

경부고속철도 교량상 장대레일의 온도응력 계측 실험  
**Investigation of Thermal Stress of Continuous Welded Rail  
on High Speed Railway Bridge**

강재윤\*    최은석\*\*    진원중\*\*    이정우\*\*    광중원\*\*    김병석\*\*  
Kang, Jae-Yoon    Choi, Eun-Suk    Chin, Won-Jong    Lee, Jung-Woo    Kwark, Jong-Won    Kim, Byung-Suk

-----  
**ABSTRACT**

Recently, the continuous welded rail(CWR) track has been used for less maintenance of the High-speed railway tracks. In case of CWR track, track buckling has always been an unpredictable event under the high compressive stress in rail. The behavior and stress state of CWR track is mainly influenced by its thermal variations, and it is important to understand seasonal variations of rail temperature and stress to predict the track stability. This paper describes the in-site measurement for the rail temperature and rail stress, and the correlation between the rail temperature and stress was examined.

-----

**1. 서 론**

레일의 응력 상태는 고속철도 차량 운행시 안전성을 결정하는 가장 중요한 지표가 되며, 특히 레일이 압축응력 상태에 놓이게 되는 하절기에는 온도 상승에 따라 일정한 한계 압축응력을 초과하게 되면 레일의 좌굴이 발생할 수 있는 확률이 높아지게 된다<sup>(1)</sup>. 따라서, 하절기 기상변화에 대한 고속철도 안전관리 대책으로서, 레일온도 55 ℃ 이상일 경우에는 전 구간 230 km/h 이하 감속 운행, 레일온도 60 ℃ 이상일 경우에는 전 구간 70 km/h 이하 감속 운행, 레일온도 64 ℃ 이상일 경우 운행을 정지한다는 규정이 고속철도선로정비지침에 마련되어 있으며<sup>(2)</sup>, 실제로 2004년의 하절기 폭염으로 인해 레일온도가 57 ℃까지 상승함에 따라, 안전을 고려하여 고속철도차량의 주행속도를 230 km/hr로 감소시킨 사례가 있다. 교량상 장대레일의 온도응력 평가와 관련하여 유한요소해석을 통한 주행안전성 검토는 이미 여러 연구를 통하여 수행되어 왔으나, 실제 주행환경은 해석에서 모사된 이상화된 상태와는 달리 다양한 외적 요인에 의해서 달라질 수 있으며, 이러한 실제 주행환경에서의 궤도 거동은 현장 계측을 통해서 파악하는 것이 바람직하다. 이에 본 연구에서는 경부고속철도 교량상 장대레일의 온도 변화에 따른 레일응력 평가를 위하여 하절기 및 동절기의 레일온도변화 및 응력을 계측하고, 계측 자료로부터 주요 위치별 레일 온도응력 예측식을 도출하였다.

-----  
\* 한국건설기술연구원 구조시스템연구실, 선임연구원, 정희원

E-mail : jykang@kict.re.kr

TEL : (031)910-0135    FAX : (031)910-0121

\*\* 한국건설기술연구원 구조시스템연구실

## 2. 장대레일 온도응력 계측 실험

### 2.1 계측실험 개요

대기온도 변화에 따른 고속철도 교량상 장대레일의 온도응력 변화를 살펴보기 위하여, 경부고속철도 노선상의 연제교 교량구간을 택하여 일정 기간 동안의 레일 온도응력 변화를 계측하였다. 계측 대상이 되는 교량 구간은 서울기점 117km 지점에 위치한 연제교 구간으로 하였으며, 이 교량은 2@40m의 PSC 박스거더교로서 경간중앙에 고정지점이 위치하여 이론적으로 중앙의 고정지점을 기준으로 좌우대칭의 온도응력이 발생하게 되므로 그림 1에 보인 바와 같이 중앙 지점에서 가동 지점까지의 40m 구간에 대해서 10m 간격으로 총 20 개소에 레일 변형률 게이지를 설치하였다. 레일의 온도는 5 개소에 설치된 온도 게이지를 통하여 계측하였으며, 대기온도 계측을 위해 1 개의 온도게이지를 계측설비 내에 두었다. 계측기간은 2005년 8월 27일 ~ 2005년 9월 8일, 2006년 1월 12일 ~ 2006년 1월 15일, 2007년 2월 10일 ~ 2007년 3월 7일, 2007년 5월 18일 ~ 2007년 5월 31일로서 총 4회에 걸쳐서 대기온도  $-9^{\circ}\text{C} \sim +33^{\circ}\text{C}$ 의 온도변화에 대한 레일온도 및 응력을 계측하였다.

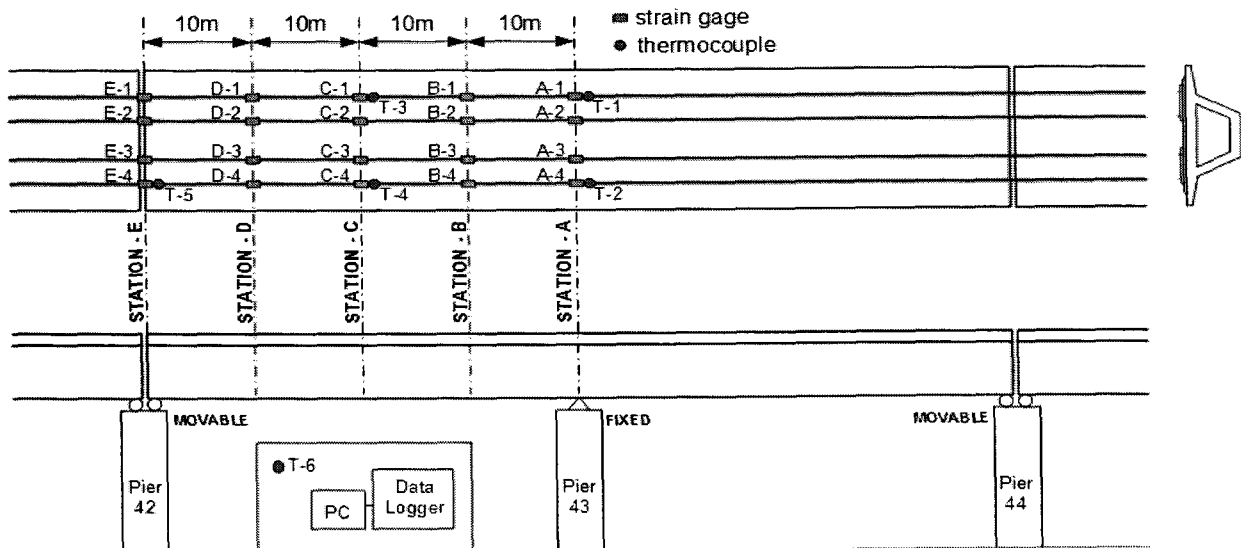


그림 1. 레일 종방향 변형률 및 온도 변화 계측 지점

### 2.2 계측 결과

측정기간중 대기온도와 레일온도간의 상관관계를 그림 2에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 레일온도는 일정한 영역 내에 분포하는 것으로 나타났으며, 임의의 대기온도에 대해서 레일온도의 편차는  $-5^{\circ}\text{C} \sim +17.5^{\circ}\text{C}$ 의 범위내에 있으며, 주간에는 복사열에 의해 레일온도가 대기온도보다 높고, 야간에는 냉각효과에 의해 레일온도가 대기온도보다 낮은 것으로 나타났다. 이와 같은 레일온도와 대기온도간의 온도편차 경향은 동절기 또는 하절기의 구분 없이 일교차에 따라 나타나는 현상이라고 할 수 있다. 즉, 그림 3에 보인 바와 같이, 일일 대기온도 일교차에 따라 주간의 레일온도 증가 경로와 야간의 레일온도 감소 경로가 차이를 보이며, 이러한 차이는 복사열에 의해 발생하는 것으로 판단된다.

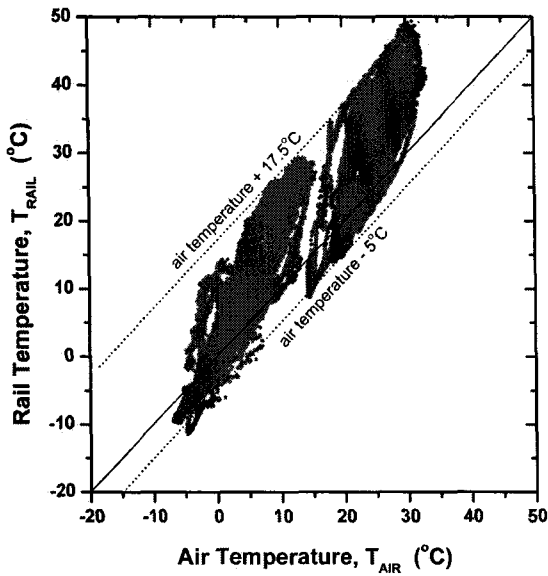


그림 2. 대기온도-레일온도 관계

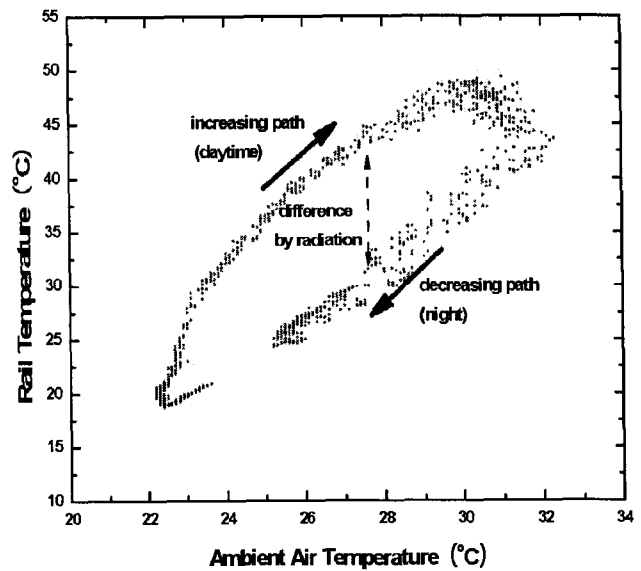


그림 3. 일교차에 따른 레일온도 변화

그림 4는 총 4회차의 모든 측정에서 계측된 온도응력을 레일온도에 대해서 나타낸 것으로서, 레일온도와 레일응력간의 관계는 그림에 표시한 바와 같은 1차 선형식으로 표현할 수 있다. 그림의 회귀식으로부터 레일이 무응력 상태가 되는 중립온도는 약  $24.4^{\circ}\text{C}$ 이며, 레일온도가  $1^{\circ}\text{C}$  변화함에 따라 레일응력은 약  $1.9\text{N}/\text{mm}^2$ 의 변화가 발생함을 알 수 있다. 단, 회귀식으로부터 레일온도에 대한 레일응력을 예측하고자 하는 경우에는, 측정치의 분포에 따라 오차범위가  $\pm 15\text{N}/\text{mm}^2$ 이 되며, 중립온도를 기준으로 온도가 감소하는 경우에는  $+15\text{N}/\text{mm}^2$ 의 상한 범위에 대해서 레일응력을 예측하고, 레일온도가 중립온도 이상이 되는 경우에는  $-15\text{N}/\text{mm}^2$ 의 하한 범위에 레일응력을 예측하는 것이 안전측의 레일응력 예측결과가 될 것으로 판단된다.

대기온도가 증가함에 따라 레일은 물론 교량바닥판도 온도신축을 하게 되며, 교량 바닥판의 온도신축과 레일-교량 상호작용에 의해 레일에는 부가적인 레일응력이 발생하게 된다. 교량 바닥판과 레일은 도상이라는 불연속 매개체를 통하여 연결되어 있고, 교량바닥판의 온도신축에 따른 변위는 도상을 통해서 일부 흡수되므로, 교량바닥판의 온도신축에 따른 부가응력의 크기를 정확하게 예측하기는 어렵다. 본 연구에서는 계측실험에서 임의의 레일온도에 대해 최대 레일응력이 발생한 측정점과 최소 레일응력이 발생한 측정점의 응력차를 교량바닥판의 온도신축에 의한 부가응력의 크기로 가정하고, 레일온도 변화에 따른 부가응력 변화를 그림 5에 나타내었다. 그림에서 레일응력의 최대치와 최소치간의 차이로부터 유도한 바닥판 온도신축에 의한 부가응력의 크기는 중립온도에서 약  $3\text{N}/\text{mm}^2$ 의 부가응력이 발생하는 것으로 나타났으며, 레일온도  $1^{\circ}\text{C}$  변화에 대해서 약  $0.11\text{N}/\text{mm}^2$ 의 부가응력이 발생하는 것으로 나타났다.

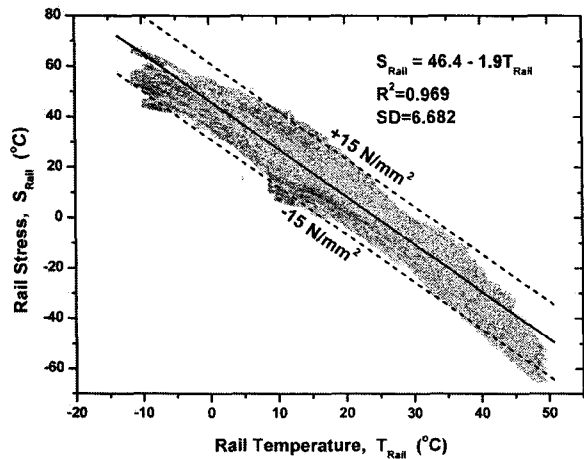


그림 4. 레일온도-응력관계 추정 곡선

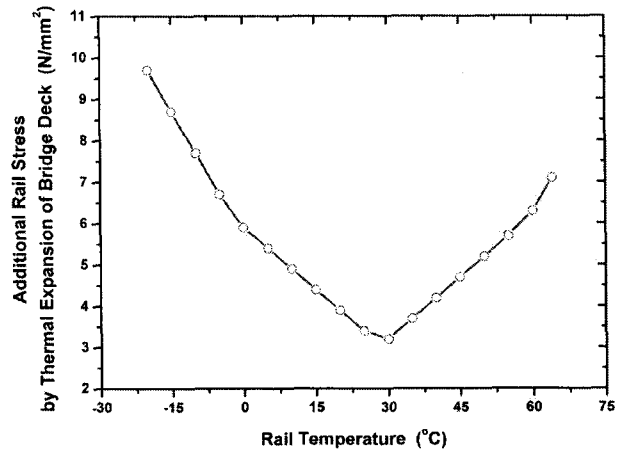


그림 5. 바닥판 온도신축에 의한 부가레일응력

### 3. 결론

본 연구에서는 경부고속철도 노선상의 교량구간에 대해서 연중 기온분포에 대한 레일온도 및 응력을 현장 계측하고, 계측자료로부터 온도변화에 대한 레일응력거동을 분석하여, 레일온도-응력 관계식을 도출하였다. 계측결과, 레일온도와 레일응력은 선형적 상관 관계를 갖는 것으로 나타났으며, 레일온도가 1°C 변화함에 따라 레일응력은 약 1.9N/mm<sup>2</sup>의 변화를 보이는 것으로 분석되었다. 레일응력의 최대치와 최소치간의 차이로부터 유도한 바닥판 온도신축에 의한 부가응력의 크기는 중립온도에서 약 3N/mm<sup>2</sup>의 부가응력이 발생하는 것으로 나타났으며, 레일온도 1°C 변화에 대해서 약 0.11N/mm<sup>2</sup>의 부가응력이 발생하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 제안한 레일응력 예측식을 이용하면 레일온도 변화 계측을 통해 레일응력을 손쉽게 예측할 수 있으며, 선로안정성 평가 및 궤도 유지관리시에 효율적으로 활용될 수 있으리라 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 고속철도기술개발사업인 “고속철도 선로 구축물 시스템 안정화 기술개발” 과제를 통해 수행되었으며, 현장계측 실험을 위해 적극적으로 협조해 주신 한국철도공사 및 한국철도시설공단 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

### 참고문헌

1. 한국건설기술연구원 (2005), 고속철도 선로구축물 시스템 안정화 기술개발 (3차년도) 연차보고서
2. 건설교통부 (2005), 고속철도선로정비지침 개정안