자갈궤도의 안정성 확보를 위한 확률론적 접근 방안에 대한 연구

A Study on Probabilistic Approach Method for Stability of the Ballasted Track

이우철* · 최진유** · 임남형*** · 이진옥****

Lee, Woo-Chul · Choi, Jin-Yu · Lim, Nam-Hyoung · Lee, Chin-Ok

Abstract

The behavior of continuous welded rail tracks is directly affected by the following various parameters: rail size; track curvature; neutral temperature; misalignment; and ballast resistance. Most of these parameters are having the nature of random variables. Therefore, uncertainties exist in the buckling safety assessments. The evaluation of the buckling safety and the maintenance strategy based on the deterministic analysis are very inefficient since the value of deterministic parameters are selected in worst track condition. In this study, the probabilistic approach method were investigated considering the probabilistic distribution of major parameters such as the neutral temperature of rail and the ballast resistance.

key words : track buckling, uncertainty, probabilistic approach method

1. 서 론

장대 레일은 신축 이음을 용접함으로써 이음부에서 발생하는 문제점을 원천적으로 해소할 수 있는 장점을 가지고 있지만 레일의 길이 변화에 따른 구조적인 문제점을 갖게 된다. 종방향 길이가 긴 레일은 체결장치에 의해 도상, 침목 등에 이중 탄성 체결되는 레일의 특성으로 인하여 양단 약 100m 이후의 구간에서 온도 변동에 따른 신축의 영향을 받지 않는 부동 구간이 발생하게 된다. 부동 구간에서는 온도 변동시 레일의 자유 팽창 및 수축이 구속되므로 레일의 길이 방향으로 과도한 축력이 발생하는 문제를 갖게 된다. 이러한 과도한 축력은 혹서기에 궤도의 좌굴 그리고 혹한기에는 레일 파단의 문제를 유발시켜 주행하는 열차의 안전을 위해할 수 있다.

궤도의 직선부 및 곡선부에서는 주행하는 열차의 사행동, 궤도 틀림, 그리고 궤도의 기하학적 조건(곡선부)에 의해 궤도에는 횡하중이 작용하게 된다. 이러한 횡하중이 일정한 제한치를 초과하게 되면 궤도에는 영구적인 횡방향 변위(Lateral Shift)가 발생할 수 있다. 과도한 횡방향 변위는 열차 탈선 및 승차감 저하를 유발시키는 불안정 상태를 이끌 수 있는 궤도의 불안정 요소이다.(G. Samavedam, 1997)(A. Kish, 1999)

이상에서 언급한 문제들에 대한 기술수준을 살펴보면 오늘날의 초고속 서비스에 충분하지 않고, 다양한 궤도조건을 확보하기 위한 안전한계 및 충분한 해석이 이루어지지 않았다. 이에 따라 초고속 서비스로 인한 장대레일 궤도의 온도 영향 및 영구적인 횡방향 변위(Lateral Shift)와 같은 궤도의 불안정요소는 가중되지만 이에 따른 합리적인 안정성 평가 기법과 이를 활용한 열차속도 규제 기준이 없어 철도의 안정적인 운행에 큰 불안요소가 되고 있다 사료된다. 또한 기존에 사용되고 있는 궤도의 안정성 평가 기법은 궤도를 구성하는 많은 인자들의 확률분포 특성을 고려하지 못하는 결정론적 해석 기법에 의존하고 있다. 실제 현장의 궤도조

* 비회원 · 충남대학교 토목공학과 박사과정 · E-mail: woochul@cnu.ac.kr
** 정회원 · 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원
*** 정회원 · 충남대학교 토목환경공학부 교수
**** 정회원 · 충남대학교 토목환경공학부 교수

건은 많은 영향 인자(온도, 열차운행조건, 궤도 유지관리 등)들에 의해 그 특성이 불확실하게 변하고 있으므로 궤도를 구성하는 구성인자들의 불확실성 및 임의성을 보다 합리적으로 고려하기 위해서는 확률론적 기법을 적용하는 것이 필수적이다.

확률론적 기법은 기존의 결정론적인 기법과 본질적인 개념에서는 큰 차이가 없다. 하지만 궤도 매개변수가 임의성이 큰 확률변수일 경우, 결정론적 기법에서는 Parametric study에 의한 민감도 정보를 정성적으로 파악할 수 밖에 없는 한계를 갖는 반면, 확률론적 기법에서는 확률변수가 갖는 이산성을 고려하여 정량적으로 분석 할 수 있는 장점을 갖는다. 또한 결정론적인 기법이 궤도 안정의 여유치 확보를 위해 가장 열악한 상태의 궤도 매개변수를 사용하기에 비경제적인 반면, 확률론적 기법은 통계적 매개 변수를 통해 동일한 안정도를 확보 할 수 있으며, 유지관리 등에서 유연성을 확보 할 수 있다. 재료특성치의 불확실성 및 구조계의 기하학적 불확실성이 높은 궤도시스템에서 보다 합리적으로 안정성 평가가 이루어지기 위해서는 각 구성인자들의 확률분포를 고려한 궤도의 확률론적 안정성 평가기법에 대한 연구가 필요하다 사료된다.

본 연구에서는 장대레일 자갈궤도의 안정성 평가에 확률론적 기법을 합리적으로 적용하기 위한 방안에 대해 연구하였다. 이를 위해 사고모드분석을 통하여 궤도의 안정성에 영향을 미치는 각종 구성인자들 중에서 주요 확률변수와 그 변수들의 확률분포자료를 선행하여 구축하고 있다. 자갈궤도의 주요 확률변수가 반영된 궤도 확률모델을 개발하고, 신뢰성을 기반으로 한 궤도 안정성 평가 프로그램 개발이 연구의 궁극적인 목표로써, 본 연구논문에서는 좌굴 확률 평가를 위한 확률론적 접근방법 및 자갈궤도의 확률변수 정량화에 대한 연구결과를 소개한다.

2. 확률론적 좌굴 안정성 평가 흐름도

전술한 바와 같이 기존 결정론적 안정성 평가는 궤도 매개변수에 대하여 고정된 안전측의 값을 사용하는 결정론적인 해석에 의해 평가되어졌기 때문에 불합리한 점을 수반하고 있었다. 본 연구에서는 좌굴 평가 흐름도인 그림 1과 같이 합리적인 좌굴 확률 평가를 수행하기 위하여 크게 하중(Load)과 강도(Strength) 두 파트로 나누어 다양한 영향인자에 의하여 변동하는 특성을 반영하고자 한다. 하중(Load)은 중립온도와 레일온도의 차이로써, 레일온도의 증가항으로 표현된다. 여기서 중립온도는 표 1에서 보는 바와 같이 복진, 신축, 침하 등 다양한 요인에 의해 변동되는 주요 확률변수로써, 온도하중의 변동을 유발한다. 온도하중의 변동은 확률론적 접근이 필요한 이유로 본 연구에서는 현실적인 제약으로 제한된 시험에 의한 확률분포로 가정하여 중립온도의 변동특성을 온도하중에 반영하였다. 그러나 후속 연구를 통하여 국내 장대레일 자갈궤도 환경에 맞는 중립온도의 확률분포 구축 연구는 반드시 필요하다 사료된다. 강도(Strength)는 자갈궤도의 특성이 반영된 허용 좌굴온도의 항으로 표현된다. 허용 좌굴온도에 영향을 미치는 다양한 인자중 가장 지배적인 영향인자를 확률변수로 정하고 이에 대하여 확률론적 기법을 적용하였다. 상대적으로 변동 및 영향이 적은 인자는 기존의 결정론적 해석프로그램을 활용하고 이를 종합적으로 반영하여 허용 좌굴온도분포를 산정하였다.

그림 2는 온도하중의 확률분포와 허용 좌굴온도의 확률분포를 도시한 그림이다. 온도하중이 허용 좌굴온도를 넘어설 때 좌굴이 발생된다고 가정할 때 하중과 강도의 확률밀도함수가 겹쳐지는 영역의 넓이는 하중이 강도를 초과하는 확률과 비례하므로 Interference Method를 통하여 쉽고 경제적으로 산출할 수 있다. Interference Method는 하중과 강도가 통계적으로 독립이라는 가정하에서 해석이 수행되며 쉽고 경제적으로 적용할 수 있는 장점을 가진다. 본 연구에서는 확률변수의 변동특성이 반영된 허용 좌굴온도의 확률분포를 합리적으로 산정하기 위하여 다양한 확률론적 기법(Stochastic Finite Element Method, Monte-Carlo Simulation, Moment Method)에 대하여 연구를 수행하였다.(G.I. Schueller, 1997) 첫째로 Stochastic Finite element Method는 기존의 유한요소법에 확률적 기법을 적용한 방법으로 허용 좌굴온도 확률분포에 영향을 주는 확률변수의 특성이 확률분포의 변동특성에 주는 영향을 분석하여 확률론적 개념에 기초하여 안정성을 평가하는 방법이다. 이 방법은 정확한 허용 좌굴온도의 확률분포 및 확률분포의 변동을 산출할 수 있어 장기적인 관점에서의 좌굴확률 평가방법으로 가장 적합하지만, Finite Element Formulation의 비선형성으로 기존의 결정론적 프로그램과의 연동에 현실적인 제약이 따른다. 둘째로 Monte-Carlo Simulation은 확률변수의 분포특성이 반영된 난수를 추출하여, 확률변수 표본집단을 생성한 후 통계적인 방법으로 안정성을 평가하는

방법이다. 개념이 간단하고 해석결과에 대한 확률변수의 변동 특성을 반영할 수 있으면서 기존 결정론적인 해석프로그램을 그대로 활용할 수 있는 장점이 있다. 하지만, 재료기하 비선형 해석프로그램인 결정론적 해석작업의 반복이 필수적이기 때문에 역시 시간적 제약을 갖고 있다. 추후 컴퓨터 기술발전 및 기존 프로그램 수정을 통한 활용가능성은 매우 높다 사료된다. 셋째로 Moment Method는 정규분포를 이루는 확률변수들의 비선형 항으로 표현된 한계상태식을 확률변수의 평균치에 대하여 Talyer 급수전개하는 근사화 방법이다. 즉 확률변수들의 결합 확률밀도함수 및 적분과정의 복잡함을 선형근사화함으로써 상대적으로 쉽게 안정성을 평가할 수 있는 방법이다. 종합적으로 고려했을 때 세가지 방법 모두 확률론적 접근이 가능하지만 Moment Method는 Stochastic Element Method 보다 쉽고 적용성이 좋은 장점을 가지고 있다. 또한 Monte-Carlo Simulation에 비하여 적은 계산에 의해서 허용 좌굴온도 확률분포를 얻을 수 있는 장점이 있어 본 연구에서는 이 방법을 사용하여 연구 중에 있다.

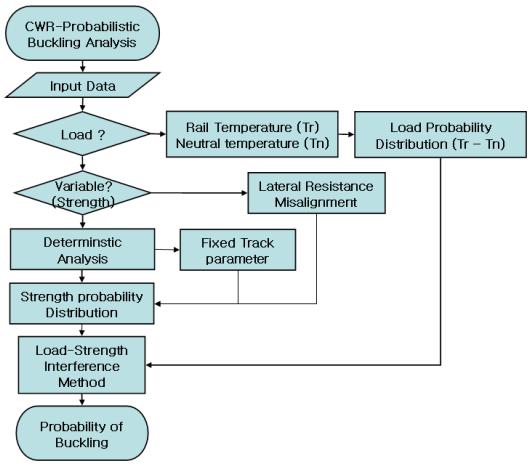

그림 1. 좌굴 확률평가 흐름도

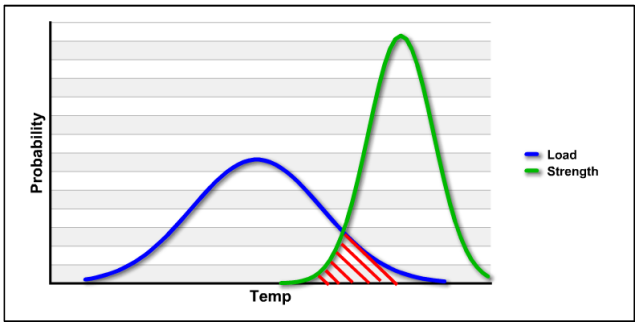

그림 2. Load-Strength Interference method

3. 궤도 확률변수

표 1은 확률변수 및 변동요인에 대하여 정리한 표이다. 매개변수중 온도하중 및 허용 좌굴온도에 가장 지배적인 영향을 미치는 중립온도, 도상 횡방향 저항력, 궤도틀림을 확률변수로 고려하였다.(Kish 1999) (임남형 2004) 이를 제외한 매개변수는 전술한 바와 같이 고정된 값으로 결정론적 해석을 통해 궤도 강도에 고려되며 확률변수는 다음과 같이 정량화되어 허용좌굴온도 확률분포에 반영된다.

도상 횡방향 저항력은 침목 및 도상의 재료적인 특성에 영향을 받는다. 이에 대하여 마찰계수, 자갈의 Grade, Agularity 등 각각의 재료적인 변동특성을 정량화하여 반영한다. 또한 도상 횡방향 저항력은 도상의 조건 및 접속부 등의 궤도의 조건에 따라 변동한다. 임남형 등의 연구에 따르면 암거-토공 구간 접속구간에서는 도상 횡방향 저항력의 회복율이 낮으며, 암거 단부로부터의 거리에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 갖는다 보고하고 있다. 또 도상작업의 종류 및 도상작업후 경과 시간에 따라 도상 횡방향 저항력의 손실 및 회복력의 차이가 발생되는 것으로 보고되고 있다.(Kish 40~60%, 임남형 50%) 현재 도상작업 1, 2종에 따른 회복력 차이는 아직 미연구중인 부분으로 본 연구에서는 이를 도상작업 후의 경과시간과 열차통과 톤수누적(MGT/year)으로 궤도 불확실에 의한 변동을 정량하는 것이 합리적이라 사료된다. 이는 경과시간 및 열차 통과 톤수가 누적될수록 도상 횡방향 저항력은 안정된 분포로 수렴하기 때문이다. 또한 궤도 틀림의 변동요인 중 기하학적 불확실성은 분기부, 곡선부 등의 취약부의 궤도틀림 빈도분포를 통하여 정량화시킨다. 궤도 불확실성 변동요인인 허용 틀림량과 파장은 중요한 영향을 미치나, 정량적으로 반영하기 어렵다. 이에 대하여 선행 연구된 사례도 독립적인 분포로 고려하지 못하고 틀림량에 따른 파장이 자동적으로 계산하는 방식으로 반영되었다.(Kish 1999) 본 연구에서는 이에 대하여 표 2와 같이 고속철도선로정비지침의 선형 관리기준 활용을 통하여 궤도 등급에 따른 궤도틀림을 정량적 반영하고자 한다. 이는 현재 시행되고 있는 유지관리와도

병행되는 장점을 가지고 있다.

중립 온도	궤도 불확실성	· 레일, 궤도의 이동 · 궤도 유지관리작업 · 기후조건 · 교통량 · 지반조건
도상 횡방향 저항력	재료적 임의성	· 침목의 재료적인 특성 · 침목의 형상 · 도상의 재료적인 특성
	궤도 불확실성	· 도상의 조건 · 접속부 [암거-토공 접속부]
궤도 틀림	기하학적 불확실성	· 건널목, 교량 등 구조물 및 그 전후의 취약지점
	궤도 불확실성	· 궤도 등급(허용 틀림량, 파장)

표 1. 확률변수 및 변동요인

준공기준 (cv)	신선 건설시 준공 기준으로 유지보수시 적용하지 않음
목표기준 [tv]	궤도유지보수작업에 대한 허용기준으로 유지보수작업이 시행된 경우 이 허용치 내로 작업이 완료함.
주의기준 [wv]	선로의 보수가 필요하지 않으나 관찰이 필요하고 보수작업의 계획에 따라 예방보수를 시행할 수 있음.
보수기준 [av]	유지보수작업이 필요한 단계

표 2. 선형 관리기준

4. 결 론

고속화되고 있는 장대레일 자갈궤도의 안정성 확보를 위하여 확률론적 안전성 평가방법 및 확률변수의 정량화에 대한 연구를 수행하여 도상 횡방향 저항력, 궤도틀림 등 확률변수의 정량화를 통한 확률론적 안정성 평가 방법을 제시하였다. 우리나라의 궤도특성에 맞는 궤도 매개변수에 대한 정량적인 자료가 절대적으로 부족한 실정으로 중립온도, 도상 횡방향 저항력 등 주요 매개변수에 대한 확률분포자료 구축이 필요하다 사료된다. 본 연구결과는 추후 궤도 확률 평가의 모델 및 로직 개발에 반영될 뿐만 아니라 콘크리트의 궤도의 파단모델 등 철도안정성 평가에 활용될 수 있는 기대 효과를 얻을 수 있다 사료된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통기술연구개발사업의 일환으로 진행되고 있는 “미래철도기술개발사업”의 지원을 받아 수행된 연구이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. G. Samavedam, F. Blader, D. Wormley, M. Snyder, D. Thomson (1997) “Analyses of Track Shift Under High Speed Vehicle-Track Interaction”, DOT/FRA/ORD-97/02
2. A. Kish, G. Samavedam, D. Wormley (1999) “Fundamentals of Track Lateral Shift for High- Speed Rail Applications”, Presented to ERRI Interactive Conference on “Cost Effectiveness and Safety Aspects of Railway Track”
3. A. Kish, G. Samavedam, (1999) “Risk Analysis Based CWR Track Buckling Safety Evaluations”, Proceedings of the International Conference on Innovations in the Design & Assessment of Railway
4. G.I. Schueller, (1997) “A State-of-the-Art Report on Computational Stochastic Mechanics”, Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 12, No. 4, pp 197-321
5. 임남형 등 (2004) “도상작업 전·후의 도상 횡저항력 변동에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회, 제24권 제6호 pp.955-961
6. 건설교통부 (2005) “고속철도철도정비지침”