

고속철도 교량상 장대레일의 하절기 온도응력 계측

Field Test to Investigate the Thermal Stress of Continuous Welded Rail on High Speed Railway Bridges in Summer Period

강재윤[†] · 곽종원* · 최은석** · 진원종** · 이정우** · 김병석***

Jae-Yoon Kang · Jong-Won Kwark · Eun-Suk Choi · Won-Jong Chin · Jung-Woo Lee · Byung-Suk Kim

Abstract

Most modern railways, especially the high speed railway tracks, use continuous welded rail(CWR) for the less maintenance. For the CWR track has very few expansion joints, track buckling has always been an unpredictable event and it happens mainly by high compressive stress in rail in summer period. Therefore, it is important to understand the variation of rail stress induced by thermal loads which has direct influence on the rail buckling and stability of railway track. This paper describes the experimental investigation of the variation of rail temperature and stress in a high speed railway track on bridge structure. Field measurement was performed to examine the correlation between the rail temperature and rail stress on the Korean High Speed Railway line. Regression functions were derived from measured data to determine the rail stress for an arbitrary rail temperature varies from 20 to 50 degree Celsius.

Keywords : Rail stress(레일응력), Rail temperature(레일 온도), Thermal load(온도하중), Continuous Welded Rail, CWR(장대레일), Rail Stability(레일안정성), High Speed Railway Bridge(고속철도교량)

1. 서론

장대레일은 온도변화에 따라 종방향 신축을 하게 되고, 이러한 온도 신축은 체결구, 침목 및 도상에 의해서 구속된다. 온도변화에 따른 레일의 자유 신축이 구속됨에 따라서 발생하는 에너지는 레일응력으로 축적되고, 온도 증가량이 큰 경우에는 과도한 레일응력이 발생하여 좌굴을 일으키는 원인이 된다. 또한, 교량상에 놓인 장대레일의 경우에는 레일 자체의 온도변화에 따른 온도 응력뿐만 아니라, 교량 바닥판의 온도 신축에 의해서 추가적인 응력이 발생한다.

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. 따라서, 철도청에서는 하절기 기상

변화에 대한 고속철도 안전관리 대책으로서, 레일온도 55°C 이상일 경우에는 전 구간 230km/h 이하 감속 운행, 레일온도 60°C 이상일 경우에는 전 구간 70km/h 이하 감속 운행, 레일온도 64°C 이상일 경우 운행을 정지한다는 규정을 마련한 바 있으며, 실제로 2004년의 하절기 폭염으로 인해 레일온도가 57°C 까지 상승함에 따라, 안전을 고려하여 고속철도차량의 주행속도를 230km/hr로 감소시킨 사례가 있다.

한국건설기술연구원은 교량상 장대레일의 온도응력 평가와 관련하여 유한요소해석을 통한 주행안전성 검토를 수행한 바 있으나[1], 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 하절기 온도 변화에 따른 레일응력을 계측하고, 계측 자료로부터 주요 위치별 레일 온도응력 예측식을 도출하였다.

2. 고속철도 교량상 장대레일의 온도 거동 특성

장대레일 궤도에서는 레일 용접 이음시에 자연상태에서

† 책임저자 : 회원, 한국건설기술연구원, 구조연구부 선임연구원
E-mail : jykang@kict.re.kr
TEL : (031)910-0135 FAX : (031)910-0121
* 한국건설기술연구원, 구조연구부 선임연구원
** 한국건설기술연구원, 구조연구부 연구원
*** 한국건설기술연구원, 구조연구부 연구위원

일정량의 긴장력이 가해지도록 하여 압축응력 증가에 대해서 여유량을 갖도록 하고 있으며, 그 긴장력과 용접이음시의 온도에 의하여 일정한 온도에서는 레일축력이 없게 되는데, 이와 같이 온도에 의한 레일축력이 없게 되는 상태가 되는 온도를 설정온도(setting temperature 또는 free stress temperature, FST)라 한다. 이 설정온도는 중위온도 보다 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 정도 이내가 원칙이나 통상 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ 를 허용 온도범위로 하고 있다. ‘고속철도선로 정비지침 개정안’의 ‘제40조 장대레일의 설정’ 규정에 의하면 우리나라의 장대레일 설정온도는 일반구간에서 $25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, 터널구간에서 $15^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 로 정하고 있으며[2], 독일의 경우에는 $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, 대만의 경우에는 $34^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ 를 설정온도로 정하고 있다.

직선 레일의 경우, 레일온도 1°C 증가에 대해서 레일응력은 약 $2.6\text{N}/\text{mm}^2$ 증가하며, 이는 레일당 약 18.6kN 의 축력이 작용하는 것과 동일한 상태이다. 레일온도가 65°C , 즉 설정온

도 25°C 에 대해서 $+40^{\circ}\text{C}$ 증가하면, 레일당 작용하는 온도축력은 약 $1,000\text{ kN}$ 에 달하며, 발생 온도하중의 일부가 체결구와 침목을 통해 하부구조로 전달되더라도 큰 온도하중의 대부분을 레일이 부담해야 하므로 좌굴 발생의 위험이 있다.

온도와 관련하여 레일온도에 영향을 미치는 다른 요인은 교량 바닥판의 온도변화에 의하여 레일에 발생하는 부가응력을 들 수 있으며, 이 부가응력에 의해 교량상 장대레일의 온도응력분포가 위치에 따라 변화하게 된다. Bridge Design Manual에서는 교량 바닥판의 온도 변화량을 $\pm 25^{\circ}\text{C}$ 로 규정하고 있으며[3], 교량 바닥판의 온도가 $+25^{\circ}\text{C}$ 증가할 때, 레일에 발생하는 부가응력은 궤도당 최대 약 $23.8\text{N}/\text{mm}^2$ 에 달한다. 단, 유한요소해석 결과에 따르면, 교량 온도 증가에 따른 레일 부가응력의 상관 관계는 Fig. 1에 보인 바와 같은 지수함수(exponential decay function)형태로 나타나며, 이로부터 2@40m의 PSC 박스거더 형식의 교량에 대해서 교량 온도 신축에 의해 발생하는 부가 레일응력은 약 $25\text{N}/\text{mm}^2$ 를 넘지 않는 것으로 나타났다[1].

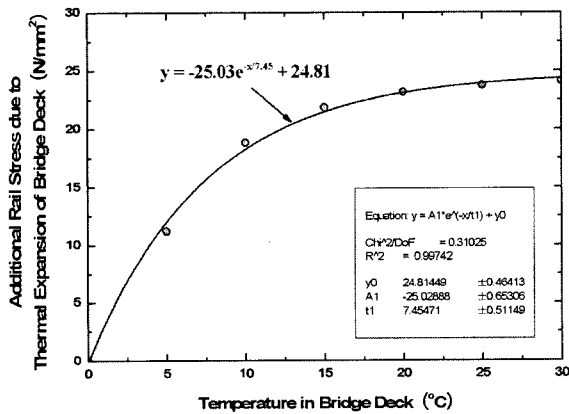


Fig. 1. Additional rail stress due to thermal expansion of bridge deck

3. 고속철도 교량상 장대레일의 온도응력 계측

3.1 계측 실험 개요

실제 주행환경에서의 교량상 장대레일의 온도응력, 특히 하절기 대기온도 증가에 따른 레일 압축응력의 변화를 살펴 보기 위하여, 경부고속철도 노선상의 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 중

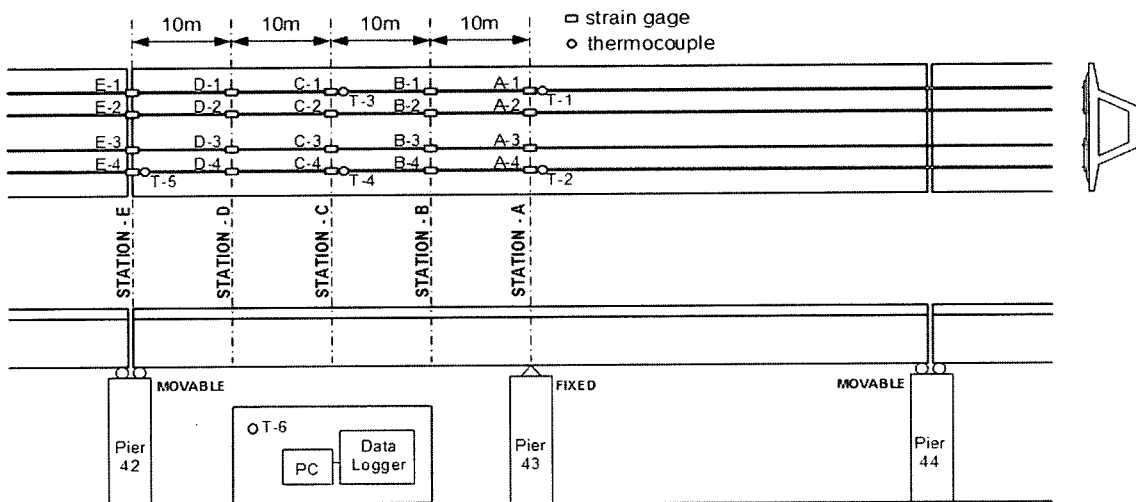


Fig. 2. Measuring points for longitudinal strain and temperature of rails

양의 고정지점을 기준으로 좌우대칭의 온도응력이 발생하게 되므로 Fig. 2에 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.

총 계측기간은 2006년 8월 27일부터 9월 8일 까지이고, 총 13일간 매 1분 간격으로 레일 변형률과 온도 변화량을 수집하였다.

3.2 온도 변화 계측 결과

Table 1은 계측 기간 중 연제교에서 가까운 청주지역의 기상청 기온 기록으로서 최대 기온은 32.3°C였고, 온도 게이지로 계측된 계측지점의 최대 대기온도는 32.8°C였다.

Fig. 3은 계측 기간 중의 대기온도 및 레일온도 계측결과이

Table 1. Daily climate records(Chungju, KMA)

년-월-일	평균기온 (°C)	최고기온 (°C)	최저기온 (°C)	일기
2005-08-27	23.8	28.8	20.5	구름조금
2005-08-28	23.3	28.1	18.6	구름조금
2005-08-29	24.5	29.3	20.0	구름조금
2005-08-30	24	27.6	21.7	흐림
2005-08-31	25.3	31.8	19.5	구름조금
2005-09-01	27.4	32.3	22.6	구름조금
2005-09-02	25.7	30.1	22.8	비
2005-09-03	23.9	26.3	21.3	흐림
2005-09-04	23.2	26.2	20.8	구름많음
2005-09-05	22.4	28.5	17.3	맑음
2005-09-06	22.8	26.5	20.1	흐림
2005-09-07	24.0	28.6	18.8	구름조금
2005-09-08	25.0	30.3	19.9	구름많음

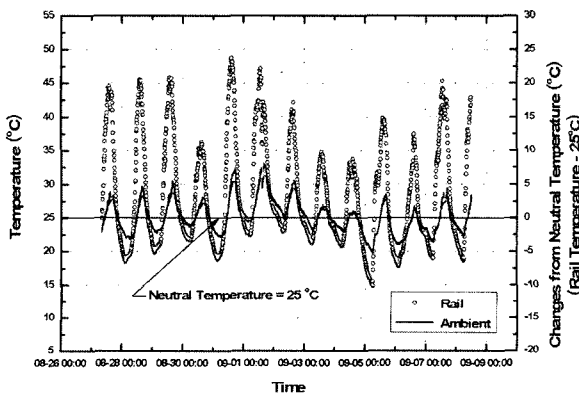


Fig. 3. Variation of ambient and rail temperature

다. 9월 1일에 대기온도가 32.8°C로서 최대 기온을 보였으나, 당일의 대기온도 변화를 살펴보면, 약 14시경에 대기온도가 급감하였는데, 소나기 등의 기상 변화가 있었던 것으로 판단된다. 따라서, 계측기간 중의 최대 레일온도는 8월 31일에 계측된 49.4°C이며, 당일의 최대 대기온도는 31.8°C였다.

계측 기간 중의 일일 최대 기온 및 최대 레일온도 변화는

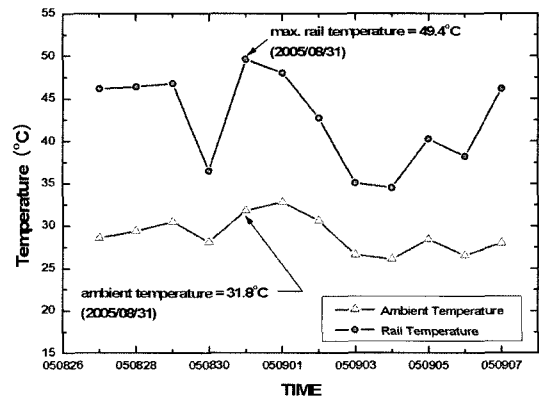


Fig. 4. Variation of maximum ambient and rail temperature

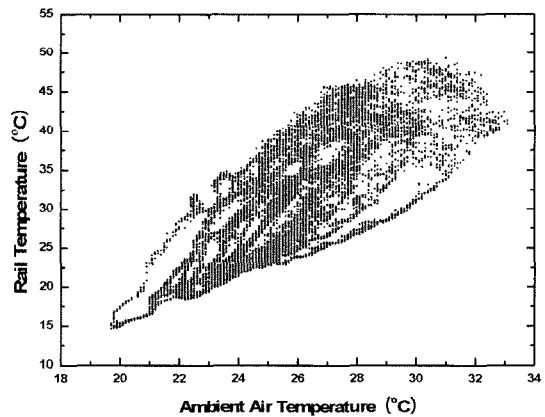


Fig. 5. Distribution of rail temperature corresponding to ambient temperature

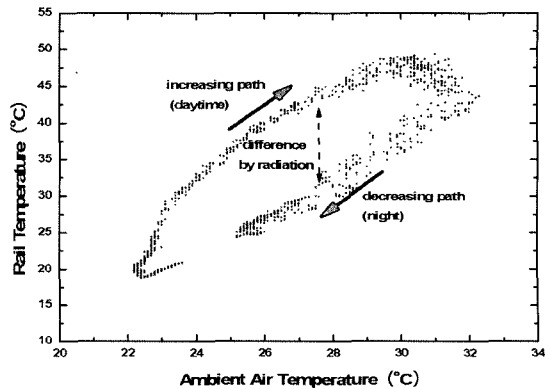


Fig. 6. Variation of rail temperature in a day

Fig. 4와 같고, Fig. 5는 계측 기간 중의 기온대비 레일응력 상관 분포를 보인 것으로서, 이로부터 레일 온도 변화는 기온에 의존하지만 기상 조건 등에 따라서 레일온도가 큰 폭으로 분산됨을 알 수 있다. 단, Fig. 6의 일일 레일응력 변화 경로에서 보인 바와 같이, 주간의 레일온도 증가 경로와 야간의 레일온도 감소 경로가 다른 것으로 나타났고, 동일한 대기온도라 할지라도 주간의 복사열에 의해서 레일온도는 크게 증가하며, 기온과 레일온도의 차이는 최대 약 20°C 인 것으로 나타났다.

3.3 레일응력 변화 계측 결과

Fig. 7은 레일 설정온도 25°C를 기준으로 한 온도 증가량에 대한 레일응력 변화를 보인 것이다. Fig. 7에서 설정온도 25°C에 대한 최대 온도변화량은 +24.4°C로서, 이에 대한 최대 레일 압축응력은 65.1N/mm²이었고, 설정온도 이하로 기온이 감소하는 경우에는 약 20N/mm²의 레일 인장응력이 발

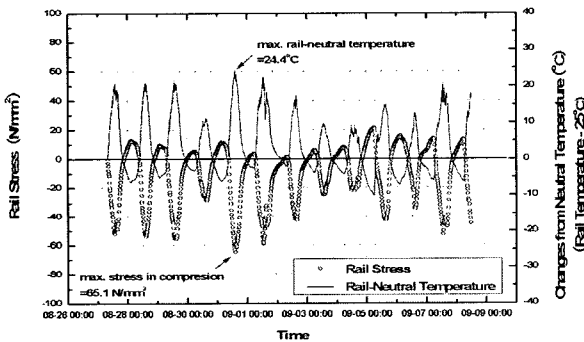


Fig. 7. Variation of rail stress corresponding to rail temperature

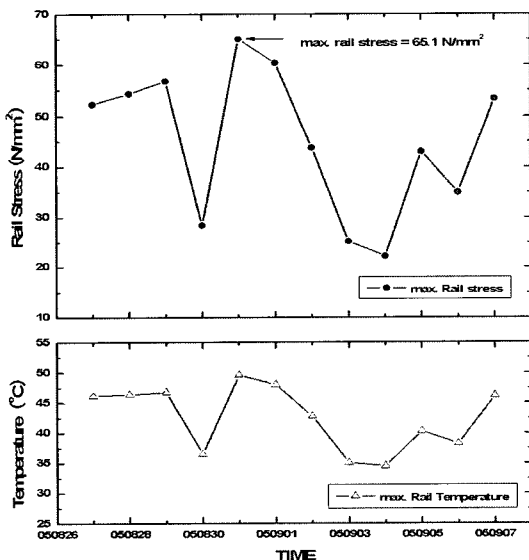


Fig. 8. Variation of maximum rail stress and rail temperature

생하는 것으로 나타났다. Fig. 8은 계측 기간 중에 발생한 최대 레일응력 변화를 보인 것으로서, 레일응력은 레일온도에 따라 변화함을 알 수 있으며, 레일온도가 높을 때 온도 변화에 대한 응력 변화가 큰 것으로 나타났다.

4. 레일 온도-응력 관계 분석

4.1 레일 온도-응력 관계식 도출

레일온도 변화에 대한 레일응력 변화의 상관관계를 살펴 보기 위하여 레일응력 계측자료를 이용하여 회귀분석을 수행하였다. 전체 계측기간에 대한 각 측정점 평균 레일응력의 분포를 이용하여 상관관계를 분석한 결과, 레일온도 변화와 응력 변화는 선형적 상관관계를 보였으며, 측정 위치에 따라 레일온도 1°C당 2.1~2.3N/mm²의 레일응력이 발생하는 것으로 분석되었다. 그러나, 전체 계측기간 중의 모든 계측자료를 이용한 경우에는 측정점 평균 레일응력에 대한 변동폭이 크게 나타남에 따라, 최대 레일응력이 계측된 8월 31일의 일일 응력 변화 계측자료를 이용하여 회귀분석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 일일 응력 분포에 대한 회귀분석 결과에서는 측정별로 레일온도 1°C당 2.1~2.6N/mm²의 레일응력이 발생하는 것으로 나타났으며, 바닥판 단부에서의 레일응력이 가장 큰 것으로 나타났다. 이는 대기온도에 따라 교량 바닥판의 온도 신축에 의해 발생한 부가 레일응력의 영향 때문이며, 교량 바닥판 온도 신축량이 가장 큰 단부 지점부근의 레일응력이 가장 크게 나타난 것이다.

4.2 레일 온도-응력 관계식을 이용한 주행안전성 평가

전 절에서 도출된 관계식에는 각 위치에서의 바닥판 온도 신축에 의한 부가응력이 포함된 상태이므로, 이 식을 이용하면 레일-교량 상호작용이 고려된 종방향 레일 온도응력 분포를 예측할 수 있을 것으로 판단된다. Table 2는 본 연구에서 도출된 레일 온도-응력 관계식을 이용하여 20°C 이상의 레일온도에 대한 레일응력을 계산한 결과로서, Table 2의 각 측정점 응력을 도표로 나타내면 Fig. 10과 같다. Fig. 10으로부터 레일 온도가 증가할수록 종방향 위치별 응력 편차가 증가하고, 단부 지점 위치에서의 레일응력이 상대적으로 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 측정점 A에서 E 위치로 이동할수록 바닥판의 온도 신축량이 크게 발생하였고, 그에 따른 부가 레일응력이 발생하였기 때문이며, 본 연구에서 도출된 레일 온도-응력 관계식에 바닥판의 온도신축에 의한 응력 변화가 포함되어 있음을 간접적으로 증명한 결과라고 할 수 있다.

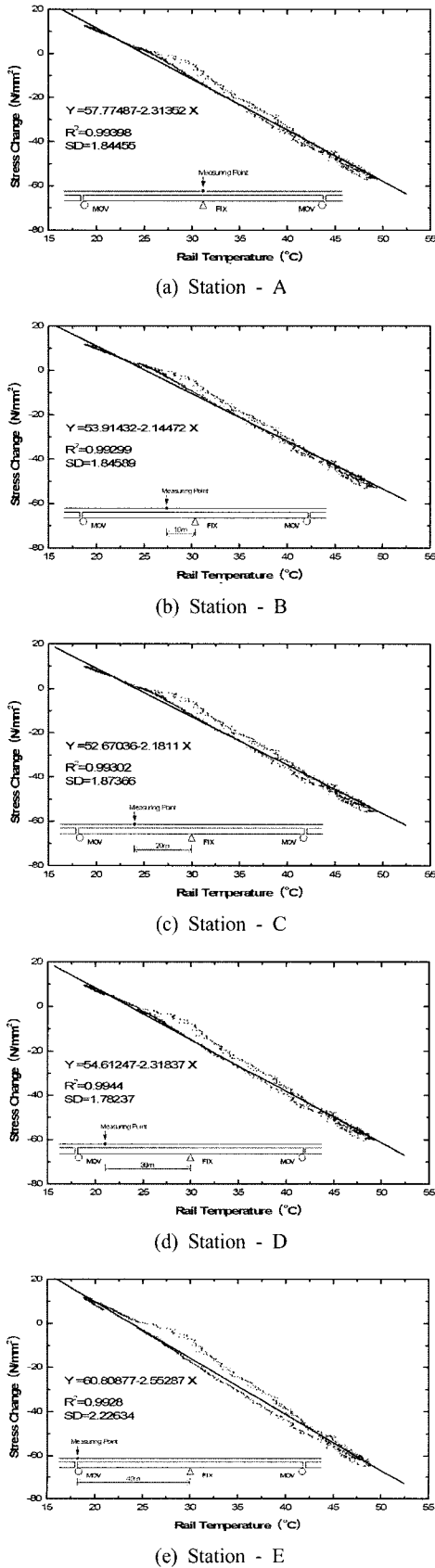


Fig. 9. Correlation between rail temperature and stress

Table 2. Estimation of rail stress due to temperature change

위치	Station A	Station B	Station C	Station D	Station E		
Coeff. C1	57.77487	53.91432	52.67036	54.61247	60.80877		
Coeff. C2	-2.31352	-2.14472	-2.1811	-2.31837	-2.55287		
R ²	0.99398	0.99299	0.99302	0.9944	0.9928		
레일 온도 (T _{rail})	레일응력 Rail Stress = C1 + (C2 × T _{rail})					응력 평균	최대-최소 응력차
20	+11.5	+11.0	+9.0	+8.2	+9.8	+9.9	+3.3
25	-0.1	0.3	-1.9	-3.3	-3.0	-1.6	-3.3
30	-11.6	-10.4	-12.8	-14.9	-15.8	-13.1	-5.4
35	-23.2	-21.2	-23.7	-26.5	-28.5	-24.6	-7.3
40	-34.8	-31.9	-34.6	-38.1	-41.3	-36.1	-9.4
45	-46.3	-42.6	-45.5	-49.7	-54.1	-47.6	-11.5
50	-57.9	-53.3	-56.4	-61.3	-66.8	-59.1	-13.5
55	-69.5	-64.0	-67.3	-72.9	-79.6	-70.7	-15.6
60	-81.0	-74.8	-78.2	-84.5	-92.4	-82.2	-17.6
64	-90.3	-83.3	-86.9	-93.8	-102.6	-91.4	-19.3
65	-92.6	-85.5	-89.1	-96.1	-105.1	-93.7	-19.6

※ (+) and (-) sign mean tensile and compressive stress respectively

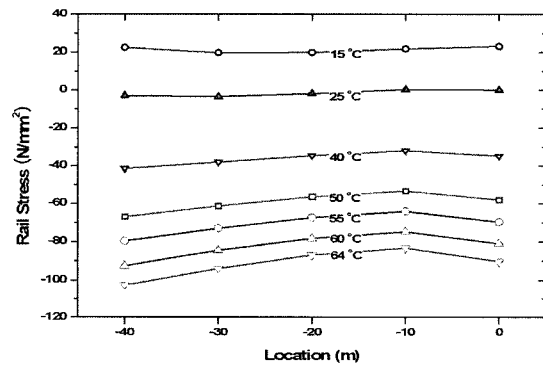


Fig. 10. Longitudinal distribution of rail stress

5. 결론

본 연구에서는 경부고속철도 노선상의 교량구간에 대해서 레일온도 및 응력을 현장 계측하고, 계측자료로부터 온도 변화에 대한 레일 응력 거동을 분석하여 주요 위치별 레일 온도-응력 관계식을 도출하였다. 계측 결과, 레일온도와 응력은 선형적 상관 관계를 보였으며, 교량 바닥판 단부 지점 부근에서의 레일 응력이 가장 크게 나타났다. 이는 교량 바닥판의 온도 신축에 의해 발생하는 부가 레일응력의 영향으로 판단되며, 단부 지점 부근의 레일응력은 다른 위치의

레일응력에 비해 최대 약 20N/mm^2 크게 발생할 수 있는 것으로 분석되었다.

레일 응력 계측 자료를 분석한 결과, 설정온도 25°C 를 기준으로 레일온도가 1°C 증가함에 따라 약 2.6N/mm^2 의 압축응력이 발생하는 것으로 나타났고, 하절기 기상변화에 대한 고속철도 안전관리 대책에서 감속운행 및 운행정지의 기준이 되는 온도인 55°C , 60°C 및 64°C 에 대해서 각각 79.6N/mm^2 , 92.4N/mm^2 및 102.6N/mm^2 의 최대 압축응력이 발생하는 것으로 예측되었다.

본 연구에서 제시한 레일 온도-응력 관계식은 약 $20\sim 50^\circ\text{C}$ 의 레일온도 범위 내에서 계측된 자료로부터 구한 것으로서, 레일 설정온도 25°C 를 기준으로 그 이상의 레일온도 증가에 대한 레일응력을 예측하는 경우에는 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 한국건설기술연구원 (2004), 고속철도 선로구축물 시스템 안정화 기술개발 (2차년도) 연차보고서.
2. 건설교통부 (2005), 고속철도선로정비지침 개정안.
3. Korea high speed railway construction authority (1995), Bridge Design Manual (BRDM) Final Report.