

레일-교량상호작용을 고려한 장대레일 거동 해석



김 병 석*



강 재 윤**

1. 머리말

장대레일(Continuous Welded Rail, CWR) 궤도구조는 레일 신축이음부에서의 구조적 취약성 및 체결구(fastener)의 손상 등의 문제점을 원천적으로 해소하고 유지관리 비용의 절감, 궤도구조의 사용 수명 연장 및 승차감 향상 등의 장점을 가짐에 따라 철도궤도구조에의 사용이 급증하고 있는 실정이며, 최근에 그 거동특성 및 적용방안에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 장대레일 궤도는 레일신축장치를 없애고 레일을 용접이음함으로써 기존의 레일 손상의 주된 부분인 레일 신축장치에서의 손상을 최소화할 수 있다는 장점을 갖는 반면, 레일이 장대화됨에 따라 온도변화 및 외력에 의해서 레일에 과도한 상대변위 및 축력이 발생할 우려가 있다. 특히 교량상의 장대레일에서는 교량과 레일 간의 상이한 거동 특성으로 인해 상대변위가 커지고, 교량의 거동에 의해 레일에 추가적인 축력이 발생하여 심각한 경우에는 레일 좌굴이나 파단을 일으킬 수도 있다.

여러 연구결과에 따르면 교량구간에서의 레일

축력은 도상의 저항력 및 교량의 신축길이, 지점 배치, 하부구조 강성 등의 영향을 받게 됨이 밝혀졌으며, 이러한 레일-교량 간의 상호작용에는 도상의 비선형적 거동이 가장 중요한 매개인자로 작용하므로 축력 계산 결과의 정확도를 높이기 위해서는 도상의 비선형 특성과 함께 교량 구조물의 강성 및 지반의 강성을 고려하여 해석을 해야 한다.^{1),2),3),5),6),8)}

본고에서는 그 동안 한국건설기술연구원에서 고속전철기술개발사업의 일환으로 수행한 고속전철 교량기술 개발 연구의 내용 중, 레일-교량 상호작용을 고려한 장대레일 궤도구조의 거동 특성 검토 결과 및 장대레일 안정성 검토를 위한 해석 프로그램의 개발 결과를 요약, 소개한다.

2. 레일-교량 상호작용에 의한 레일축력 변화의 영향인자

레일 안정성 검토에 있어서 레일 및 교량 구조물의 변위에 영향을 미치는 모든 요인은 레일-교량 상호작용의 영향인자라고 볼 수 있으며, 이 영향

* 정회원 · 한국건설기술연구원 구조시스템그룹, 그룹장
** 한국건설기술연구원 구조시스템그룹, 연구원

기술기사

인자는 크게 궤도구조와 교량구조 측면의 두 범주로 분류할 수 있다.

교량구조 측면에서의 영향인자는 고정지점의 위치 및 종류, 교량의 신축길이, 교량상판의 단면 계수 및 탄성계수, 지점의 강성, 교량상판의 중립 축의 위치 등을 들 수 있으며, 궤도구조 측면에서의 영향인자는 레일의 종방향 변위에 대한 저항력, 레일의 단면적, 레일 신축이음의 유무, 궤도 유지보수 수준 등을 들 수 있다. 여기서 말하는 궤도구조는 레일, 체결구, 침목 및 도상(ballast)을 포함하여 일컫는다.

상기의 영향인자 중에서 가장 큰 영향을 미치며 레일축력 해석시에 반드시 고려해야 하는 중요한 항목은 다음에 상세하게 설명한다.

2.1 도상의 비선형 거동

도상의 거동은 이미 여러 연구결과로부터 비선형거동을 하는 것으로 밝혀졌고, 변위-저항력관계는 일반적으로 bi-linear 거통특성을 보인다고 규정하고 있으며, 이와 같은 도상의 비선형 재료특성은 이미 UIC Code(1995)에 채택되어 있다. 아래의 그림 1은 UIC Leaflet 774-3 (1995)에서 규정하고 있는 도상의 변위-저항력 관계곡선이며, 이 관계곡선으로부터 궤도의 종저항력은 도상의 다짐 상태뿐만 아니라 수직하중의 재하 여부에 따라 다른 거동을 보임을 알 수 있다. 즉, 도상의 종저항력이 증가할수록 교량의 거동에 의한 추가적인 레일축력이 발생할 가능성이 크며 레일의 축력이 교량으로 전달되는 비율도 커진다. 반면에 도상

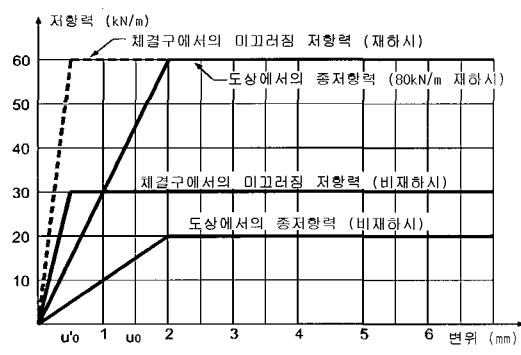


그림 1 궤도의 종방향력-변위 관계(UIC, 1995)³⁾

저항력이 감소하면 교량의 거동에 의한 추가적인 레일축력의 발생은 감소하지만 도상 저항력을 통한 레일축력의 분배효과가 떨어져 축력의 대부분을 레일이 부담하여야 하므로 시동/제동하중 작용시에 레일의 좌굴 또는 파단이 발생할 수 있다. 따라서, 레일축력을 소요의 제한치 이내로 유지하기 위해서는 지속적인 도상 저항력의 관리가 필요하며, 도상의 상태를 고려하여 레일축력을 검토해야 한다.

2.2 교량 하부구조의 강성

교량상에서의 레일축력은 궤도와 교량구조물로 분배되며, 이때의 분배율은 궤도와 교량간의 상대변위에 대한 저항력의 크기와 종방향 변위에 대한 구조물의 저항력, 즉 하부구조의 강성에 의해 결정된다. 다시 말해서 교량구조물의 변형은 레일에 추가응력을 발생시키게 되며, 그 교량구조물의 변형은 본질적으로 하부구조의 강성에 의존한다. 따라서, 장대레일 안정성 검토를 위한 정확한 해석 결과를 얻기 위해서는 하부구조의 강성 결정에 신중을 기해야 한다. 참고로 독일에서는 하부구조 및 기초의 강성이 레일의 추가응력 발생에 큰 영향을 미친다고 보고, 이 강성을 결정하기 위하여 1984년부터 1986년 사이에 독일 고속전철 신설 노선의 4개 교량에 대해 실물실험을 실시하였다.⁴⁾ 이 실험에서, 교각 및 지반 강성을 결정하기 위한 측정인자는 다음과 같다.

- Foundation level에서 수평하중을 작용시킨 뒤, 확대기초 혹은 말뚝기초의 변위와 경사도를 측정
- Pier head level에서 수평하중을 작용시킨 뒤, 교각에 수직하중을 재하한 경우와 재하하지 않은 각각의 경우에 대해 변위와 경사도를 측정

2.3 작용하중

레일축력은 레일과 교량 간의 온도 차이에 의한 상대적 구속력에 의해 발생하거나, 열차의 시동 및 제동하중이 외력으로 직접 작용할 때 발생하며, 레일 체결구의 체결력 및 도상의 저항력이 레일 신축의 구속력으로 작용하여 레일축력을 일으키는

원인이 된다. 레일의 평균 종방향 응력이 0이 될 때의 온도를 중립온도(neutral temperature, T_n)라 정의하여, 레일의 온도가 중립온도보다 높을 때에는 구속력에 의해 레일에 압축력이 작용하여 좌굴 안정성에 대한 검토가 요구되고, 상대적으로 낮을 때에는 인장력이 작용하여 장대레이 용접부에서의 파단 위험성 또는 레일 이음부에서의 개구량 검토가 필요하다.

열차에 의해서 레일에 작용하는 하중에는 수직 하중, 종방향하중 및 횡하중이 있다. 종방향 하중의 경우에는 차량의 시동 및 제동하중을 들 수 있으며, 온도하중과는 달리 짧은 시간에 큰 하중이 레일에 직접 작용하므로 레일의 초기응력 상태에 따라 갑작스런 파단 또는 좌굴이 발생할 위험이 높다.

3. 장대레이 안정성 검토를 위한 해석방법 고찰

장대레이 궤도구조에 발생하는 문제점은 크게 레일의 좌굴과 파단에 대한 문제점으로 나뉘어진다. 이 두 가지 문제점 중에서 레일의 좌굴에 관한 문제가 전체적인 궤도 안정성에 중요한 부분을 차지하며, 레일의 종방향 축력을 검토하는 것도 레일의 축력을 허용한도 이내로 제한함으로써 레일의 좌굴을 방지하는 데에 목적이 있다고 할 수 있다.

교량상 장대레이의 축력을 계산하는 방법에는, 교량상의 레일 이동량과 교량 상판의 이동량이 일치하는 점을 가정하여 레일 신축량과 축력의 연속성으로부터 구성된 연립방정식의 해를 구하는 방법⁷⁾과, 레일과 교량의 전체 구조 시스템을 모형화하여 유한요소해석을 하는 방법^{1),6),8)}이 있다.

전자의 방법은 일반구간의 종방향 저항력 및 교량구간의 종방향 저항력은 일정하다는 것과 주형과 레일의 상대변위는 주형상의 각 체결장치를 통하여 레일에 균등한 축력을 부가한다는 것 등의 기본가정으로부터 연립방정식을 유도하여 해를 구하는 방법이다. 교량형식, 지간, 지점배치 등만 가정하면 다른 세부적인 설계자료 없이도 축력의 근사계산이 가능하므로 예비설계 단계에서 유효하게 사용되는 방법이다. 그러나 도상의 비선형

거동 특성이나 교각 및 지반 등의 강성을 전혀 고려할 수 없으므로 레일 안정성에 관한 검토에 결과를 반영하는 데에는 한계가 있다.

그러나, 후자의 유한요소법에 의한 방법은 레일, 도상 및 교량구조물 등의 구조요소를 각각의 물성치를 반영한 유한요소로 치환하여 전체구조계에 대해서 해석을 수행하는 방법으로서, 장대레이 축력뿐만 아니라 각 요소의 변위 및 교각의 반력 계산 등의 교량의 종방향 거동을 함께 검토할 수 있다는 장점이 있다.

따라서 레일과 교량구조물 간의 상호작용 및 도상의 비선형 특성을 고려하기 위해서는 유한요소 해석법의 적용이 필수적이며 교각강성, 교대강성, 기초강성 등의 교량 하부구조 강성을 정밀하게 결정하는 방안이 요구된다. 독일에서는 토질조사 보고서를 통하여 기초의 정적 및 동적 강성을 결정하고, 교량의 하중 재하위치에 대한 하부구조의 강성을 불리한 방향으로 변화시키면서 레일응력을 검토하고 있다.⁴⁾

4. FEM을 이용한 레일축력 해석

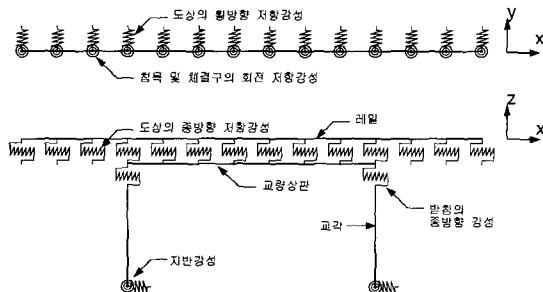
전술한 바와 같이 유도상 궤도구조의 장대레이 축력을 계산하는 데에 있어서는 도상의 비선형 거동특성을 고려함과 동시에 교량구간의 경우에는 하부구조의 강성이 레일축력에 미치는 영향을 고려할 필요가 있다. 이를 위하여 유한요소법을 이용한 해석 프로그램이 각국에서 개발되어 왔으며, 개발 초기에는 자유도를 종방향만으로 국한함으로써 수직방향 또는 횡방향 거동의 영향은 고려하지 못하였으나 최근에는 레일의 후좌굴 거동까지 검토할 수 있는 해석 프로그램이 개발되었다.^{1),9)} 본 장에서는 유한요소해석을 통한 장대레이 축력 해석에서 요구되는 해석모형화 방안, 해석모듈의 구성 및 일반적인 해석흐름을 제시한다.

4.1 해석모형화 방안

궤도구조물을 모형화하는 데에는 공간뼈대요소(또는 보요소)와 스프링 요소를 적용한다. 공간뼈대요소는 레일과 교량상판, 교각 등의 모형화에

표 1 부재별 해석모형화 요소

부재구분	사용요소
Rail	6-DOF Frame
Ballast	6-DOF Bi-linear Spring
Bridge Deck	6-DOF Frame
Bearing	6-DOF Linear Spring
Pier Column	6-DOF Frame
Soil Foundation	6-DOF Linear Spring
Truss	1-DOF Truss

그림 2 레일축력 해석을 위한 해석모델의 구성⁹⁾

적용되며, 스프링요소는 다시 선형 또는 비선형 거동특성을 갖는 요소로 분류하여 도상의 모형화에는 비선형 스프링요소를 적용하고 교량받침이나 지반강성의 모형화에는 선형 스프링요소로 치환한다.

도상은 일정한 변형 수준까지는 탄성적으로 거동하다가 임의의 한계수준(항복변위)을 넘게 되면 외력에 더 이상 저항하지 못하고 일정한 크기의 저항력만을 갖는 bi-linear 스프링 요소로 모델링 한다. 도상에 의한 종방향 저항력은 일반적으로 레일과 교량요소 사이에 bi-linear 스프링 요소가 일정한 간격으로 등분포 되어 있는 것으로 가정 하지만, 더욱 정확한 결과를 얻기 위해서는 침목 간격으로 분산되어 작용하는 것으로 가정하는 것이 바람직하다.

4.2 프로그램 구성 방안 및 해석 알고리즘

4.2.1 전처리 모듈

전처리 과정의 기본 개념은 사용자의 입력을 최소화하고 그래픽 환경에서 해석모델의 확인 및

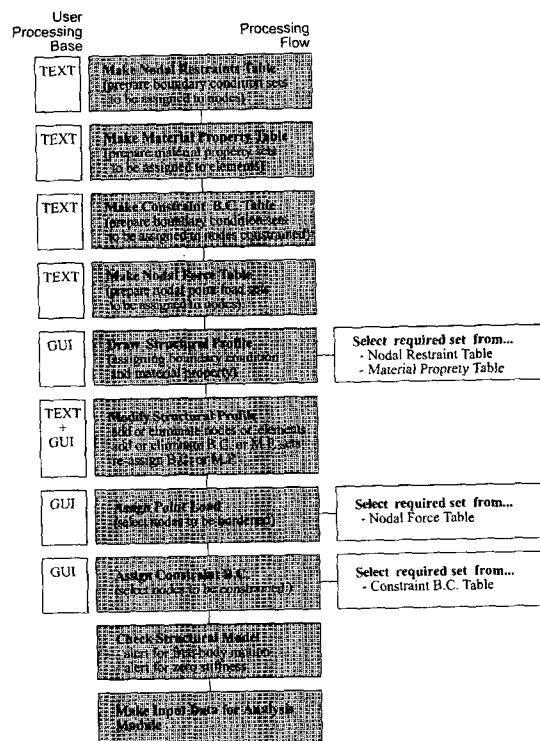


그림 3 전처리 모듈의 흐름도

수정을 가능하도록 하는 것이다. 그러나 완벽하게 그래픽 처리를 통해서만 해석 모형을 구성하는 것에는 번거로움이 있으므로 텍스트기반의 입력작업과 그래픽(Graphic User Interface, GUI)기반의 수정작업을 적절히 병행하므로써 모델링과정을 단순화하였다.(그림 3 참조)

4.2.2 해석 모듈

기존에 개발된 장대레일 축력해석 프로그램의 대부분은 하중 분할에 의한 반복수렴계산으로 해를 구하는 방법을 취하고 있다. 이 해석 알고리즘은 작용하중을 여러 개의 하중단계로 분할하고, 각 하중단계의 시점에서 현재의 기하좌표와 그에 대한 내력을 이용하여 변형된 구조시스템의 기하강도 매트릭스를 구성한다. 각 하중단계의 반복수렴계산(iteration) 과정에서 변위상태에 의해 결정된 기하강도매트릭스를 고려하여 전체 강성도 매트릭스 및 하중벡터를 재구성하면서 구조계의 평형을 만족하는 변위벡터를 결정한다.(그림 4 참조)

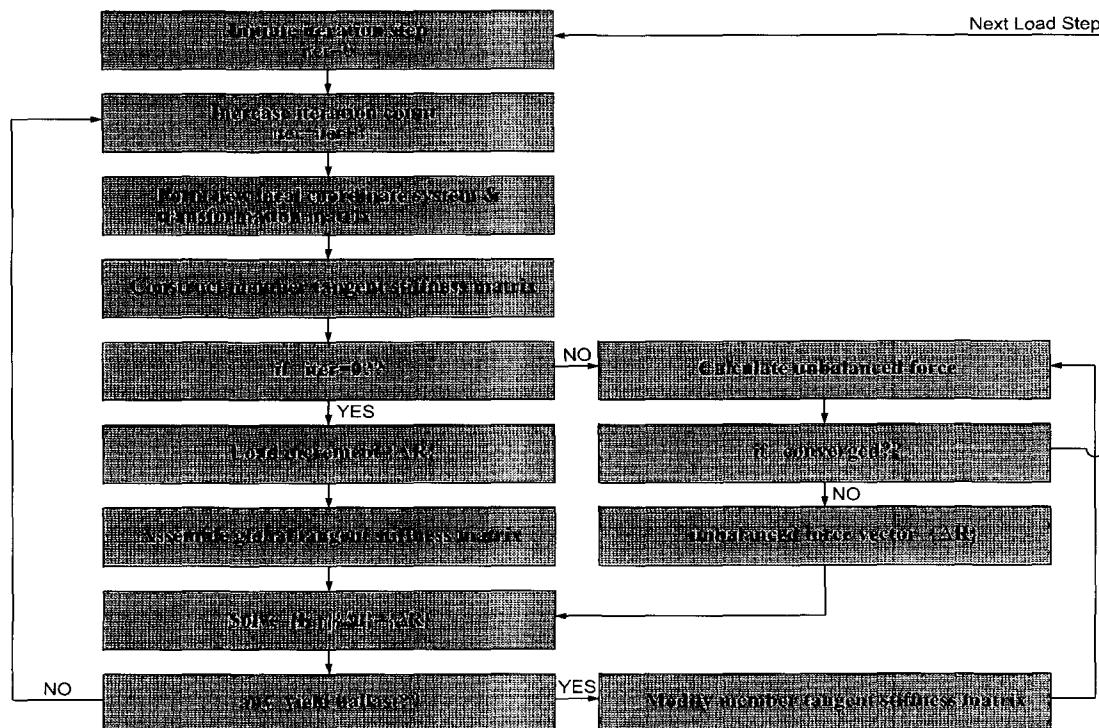


그림 4 수렴해석 흐름도

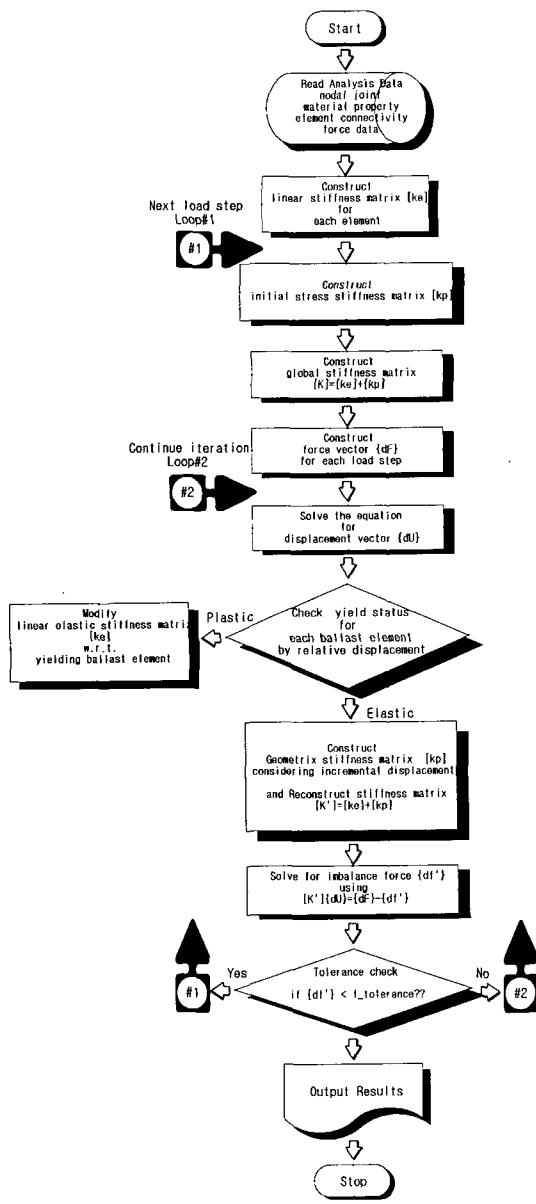
이 해석 알고리즘은 도상의 비선형 거동을 물론이고 레일의 좌굴거동까지 해석할 수 있다. 그림 5에는 본고에서 제안하는 도상의 비선형 거동 및 레일의 횡방향 좌굴거동을 해석하기 위한 알고리즘 (Load-controlled Nonlinear Incremental Solver)의 개략적인 흐름도를 나타내었다. 본 해석 흐름도는 참고문헌 9에서 장대레일 축력해석 프로그램의 개발을 위해 구성한 해석 흐름을 나타낸 것이다.

해석 모듈은 크게 레일의 종방향 거동 해석모듈과 횡방향 좌굴안정 해석모듈의 두 범주로 구성하며, 이 때 고려해야 할 load case는 온도하중만 작용하는 경우, 시동/제동하중이 작용하는 경우, 온도하중과 시동/제동하중이 동시에 작용하는 경우, 수직하중을 고려하는 경우로 나눈다. 기존의 해석 프로그램에서는 대부분이 온도하중과 시동/제동하중이 동시에 작용하는 경우를 고려하지 않으나 레일의 실제적인 거동을 분석하기 위해서는 두 종류의 하중을 동시에 고려하는 것이 바람직하다.

또한 수직하중이 작용함에 따라 교량상판의 휨거동으로 인하여 레일과 교량 간의 상대변위가 발생할 수 있고, 이로 인해 도상의 저항력이 상당히 증가하게 되므로 이를 고려하는 것이 바람직하다.

4.2.3 후처리모듈

후처리 모듈(post-processing module)은 해석결과로부터 출력된 결과를 GUI환경에서 편리하게 분석할 수 있도록 하기 위한 분석도구이다. 해석된 결과는 크게 절점변위, 요소의 부재력, 레일과 구조물간의 상대변위, 도상 요소의 부재력, 레일 및 교량의 종방향 응력 등으로 구성되며 각각의 해석 결과를 시각적으로 확인할 수 있도록 하였다. 해석은 3차원상에서 이루어지므로 해석결과도 절점변위 및 부재력의 경우에는 6자유도에 대한 해석결과를 확인할 수 있다. 도상요소에 있어서는 종방향과 횡방향에 대해서 변위 및 부재력을 확인 가능하다.

그림 5 해석 흐름도⁹⁾

5. 맷음말

교량상 장대레일의 경우에는 온도변화 및 시동/제동하중 등의 외력에 대하여 레일과 교량구조물이 서로 다른 거동을 보이며, 그로 인한 레일의 축력 변화는 복잡한 양상을 보인다. 이 때 간단한 이론식만으로는 신뢰할 만한 축력 계산결과를 얻

기 어려우므로, 유한요소법을 이용한 해석프로그램의 개발이 요구된다.

교량상 장대레일의 축력 검토에서는 도상의 비선형적 재료 특성과 교량 및 지반의 강성을 함께 고려하는 것이 중요한 사항이며, 레일에 추가응력을 유발하는 교량 구조물의 변형은 하부구조의 강성에 의존하므로 교량의 하부구조(교각, 교대 및 기초) 강성의 정밀한 평가가 필수적이다.

본고에서 거론한 레일-교량 상호작용의 영향인자는 레일축력 변화 및 레일 안정성에 직접 영향을 미친다는 점에서 매우 중요한 의미를 가지며, 레일축력 해석을 위한 프로그램 작성시에 반드시 고려해야 할 것으로 생각된다. 또한 본고에서 제시한 레일축력 해석 프로그램의 구성 방안은 레일축력의 정확한 평가를 위한 해석 프로그램의 개발에 응용될 수 있다.

참 고 문 헌

- Van, M.A., *Stability of Continuous Welded Rail Track*, TU-Delft University Press, 1996
- Samavedam, G., "Theory of CWR Track Stability," *Report No. 3, ERRI-D202/RP3, European Rail Research Institute, Utrecht, the Netherland*, 1995
- UIC, "General Principles of Calculating Longitudinal Forces in a Bridge, its bearings and its substructure - Recommendations for a simple case(1st Ed.)", *UIC Code 774-3*, 1995
- Meyer, G. and Ruse, P., "Design System used by the German Federal Railway for Valley Bridges on the New Railway Lines," *Ingenuurbauwerke*, IBW Talbrücken, Nr. 4, 1987, pp.49~81
- Arbab, F., "Effect of Nonlinear Parameters on Stresses in Railroad Tracks", *J. of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 1, 1988, pp.165~183
- Esveld, C., A New Set of Computer Models for Analysing CWR, *Proc. World Congress on Railway Research '97*, ACTES, Florence,

- Italy, Vol. B, 1997, pp. 21~31
7. Flyba, L., Continuous Welded Rail on Railway Bridges, *Proc. World Congress on Railway Research '97*, ACTES, Florence, Italy, Vol. B, 1997, pp. 99~105
8. Ramonde, P., Track/Bridge Interaction, *Proc. World Congress on Railway Research '97*, ACTES, Florence, Italy, Vol. B, 1997, pp. 449~455
9. 한국건설기술연구원, “고속전철 교량/터널구조 및 유지관리 시스템 개발”, 고속전철기술개발 사업 1단계 최종보고서, 1999 