

장대레일 궤도의 좌굴확률평가 시스템

Buckling Probability Evaluation Framework of CWR Tracks

배현웅* 한승룡** 최진유*** 임남형†
Hyun-Ung Bae Seung-Ryong Han Jin-Yu Choi Nam-Hyoung Lim

ABSTRACT

The buckling behavior of CWR tracks is affected by the various parameters such as stiffness and geometry of track panel, ballast resistance, rail temperature, initial imperfection, and wheel load. Until now, CWR tracks were managed by the dichotomous logic (deterministic approach) despite these influence factors are having the nature of random variables. So, the design method and existing management process to prevent the track buckling can be very non-economic since the value of these influence factors to calculate the track buckling strength are selected by considering the worst track condition. In this study, buckling probability evaluation process is proposed which is based on the reliability index, AFOSM method, and limit state equation.

1. 서론

기존의 장대레일 궤도의 안정성 평가는 궤도 매개변수에 대하여 고정된 안전측의 값을 사용하는 결정론적인 해석에 의존해서 평가되어져왔다. 하지만 궤도 매개변수는 재료적 및 기하학적 불확실성이 높기 때문에 변동하는 특성을 갖는다. 실제현장의 궤도조건은 많은 영향인자(온도, 열차운행조건, 궤도유지관리 등)들에 의해 그 특성이 불확실하게 변하고 있으므로(표 1), 궤도를 구성하는 인자들의 불확실성 및 임의성을 보다 합리적으로 고려하기 위해서 확률론적 기법을 적용하는 것이 필수적이다. 다시 말해 장대레일 궤도의 안정성 평가를 보다 합리적으로 수행하기 위해서는 궤도 매개변수의 불확실성 및 임의성 반영이 반드시 이루어져야 한다. 그러나 아직까지 확률론적 접근의 근간이 되는 확률분포 산정을 위한 매개변수의 기초데이터 구축이 매우 부족한 실정이다. 레일온도, 중립온도, 도상횡방향저항력, 궤도틀림 등 매개변수의 기초데이터 구축은 장대레일 궤도의 보다 합리적이며 정도 높은 안정성 평가가 수행되기 위해 반드시 수행되어져야할 선결 과제이다.

† 정회원, 충남대학교, 토목공학과, 부교수
E-mail : nhrim@cnu.ac.kr
TEL : (042)821-7005 FAX : (042)821-8867

* 학생회원, 충남대학교, 토목공학과, 석사과정

** 비회원, 고려대학교, 건축사회환경공학과, 연구조교수

*** 정회원, 한국철도기술연구원, 차륜궤도연구실, 선임연구원

표 1. 궤도 매개변수의 변동요인

중립 온도	궤도 불확실성	<ul style="list-style-type: none"> · 레일, 궤도의 이동 · 궤도 유지관리 작업 · 기후조건 · 교통량 · 지반조건
도상 횡방향 저항력	재료적 임의성	<ul style="list-style-type: none"> · 침목의 재료적인 특성 · 침목의 형상 · 도상의 재료적인 특성
	궤도 불확실성	<ul style="list-style-type: none"> · 도상의 조건 · 접속부 [압거-토공 접속부]
궤도 틀림	기하학적 불확실성	<ul style="list-style-type: none"> · 건널목, 교량 등 구조물 및 그 전후의 취약지점
	궤도 불확실성	<ul style="list-style-type: none"> · 궤도 등급(허용 틀림량, 과장)

본 연구에서는 장대레일 궤도의 안정성 평가에 확률론적 기법(AFOSM)을 적용하여 궤도 매개변수들의 변동성 및 불확실성을 고려한 좌굴확률 평가프로그램을 개발하였다. 이를 바탕으로 지속적인 매개변수의 기초데이터 구축이 이루어진다면 궁극적으로 혹서기 적정한 운전속도 가이드라인 제시 및 유지관리 시 유연성, 효율성을 제공하는 등 궤도의 안정성 향상 및 합리성 확보에 기여할 수 있으리라 판단된다.

2. 좌굴확률 평가시스템

본 연구에서는 합리적으로 장대레일 궤도의 안정성을 평가하기 위하여 그림 1과 같이 좌굴확률 평가 시스템을 구성하였다. 확률론적 안정성 평가는 크게 하중(Load)과 관련된 레일온도 확률분포 산정부분(Process 1), 강도(Strength) 측면인 변동특성을 고려한 허용좌굴온도 산정부분(Process 2), 확률론적 기법을 이용한 좌굴확률 산정부분(Process 3)으로 나누어 다양한 영향인자에 의하여 변동하는 궤도 매개변수의 특성을 보다 합리적으로 고려하였다.

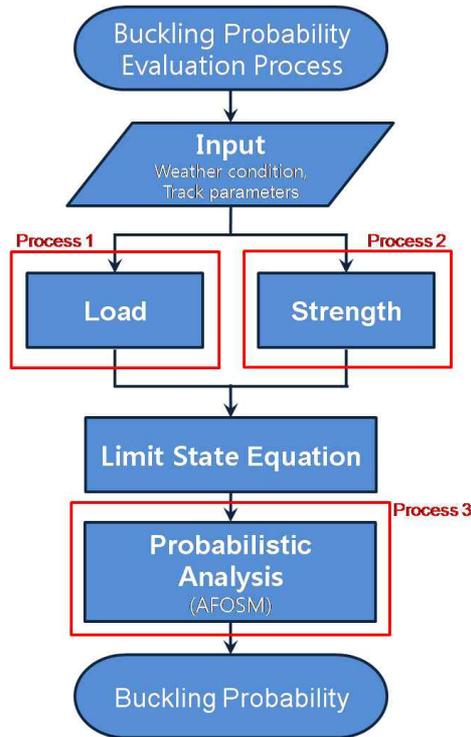


그림 1. 확률론적 안정성 평가 흐름도

2.1 하중관련 레일온도 확률분포 산정방법(Process 1)

하중과 관련된 레일온도 확률분포 산정 부분의 경우, 레일온도와 중립온도의 차이로써 레일에 작용하는 온도하중을 산정하는 프로세스이다.

레일온도는 기후영향요소에 의하여 변동하는 특성을 가지고 있기 때문에 이를 고려하기 위해서는 실제 현장의 기후조건 및 레일온도가 측정되어야 한다. 하지만 이는 현실적으로 어려움이 따르기 때문에, 실험을 통한 기후요소에 따른 레일온도의 데이터베이스화가 필요하다 사료된다. 지속적인 데이터베이스화가 이루어지면, 실제현장의 기후조건인 대기온도, 습도, 일사량 등을 입력으로 하여 축적된 데이터베이스에서 같은 조건의 레일온도들이 조회되어 온도하중분포로써 반영된다. 또한 이와 마찬가지로 설정 온도 측정결과를 데이터베이스화하여 궤도의 설정온도가 입력된다면 중립온도의 변동특성이 반영된 중립온도의 확률분포가 구해진다. 따라서 조회된 레일온도(T_R)에서 중립온도(T_N)의 차로써 산정된 온도하중(T_L)의 평균(μ)과 표준편차(σ)로 하중의 확률분포가 반영된다.

2.2 강도관련 변동특성을 고려한 허용좌굴온도의 산정방법(Process 2)

강도와 관련된 변동특성을 고려한 허용좌굴온도의 산정부분의 경우, 불확실성이 높은 궤도 매개변수들을 고려한 기존 결정론적 해석프로그램을 통해 다수의 조건별 해석으로 도출한 하한좌굴온도의 추정식을 이용하여 강도로써 반영하는 프로세스이다.

온도하중 확률분포 산정과 마찬가지로 실측데이터를 통한 도상 횡방향 저항력, 궤도틀림 등의 데이터베이스 구축을 통해 확률분포를 산정하는 것이 가장 이상적이지만, 레일온도의 영향인자인 기후요소의 측정과는 달리 측정을 통한 데이터베이스 구축이 매우 어려운 실정이다. 본 논문에서는 기존 양신추(2002) 등에 의해 제안된 곡선반경과 도상 횡저항력을 고려한 최소좌굴온도 추정식(식 1)을 통하여 적용하였다.

$$T_{\min} = a(g)R^2 + b(g)R + c(g) \tag{1}$$

$$a(g) = -7.1151E - 11g^2 + 1.4358E - 07g - 9.1101E - 05$$

$$b(g) = 8.7123E-08g^2 - 1.7631E-04g + 1.1798E-01$$

$$c(g) = -3.1495E-05g^2 + 8.5223E-02g - 1.9220E+01$$

여기서, R : 곡선반경, g : 도상저항력

2.3 확률론적 기법을 이용한 좌굴확률 산정방법(Process 3)

확률론적 기법을 이용한 좌굴확률 산정부분의 경우, 이상에서의 프로세스를 통해 산정된 레일온도와 관련된 확률분포 및 변동특성을 고려한 허용좌굴온도 결정식을 이용하여 도출된 한계상태방정식을 확률론적 기법(일계이차모멘트법, AFOSM)을 활용하여 좌굴확률을 산정하는 프로세스이다.

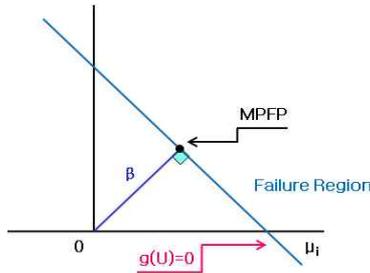


그림 2. AFOSM의 기하학적 의미

AFOSM(Advanced First Order Second Moment method) 방법은 파괴확률(P_f)을 구하기 위한 신뢰도지수(β)가 표준정규분포 확률변수 공간에서의 원점으로부터 한계상태방정식까지의 최단거리라는 기하학적의미로 접근한 방법으로 적용성이 우수하고 시간적 제약이 적은 장점이 있으며, 이를 이용한 평가절차는 다음과 같다.

- Load에 대한 확률분포의 확률변수와 한계상태방정식을 서로 통계적으로 독립인 표준정규분포 확률변수 공간에서 표현되도록 표준정규분포화 시킴
- 원점으로부터 한계상태식이 0이 되는 설계점(Most Probable Failure Point)까지의 최소거리(신뢰도지수)를 구하기 위한 반복법 시행
- 구해진 설계점에서 비선형 한계상태방정식을 Taylor 전개하여 선형 근사화시킴
- 표준정규분포 확률변수 공간에서 구한 설계점 좌표와 정규분포 확률변수 공간에서의 원좌표 정의
- 정규분포 확률변수공간에서 구한 설계점과 원점의 최단거리인 신뢰도지수를 통해 좌굴확률 산정

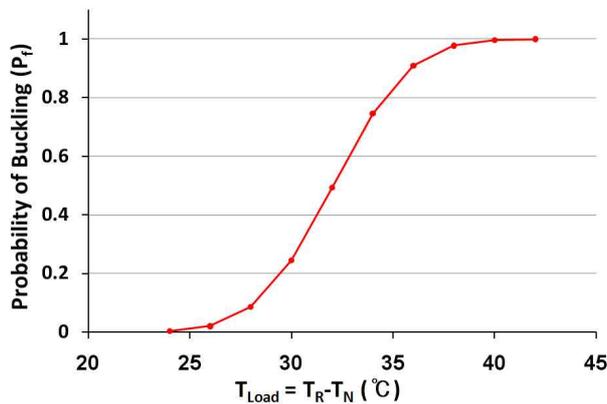


그림 4. 온도하중에 따른 좌굴확률 취약도 곡선

그림 3은 본 연구에서 개발한 좌굴확률 평가프로그램을 통하여 앞서 제안한 평가체계를 따라 좌굴확률을 산정하여 온도하중(T_L)에 따른 좌굴확률 취약도 곡선을 나타낸 것이다. 이때 입력된 조건들은, 곡선반경 500m, 레일온도의 평균(μ) 49~67°C, 표준편차(σ) 3°C와 중립온도의 평균 25°C, 표준편차 3°C, 도상저항력 평균 500kg/m, 표준편차 20kg/m로 가정하여 산정된 곡선이다.

3. 결 론

본 연구는 고속기 궤도의 안정성 향상 및 합리성 확보를 위한 기초연구로써 장대레일 좌굴확률 평가 시스템을 확률론적 기법(AFOSM)을 적용하여 개발하였다. 이를 통하여 궤도를 구성하는 인자들의 불확실성 및 임의성을 고려하여 장대레일 궤도의 안정성 평가를 보다 합리적으로 수행할 수 있으며, 차후 기존 하한좌굴온도의 추정식을 다양한 궤도 매개변수를 고려하고, 직선구간을 포함하는 식으로 보완하여 고속기 대기온도 및 레일온도 증가에 따른 합리적인 운행속도 제한 등의 배경에 기여할 수 있으리라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 건설교통부, “고속철도 철도정비지침”, 2005.
2. 양신추 김은, “곡선부 궤도의 최소좌굴강도 추정식의 개발,” 대한토목학회 논문집, 제22호, 제5D호, pp. 957-967 2002.
3. 양영순, 서용석, 이재욱, “구조 신뢰성 공학”, 서울대학교출판부, 2002.
4. 임남형, 황성호, 이지하, “도상작업 전·후의 도상 횡저항력 변동에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회 논문집, 제24권, 제6D호, pp. 955-961, 2004.
5. A. Kish, G. Samavedam, “Risk Analysis Based CWR Track Buckling Safety Evaluations”, Proceedings of the International Conference on Innovations in the Design&Assessment of Railway, 1999.
6. G. Samavedam, F. Blader, D. Wormley, M. Snyder, D. Thomson, “Analyses of Track Shift Under High Speed Vehicle-Track Interaction”, DOT/FRA/ORD-97/02, 1997.