

경부고속철도 2단계구간 궤도~구조물 상호작용 해석 및 적용

Track~Structure Interaction analysis and application on Kyoung-bu 2nd stage HSR project

이주헌* 이상진** 김재학*** 박대근**** 한광희*****
Lee,Joo-Heon Lee,Sang-Jin Kim,Jae-Hak Park,Dae-Geun Han,Kwang-Hee

ABSTRACT

The construction of CWR is commonly known method and provides a lot of advantages. However, great caution should be paid to the maintenance of the CWR which is much influenced by the roadbed condition, the change of weather and temperature in order to secure safe train operation. For the construction of the CWR on the bridge, the safety of the CWR should be secured by evaluating the safety and by applying appropriate measures and track materials to the CWR after reviewing the interaction between bridge and track. As the Kyoung-bu 2nd stage HSR project cited in this article would be constructed with slab track, the safety of the CWR on the bridge was evaluated on the basis of UIC code which is internationally used, and DS 804 which is German standard for slab track. In this article, the analysis of the interaction between track and bridge commonly used in Korea was compared with the analysis recommended by UIC 774-3R in order to review the applicability of more reasonable value in the design of structures.

1. 서론

국내외적으로 급변하는 철도교통 환경개선 추세에 따라 주요 기존 간선 철도의 복선화 및 개량을 통하여 기존선의 속도향상과 수송력 증강을 도모하고 있다.

이러한 선구의 속도향상은 보다 높은 궤도강도와 열차운행 중 승객의 쾌적한 승차감 확보, 소음·진동 및 궤도파괴의 최소화 등 선로의 성능향상을 요구받게 되는데, 이를 위한 효과적이고도 필수적인 대안 중 하나는 전 선구에 레일장대화(장대레일부설)를 실현하는 길이라 할 수 있다.

철도 선로시설에서 장대레일의 부설은 일반적으로 알려진 이론상으로 가능하며 많은 장점을 제공하지만, 노반조건, 기후 및 온도변화 등의 영향을 많이 받게 됨에 따라 열차 운행 중 안전확보를 위해서는 유지 보수 관리에 세심한 주의를 필요로 하게 된다.

특히 교량 상에 장대레일을 부설함에 있어서는 교량과 궤도의 상호작용에 관하여 검토하여 레일장대화시 안전성 판단과 적절한 대책 및 궤도재료 적용에 그 목적이 있다.

본 논문에서 인용한 경부고속철도 2단계구간 선로의 경우 콘크리트궤도 적용에 따라 보다 상세한 해석 및 검토로 교량상 레일장대화에 따른 안전성을 검토시 국제적으로 통용하고 있는 UIC code 및 콘크리트도상 궤도기준을 갖고 있는 독일의 DS 804를 적용하였다.

현재 국내에서 통상적으로 시행되어 지는 궤도~교량간 상호작용해석과 UIC774-3R에서 제안하는 상세 해석방법을 비교하여 구조물 설계시 보다 합리적인 값의 적용가능성을 검토하였다.

* (주)한국철도기술공사 과장, 정회원

** (주)한국철도기술공사 전무, 정회원

*** (주)한국철도기술공사 상무, 정회원

**** (주)한국철도시설공단 부장, 정회원

***** (주)에프이에이코리아 상무, 정회원

2. 검토방법 및 적용

UIC774-3R에 따르면 궤도~교량간의 상호작용 해석을 위해 컴퓨터를 이용한 해석 형태로는 다음과 같이 적용할 수 있다고 제시하고 있으며 컴퓨터 프로그램의 능력에 따라, 두 방법중 택일하여 선택하여 해석을 수행할 수 있으나, UIC code에서도 언급한 바와 같이 두 해석 간에는 오차가 크게 발생할 수 있으므로 (해석방법 1, 2)의 적용 시에 주의가 필요하다.

1. 온도 변화, 시/제동 하중, 열차 수직하중에 대하여 분리된 간단한 해석 (해석방법 1)
2. 온도 변화, 시/제동 하중, 열차 수직하중에 대하여 동시에 해석하는 완전한 해석 (해석방법 2)

국내에서 통상적으로 시행되어 지는 궤도~교량간 상호작용 해석은 해석방법 1로 적용하며 복선 선로의 경우도 1개 선로에 대해 상판 온도변화 하중, 열차 시/제동하중, 열차 상재하중에 대해 각각 해석을 수행하고 각 하중조건 영향을 조합하여 장대레일의 허용 부가응력과 비교하고 있다.

$$\sum R = \alpha R(\Delta T) + \beta R(braking) + \gamma R(bending)$$

α, β, γ 는 단경간 교량 또는 연속지지 교량의 경우 1.0 적용

본 논문에서는 복선선로에 대해 해석방법 2의 상판의 온도변화, 열차 시/제동하중 및 수직하중에 대하여 동시에 해석하는 완전한 해석을 수행하고 해석방법 1과 비교하였다.

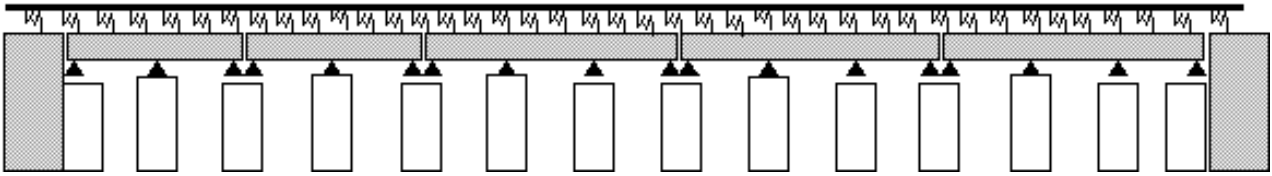
궤도~교량간 상호작용 해석 결과는 <표-?>과 같이 UIC774-3R을 기본으로 하고 레일응력의 경우 독일 DS804에 제시된 콘크리트도상 궤도의 레일응력 기준을 적용하였다.

기준항목	설계기준	비고
레일응력	압축 : -92N/mm^2 (-72N/mm^2 : 자갈도상) 인장 : $+92\text{N/mm}^2$ * 온도하중, 시,제동하중, 및 수직하중 작용시 구조물의 영향에 따라 부가적으로 발생하는 종방향 부가응력	콘크리트도상 및 자갈도상 궤도 좌굴, 파단에 대한 안전기준
교량과 궤도의 상대변위	변위 : 4mm (시,제동하중 작용시)	유도상궤도의 유지관리를 위한 안전기준
상판 절대변위	상판 수평절대변위 : $\pm 5\text{mm}$ (레일신축이음매 없는 경우) 상판 수평절대변위 : $\pm 30\text{mm}$ (레일신축이음매 있는 경우)	유도상궤도의 유지관리를 위한 안전기준
상판과 상판, 상판과 교대사이 변위	상판/상판, 상판/교대간 변위 : 8mm <수직하중 작용시>	유도상궤도의 유지관리를 위한 안전기준

<표-1> DS804 및 UIC774-3R 검토 기준

3. 해석 기본 제원

본 논문에서 적용한 구조물은 경부고속철도 2단계 구간의 화실고가를 기초로 검토하였다. 화실고가의 경우 경부고속철도 2단계 구간에 대표적인 형태의 복선선로(이하 Track1, Track2)를 위한 교량이며 교각의 높이 또한 기타 교량보다 높아 안전성 검토에 이상적인 모델이다.<그림-?>과 같이 경간의 구성은 2@25m, 2@25m, 3@25m, 3@25m, 3@25m이며 총길이 325m이다.



<그림-1> 화실고가 전반도

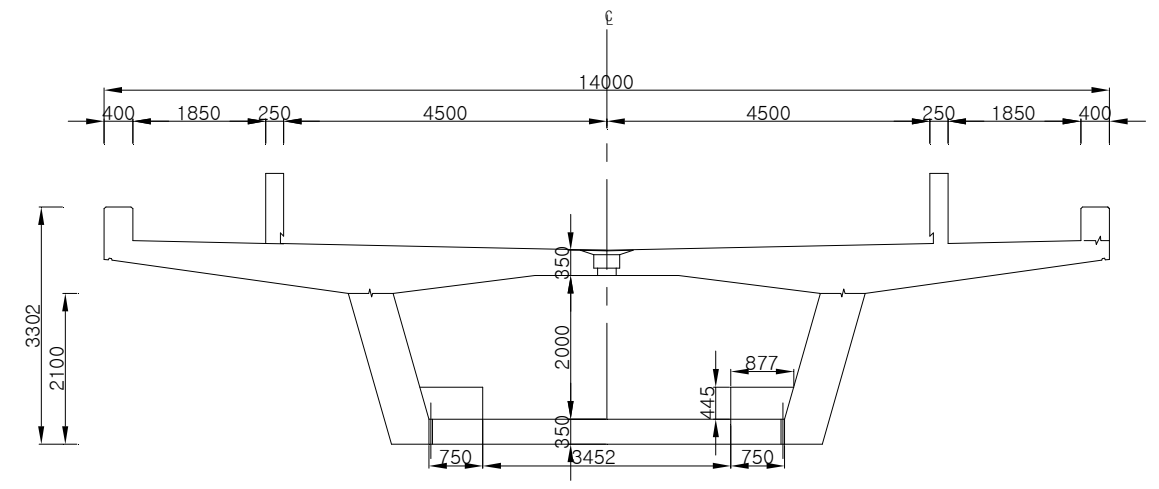
3.1 교량 상부구조 특성

교량~구조물 상호작용 해석시 교량 상부구조는 아래와 같이 3가지 형태로 이상화 할 수 있다.

1. 단순보 다경간 교량 (multiple single span bridges)
2. 연속보 교량 (continuous span bridges)
3. 강결된 연속보 교량 (continuous girder built as rigid frame bridges)

이때 교량 상부구조는 열차수직하중, 시제동하중에 대해 고려할 수 있도록 보(Beam)요소로 체결구 및 교각은 재료의 bi-linear특성을 고려할 수 있는 스프링(Spring) 요소로 적용하였으며, 본 과업구간은 PC-box 3@25m의 기하학적 형상 및 제원은 다음 <표-?>와 같다.

상부형식	경간 길이	등가탄성계수 (E : N/mm ²)	단면적 (A : m ²)	단면2차모멘트		중립축 위치 (상부부터) (d : m)	주형 높이 (H : m)
	(m)			(I _{yy} : m ⁴)	(I _{zz} : m ⁴)		
PC BOX 거더	25	28571.0326	11.90	12.117	156.780	0.79	2.7



<표-2> 2@40m PC Box 기하학적 형상 및 제원

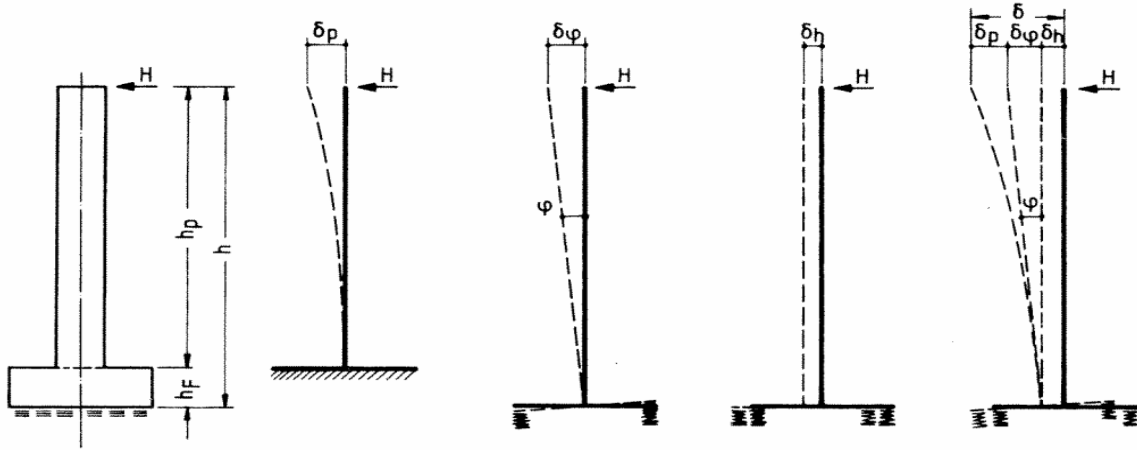
3.2 교량 하부구조 특성

교량상부구조는 아래와 같은 교량받침의 형태로 지지되어질 수 있다.

1. 강결 (rigid)
2. 고정단 (fixed)
3. 이동단 (movable)
4. 특정 스프링계수를 갖는 교량받침 (spring stiffness)

상기와 같이 교량받침의 특성만 고려할 경우 온도하중 및 열차 수직하중에 대해서는 적절한 해석모델 일 수 있으나 열차 시제동하중 작용에 대해서는 적절한 값을 얻을 수 없다. 특히 고속철도와 같은 열차 시, 제동하중이 주요한 하중조건일 때는 교량 하부구조를 해석모델에 반영이 필요하다.

UIC code에서 제안하는 K값 산정시 각각의 계수는 <그림-?>와 같다. 이에 본 해석 및 검토에서는 UIC code에서 제안하는 방법을 적용하였으며 교량받침의 형식, 지반조건의 특성 및 각각의 교각에 대해 형상 및 높이 등의 제원을 반영하였다. 이때 K값 산정시 토목노반 설계시 기준값인 지반변형계수 (E₀)=12 및 N치=50으로 적용하였다. 이는 본 과업구간의 대부분의 교각저판은 암반상에 위치되어 있어 보다 안전측의 결과값이 도출되도록 반영하였다.



<그림-2> K값 계산시 계수산정

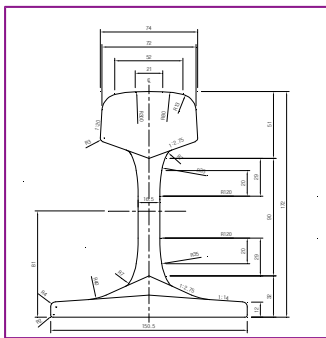
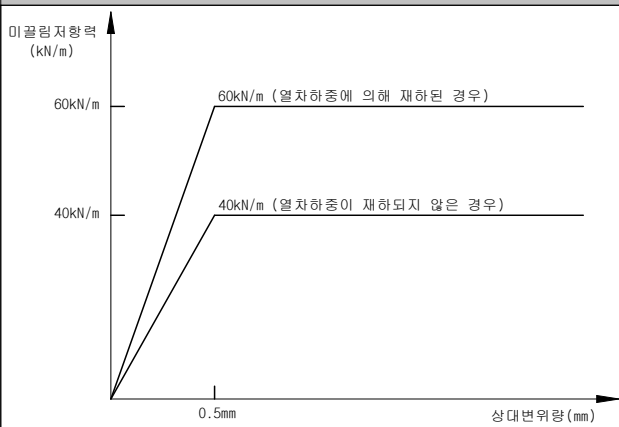
$$K = \frac{H[MN]}{\sum \delta_i [m]}$$

여기서

$$\sum \delta_i = \delta_p + \delta_\psi + \delta_h, \quad \delta_p = \frac{1}{3} \times \frac{h_p^3}{EI}, \quad \delta_h = \frac{1}{K_h}, \quad \delta_\psi = \frac{(h_p + h_f/2)^2}{K_\psi}$$

3.3 레일 및 체결구 종방향저항력

본 경부고속철도 2단계구간에 적용하는 레일은 1단계구간과 동일한 UIC60레일을 적용하였으며 체결구는 각국 고속철도에 적용가능하며 국내에서 널리 쓰이는 Pandrol SFC를 적용하였다. 그러나 Pandrol SFC 및 Vosshloh system300등 각종 체결구 종방향저항력은 실제 시험값이 UIC774-3R의 종방향저항력 값보다 작게 발생한다. 따라서 설계단계에서는 실제 측정값보다 안전측으로 반영할 수 있는 UIC774-3R에서 제시하는 값을 적용하였다.

UIC60 레일	체결구 종방향저항력 (UIC774-3R)
	
$A \text{ (mm}^2\text{)} = 15338.9$ $I_{yy} \text{ (m}^4\text{)} = 6.07E-05$ $I_{zz} \text{ (m}^4\text{)} = 1.02E-05$ $J \text{ (m}^3\text{)} = 4.34E-06$ $A_{sy} \text{ (m}^2\text{)} = 6.47E-03$ $A_{sz} \text{ (m}^2\text{)} = 0.01274$	

3.4 하중

레도~교량간의 상호작용 해석시 발생가능한 하중의 종류는 다음과 같다.

1. 장대레일의 경우에 상판의 온도신축 또는 레일 신축 장치가 있을 때 레일과 상판의 온도 신축
2. 수평방향의 제동과 시동 하중
3. 수직방향 열차하중 하에 발생하는 상판의 휨의 결과로서 그것의 지점부에서 상판의 회전
4. 크리프와 건조수축에 기인하는 콘크리트 구조물의 처짐
5. 온도구배의 영향하에서 지점부의 종방향 변위

6. 수직방향 온도 구배에 기인하는 구조물의 처짐

일반적인 교량의 경우 상기 하중에서 1~3의 경우 교량의 설계에 지배적인 하중이며 3~6에 의해 발생하는 레일응력은 미미하므로 반영하지 않는다.

가. 온도하중

교량상판의 온도변화에 따라 발생하는 신축량은 체결구(도상)를 통해 레일로 전달된다.

온도하중(구조물)	콘크리트교(PSC)	±20℃
	강교, 합성교	±35℃
온도하중(궤도)	적용 안함 (UIC774-R Section 1.4.2)	

나. 시/제동하중

열차의 시동 및 제동하중에 의해 레일의 신축 및 교각에 변위를 발생시키며 그 크기 및 재하길이는 다음과 같다. 이때 UIC 774-3에서 제시하는 최대 시동 및 제동하중을 적용하였다.

수직하중	UIC71 (80kN/m) 적용길이 : 300m
제동하중	20kN/m 적용길이 : 300m
시동하중	33.3kN/m 적용길이 : 30m

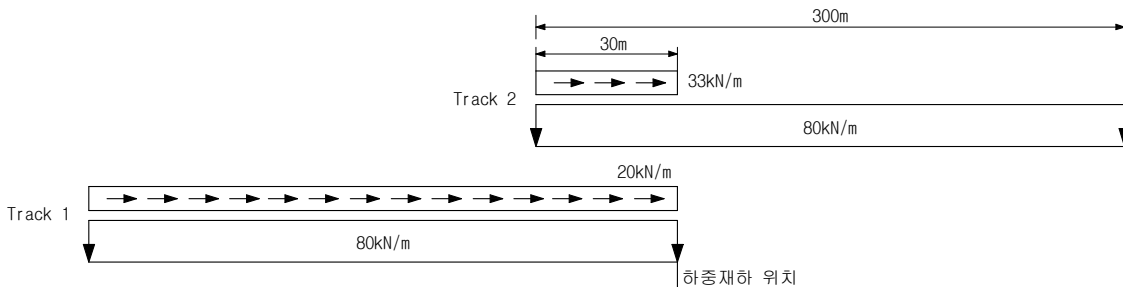
열차하중 재하방법은 Track1 및 Track2에 열차의 시제동 및 수직하중을 각각의 레일응력이 최대로 발생하도록 교량 이동받침에 열차가 좌, 우측방향으로 반복재하 하여 해석을 수행하였으며 최대값을 구하였다. 본 논문의 화실고가의 경우 A2(교량 우측단부)에 제동하중 시점이 위치하는 경우 최대값이 발생하였다.

다. 수직하중

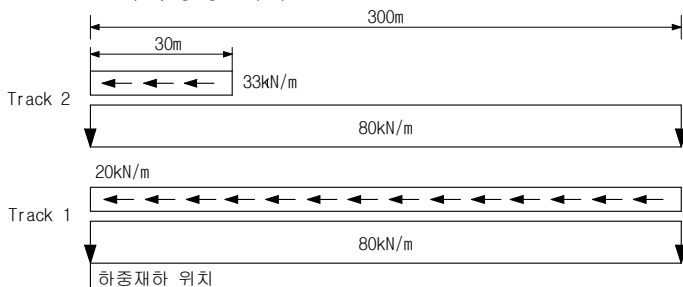
수직방향 열차 상재하중에 의해 교량상판에 휨이 발생하며 이 휨은 교량상판 단부에 회전 및 변위를 발생하게 된다

이때 상기 시/제동하중과 수직하중은 별개로 작용할 수 없다. 즉 <그림-3>과 같이 시동하중 재하하는 열차전장에 수직하중이 작용할 때 시점 쪽 30m에 대해 시동하중을 적용하며, 제동하중 재하하는 열차전장에 수직하중 및 제동하중이 작용하는 것으로 적용하여야 한다.

Case 1 (우측방향 재하)



Case 2 (좌측방향 재하)



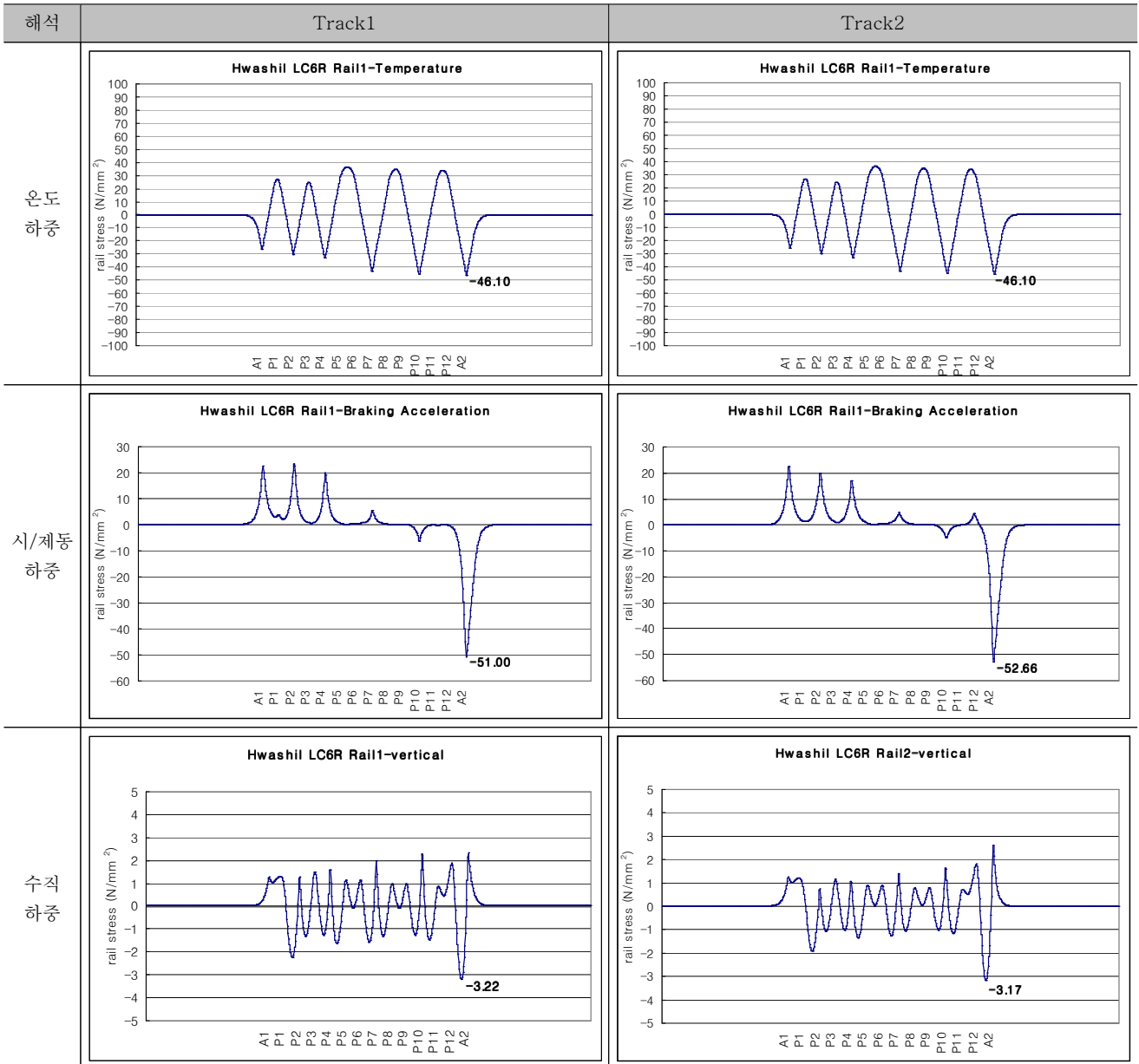
<그림-3> 시동, 제동하중 및 수직하중

4. 하중조합 및 해석

2항의 검토방법 및 적용에서 기 언급한 바와 같이 2가지 방법에 대해 해석을 수행하였다. 아래 하중에 대해 각각 해석을 수행하였다.

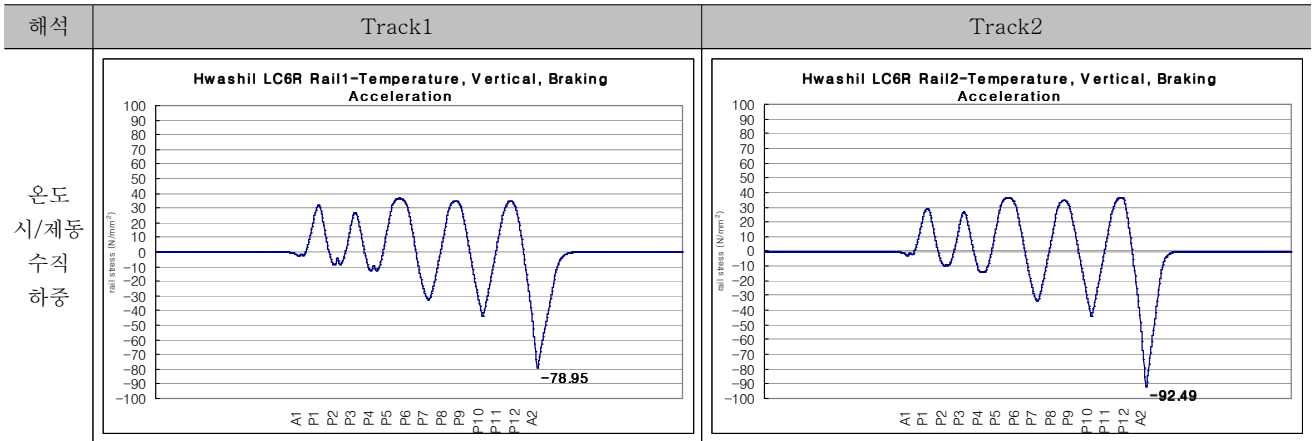
가. 온도 변화, 시/제동 하중, 열차 수직하중에 대하여 분리된 간단한 해석 (해석방법 1)

1. 온도하중 해석 : Unloaded상태 체결구종저항력 상태에서 Track1, Track2에 온도하중 적용
2. 시/제동하중 해석 : Loaded상태 체결구종저항력 상태에서 Track1에 제동하중, Track2에 제동하중 적용
3. 수직하중 해석 : Loaded상태 체결구종저항력 상태에서 Track1에 제동하중, Track2에 제동하중 적용



나. 온도 변화, 시/제동 하중, 열차 수직하중에 대하여 동시에 해석하는 완전한 해석 (해석방법 2)

Unloaded상태 체결구종저항력 상태에서 Track1, Track2에 온도하중 적용하여 1차 해석을 수행한 결과 (변위, 응력등)를 경계조건(boundary condition)을 유지한 상태에서, Loaded상태 체결구종저항력 상태로 재료 특성을 변경하고 Track1에 제동하중 및 수직하중, Track2에 제동하중 및 수직하중을 적용하여 2차 해석을 수행하였다.



다. 해석결과 요약

상기해석 결과를 요약하면 다음과 같다.

	Track1		Track2	
	해석방법1	해석방법2	해석방법1	해석방법2
온도하중	-46.10 Mpa	-78.95 Mpa	-46.10 Mpa	-92.49Mpa
시/제동하중	-51.00 Mpa		-52.66 Mpa	
수직하중	-3.22 Mpa		-3.17 Mpa	
합계	-100.32 Mpa		-101.93 Mpa	
비율	기준값대비 127%	기준값	기준값대비 110%	기준값

5. 결 론

교량상 레도가 복선 이상의 경우, 시동하중 및 제동하중은 각각의 선로에 작용시키며 이때 최대 레일 응력이 발생하도록 재하 하는데 일정한 간격으로 시동 및 제동하중을 이동시켜 최대값이 발생하는 하중 케이스를 적용하는 것이 필요하다.

이때 각각의 하중케이스에서 구한 최대값의 선형 조합(superposition) 결과는 온도하중에 대해 1차 해석을 수행한 결과(변위, 응력등)를 경계조건(boundary condition)을 유지한 상태에서 Loaded상태 체결구 종저항력 상태로 재료 특성을 변경하고 Track1에 제동하중 및 수직하중, Track2에 제동하중 및 수직하중을 적용하여 2차 해석을 수행하는 해석 방법보다 최대 27%가 더 크게 계산되었다. 이는 실제 거동보다 크게 결과가 도출되어 보다 안전측의 구조물 조건이 되겠으나 경제성 측면에서는 불리하다 할 수 있다.

따라서 최적화된 교량 구조물을 위해서는 온도 변화, 시/제동 하중, 열차 수직하중에 대하여 동시에 해석하는 완전한 해석 (해석방법 2)이 합리적인 해석방법이라는 결론을 얻었다.

참고문헌

- [1] DS804 (B6) - Sep. 2000, Regulation for bridges and other civil structures, Deutsche Bahn Gruppe, DB Netz (DB 독일철도 기준)
- [2] UIC 774-3R, Track/Bridge interaction, Recommendations for calculation, 2nd edition, October 2001
- [3] Anforderungskatalog zum Bau der Festen Fahrbahn, 3. uberarbeitete Auflage, Stand 15.10.1995. (Catalogues for construction of slab Track)
- [4] 고속철도 설계기준 -2004 한국철도시설공단
- [5] 철도설계기준(철도교편) -2004 대한토목학회
- [6] 경부고속철도 대구~부산간 궤도공사 실시설계 구조계산서 - 2006 (주)한국철도기술공사