

# 열차하중에 따른 교량 신축부 장대레일 축력 연구

## A study on the axial force on the CWR of the support rotation

박준오\*      김종민\*\*      김우진\*\*\*

Park, Jun O   Kim, Jong Min   Kim, Woo Jin

---

### ABSTRACT

It is widely known that the temperature variation introduces the axial force along a CWR (Continuous Welded Rail) in the railway bridges. Additional axial forces are generated due to many other reasons. These includes the interaction between the bridge girder and the CWR; acceleration or deceleration of the vehicles; support rotation (or deflection) of the girder. Among aforementioned reasons, this study investigates the influence of the support rotation on additional axial forces throughout the numerical study and the field test. Several strains gauges are installed along the CWR and the strains are measured under passing trains. It is expected that the elaborated estimation of the axial force on CWR will be beneficial for future railway maintenance.

---

### 1. 서론

교량상 장대레일의 축력은 주로 레일의 온도신축 구속에 의하여 발생된다. 이 외에도 거더의 온도신축과 장대레일과의 상호작용에 의한 추가축력, 시제동하중에 의한 축력 그리고 열차주행에 따른 교량의 처짐에 의한 거더의 회전 변위에 의하여 거더의 중립축으로부터 직각으로 일정거리를 유지하고 있는 레일에 축방향 거동을 유발시켜 이에 따른 축력 등 여러 가지 요인에 의한 부가축력이 발생하게 된다.

이들 추가 축력 중에서 열차하중에 의하여 발생하는 거더의 회전변위로 인한 추가축력에 대하여 수치해석을 수행하고 관형교 교량상 레일에 변형을 게이지를 설치한 후 주행하는 열차에 의하여 발생하는 장대레일의 축방향 변형률을 측정하였다.

본 연구는 교량상 장대레일에 부가되는 추가축력 요소 중에서 열차가 교량을 통과할 때 발생하는 거더의 회전 변형에 의한 장대레일에 발생하는 추가축력의 영향을 수치해석과 현장실험을 통하여 파악함으로써 보다 정확한 장대레일 축력을 산정하고자하며, 교량상 장대 레일 축력관리를 합리적으로 할 수 있게 하고자 한다.

---

\* 박준오, 정회원, 한국철도시설산업(주) 선로시설연구소

\*\* 김종민, 비회원, (주)동명기술공단 철도부

\*\*\* 김우진, 비회원, 한국철도시설산업(주) 선로시설연구소

## 2. 교량거동과 장대레일의 상호작용에 의한 레일축력

### 2.1 교량상 장대레일 거동

장대레일 궤도는 여러 가지 장점에도 불구하고, 레일이 장대화됨에 따라 온도변화 및 추가적 외력에 의해서 레일에 과도한 상대변위 및 축력으로 인한 좌굴위험성과 파단시 개구량에 의한 탈선위험성이 발생할 우려가 있다. 특히 교량상의 장대레일에서는 교량의 거더와 레일간의 물성 차이로 인해 상대변위가 커지고 교량의 거동에 의해 레일이 부담하는 추가적인 축력이 발생하여 심각한 경우에는 레일좌굴이나 파단을 일으킬 수 있으며, 장대레일 종하중이 거더 및 교각에 작용하게 된다. 이와 같이 교량상에 부설하는 장대레일은 일반구간의 장대레일과 구분하여 “교량상 장대레일”이라 부르며, 여러 연구결과에 따르면 교량구간에서의 레일축력은 도상저항력, 교량의 신축길이, 지점배치방식 및 하부구조 강성 등의 영향을 받는 것으로 알려지고 있다. 교량상 장대레일은 도상의 종류에 따라서 구분할 수 있으며, 유도상 교량보다는 무도상 교량의 장대레일에 대한 유지관리가 더 어렵다고 할 수 있다. 이는 거더가 온도변화에 따라 신축하려는 힘이 유도상교량의 경우 약 300mm 두께정도의 자갈도상하면과 거더 상면의 접촉면을 통하여 침목을 거쳐 레일로 전달되는 것과 달리 무도상 교량은 거더 상면에서 침목을 통하여 레일에 직접 전달되기 때문에 유도상 교량에 비해서 부가되는 축력이 더 크기 때문이다.

교량상 장대레일과 거더 사이에 작용하는 힘의 전달경로는 교량구조, 체결구조 및 도상자갈의 유무 등에 따라 아래와 같은 하중경로를 통하여 상호작용을 하게 된다.

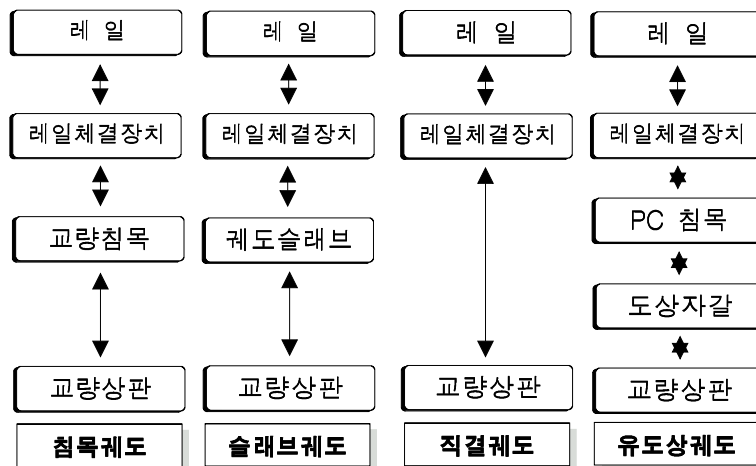


그림 2.1 레일과 교량간 힘의 전달경로

본 연구에서는 상기와 같이 복잡한 거동을 하는 장대레일과 교량의 상호작용 중에서 열차하중에 의하여 추가적으로 발생하는 장대레일의 축력에 대하여 고찰하고자 한다. 실험 대상교량은 경부선 청도강교량(하선)으로 교량 총연장 98.36m로 19.74m 거더 5개로 구성된 교량으로서 25m 이상의 운행선상 무도상교량 상에서 최초(2002)로 레일장대화된 교량이며 최근에 청도강(상선, 140m, 10.24m@2, 19.74m@6)에도 레일장대화가 완성되었다. 교량 제원은 다음 표 2.1과 같다.

표 2.1 청도강교 (하) 제원

선명	역구간	위치 (km)	상·하선
경부선	남성현-청도	361.469	하선
직·곡선	형식/경간	레일	연장 (m)
직	강판형, 18.35×5	60kg	98.36



그림 2.2 청도강교 하선 전경

## 2.2 교량상 상재하중에 의한 장대레일 거동

교량에 설치된 장대레일과 교량에 통과되는 열차하중에 의한 교량의 수직처짐 및 교량 거더의 전단 변위에 의한 거더의 회전 변위와의 상호작용에 의하여 그림 2.3에서 보는 바와 같이 레일에 축방향 변형이 발생되며 이로 인하여 추가적으로 레일 축력이 발생되게 된다. 일반적으로 철도교량의 거더는 비교적 길며 짧은 거더인 경우 거더의 온도신축에 의하여 추가되는 레일 축력이 미소함으로 이를 논외로 한다면 전단변형은 크지 않을 것이다. 따라서 거더의 회전변위는 주로 거더의 수직변위에 의한 회전이 발생될 것으로 판단된다. 이와 같은 거더의 처짐에 의한 회전변위와 이에 따른 중립축으로부터 수직으로 일정거리를 유지하고 있는 레일의 축방향 변형을 발생시키게 되어 레일에 축력을 발생시키게 된다.

그러나 거더의 중앙부에서는 거더의 회전변위가 발생되지 않게 되나 여기서도 열차하중에 의하여 레일에 축력을 발생시키게 된다. 이는 열차에서 진행되는 축중이 다수이며, 일정한 간격으로 주행하게 됨으로 일부의 축중은 레일의 종방향 거동을 방해함으로 그림 2.4와 같이 거더의 단부에서 레일이 인장력을 받을 수 있을 것이다. 실제 거더 중앙부의 거동에서는 거더의 수직 처짐에 의하여 거더의 상부는 압축응력을 받게 되고 레일과 거더 사이의 마찰 저항에 의하여 거더의 압축변형이 레일에 전달(그림 2.4) 될 것이다.

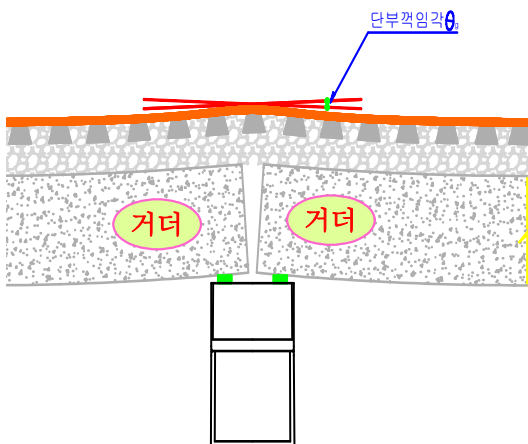


그림 2.3 열차 축중에 의한 단부의 변형

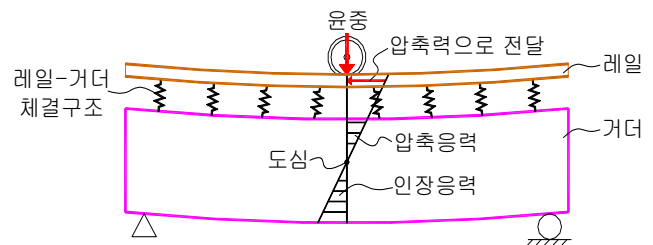


그림 2.4 열차 축중에 거더중앙부 레일의 압축력

## 2.3 교량상 장대레일 축력해석

### 2.3.1 교량상 장대레일 온도축력해석

우리나라 교량상의 주변환경과 기존의 계측결과를 토대로 교량상 레일과 도상구간의 레일 및 거더온도 변화량을 달리하여 해석을 수행하였다. 또한 장대레일의 부동구간을 고려하기 위하여 교량 시중점으로부터 도상구간을 100m씩 설정하였다. 온도 설정은 설정온도 25℃에 변화량은 ±45℃로 하였으며 기타 재료들의 물성치들은 기존의 철도청 및 철도기술연구원 연구결과들을 적용하였다.

전술한 바와 같이 판형교량 궤도구조의 특성을 고려하기 위하여 아래 그림과 같이 20m 단순 판형교를 모델링하여 해석하였다.

본 연구에서는 장대레일의 온도 축력과 거더의 온도신축에 의한 장대레일 추가축력은 기존 연구에서 많은 연구가 있었으므로 여기서는 그들 결과만을 이용하여 거더의 회전변위에 대한 추가 축력에 대한 고찰을 하고자 한다. 다음 그림 2.6~2.7과 표 2.2는 교량받침의 고정-가동(FMFM) 형식과 청도강 교량에 설치된 반 고정형 축력저감 받침과의 비교를 통하여 거더의 회전변위에 의한 추가 축력에 대하여 장대레일의 축력을 해석한 결과이다.

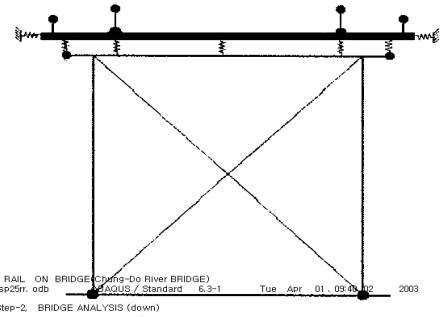


그림 2.5 판형교 단면 모델

표 2.2 계재레일과 레일축력 비교

레일축력		지점형식		축력저감 받침	
		FMFM	FFMM		
계재 레일	유	k=0.4	112.1	109.4	91.8
	무	k=0.4	104.2	95.2	89.1
		k=1.0	111.5	108.1	93.7

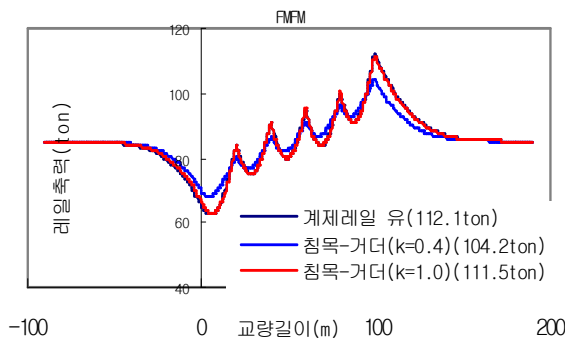


그림 2.6 FMFM 형식의 레일축력

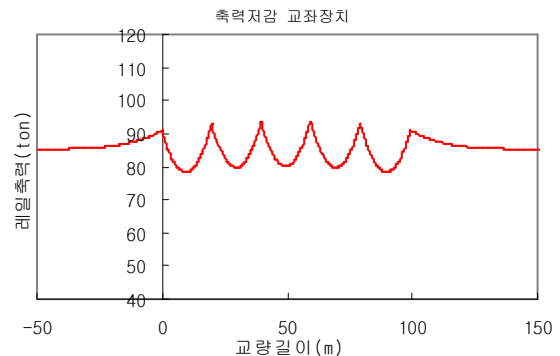


그림 2.7 축력저감 받침형식의 레일축력

### 2.3.2 교량 거더의 회전변위에 의한 장대레일 축력해석

해석모델은 청도강교량을 그림 2.8과 같이 3차원 모델링하여 연행하중을 재하시키면서 시간이력해석(Time history analysis)을 통하여 열차하중에 의한 교량상 장대레일 축력 해석을 수행하였다.

교량 중앙거더 중앙점에 하중을 재하시켰을 때 축력의 분포를 나타낸 것이 그림 2.9~2.10이며 그림 2.9는 FMFM 교량일 때의 축력이며 고정단과 가동단에 의하여 레일축력이 비대칭적으로 나타나고 있으며, 그림 2.10은 축력저감받침을 적용한 경우로서 반고정 방식에 의한 대칭으로 레일 축력이 발생되고 있음을 알 수 있다.

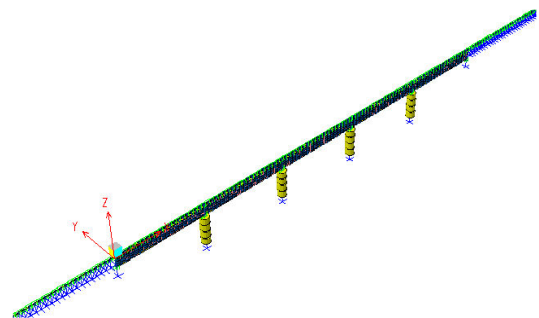


그림 2.8 청도강교량 해석 모델

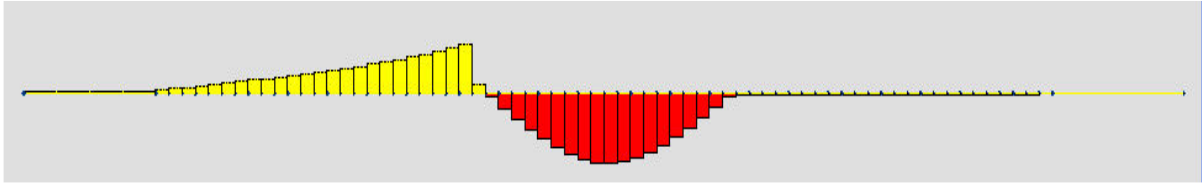


그림 2.9 열차 축중에 의한 레일 축력(FMFM 방식)

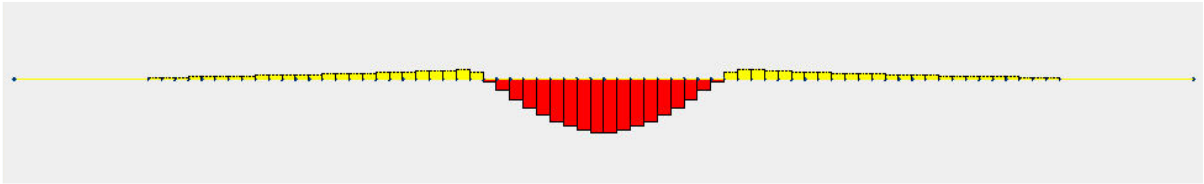


그림 2.10 열차 축중에 의한 레일 축력(축력저감반침 형식)

## 2.4 교량상 열차축중에 의한 장대레일 추가 축력해석

청도강 교량 하선 해석모델인 그림 2.8에서 운행 열차를 KTX, 새마을 및 무궁화 열차를 기준으로 시간이력해석을 수행하여 열차 축중에 의한 교각상부에서의 레일 축력과 교량 중앙부에서의 레일 축력을 고찰하였다.

### 2.4.1 KTX에 의한 추가 축력해석 결과

청도강교량 KTX 주행시 교량의 거동 해석 결과를 표 2.3과 그림 2.11~2.15로 나타내었다. 거더의 수직변위는 7.11mm로 나타났으며 교량상 레일의 변위는 거더 중앙 레일에서 종방향으로  $-0.65\text{mm} \sim 0.82\text{mm}$ , 교각 상부 레일에서 종방향으로  $-0.70\text{mm} \sim 0.63\text{mm}$ 였고, 레일의 축력은 거더 중앙 레일에서  $-6.28\text{ton} \sim 2.68\text{ton}$ , 교각 상부 레일에서  $-2.07\text{ton} \sim 7.02\text{ton}$ 으로 나타났다. 앞에서의 고찰과 같이 거더의 중앙부에서도 6.3ton 정도의 압축력이 증가되게 됨을 알 수 있다. 물론 이러한 축력의 증가는 거더의 처짐, 체결구의 체결력, 교량반침의 구속조건 등에 영향을 받을 것이다.

표 2.3 KTX 주행시 해석결과

		최대치	최소치
변위 (mm)	중앙거더(수직)	0.21	-7.11
	거더중앙레일(수평)	0.82	-0.65
	교각상부레일(수평)	0.70	-0.63
종방향력 (ton)	거더 중앙레일	2.68	-6.28
	교각 상부레일	7.02	-2.07

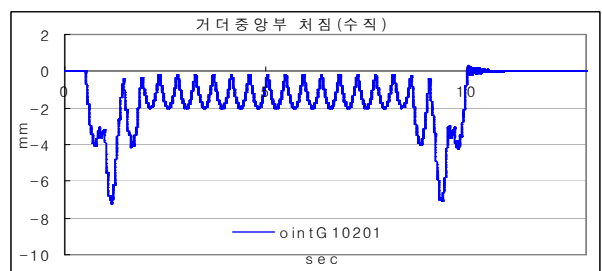


그림 2.11 KTX 주행에 따른 거더 수직처짐

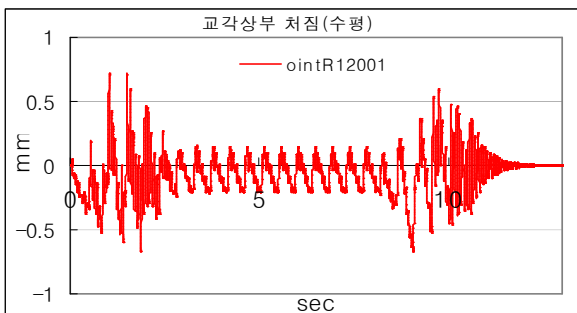


그림 2.12 교각상부레일 수평변위(KTX)

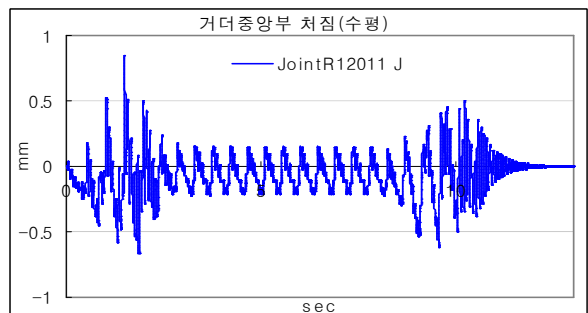


그림 2.13 거더중앙부 수평변위(KTX)

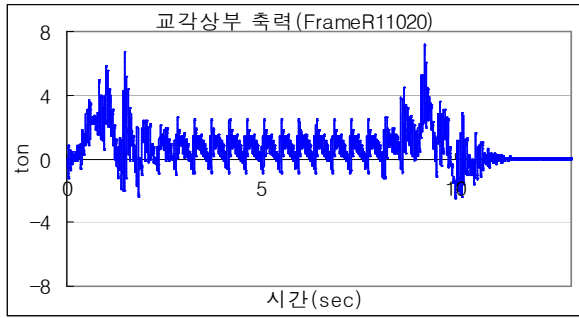


그림 2.14 교각상부레일 축력(KTX)

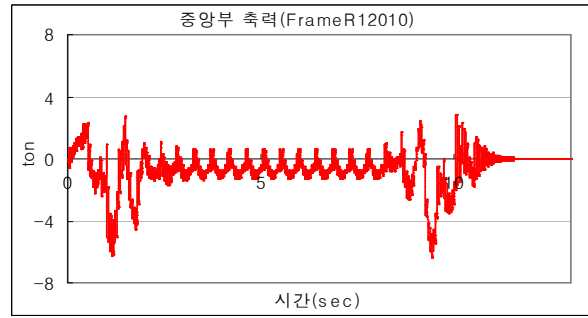


그림 2.15 거더중양부레일 축력(KTX)

### 3. 무도상교량 거더 신축부 축력 계측

#### 3.1 계측 개요

계측대상은 현재 운행중인 여러 선로 중에서 KTX, 새마을호, 무궁화호, 통근열차 및 화물열차 등 모든 종류의 열차가 운행중이고 가장 통행량이 많은 경부선으로 결정하였으며, 이 중에서 무도상 교량이면서 장대레일이 부설된 구간을 선정하였다. 경부선 남성현-청도구간에 위치한 청도강교는 상,하선이 별도의 강판형 교량으로 이루어져 있어서 하선을 대상으로 하여 청도강(하)교에서 계측을 실시하였다. 계측을 실시한 거더는 P3과 P4에 위치한 네 번째 거더를 대상으로 하였으며, 그림 3.1과 같이 거더의 양단부와 중앙에서 좌·우레일의 중립축 양면으로 하여 스트레인게이지를 부착하고 거더 중앙부 하단에는 LVDT를 좌·우측 형상에 연결하여 거더의 처짐도 함께 계측하였다.

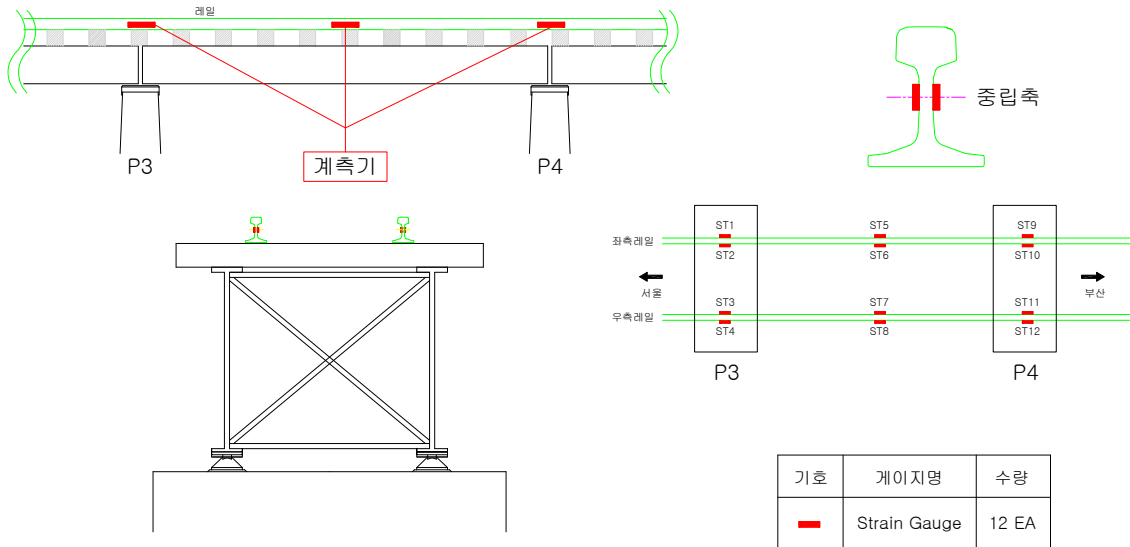
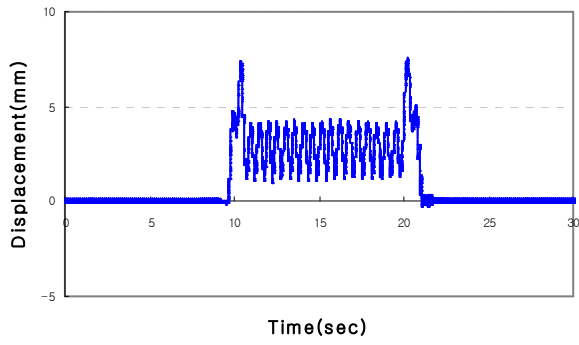


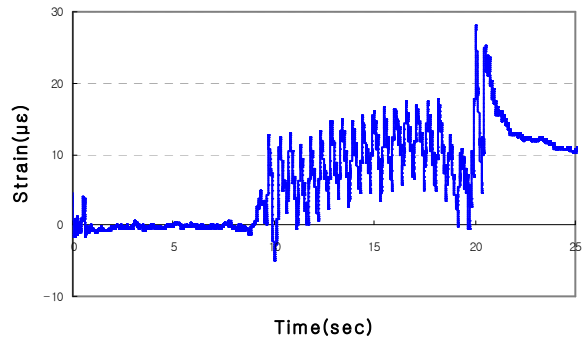
그림 3.1 청도강(하)교 G4의 계측위치

#### 3.2 계측결과

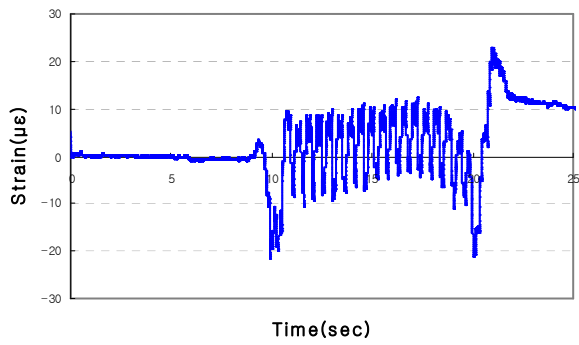
청도강(하)교에서 계측한 데이터 중에서 KTX, 새마을호, 무궁화호 및 화물열차의 주행에 따른 거더의 처짐과 레일의 변형율을 열차종별마다 대표적으로 나타낸 것이 그림 3.2~3.5이다.



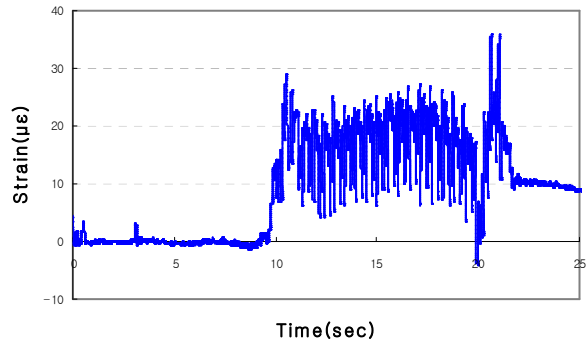
(a) 처짐



(b) 변형율(시점)

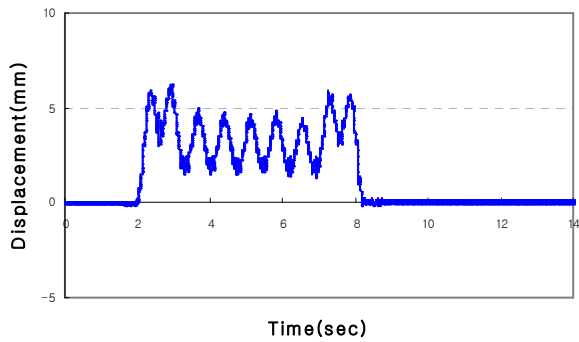


(c) 변형율(중앙)

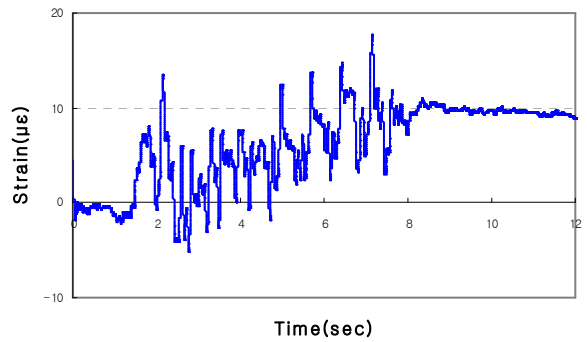


(d) 변형율(종점)

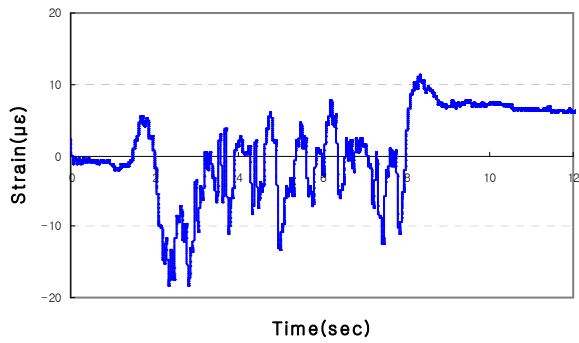
그림 3.2. KTX 통과시 처짐과 변형율



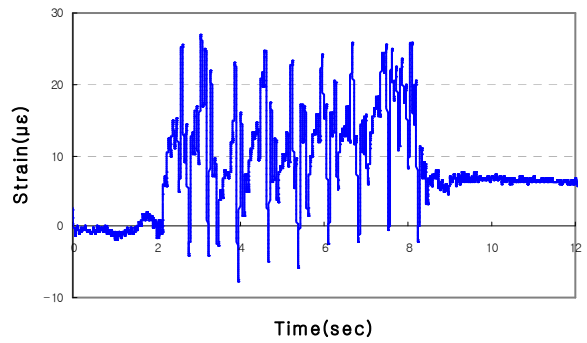
(a) 처짐



(b) 변형율(시점)

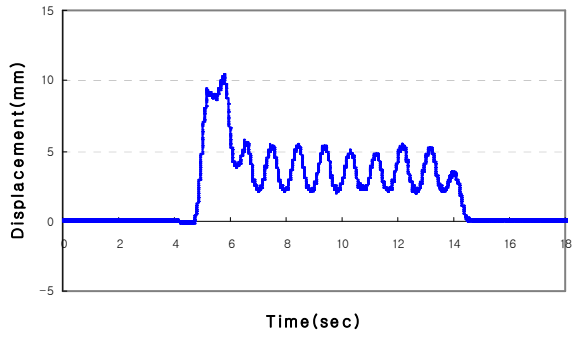


(c) 변형율(중앙)

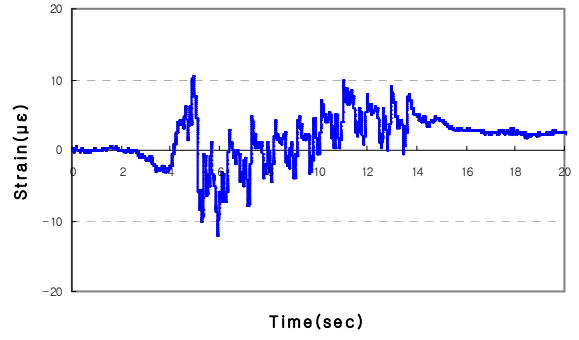


(d) 변형율(종점)

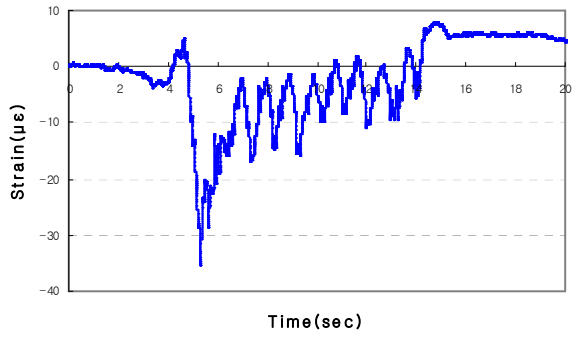
그림 3.3. 새마을호 통과시 처짐과 변형율



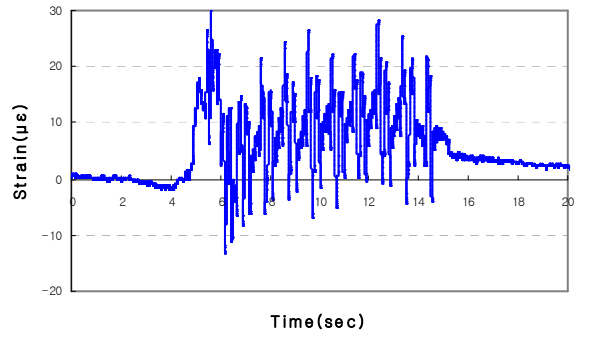
(a) 처짐



(b) 변형율(시점)

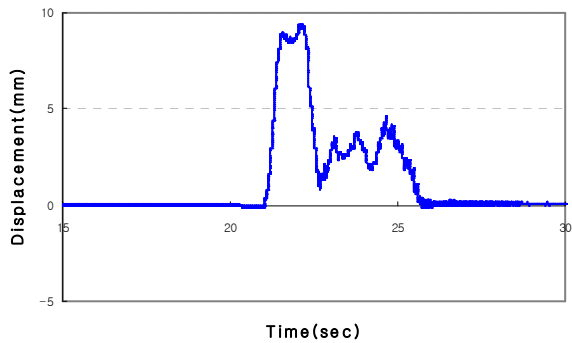


(c) 변형율(중앙)

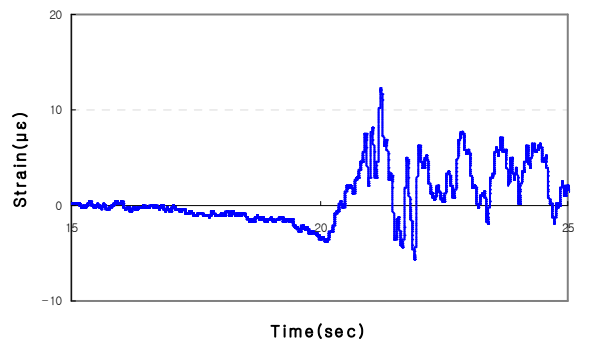


(d) 변형율(중점)

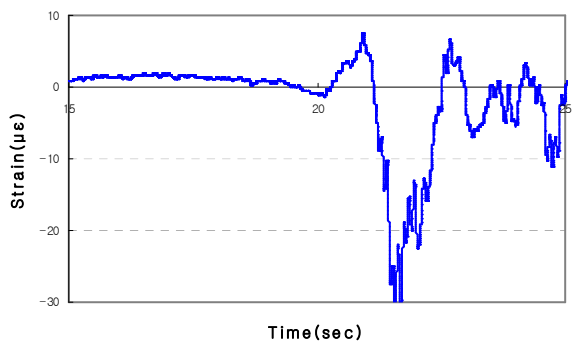
그림 3.4. 무궁화호 통과시 처짐과 변형율



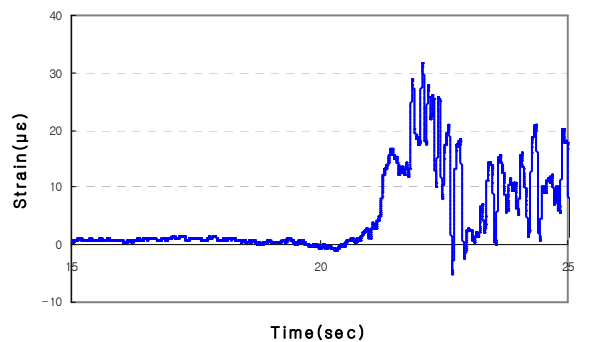
(a) 처짐



(b) 변형율(시점)



(c) 변형율(중앙)



(d) 변형율(중점)

그림 3.5. 화물열차 통과시 처짐과 변형율



이들 결과들로부터 레일종방향 변형율의 최대치와 이들을 다시 축력율로 환산하여 나타낸 것이 아래 표 3.1이다.

표 3.1. 열차별 처짐과 변형율의 최대,최소값

열차종별	처짐(mm)		시점 변형율( $\mu\epsilon$ )		중앙 변형율( $\mu\epsilon$ )		종점 변형율( $\mu\epsilon$ )	
	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN
KTX	8.09	-0.49	33.82	-18.30	31.20	-36.38	47.62	-16.09
새마을호	8.94	-0.31	22.86	-10.11	22.57	-26.10	47.57	-14.62
무궁화호	11.14	-0.21	26.04	-12.57	11.14	-0.21	45.27	-18.22
화물열차	12.35	-0.21	22.53	-20.87	20.56	-37.93	51.11	-21.47

표 3.2 열차통과중의 레일부가축력에 대한 최대,최소값

열차종별	시점 레일축력(tonf)		중앙 레일축력(tonf)		종점 레일축력(tonf)	
	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN
KTX	5.50	-2.98	5.08	-5.92	7.75	-2.62
새마을호	3.72	-1.65	3.67	-4.25	7.74	-2.38
무궁화호	4.24	-2.05	1.81	-0.03	7.37	-2.97
화물열차	3.67	-3.40	3.35	-6.17	8.32	-3.49

#### 4. 결과 분석

교량상 장대레일의 축력 중 열차주행에 따른 교량의 처짐에 의한 거더의 회전 변위에 의하여 발생하는 레일의 축방향 축력을 고찰하기 위하여 해석적인 방법과 실제 교량에 대한 일련의 현장측정실험을 수행하였다. 이들을 간단히 요약하여 표 4.1에 나타내었다.

표 4.1에서 나타나는 바와 같이 처짐에서는 수치해석이 다소 크게 나타나고 있으며, 레일 최대 축력은 대부분 유사하게 나타나고 있다. 그러나 거더 중앙부에서 최대 인장력에서 실측치가 수치해석보다 아주 크게 나타나고 있다. 이는 현장실험과 수치해석에서 실제적인 측정오차, 재료의 물성 차이, 열차하중에 의한 충격과 모델 오차 등에 의하여 어느 정도의 오차가 발생 될 것이다.

표 4.1 KTX 주행시 해석결과

		최대치		최소치		
		수치해석	현장실측	수치해석	현장실측	
중방향력 (ton)	변위 (mm)	중양거더	0.21	2.98	-7.11	-5.50
	거더중양	교각상부	2.68	5.08	-6.28	-5.92
		교각상부	7.02	7.75	-2.07	-2.62

본 연구에서는 거더의 회전에 의한 장대레일 부가축력을 기존의 해석과 다르게 실제 모델과 유사하게 모델링하여 수치해석하였으며, 또한 열차 주행에 따른 거더의 처짐에 의한 단부 및 거더 중앙부의 축력을 측정하여 비교 검토하여 해석적 방법으로 추가축력을 산정하여도 현실과 유사한 결과를 얻었다는 데 의미가 있을 것으로 사료된다.

교량상 장대레일의 온도축력에 거더의 회전에 의한 장대레일 부가축력을 추가하여 축력도를 도시하는 데에는 여러 가지 방법이 있을 수 있을 것이나 열차주행에 따른 축력 특성들이 다르기 때문에 사실상 정확히 나타내는 데에는 한계가 있다. 따라서 여기서는 최대치와 최소치를 온도 상승 및 하강에 레일 축력의 절대치가 가장 크게 나타나게 하는 방법을 취하였다. 한개의 거더에서 거더 시점부, 중앙부, 종

점부 축력으로부터 2차식으로 곡선을 가정하고 이를 교량상 장대레일 온도 축력에 추가하는 방법을 선택하였으며 이를 나타낸 것이 그림 4.1~4.2이다.

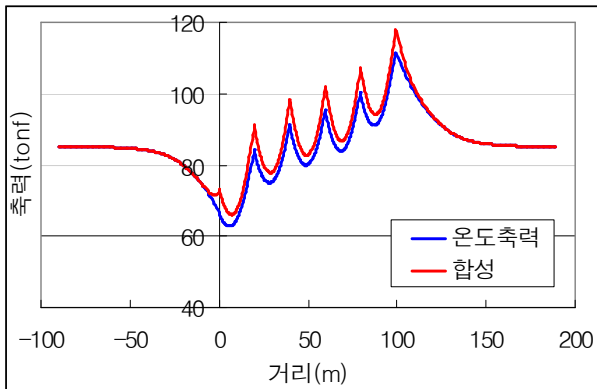


그림 4.1 거더 회전변위를 고려한 축력(FMFM)

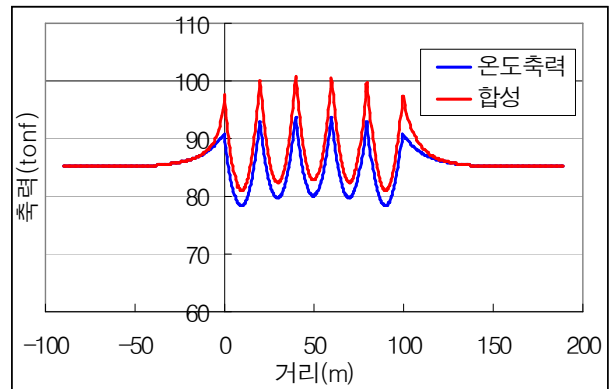


그림 4.2 거더 회전변위를 고려한 축력(축력저감)

하절기 온도상승에 따른 압축력의 증가는 압축력이 상대적으로 큰 지점부에서 거더회전에 의한 인장응력이 발생됨으로 결과적으로 최대 절대 레일합성축력이 감소되게 됨으로 여기서는 논외로 하였다.

동절기 온도하강에 따른 레일 인장력 증가는 인장력이 상대적으로 큰 지점부에서 거더회전에 의한 인장응력이 추가로 발생됨으로 그림에서와 같이 인장력이 증가되게 된다. 따라서 이 경우에는 레일의 피로에 의한 절손 위험이 증가되게 될 것이다. 이러한 거더의 신축부 상부에서는 레일 용접부를 회피하는 것이 바람직할 것이며 특히 테르밋트 용접을 피하여야 할 것이다.

## 5. 결론

본 연구는 교량상 장대레일에 부가되는 추가축력 요소 중에서 열차가 교량을 통과할 때 발생하는 거더의 회전 변형에 의한 장대레일에 발생하는 추가 축력의 영향을 수치해석과 현장실험을 통하여 고찰하였다.

수치해석을 통하여 열차 주행에 따른 교량상 레일의 거동을 실제와 유사하게 모델링하여 해석하였고 또한 무도상 교량 및 판형교량상 레일장대화가 된 동일 형식의 교량에서 열차주행에 따른 장대레일의 축력을 측정하여 비교 검토하여 유사한 결과를 얻었다.

동절기 거더 신축부에서 온도하강에 따른 레일 인장력과 이곳에서의 거더회전에 의한 인장력의 추가 발생은 레일의 피로에 취약할 수 있을 것임으로 이러한 거더의 신축부 상부에서는 테르밋트 용접을 피하여야 할 것이다.

## 참고문헌

1. 철도청, '경부고속철도 기준선 활용에 따른 판형교 장대부설 및 장대레일 관리방안연구', 2000.12
2. 민경주의, '무도상교량특성을 고려한 장대화방안 연구', 철도학회학술발표회, 2005.5
3. 민경주의, '무도상 연속 강철교량의 레일장대화에 관한 연구', 철도학회학술발표회, 2006.5.
4. 佐藤吉彦, '新軌道力學', 1997