

사용지진을 고려한 고속철도 연속교 장대레일의 응력 해석

Long-Rails Stress Analysis of High-Speed Railway Continuous Bridges Subject to Operating Basis Earthquake

김 용 길^{*} 권 기 준^{**} 고 현 무^{***}
Kim, Yong Gil Kwon, Ki Jun Koh, Hyun Moo

국문요약

철도나 고속철도에서 사용되는 장대레일은 연결부 근처에서 상부구조물간의 변위불일치로 인하여 부가적인 응력이 발생되게 되는데, 이 현상은 단순교에서보다 연속교에서 더 현저하게 나타난다. 철도는 가속과 정지 시의 안전뿐만 아니라 지진상태에서도 탈선이 일어나지 않고 안전하게 정지할 수 있도록 철도구조물의 응력과 변위에서 안전을 보장할 수 있어야 한다. 철도의 안전도를 확보하기 위해 시-제동하중, 온도하중에 의한 레일의 응력에 대한 해석방법은 많은 연구가 이루어져 왔으나, 그 방법이 정적 비선형해석을 바탕으로 하고있어 동적 비선형해석을 필요로 하는 지진하중은 고려되지 못하였다. 그러나, 철도교량의 장대레일과 같이 비선형 거동을 보이는 시스템에서는 교량상판의 상대변위와 레일의 응력과는 선형적인 관계가 정립되지 못하므로, 지진시 열차의 안전한 정지를 확인 하기 위해서는 지진에 대한 영향이 제대로 반영되도록 정적하중과 제동하중과 동적하중인 지진하중을 동시에 재하하여 레일의 응력을 계산하는 동적해석 방법이 요구된다. 본 연구에서는 장대레일을 사용할 때 문제가 되는 레일의 응력을 해석하기 위해 대만고속철도 설계시방서 기준을 만족하는 재료비선형이 고려된 동적해석방법을 개발하였으며 그 방법을 현재 대만에서 연약부지 위에 건설중인 고속철도 연속교에 대한 해석에 적용하였다.

주요어 : 레일응력, 대만고속철도, 연속교, 지진, 비선형해석

ABSTRACT

Long-rails in railways and high-speed railway are subjected to additional stresses resulted from the displacements inconsistency between upper structures, and this phenomenon is more remarkable in continuous bridges than in simple bridges. For the sake of safety, railways have to guarantee trains to stop safely without derailment even in the event of earthquake. The influences of acceleration, braking, and temperature were analyzed by static nonlinear method. But earthquake loads that require dynamic nonlinear analysis are not considered in these methods. Because linear relation between relative displacements of decks and rail stresses is not guaranteed at the nonlinear systems such as long rails on the bridges, it is required to compute rail stresses considering both braking and earthquake load by nonlinear dynamic analysis method. In this study, dynamic analysis method with material non-linearity for rails on continuous bridges according to the Taiwan High Speed Railway(THSR) Design Specification volume 9 was developed. And additional stresses and displacements of long rails for acceleration, braking, and earthquake loads were analyzed by this method.

Key words : rail stress, THSR, continuous bridge, earthquake, nonlinear analysis

1. 서 론

현대 사회의 더 빠르고 편안한 육상교통의 수요를 충족시키기 위해서 프랑스, 독일, 일본 등에서는 고속철도가 운행되고 있으며, 우리나라와 대만에서는 고속철도 건설이 이루어지고 있다. 우리나라에서는 증가하는 물류비 부담, 도로위주의 교통정책의 한계성을 극복하기 위해 경부고속철도 건설을 시작하여, 1999년 12월에 시험선 일부구간에서 우리나라 고속열차(KTX)가 시험운행을 시작하였으며 오는 2003년 12월이면 영업을 개시할 예정으로 건설이 이루어지고 있다.⁽¹⁾

철도와 고속철도에서는 동적충격을 줄이고 승객의 승차감을 편안하게 하기 위하여 장대레일을 사용하고 있다. 장대레일의 경우에는 연결부 근처에서 상부구조물간의 변위불일치로 인하여 부가적인 응력이 발생되게 되는데, 이 현상은 단순교에서보다 연속교에서 더 현저하게 나타난다. 이러한

응력과 변위가 과도하게 되면 열차의 탈선이 발생할 수도 있으므로, 철도는 가속과 정지 시에도 기차가 안전하게 운행될 수 있도록 철도구조물과 레일의 안전을 보장할 수 있어야 한다. 철도교의 경우 지진 발생시에 교각의 파괴나 상부구조의 낙교등의 교량 붕괴에 대한 설계가 이루어지고 있으나, 차량의 탈선으로 인한 인명피해를 유발할 수 있는 레일의 파손은 무시되고 있는 실정이다. 따라서, 고속철도의 안전을 위해서는 사용지진 발생시에 차량이 탈선하지 않고 무사히 정차할 수 있도록 레일과 교량이 설계되어야 한다.

고속철도의 교량형식은 해석의 단순화를 위해서 단순교를 위주로 시공되고 있으나 하부도로 또는 철로를 횡단하기 위함이거나 하부지형에 대한 적합성을 고려하여 지간장을 길게 할 필요가 있을 경우에는 연속교를 채택하여 시공하고 있다. 따라서 고속철도교량의 경우에도 단순교 뿐만 아니라 연속교에 대한 레일해석을 할 필요가 있다.

우리나라에서 시공된 고속철도의 경우는 붕괴방지지진만을 고려하여 지진 시 낙교 및 붕괴방지 개념만이 고려되고 있으며⁽²⁾, 지진발생시에 차량이 탈선하거나 전복하지 않고

* 서울대학교 공학연구소 객원연구원, 공학박사

** 정회원 · 한경대학교 조교수, 공학박사(대표저자 : kjkwon@hnu.hankyong.ac.kr)

*** 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2002년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2002. 9. 16 / 심사종료일 : 2002. 10. 1)

안전하게 정착할 수 있도록 하는 사용상태의 지진하중의 영향이 전혀 고려되지 않고 있다. 그러나 고속철도열차의 경우 정규속도에 따라 운행하고 있는 중에 지진이 발생하더라도 정지하기까지는 수 km의 거리를 운행하게 되므로 지진시에도 안전한 정지가 이루어지는 것이 중요하다고 할 수 있다. 따라서 가속 및 제동상태에서의 레일의 안전성뿐만 아니라, 사용지진의 영향을 고려하여 지진하중이 작용하는 상태에서의 제동하중이 함께 해석되어야 할 필요가 있다.

시-제동하중, 온도하중에 의한 레일의 응력에 대한 해석 방법은 많은 연구가 이루어져 왔으나, 그 방법이 정적 비선형해석을 바탕으로 하고있어 동적 비선형해석을 필요로 하는 지진하중은 고려되지 못하였다.⁽³⁾⁻⁽⁵⁾ 그래서, 세계 여러나라의 설계기준들은^{(6),(7)}, 레일이 모델링되지 않은 교량의 지진해석을 통하여 인접한 교량상판 간의 상대변위를 제한함으로써, 레일의 응력을 간접적으로 규정하고 있다. 그러나, 철도교량의 장대레일과 같이 비선형 거동을 보이는 시스템에서는 교량상판의 상대변위와 레일의 응력과는 선형적인 관계가 정립되지 못하므로, 지진시 열차의 안전한 정지를 확인 하기 위해서는 지진에 대한 영향이 제대로 반영되도록 정적하중인 제동하중과 동적하중인 지진하중을 동시에 재하하여 레일의 응력을 계산하는 동적해석 방법이 요구된다.

본 논문에서는 연속교가 적용된 고속철도 레일의 안전성을 검토하기 위하여 데크간의 상대변위와 데크와 레일간의

상대변위를 해석할 수 있는 방법을 개발하여, 가속 또는 제동이, 그리고 가속과 제동이 동시에 안전하게 이루어는 지와 사용지진이 작용할 때 안전한 제동이 이루어지는가에 대한 해석이 수행된다. 가속, 제동, 그리고 지진하중이 작용하는 상태에서의 제동하중이 작용할 때의 레일의 안전도는 사용지진의 영향을 고려하고 있는 대만고속철도 설계시방서를 따른다.⁽⁸⁾ 해석에는 레일과 교량상부를 연결하는 부재의 재료비선형을 고려하며, 교량내진해석을 위해 동적해석을 수행한다.

2. 교량시스템 모델링과 해석방법

2.1 지반모델

지진에 의한 지반거동의 특성은 부지의 지반층상형태에 따라서 그 영향이 현저하게 다르게 나타날 수 있으며, 이에 따라서 지반의 특성이 입력지반운동의 강도 및 주파수특성뿐만 아니라 구조물해석을 위한 방법이 달라질 수도 있다. 양호한 지반 위에 건설된 교량의 경우는 입력지진하중의 영향을 계량화된 정적하중으로 작용시키는 방법이 사용되어질 수 있으나 연약지반 위에 놓여진 교량에 대해서는 지반과 구조물간의 상호작용을 고려할 수 있는 해석방법이 적용되어야 한다. 본 논문에 적용된 지반특성값은 각 교각의 위치에서 보링하여 구한 데이터를 사용하였으며, 연속교 구간인 P17(교각 위치 560m)의 경우 깊이에 따른 물성치가 다음 표 1과 같다.

표 1 P17(560m)의 지층별 soil properties

Boring 번호 및 위치 : P17(560m)								
Input						Output		
층번호 (i)	층두께 (H _i)	Soil Type	밀도 (ρ _i)(ton/m ³)	Poisson비	N-value (N _i)	전단파속도 (V _{si}) [*] (m/s)	전단탄성계수 (G _i) ^{**} (tonf/m ²)	
1	2.0	Clay	1.90/9.8	0.45	8	206.8	8288.2	
2	2.5	Clay	1.90/9.8	0.45	4.5	160.7	5007.5	
3	4.5	Clay	1.90/9.8	0.45	5	168.3	5491.5	
4	1.5	Sand	1.97/9.8	0.30	12	191.2	7346.1	
5	6.0	Clay	1.93/9.8	0.45	5	168.3	5578.2	
6	3.0	Sand	1.97/9.8	0.30	20	233.7	10983.5	
7	3.0	Clay	1.93/9.8	0.45	7	195.0	7489.9	
8	3.0	Sand	1.94/9.8	0.30	18	224.3	9955.2	
9	3.0	Clay	1.98/9.8	0.45	6	182.3	6713.5	
10	3.0	Sand	1.94/9.8	0.30	18	224.3	9955.2	
11	9.0	Clay	2.01/9.8	0.45	15	272.3	15205.4	
12	1.5	Sand	1.97/9.8	0.30	50	335.3	22598.5	
13	1.5	Sand	1.97/9.8	0.30	35	291.4	17065.2	
14	3.0	Clay	2.04/9.8	0.45	32	379.4	29965.5	
15	1.5	Sand	1.97/9.8	0.30	33	284.7	16292.6	
16	3.0	Clay	2.04/9.8	0.45	29	363.4	27490.3	
17	1.5	Sand	2.06/9.8	0.30	30	274.2	15805.1	
18	4.5	Clay	2.04/9.8	0.45	32	379.4	29965.5	

지반주기 : $T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{si}} = 0.946$ (sec) ; H_i : i 번째 층의 두께, ; V_{si} : i 번째 층의 전단파 속도

* V_s = 8.3177N^{0.4379}(clay), V_s = 71.868N^{0.3937}(sand) : 대만 C280지역에 대한 Down Hall Test결과

** G_i = ρ_i × V_{si}²

일반적으로 지진하중이 가해지는 경우에는 지진파의 전파가 수직으로 이루어지는 것으로 보고 있으며, 이에 따라서 지반의 영향은 지반자체의 고유주기가 필터로 작용하여 지반 위에 놓여진 구조물에 작용하는 주파수특성, 강도, 그리고 지속시간 등을 변화시킨다. 본 논문에 적용된 지반모델은 soil column 해석결과 기본주기가 0.946초로서, 대만시방서 기준에 따르면 연약지반으로 볼 수 있는 특수부지로 구분된다.⁽⁶⁾ 이에 따라서 해석방법 또한 간이해석이 아닌 지반과 구조물의 영향이 동시에 복합적으로 고려될 수 있는 방법이 적용되어질 필요가 있다.

2.2 입력지반운동

입력지반운동은 대만고속철도공단(THSRC)에서 제공한 대만 C280지역 부근에서 발생한 실제지진파를, 사용상태의 지진하중에 적합하게 붕괴방지 수준의 1/3인 0.133g로 지반 최대가속도를 수정하여 사용하였다. 해석에 사용된 입력지진은 그림 1과 같다.

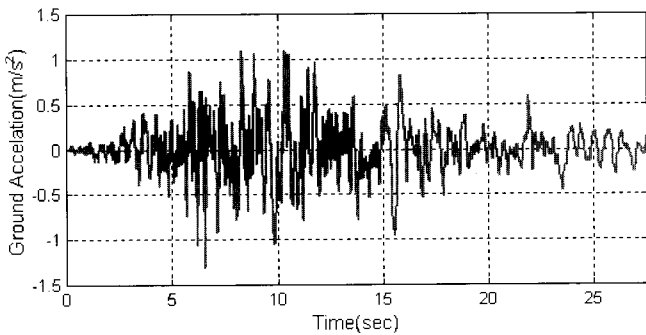


그림 1 해석에 사용된 입력지진파

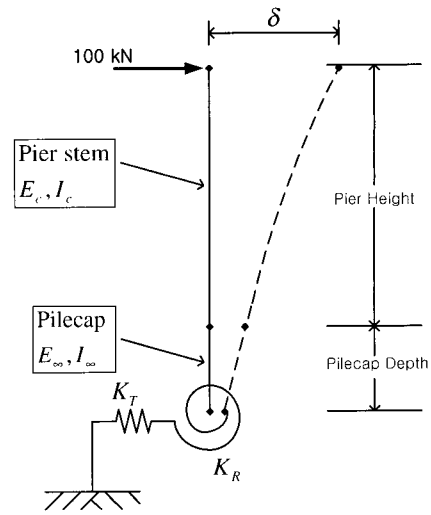


그림 3 파일과 교각의 스프링 모델화

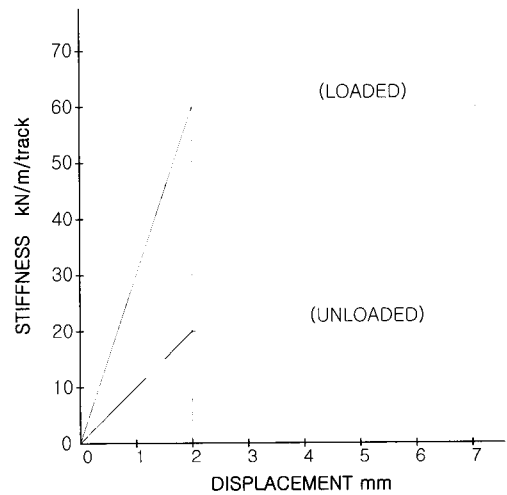


그림 4 교량과 레일을 연결하는 부재의 완전소성모델

2.3 구조물모델링

해석교량은 현재 대만 C280공구에서 건설중이고 그림 2와 같이 길이가 100m인 3경간 연속교(교각위치는 560m-660m)이며, 하중으로 작용하는 열차의 길이와 장대레일의 특성을 고려하기 위하여 연속교 전후에 각각 560m가 단순교로 모델링에 포함되었다. 단순교의 지간은 35m로 모델링되었다. 교량의 기초는 파일기초로 이루어져 있으며 파일과 지반의 영향은 그림 3과 같은 지반스프링으로 모델링되었다. 레일과 교량상부를 연결하는 부재(자갈과 fastening)는 수직하중의

유무에 따라 그림 4와 같이 완전소성(perfect plastic)거동을 하며, 레일은 2개의 선로로 구성되어 있으며, 레일과 교량의 상부구조는 5m마다 1개의 절점을 갖는 것으로 모델링되었다.

3. 레일의 응력과 변위

3.1 레일의 응력 및 변위에 대한 허용기준

장대레일의 경우에는 레일의 연속성으로 인하여 자체의 응력이 크게 발생할 수 있다. 또한 하부구조물의 영향에 의

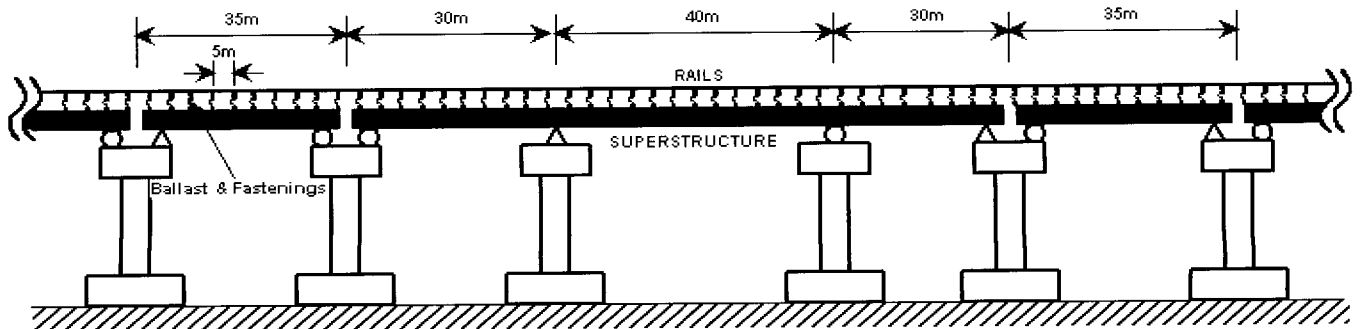


그림 2 교량시스템의 모델링

해서도 추가적인 응력과 변형이 발생할 수도 있다. 이러한 추가적인 영향이 레일과 구조물간의 상호작용을 유발한다. 이러한 사항을 고려하여, 대만 고속철도 설계시방서에는 지진이 작용하지 않는 보통의 경우와 지진이 작용하는 경우로 분리하여 허용할 수 있는 범위가 다음의 표 2와 같이 규정되어 있다.⁽⁴⁾ 표 2의 변위에 대한 기준에서 상시의 경우에는 데크간의 상대변위와 데크와 레일간의 상대변위를 규정하고 있는 반면에 지진하중이 작용하는 경우에는 데크간의 상대변위만을 규정하고 있다. 이것은 지진시의 레일의 응력은 동적비선형 해석을 수행하여야 하므로 대부분의 설계기준에서는 지진하중 작용시에는 데크간의 상대변위 만이 규정되어 있기 때문이다.

표 2 레일의 허용응력 및 데크간의 허용상대변위

	Rail stress	Displacement
상시	-72/+92 N/mm ²	7 mm : 데크 간 4 mm : 데크와 레일 간
지진시	-147/+167 N/mm ²	25 mm : 데크 간

3.2 가속하중 작용시의 레일의 응력과 변위

가속하중의 영향은 기관차의 가속에 의해 발생하므로 한 점에 가속력 100이 작용하는 것으로 모델링되어질 수 있다. 가속하중이 연속교에 직접적으로 영향을 미치면서 연결지점에 작용하는 경우에 가장 큰 응력을 발생시킬 수 있으므로, 가속력이 작용하는 위치를 단순교와 연속교의 연결지점에 작용시키고 연속교 상부에 열차가 위치할 때의 영향을 고려할 필요가 있다. 따라서 본 논문에서 가속하중은 그림 5와 같이 100tonf를 집중하중으로 작용하는 것으로 모델링하

고, 하중의 작용점으로부터 열차가 위치하는 30m 구간의 연결부재는 그림 4의 수직하중 재하시의 강성을 사용하고, 나머지 구간의 연결부재는 수직하중 비재하시의 강성이 사용되었다.

가속하중에 의한 레일과 데크의 변형상태가 레일의 위치에 따라 그림 6에 나타내져 있다. 연속교 구간은 560m-660m에 존재한다. 레일의 변형은 연속교의 시작부에 집중하중이 작용하는 곳에서 가장 크게 발생하며 연속교 시작부에서 변곡점을 가지는 형태를 취하고 나머지 부분은 하중작용점으로부터 멀어지는데 따라서 빠른 감소를 보이고 있다. 데크의 변형은 연속교 및 단순교의 연결부분에서 계단형상의 변위 차이를 보이고 각 교량구간에서는 일정한 값을 갖는 형태의 분포를 하고 있다. 데크와 레일간의 상대변위의 형태는 변형은 상부구조물의 강성으로 인하여 연결부를 사이에 두고 불연속한 양상을 나타내고 있다. 레일의 변위는 하중작용점으로부터 멀어질수록 급격하게 감소하는 반면에 데크의 변위는 각 교량 부분에서 일정한 값을 가지게 되어 하중이 작용하는 연속교의 반대편에서는 상대변위가 음의 값을 나타내고 있다. 가속하중에 의한 응력상태는 그림 7에 나타나 있으며, 하중작용위치를 전후하여 피크를 이루고 있다. 응력의 분포는 하중이 작용하는 위치에서 응력의 부호가 바뀌는 응력교체현상을 보이고 있다. 연속교의 레일응력의 결과는 단순교의 결과⁽⁹⁾와 차이가 많지 않게 나타나고 있다.

가속하중이 작용하는 경우의 해석결과에서 데크간 최대 상대변위가 1.4mm, 데크와 레일의 최대 상대변위가 1.7mm로 모두 허용범위 내에 분포하고 있다. 또한 레일의 응력은 허용범위인 -72/+92에 크게 못 미치게 분포하는 것을 보여주고 있다. 따라서 연약지반 위에 놓인 연속교에서 열차의 가속이 이루어 질 경우 레일의 안전이 보장된다고 볼 수 있겠다.

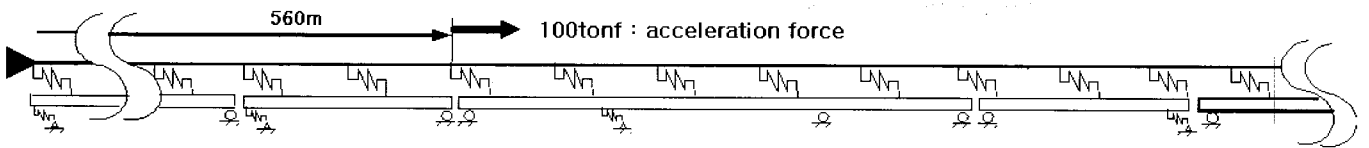


그림 5 가속하중 작용시의 교량시스템의 모델

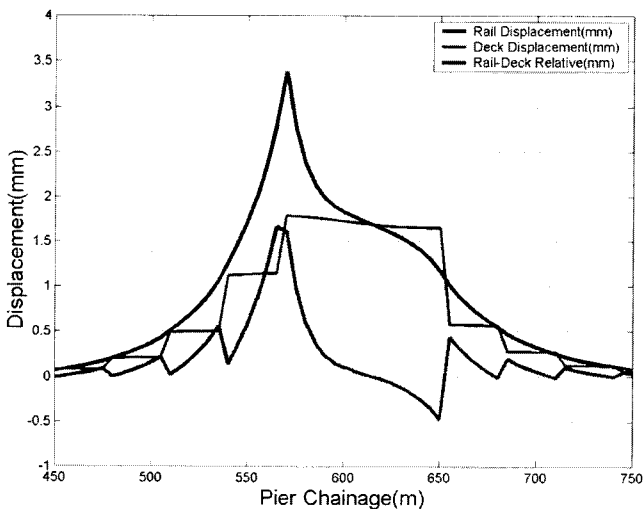


그림 6 가속하중 작용시의 레일과 데크의 변위

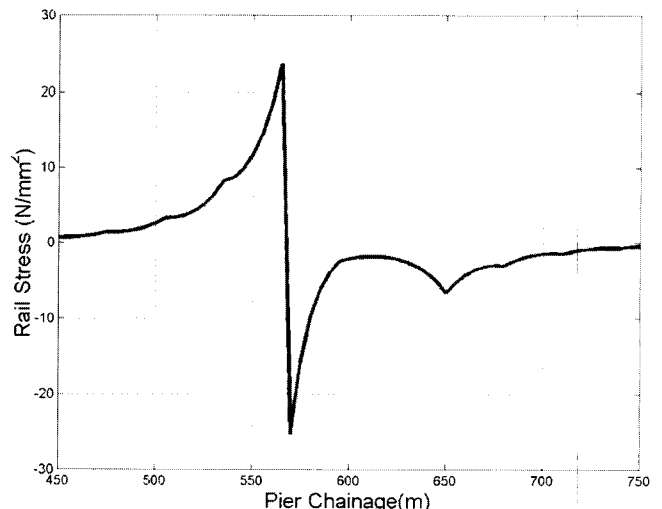


그림 7 가속하중 작용시의 레일의 응력

3.3 제동하중 작용시의 레일의 응력과 변위

제동하중의 영향은 전체열차의 제동에 의해 발생하므로 전차의 전체 길이에 걸쳐 고르게 힘이 작용하는 것으로 모델링되어질 수 있다. 제동하중이 작용하는 경우는 제동하중의 시작점이 연속교와 단순교의 연결부에 위치하고 하중의 연속교 전체길이에 걸쳐서 작용할 때가 가장 큰 영향을 나타내므로 이를 고려하여야 한다. 이를 고려하여 제동하중은 그림 8과 같이 교량연결부에 불연속성이 나타나도록 연속교의 시작점에서부터 300m에 걸쳐 2tonf/m의 힘이 수평방향으로 작용하는 것으로 모델링되어졌다. 또한 연결부재의 강성도도 전차의 길이만큼의 구간은 수직하중 재하시의 강성이 사용된다. 하중작용범위가 연속교를 지나 이웃한 단순교에 까지 분포하고 있다.

제동하중에 의한 레일과 데크의 변형상태가 그림 9에 나타나 있다. 레일의 변형은 제동하중이 연속적으로 작용하므로 피크를 나타내지는 않고 상부데크의 불연속성이 반영되는 결과를 보여주고 있다. 그림에서 레일의 변위양상은 연속교 부분에서 단순교에서보다 더 큰 값을 나타내고 있으며, 연속교내에서도 중간지점에서 가장 큰 값을 나타내면서 부드러운 곡선을 이루고 있다. 연속교와 단순교 연결부에서 변위의 급격한 감소가 나타나는데, 이는 데크의 변위에서 단순교와 연속교의 연결부에서 변위의 불연속성이 발생하므로 이 영향이 레일의 변위에 나타난 것으로 볼 수 있다. 제동하중이 가해지는 단순교부분에서는 변위의 감소가 서서히 이루어지고 있다.

데크의 변위 또한 연속교부분에서 가장 큰 값을 보이고, 연속교와 단순교의 연결부에서 큰 값의 불연속이 나타나며,

하중제하가 끝나는 위치에 있는 단순교연결부에서도 데크의 변위는 커다란 불연속을 보여준다. 단순교의 해석결과⁽⁹⁾와 비교하면 레일과 데크가 거의 두 배에 가까운 변형을 일으키는 것으로 나타난다. 이 현상은 짧은 구간에 하중을 데크가 부담하는데 단순교와는 달리, 연속교의 경우에는 긴 구간에 걸쳐서 제동하중의 영향이 연속교 상부데크의 전체변위로 나타나는 결과로 볼 수 있다.

제동하중에 의한 응력상태는 그림 10에 나타나 있으며, 하중작용위치에서 상부데크의 불연속성이 나타나는 부분에서 가장 큰 피크를 이루고 있다. 그림에서 응력은 하중작용 시작점인 연속교와 단순교의 연결부, 하중이 가해지고 있는 부분의 연속교와 단순교의 연결부, 그리고 하중작용이 끝나는 단순교간의 연결부에서 눈에 띄이는 큰 값을 보이고 있다. 응력이 크게 나오는 부분은 레일과 데크간의 상대변위가 큰 곳과 대체로 일치하는 것을 볼 수 있었다. 제동하중이 작용하면서 나타나는 응력은 가속하중에 의한 것과는 달리 응력교체 현상이 나타나지 않는 것을 볼 수 있다.

연속교의 레일응력의 결과는 단순교의 결과⁽⁹⁾에 비해 많은 피크를 보여주고 있으며, 응력의 최대값은 단순교의 약 2.5배의 크기를 보여 가속하중에 의한 레일응력이 압도적으로 큰 단순교에 비하여 연속교에서는 제동하중에 의한 레일응력이 가속하중보다 큰 것을 보여준다.

제동하중이 작용하는 경우의 해석결과에서, 데크간의 상대변위는 허용범위 7mm에 미치지 못하는 2.56mm 정도의 크기를 보여주고 있으며, 레일과 데크의 상대변위는 허용범위 5mm에 1/3 정도인 1.7mm에 그친다. 응력의 경우에도 최대값이 허용범위에 1/3정도의 분포를 보여주고 있다.

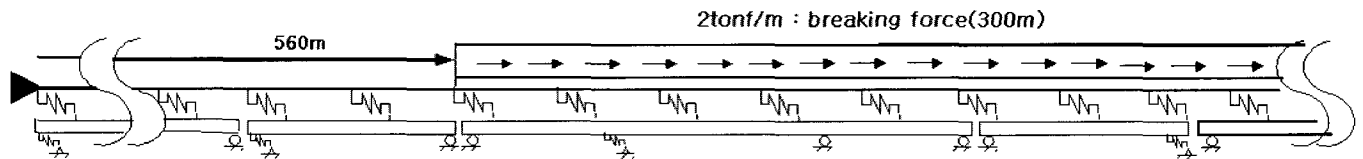


그림 8 제동하중 작용시의 교량시스템의 모델

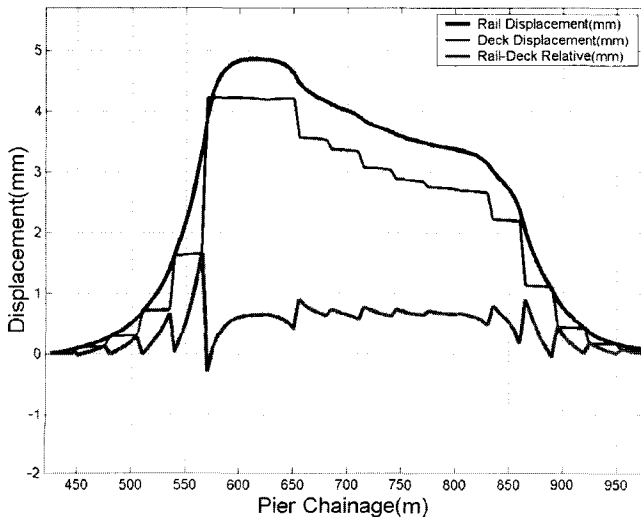


그림 9 제동하중 작용시의 레일과 데크의 변위

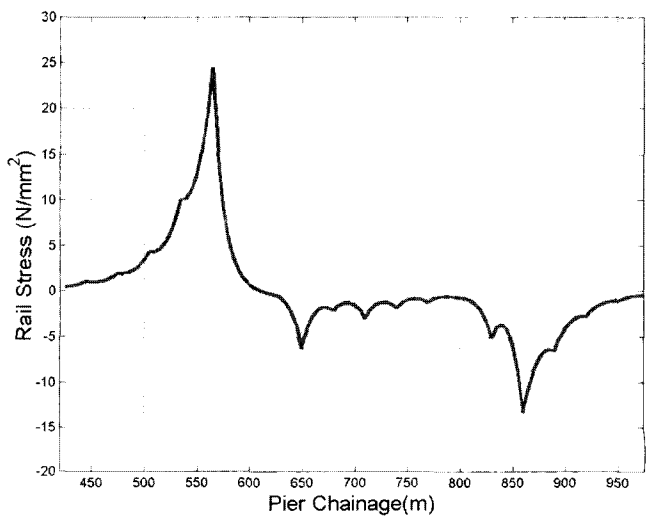


그림 10 제동하중 작용시의 레일의 응력

3.4 가속하중과 제동하중이 동시에 작용할 때 레일의 응력과 변위

해석대상교량은 2개의 선로를 가지고 있어서 이웃한 선로에서 가해지는 하중이 서로간에 영향을 미치므로, 시동하중 및 제동하중 뿐만 아니라 두 가지의 하중이 동시에 작용하는 경우에 대해서도 고려할 필요가 있다. 이 경우의 하중 작용방향은 반대로 향하고 있는 열차가 각각 가속과 제동을 하는 조합이 가장 큰 응력을 발생시킬 수 있을 것이다. 이러한 개념으로부터 가속과 제동이 동시에 이루어지는 하중조합을 그림 11과 같이 1번 선로에는 그림 8과 같은 제동하중이 2번 선로에는 그림 5와 같은 가속하중이 작용하도록 모델링되었다.

제동하중과 가속하중이 연속교 구간에서 동시에 작용하는 경우의 결과를 그림 12에는 제동하중이 작용하는 1번 선로의 변형과 가속하중이 작용하는 2번 선로의 변형으로 각각 나타내었다.

결과를 관찰하여보면 그림 12(a)에서 나타나는 제동선로에서의 변위는 제동하중만 작용하는 경우의 그림 9에 비해 변위의 최대값이 5.8mm에서 6.4mm로 증가하였으나, 데크와 레일 사이의 상대변위는 크기의 변화가 거의 없는 것을 볼 수 있다. 따라서 레일의 변위증가는 데크간의 상대변위가 커지는 영향으로 해석할 수 있다. 그림 12(b)에 나타나는 가속선로에서의 변위는 그림 6에서 나타나는 가속하중만 나타나는 변위에 대한 증가폭이 3.4mm에서 6.8mm로 두 배정도

증가하여 제동선로에서보다 크게 나타났다.

위의 결과는 이웃하는 선로에 대한 하중의 영향은 전체하중의 합이 데크의 변위로 나타나고, 최대값의 발생위치는 각 선로에 작용하는 하중의 특성을 따른다고 볼 수 있다. 따라서 제동선로에서는 가속하중 100tonf의 영향이 전달되어졌고 가속선로에서는 연속교 상부에 작용하는 제동하중 200tonf의 영향이 전달되어 증가폭이 커지게 된 것으로 볼 수 있다.

레일과 데크간의 상대변위는 제동선로에서 크게 변하지 않았으나, 가속선로에서는 하중작용시점의 연결부에서 데크간의 상대변위가 커지고 바로 그 인접한 연속교 시작지점에 집중하중이 작용하는 영향이 겹쳐지면서 상대변위의 피크가 두 배정도 증가하는 값을 보이고 있다.

모두 각각 작용하는 하중에 비해 두 하중이 서로 영향을 미쳐서 변위가 증가하는 양상을 보이고 있다. 각 선로에 발생하는 변위의 증가는 이웃하고 있는 선로에서 작용하는 하중이 데크의 연결부에 상대변위를 증가시키는 상승작용을 유발함으로써 나타나는 결과로 볼 수 있다.

그림 13에 나타난 응력의 분포형상으로부터 각 선로에서 발생하는 응력의 크기는 이웃하고 있는 선로에 작용하는 하중의 영향을 받고 있으나 형태에 있어서는 각 선로의 하중 특성을 잘 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 응력값의 크기는 제동선로와 가속선로에서 24.5N/mm²에서 28N/mm²로, 23N/mm²에서 41N/mm²로 각각 증가하였는데, 이 현상은 그림 12에 나타난 변위의 변화양상과 같은 이유로 설명될 수 있다.

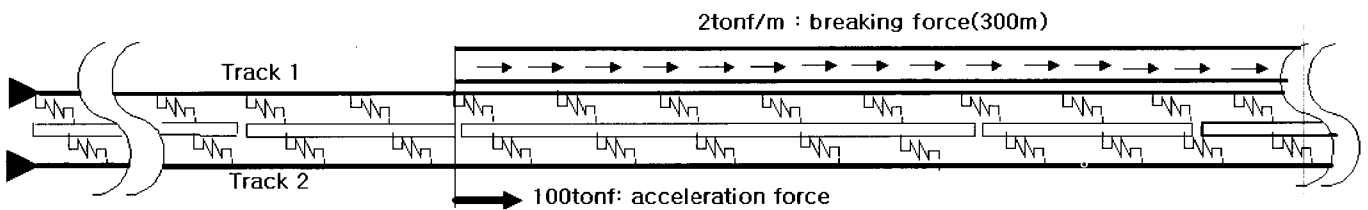


그림 11 가속하중과 제동하중이 동시에 작용시의 교량시스템의 모델

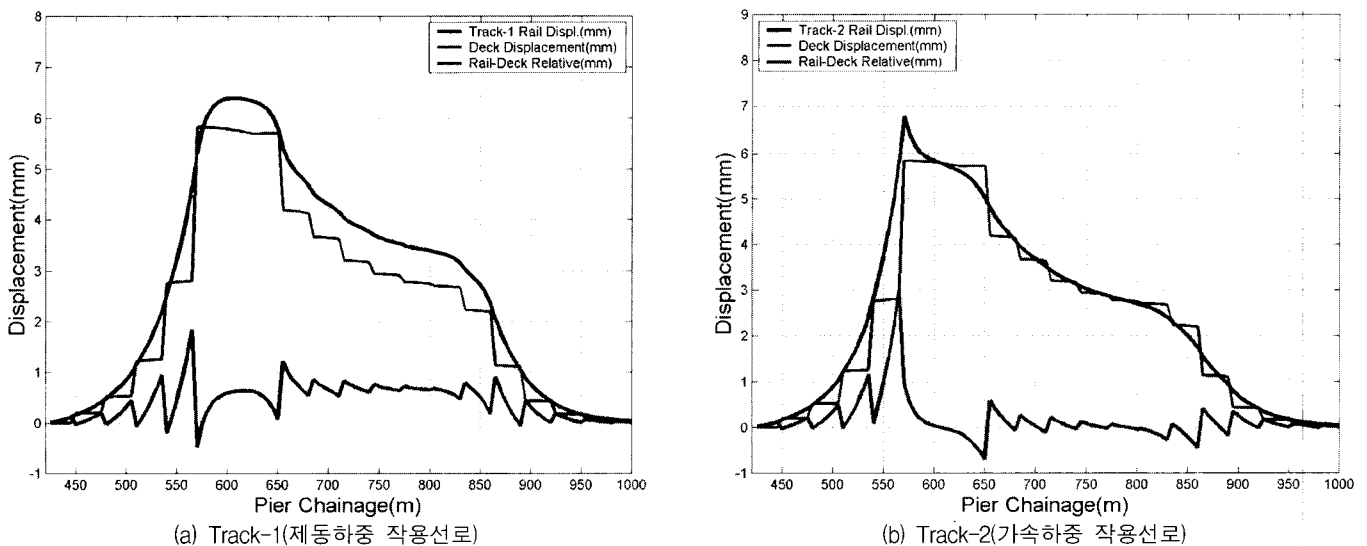


그림 12 가속하중과 제동하중이 동시에 작용시의 레일과 데크의 변위

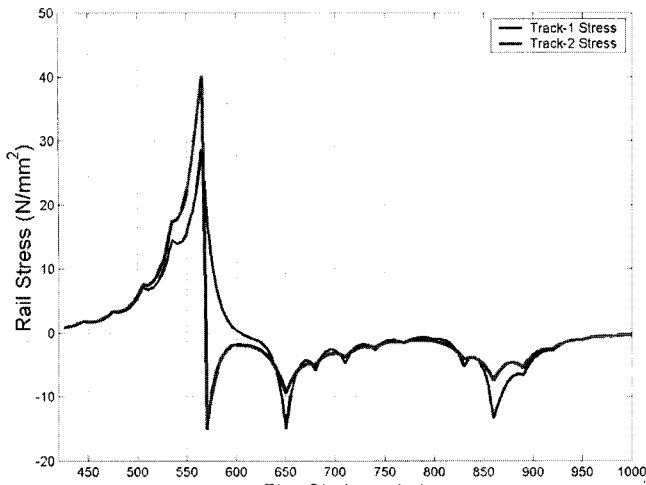


그림 13 가속하중과 제동하중이 동시에 작용시의 레일의 응력

3.5 제동하중과 지진하중이 동시에 작용할 때 구조물의 변위와 응력

지진계측이 활발하게 이루어질 경우에는 초기지진의 관측을 통하여 철도위를 운행하고 있는 열차에 경보를 울려서 붕괴방지지진이 철도에 도달하기 전에 운전자가 정지할 수 있도록 하거나 중앙통제실에서 원격적으로 정지할 수 있다.⁽¹⁰⁾ 이러한 비상정지가 이루어지는 경우에도 구조물이나 레일의 안전이 유지되어 열차의 탈선이 발생하지 않아야 한다. 그러므로 레일의 응력을 해석하는데 있어서 지진만 고려해서는 정확한 거동을 확인할 수 없으며, 지진하중과 동시에 정지하중을 고려하고 레일을 지지하는 연결부의 비선형성을 포함한 해석이 수행되어야 한다. 지진이 발생하는 경우에는 열차를 정지시키기 위해 제동을 하는 경우만을 가정하면 되므로 제동하중과 지진하중을 동시에 작용되고 가속의 경우는 해석에서 제외하였다.

또한, 교량의 교축직각 방향의 경우에는 지진에 의한 열차의 탈선이 레일과 교량의 상부구조가 일체로 거동하는 교축직각방향의 거동에 의하여 결정되므로 레일의 응력과는 무관하여 고려하지 않았다.

지진이 작용하는 경우에 레일의 응력을 규정하는 기존의 설계기준들의 중요한 인자가 데크간의 상대변위로 규정되어 있으므로, 이 절에서는 지진하중과 정지하중이 동시에 작용하는 경우에 동적비선형 해석을 수행하여 상부데크간의 상대변위와 레일의 응력을 얻었으며, 이 결과를 지진하중만 작용하는 경우의 거동과 비교하여 보았다. 입력지진은 그림 1에 나타나 있는 시간이력을 사용하였으며 해석방법으로는 Newmark- β 방법(Newton-Raphson method)이 사용되었다.⁽¹¹⁾

데크간의 상대변위에 대한 결과를 그림 14에 지진만 작용하는 경우와 지진과 제동하중이 동시에 작용하는 경우를 비교하여 나타내었다. 그림에서 10초를 바로 지난 시점에서 데크간의 상대변위가 최대 값을 보이는데 지진과 제동하중의 동시에 작용하는 경우의 값 24.7mm과 지진만 작용하는 경우의 값 19.8mm의 차이가 그림 9에서 얻은 제동하중만 작용하는 경우의 값 2.56mm 보다 크게 나오므로, 단순히 선형

합으로 조합하는 것은 실제와 다른 결과를 얻게 될 수 있다는 것을 말해준다. 해석결과에서 나타난 24.7mm는 허용변위 25mm에 조금 못 미치는 값으로서 산술적인 합으로만 계산한다면 자칫 허용범위를 넘는 사항을 안전한 것으로 잘못 판단할 수도 있게 된다.

그림 15에는 지진하중이 제동하중과 동시에 작용하는 경우와 지진하중만 작용하는 경우의 레일응력을 나타내었다. 그림 10과 그림 15를 통하여 레일의 응력을 살펴보면 제동시 24.5N/mm², 지진시 97.5N/mm²이 발생하고, 동시에 제하하는 경우에는 108.4N/mm²이 발생하여 두 응력의 선형합 122.0N/mm²보다는 작은 값이 계산되어 허용치(167N/mm²)에는 여유가 생긴다.

위의 결과로부터 그림 14와 15에서 나타난 데크간의 상대변위와 레일응력의 거동양상은 시간에 따라서 아주 유사한 모습을 나타내고 있기는 하지만, 데크간의 상대변위 및 레일의 응력은 모두가 선형합으로 조합되어질 수도 없고, 두 값 사이에도 관계되는 정식을 만들지 쉽지 않다는 것을 알 수 있다.

각각의 하중에 대한 장대레일의 응력은 데크간의 상대변위가 중요한 인자이기는 하지만, 두 가지 하중이 조합되는 경우에는 그 영향이 서로 상쇄되거나 증폭이 일어나고 지진

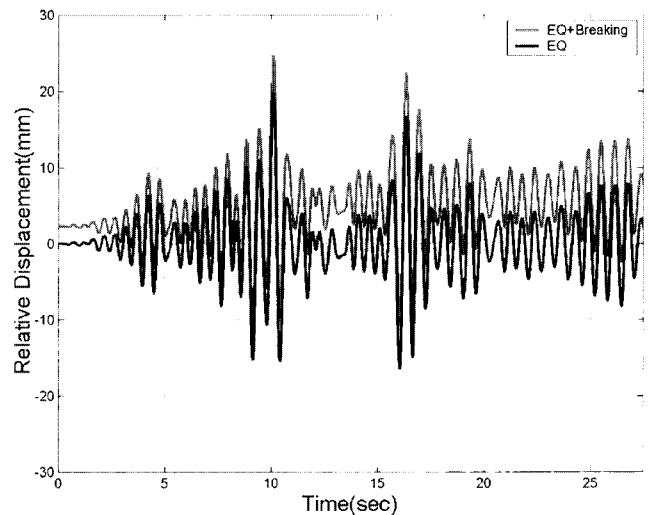


그림 14 제동하중과 지진하중이 작용시의 데크간의 상대변위

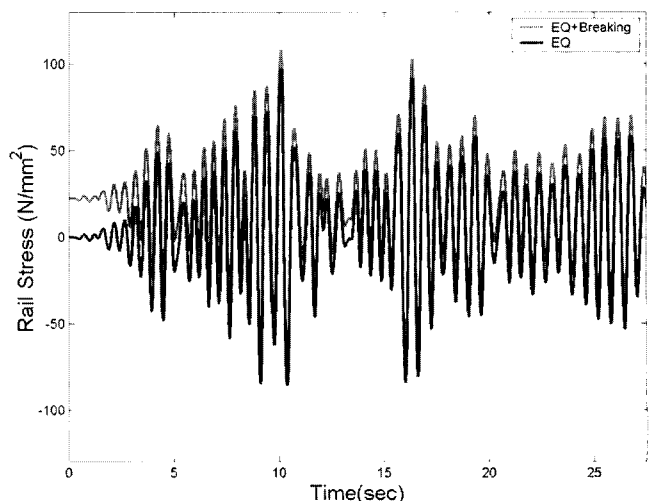


그림 15 제동하중과 지진하중이 작용시의 레일의 응력

하중과 같이 큰 하중이 작용하는 경우에는 비선형 거동이 발생하게 되어 선형해석으로는 레일의 응력과 데크간의 상대변위를 정확하게 규정할 수 없으므로, 본 논문에서 제시된 해석방법과 같이 동적비선형해석을 수행하여 레일의 응력을 계산하는 방법이 사용되어야 할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 장대레일을 사용할 때 문제가 되는 레일의 응력을 해석하기 위해 대만고속철도 설계시방서 기준을 만족하는 해석방법을 개발하였으며 그 방법을 현재 대만에서 연약부지위에 건설중인 고속철도 연속교에 대한 해석에 적용하였다. 본 연구에 적용된 해석방법은 연결부재의 재료비선형성이 고려된 동적해석법으로서, 이 방법을 적용하여 열차의 가속, 제동, 그리고 지진하중의 조합에 대하여 구조물의 변위와 레일의 응력을 계산하였다.

연속교 레일의 변위의 최대값은 하중형태에 따라서 발생하는 위치가 달라졌으나, 데크간의 상대변위 또는 데크와 레일간의 상대변위가 크게 발생하는 위치에서 레일응력 또한 크게 나타났다. 그러나 각각의 하중에 대한 장대레일의 응력은 데크간의 상대변위가 중요한 인자이기는 하지만, 데크간의 상대변위와 레일응력간의 직접적인 선형관계는 성립하지 않으며, 두 가지 하중이 조합되는 경우에는 그 영향이 서로 상쇄되거나 증폭이 일어나고 지진하중과 같이 큰 하중이 작용하는 경우에는 비선형 거동이 나타났다.

대상이 된 연속교의 변형 및 레일의 응력은 시방규정을 만족하는 거동을 나타내었으며 해석결과를 분석하여 불 때 지진의 영향이 다른 하중의 영향에 비해 변형과 응력부분에서 상대적으로 크게 나타나므로, 지진의 영향을 교량의 안전도검토에 있어서 중요한 인자로서 고려할 필요가 있으며, 재료의 비선형성이 해석결과에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

따라서 선형해석으로는 고속철도 연속교 장대레일의 응력과 데크간의 상대변위를 정확하게 규정할 수 없으므로, 본 논문에서 제시된 해석방법과 같이 동적비선형해석을 수행하여 레일의 응력을 계산하는 방법이 적용되어야 할 것으로

사료된다.

본 논문에서 수행된 연구결과는 우리나라의 고속철도에 대한 사용지진시의 안전도 검토를 위해 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 한국고속철도공단 홈페이지, http://www.ktx.or.kr/kor/introduce/if_i1.html.
2. 고속전철사업기회단, 고속철도 콘크리트구조물(RC 및 PC) 설계표준시방서(안), 1991.
3. Premersberger, G. and Rojek, R., "Structural system for the transmission of longitudinal force on railway bridges," *Engineering structures*, DB New Line Mannheim-Stuttgart, No. 4, 1987.
4. 日本八天代엔지니어링, "Nojang-I 橋梁 노선레일 軸方向 應力檢討", 연구보고서, 日本八天代엔지니어링, 1992, pp. 102.
5. Eisenmann, J., Leykauf, G., and Mattner, L., "Recent developments in german railway track design," *Transport*, 1994, pp. 91-96.
6. 鐵道構造物等 設計標準・同解説, 日本鐵道綜合技術研究所, 1992.
7. International Union of Railways, *UIC(Union Internationale des Chemins de Fer) Code*, 1985.
8. Taiwan High Speed Rail Corporation, *Taiwan High Speed Railway Design Volume 9*, 2000.
9. 김용길, "대만 고속전철 단순교의 레일-구조물 상호작용 해석", 한국산업안전학회논문집, 제16권, 제2호, 2001.
10. Nakamura, Y., "Real-time information systems for seismic hazards mitigation UrEDASP," HERAS and PIC, Railway Technical Research Institute, QR, Vol. 37, No. 3, 1996.
11. *Structural Dynamics by Finite Elements*, Prentice Hall, Weaver & Johnston, 1987.