌굴확률은 1.24×10^{-5} (신뢰도지수 4.22) 수준으로 나타났으며, 열차운행을 중지해야 하는 레일온도(T_{Lm})는 64°C 이므로 이때의 좌굴확률은 5.20×10^{-3} (신뢰도지수 2.56) 수준으로 나타났다. 이는 허용/목표 좌굴확률 또는 신뢰도지수(Tables 3-5)의 관점에서 봤을 때, 국내 규정은 미국의 연구(Kish and Clark, 2009)에서 제시하고 있는 좌굴확률 수준보다 좌굴결과에 대한 위험도(Consequences of failure)를 다소 낮게 보거나, 안전 확보에 대한 비용투자 수준(Relative costs of safety measures)을 다소 높게 평가하고 있는 것으로 유추해볼 수 있다. 다시 말해, 국내 규정은 미국의 연구와 비교하여 열차 운행속도 제한을 시작하는 레일온도 및 열차 운행중지에 대한 레일온도가 높아 다소 불안정한 제한이 될 수 있다. 그러나 제한되는 열차속도($230, 70\text{ km/h}$)로 봤을 때는 미국의 연구와 비교하여 그 속도가 다소 보수적으로 제한되고 있다.

앞서 국내 고속철도의 좌굴확률 평가를 통해 산정된 현재 국내 규정의 좌굴확률 수준($1.24\times10^{-5}, 5.20\times10^{-3}$)을 반영하여, Eq. (4)에 의한 열차 운행속도 제한 방법을 적용시켜 비교하였다(Fig. 7). 레일온도 $55\sim60^{\circ}\text{C}$ 에 제한되고 있는 열차속도 230 km/h 와 레일온도 $60\sim64^{\circ}\text{C}$ 에 제한되고 있는 열차속도 70 km/h 는 다소 안전측으로 제한되고 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6. Train Speed Reduction Scheme(Korea)

Fig. 7. Comparison of Train Speed Reduction Scheme in Korea

제시된 열차속도 감소곡선을 따르면 좀 더 세분화되고 경제적인 열차속도 제한이 가능할 것으로 판단되며, 만약 Tables 3-5와 같이 다른 허용/목표 좌굴확률 수준으로 설정된다면 국내 규정의 재검토가 필요해질 수도 있다. 또한, 궤도의 유지보수 작업 이후에는 동일 레일온도에 대한 좌굴확률이 상당히 증가하므로 유지보수 작업 후 조건에 대한 열차 운행속도를 제한하는 방안도 검토해볼 필요성이 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 기존 개발된 장대레일 좌굴확률 평가프로그램에서 허용온도 계산 시 상한 및 하한좌굴온도를 고려하도록 개선하였으며, 국외 연구의 이론적 배경과 국내 선로조건이 고려된 좌굴확률을 근거로, 한국 열차 운행속도 제한의 타당성과 신뢰성을 고찰하였다.

본 논문에서 제시한 신뢰도 기반 열차 운행속도 제한 방법에 따라, 국내 고속열차 운행속도 규정에서 열차속도를 제한하기 시작해야 하는 좌굴확률 수준($P_f=1.24\times10^{-5}, \beta=4.22$) 및 열차운행을 중지해야 하는 좌굴확률 수준($P_f=5.20\times10^{-3}, \beta=2.56$)을 도출하였다. 이 수준은, 국내 규정이 미국의 연구와 비교하여 열차 운행속도 제한을 시작하는 레일온도 및 열차 운행중지에 대한 레일온도가 높아 다소 불안정한 제한이 될 수 있다고 판단되었으며, 제한되는 열차속도의 관점으로 봤을 때는 미국의 연구와 비교하여 그 속도가 다소 보수적으로 제한되고 있음을 확인하였다.

향후, 신뢰도 기반의 좌굴확률 평가와 열차속도와 관련한 이론적 배경 적용 시 좀 더 세분화되고 경제적인 열차 운행속도 제한 규정을 제시할 수 있으며, 국내 실정을 면밀히 고려한 허용/목표 좌굴확률(또는 신뢰도지수)이 설정된다면 더욱 합리적인 혹서기 열차 운행속도 제한 규정을 정립할 수 있을 것으로 판단된다.

또한, 궤도 안정성을 합리적으로 평가할 수 있는 신뢰도 기반의 장대레일 좌굴확률 평가기법의 고도화를 위해서는 좌굴에 영향을 미치는 주요 변수들의 확률분포산정을 위한 기초데이터에 대한 지속적 데이터베이스 구축이 반드시 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2012-0008221).

References

- American Institute of Steel Construction(AISC) (1986) *Load and Resistance Factor Design Specification for Steel Buildings*.
- Association of Japanese Railroads (2010) Track Maintenance of Tokaido Shinkansen(東海道新幹線の保線). pp. 158-159.
- Bae, H.U. (2011) *Buckling Probability Evaluation System to Analyze Buckling Risk of the CWR Tracks*. A thesis for the degree of Master, Chungnam National University.
- Bae, H.U. Choi, J.Y. Choi, S.H., and Lim, N.H. (2010) Constructing the Real Time Temperature Database considering Climatic Element. *Proceedings of 2010 Conference of the Korean Society of Hazard Mitigation*, pp. 234-237.
- Bae, H.U., Choi, J.Y., Han, S.R., Lee, C.O., and Lim, N.H. (2011) Buckling Probability of Continuous Welded Rail Tracks. *The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Keynote Lectures and Extended Abstracts of EASEC-12*, p. 163.
- European Committee for Standardization(CEN) (2002) *Basis of Structural Design*. EN 1990:2002.
- Industry & Academic Cooperation in Chungnam National Univ.(IAC) (2013) ProCWR-Ver.01. C-2013-014293, Korea Copyright Commission.
- International Organization for Standardization (ISO) (1998) *General Principles on Reliability for Structures*. ISO 2394:1998(E).
- International Union of Railways(UIC) (2005) *UIC Code 720 R*.
- Joint Committee on Structural Safety(JCSS) (2001) *Probabilistic Model Code*. JCSS-OSTL/DIA/VROU-10- 11-2000, 12th draft.
- Kish, A and Samavedam, G. (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, Dec. 2-3.
- Kish, A. and Clark, D.W. (2009) Track Buckling Derailment Prevention Through Risk-Based Train Speed Reductions. *AREMA 2009 Annual Conference & Exposition*.
- Kish, A. and Samavedam, G. (2013) *Track Buckling Prevention: Theory, Safety Concepts, and Applications*. Final Report, DOT/FRA/ORD-13/16, Federal Railroad Administration, U.S. Department of Transportation.
- Korea Rail Network Authority(KR) (2008) *Railroad Maintenance Guidelines*.
- Korea Railroad Corporation(Korail) (2012) Detailed Rules of Driving Treatment in High Speed Railway.
- Lee, J.D. (2001b) *Railway Engineering*, Nohae Publisher(In Korean).
- Lee, S.M. (2011a) *Development of the Rail Temperature Database considering Climatic Elements*. A thesis for the degree of Master, Chungnam National University.
- Lim, N.H. Hwang, S.H., and Lee, J.H. (2004) Experimental Study on the Fluctuation of Lateral Ballast Resistance before and after Ballast Work. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 24, No. 6D, pp. 955-961.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs of Korean government(MLTM) (2009) *Railroad Construction Standard*.
- Yi, G.S., Bae, H.U. Choi, J.Y., and Lim, N.H. (2012) Theoretical approach to offer a rational speed reduction scheme in Korea railway. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 204-208, pp. 1918-1922.

© Received August 19, 2013
 © Revised August 23, 2013
 © Accepted September 6, 2013