

장대레일 철도 교량의 축력 영향인자 분석

Influence Factors Affecting the Longitudinal Force of Continuous Welded Rail on Railroad Bridges

김경삼* 한상윤** 임남형*** 강영종****
Kim, Kyung-Sam Han, Sang-Yun Lim, Nam-Hyoung Kang, Young-Jong

ABSTRACT

Recently, use of Continuous Welded rail(CWR) is increased for structural, economical reason but new problem is caused accordingly and phenomenon that give threat in traveling by ship stability of train is led. According as rail is prolonged, excessive relative displacement and longitudinal force can happen to rail by temperature change and external force. Specially, buckling or fracture of rail can happen in railroad bridges because relative displacement by bridge and properties of matter difference between rail grows and additional axial force happens to rail by behavior of bridge. According to several study, longitudinal force of rail in bridge is influenced with ballast resistance, elongation length, boundary condition, stiffness of framework. Non-linear behavior of ballast acts by the most important factor in interaction between rail and bridge. Therefore, must consider stiffness of bridge construction with non-linear characteristic of ballast and stiffness of base for accuracy with longitudinal force calculation and analyze. In this study, perform material non-linear analysis for longitudinal force of CWR and three dimensional buckling analysis to decide buckling force.

1. 서론

최근 세계 각 국에서는 철도를 국가 기간 교통수단으로 인식하여 철도 산업에 많은 관심을 가지고 투자하고 있다. 이런 관심은 대륙과 국가간의 철도네트워크를 구성을 현실화하고 있으며 고속철도의 보급과 자기부상열차의 상용화를 앞당기고 있다. 우리나라에서도 2004년이면 고속철도가 개통될 것으로 예상되어 세계적인 흐름에 동참할 것이다. 그러나 이러한 장대레일의 사용이 빈번해지면서 새로운 문제점이 야기되어 열차의 주행 안정성에 위협을 주는 현상이 유발되었다. 즉, 레일이 장대화됨에 따라 온도변화 및 외력에 의해서 레일에 과도한 상대변위 및 축력이 발생할 우려가 있다. 특히 교량상의 장대레일에서는 교량과 레일 간의 물성 차이로 인해 상대변위가 커지고 교량의 거동에 의해 레일에 추가적인 축력이 발생하여 심각한 경우에는 레일 좌굴이나 파단을 일으킬 수도 있다. 여러 연구결과에 따르면 교량구간에서의 레일축력은 도상의 저항력 및 교량의 신축길이, 지점배치, 하부구조 강성 등의 영향을 받게 됨이 밝혀졌으며, 이러한 레일-교량 간의 상호작용에는 도상의 비선형적 거동이 가장 중요한 매개인자로 작용하므로 축력 계산 결과의 정확도를 높이기 위해서는 도상의 비선형 특성과 함께 교량 구조물의 강성 및 지반의 강성을 고려하여 해석을 해야 한다.

* VSL KOREA(주) 사원, 비회원

** 고려대학교 토목환경공학과 박사과정, 비회원

*** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

**** 고려대학교 토목환경공학과 부교수, 정회원

2. 궤도 축력 이론

2.1 일반 구간

장대궤일은 온도변화가 있더라도 궤일체결장치, 침목 및 도상에 의해 그 이동이 억제되므로 이에 상당하는 에너지가 궤일축력으로 작용하게 된다.

$$P = EA\beta(t - t_0) \quad (1)$$

여기서,

P : 궤일 축력(ton)

E : 궤일강의 탄성계수($2.1 \times 10^6 kgf/cm^2$)

A : 궤일의 단면적(cm^2)

β : 궤일강의 선팽창계수($1.14 \times 10^{-5}/^\circ C$)

t : 장대궤일 온도($^\circ C$)

t_0 : 장대궤일 부설온도($^\circ C$)

온도변화에 따른 궤일의 이동은 궤일과 침목, 침목과 도상에서 저항을 받지만 이중 탄성체결을 하여 저항력이 매우크기 때문에 침목과 도상간의 저항력에 지배된다. 궤일길이 방향의 이동에 저항하는 힘, 즉 도상저항력은 Fig.1과 같이 일정한 수준까지는 탄성적으로 변화하지만 그후는 소성 변형하여 변위량에 관계없이 일정하게 되며, 이때의 침목이동량은 2~5mm 정도가 된다.

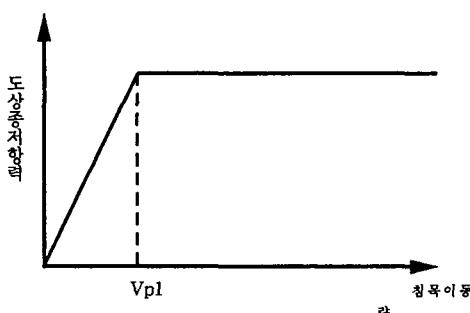


Fig.1 도상종저항력

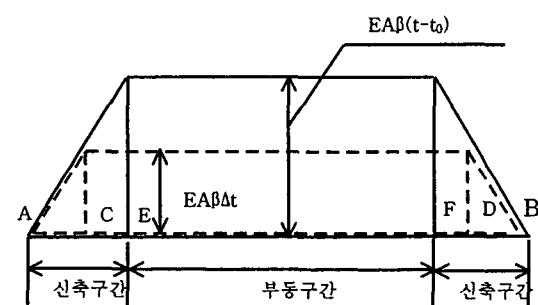


Fig.2 장대궤일 축력분포

Fig.2에서 A~E, F~B간에서는 궤일 신축이음매의 영향으로 궤일은 온도변화에 따라 신축하게 되며 도상으로부터 저항을 받지만 E~F간은 온도변화에 의해 신축하지 않으며 종저항력도 작용하지 않는다. 즉, 일반구간의 장대궤일은 장대궤일 단부로부터 어느 정도(약 100~150m)까지는 온도변화에 따라 신축하지만 그 이상의 안쪽의 궤일은 도상의 구속으로 인하여 신축하지 않고 본래의 길이를 유지하게 된다.

2.2 교량구간

장대궤일을 교량상에 부설하면 온도변화에 따라 교량 거더가 신축하기 때문에 이로인한 축력이 추가로 궤일에 작용하며 그 반력으로 교량 거더와 교각에는 종하중이 작용된다. 교량 거더의 고정지점 부근에서는 궤도 축력이 감소되지만 이동지점 부근에서는 거더 신축량만큼의 도상변형이 발생하므로 궤도축력이 부가된다. 일반적으로 장대궤일이 부설된 철도교량은 궤도축력 때문에 발생되는 궤일응력에 의해서 교량의 형식, 지간길이, 지점배치방법 등이 결정된다. 특별한 경우 교량전후부에 궤일신축이음매를 설치하여 이 한도를 크게 유지하고 있으나 고속열차의 승차감이나 궤도의 유지관리 등의 문제점 때문에 가능한 궤일신축을 두지 않는 것이 바람직하다.

3. 도상궤도의 해석

해석에 사용된 교량은 2경간 연속(2@52.5m)과 9경간 연속(55m+7@65m+55m)으로 구성된 강박스 합성형 교량이다(Fig.3). 해석의 수행에 있어서 9경간 연속부분은 2경간 연속과 1경간으로 이루어진 교량도 검토할 것이다. 철도 교량상에 존재하는 장대레일의 온도상승에 의한 축력을 검토하여 축력의 영향인자를 분석하였다.

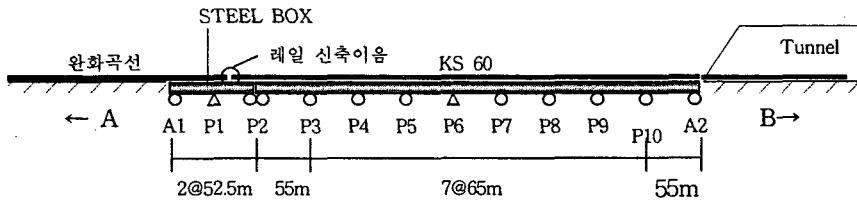


Fig.3 해석 교량

3.1 축력의 영향인자

교량에서 9경간(P2 ~ A2)연속으로 시공되는 교량상에 위치하는 장대레일의 온도에 의한 축력을 검토한다. 교량은 종방향 변위에 대한 고정지점이 1개 교각에 위치하며 B방향 교대 A2이후에는 터널이 위치한다. 또한 교량의 거더는 교각 P2와 교대 A2에 신축이음이 존재하며 A방향의 완화곡선 때문에 장대레일의 신축이음은 교각 P1과 P2사이에 위치한다.

장대레일의 축력을 검토를 위한 영향인자는 다음과 같다.

- 교량형식의 변화

Fig.4와 같이 P2에서 A2까지의 교량형식을 9경간, 2경간, 1경간으로 변화시켜 축력의 분포특성을 파악하였다.

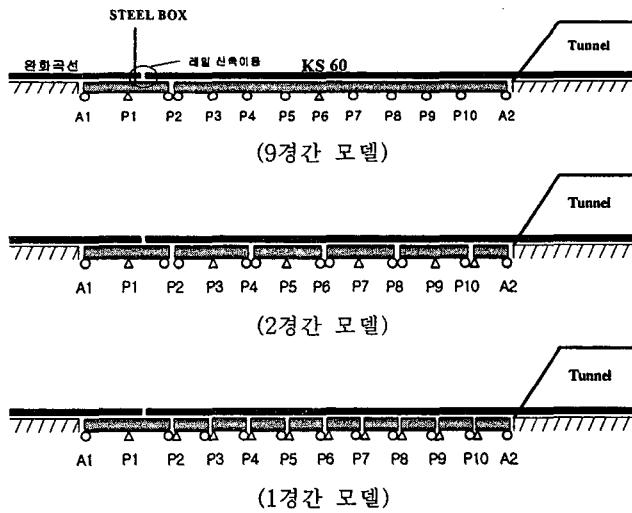


Fig.4 교량형식별 모델

- 고정교각의 위치변화

고정교각의 위치는 고정단을 말하는 것으로 고정교각의 위치에 따라 교량의 변위가 다른 특성을 보이므로 고정교각의 위치는 중요한 인자가 된다. 이러한 고정교각의 위치변화는 각 교량형식에 따라 차이가 있다.

- 레일당 도상 종저항력 변화

레일당 도상 종저항력은 Fig.5에서와 같이 표현되며 다음과 같은 도상 저항력과 한계탄성 범위

의 조합으로 해석 모델을 정의하였다.

- Ⓐ 저항력=350kgf, 한계 탄성 변위=0.2cm(350-0.2)
- Ⓑ 저항력=500kgf, 한계 탄성 변위=0.2cm(500-0.2)
- Ⓒ 저항력=350kgf, 한계 탄성 변위=0.5cm(350-0.5)
- Ⓓ 저항력=500kgf, 한계 탄성 변위=0.5cm(500-0.2)

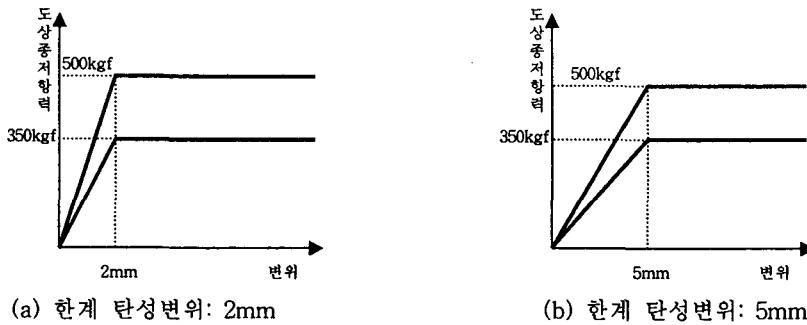


Fig.5 도상 종방향 저항력

3.2 축력 해석 모델

교량상 장대레일의 축력 검토를 수행하기 위하여 범용프로그램인 ABAQUS를 사용하였으며 Fig.6과 같이 레일과 거더는 보요소를 사용하였으며 도상 종방향 저항력은 Fig.5와 같이 비선형 특성을 나타내므로 도상 저항력은 일방향 비선형 스프링 요소를 사용하였다.

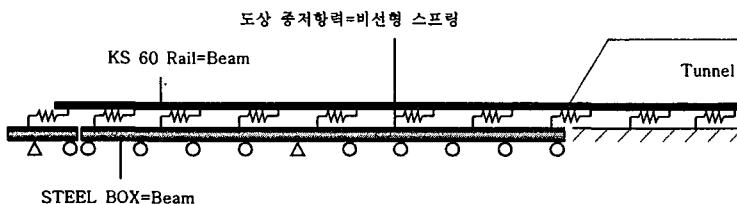


Fig.6 축력 해석 모델

- Ⓐ 레일 : B21 요소
- Ⓑ 거더 : B21 요소
- Ⓒ 도상 종저항력(교량구간) : 비선형 스프링, SPRING2
- Ⓓ 도상 종저항력(터널구간) : 비선형 스프링, SPRING1
- Ⓔ 해석 : 재료 비선형 해석

3.3 레일의 허용 압축하중

철도 기술자들이 널리 사용하고 있는 좌굴축력(buckling force)은 다음과 같은 식 (2)에 의해 결정되었으며 대표적인 도상 횡저항력에 관한 좌굴축력은 약 100ton임을 구할 수 있다.

$$P = 3.63 \cdot J^{0.383} \cdot g^{0.535} \cdot N^{0.267} \quad (2)$$

여기에서

P = 좌굴 축력(ton)

J = 레일의 횡강성(cm⁴): KS60 = 512 cm⁴

g = 레일당 도상 횡저항력(kgf/cm) = 5 kgf/cm

N = 궤도의 횡강성 계수(레일 횡강성의 배수, 약 1.3)

또한 본 연구실에서 개발된 KUCWR(Korea University program for analyze Continuous Welded Rail track)에 의해 도출된 좌굴축력은 약 86.5ton으로 본 연구에서의 기준값으로 사용하였다.

4. 해석 결과

4.1 고정교각의 위치변화의 영향

고정교각의 위치변화에 따른 레일의 축력분포는 Fig.7에 나타나 있다. 그림에서 알 수 있듯이 고정교각의 위치가 A2에 접근할수록 A2에서의 최대 축력값이 감소한다. Fig.8에 나타난 변위는 고정교각을 중심으로 좌우로 변위가 발생함을 알 수 있다.

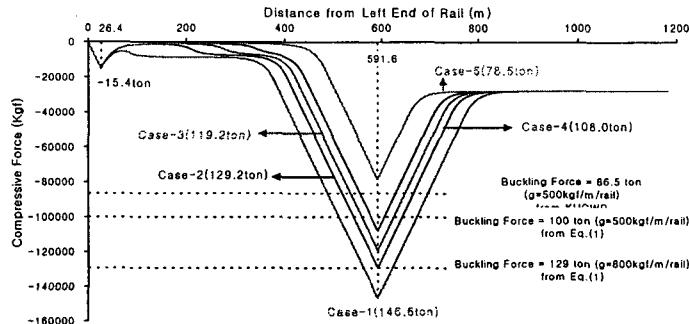


Fig.7 고정교각 위치변화에 따른 축력분포 (350-0.2)

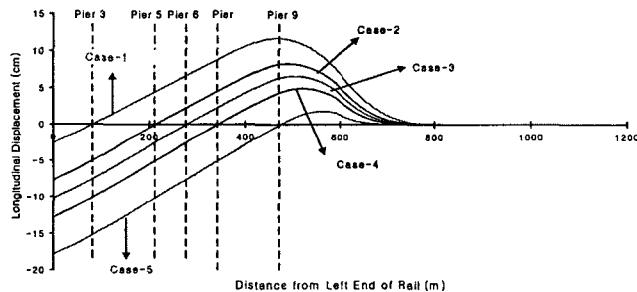


Fig.8 고정교각 위치변화에 따른 변위분포 (350-0.2)

4.2 도상 종저항력의 영향

Fig.9은 한계탄성범위를 0.2cm로 하고 종저항력을 350kgf와 500kgf를 각각 비교한 것이다. 종저항력이 클수록 최대축력값이 더 큰 값을 가지는데 그 이유로는 온도하중의 특성상 변위가 구속되는 힘이 클수록 응력이 더 크게 발생하기 때문에 종저항력이 클수록 축력값이 크게 발생한다고 할 수 있다.

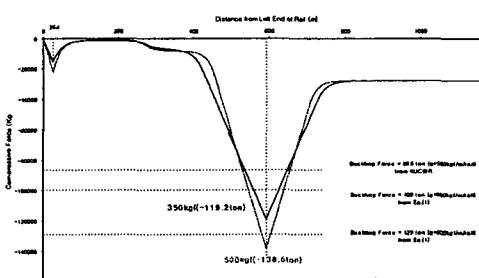


Fig.9 도상종저항력에 따른
축력분포(ELD=0.2cm)

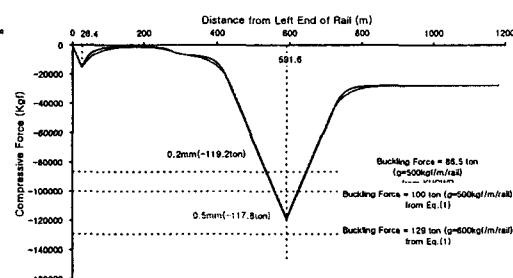


Fig.10 한계탄성범위에 따른
축력분포(LRF=350kgf)

4.3 한계탄성 범위의 영향

한계탄성범위는 Fig.10에서와 같이 온도변화에 따른 레일의 축력분포에 영향을 미치지 않는다.

5. 결론

해석에 사용된 교량은 2경간 연속(2@52.5m)과 9경간 연속(55m+7@65m+55m)으로 구성된 강박스 합성형 교량이다. 9경간 연속구간은 또 2경간, 1경간으로 나누어 교량형식을 고려하여 도상저항력의 비선형성을 고려한 합리적인 해석방법을 제시하였다. 또한 교량상에 존재하는 장대레일의 온도에 의한 축력을 검토하여 레일의 축력에 미치는 영향인자를 분석하였다.

교량 구간 상에 위치하는 교축방향 고정단 교각의 위치, 그리고 도상 종방향 저항력에 따른 모든 가능한 경우에 대하여 온도에 의한 레일의 축력을 검토하였다.

- 고정교각의 위치(9경간 교량)

고정교각이 A2에 가까워질수록 레일의 최대 축력의 값이 줄어들었다. 다시 말해 고정교각의 위치가 최대축력이 발생하는 지점(A2)에 가까울수록 온도변화에 따른 레일과 교량의 변위는 A2반대 방향으로 더 많이 발생한다.

- 도상 종저항력

도상 종저항력이 클수록 레일의 최대축력이 증가하였으나 변위는 감소하였다. 도상 종저항력이 크다는 것은 변위 발생을 억제할 수 있다. 즉 변위 발생 감소에 따라 축력의 크게 발생할 수 있다.

- 한계탄성범위

탄성한계범위의 크기는 레일의 축력에 미치는 영향이 거의 없다고 판단된다.

- 교량형식

최대축력의 크기 (9 경간 교량>2 경간 교량>1 경간 교량)

최대변위의 크기 (9 경간 교량>2 경간 교량>1 경간 교량)

∴ 단경간이 될수록 교량의 변위가 분산되어 레일의 축력분포도 분산되어 최대값은 상대적으로 작아진다.

참고문헌

1. 이종득(1994), 철도 공학 ,노혜출판사
2. 강기동, 박종방, 김인재, 박대근,(1994), “교량상 궤도축력의 해석 및 실측결과 비교”, 대한토목학회논문집, 제14권 제4호, pp.907-913
3. 양신추, 이지하, 서사범(2000), “철도교량상의 장대레일 축력 해석기법 개발”, 대한토목학회논문집, 제20권 제5-D호, pp.581-591
4. 강영종, 임남형, 신정렬, 양재성(1999), “온도하중을 고려한 장대레일 궤도의 안정성 해석”, 한국강구조학회논문집, 제11권 3호, pp. 281-190.
5. 임남형(2001), “Three Dimensional Nonlinear Analysis of Continuous Welded Rail Track”, 박사학위논문, 고려대학교
6. 배준현(2003), “궤도 좌굴에 대한 궤도구성요소들의 민감도”, 석사학위논문, 고려대학교