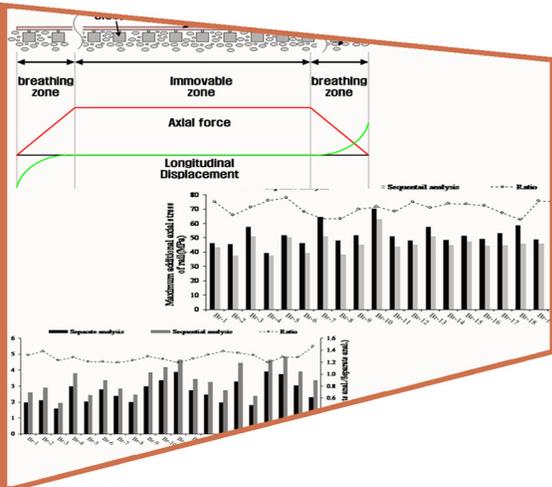


궤도-교량 종방향 상호작용 해석 기법 소개

Introduction of Track-Bridge Longitudinal Interaction Analysis Method



1. 궤도-교량 상호작용

최근 고속철도망의 전국 확대에 따라 궤도 토목 시설물에서의 해결과제가 대두되고 있다. 많은 해결과제 중에서 궤도-교량 상호작용(Track-bridge interaction)은 열차의 주행안전성, 궤도의 안전성 뿐만 아니라 노반구조물에 해당하는 교량의 형식, 지간장, 거더 높이, 교량 받침 등 교량 설계에 지대한 영향을 미친다. 특히 경부고속철도 1단계구간의 고속 본선 선로는 전체 223.6km 연장 중 토공 170개소 57.4km(25.7%), 교량 101개소 88.9km(39.7%), 터널 51개소 77.3km(34.6%)의 비율로 구성되어 있다. 대부분 토공구간인 국외의 시공사례와 달리 하천, 산악 지형이 많은 국내 지형 여건을 고려할 때 궤도-교량 상호작용은 선결되어야 할 핵심 기술로 요구되고 있다.

고속철도는 열차의 안정적인 고속주행을 위하여 궤도의 취약부인 레일 신축이 음매를 제거한 장대레일(Continuous Welded Rail, CWR)을 사용한다. 장대레일은 그림 1과 같이 양단 약 100m이외의 구간에서 온도변동에 따른 레일의 신축이 발생하지 않는 부동구간(Immovable zone)이 발생한다. 부동구간에서는 온도변동 시 레일의 자유팽창 및 수축이 구속되므로 레일의 길이방향으로 과도한 축력이 발생하므로, 설계 및 운영시 레일에 발생하는 축력에 주의하여야 한다.

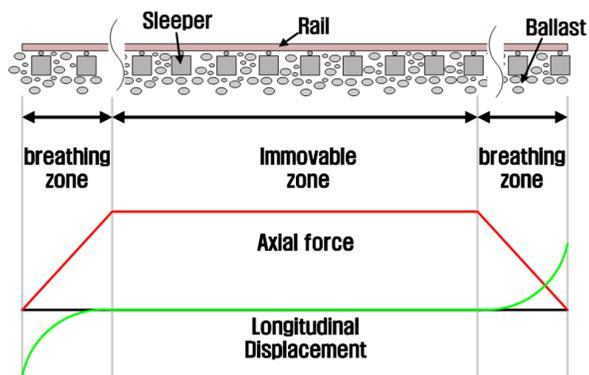


그림 1 장대레일의 축력, 변위 선도

교량상 장대레일 부설 시 교량의 거더(girder)는 온도변화에 따른 신축이 발생하며 장대레일의 부동구간이 교량 거더 상부에 놓이는 경우 거더는 신축이 가능



윤 경 민

충남대학교 철도연구소 박사후 연구원



이 경 찬

철도기술연구원 고속철도연구본부 선임연구원



배 현 응

충남대학교 철도연구소 박사후 연구원



민 경 환

충남대학교 철도연구소 연구교수



임 남 형

충남대학교 토목공학과 교수

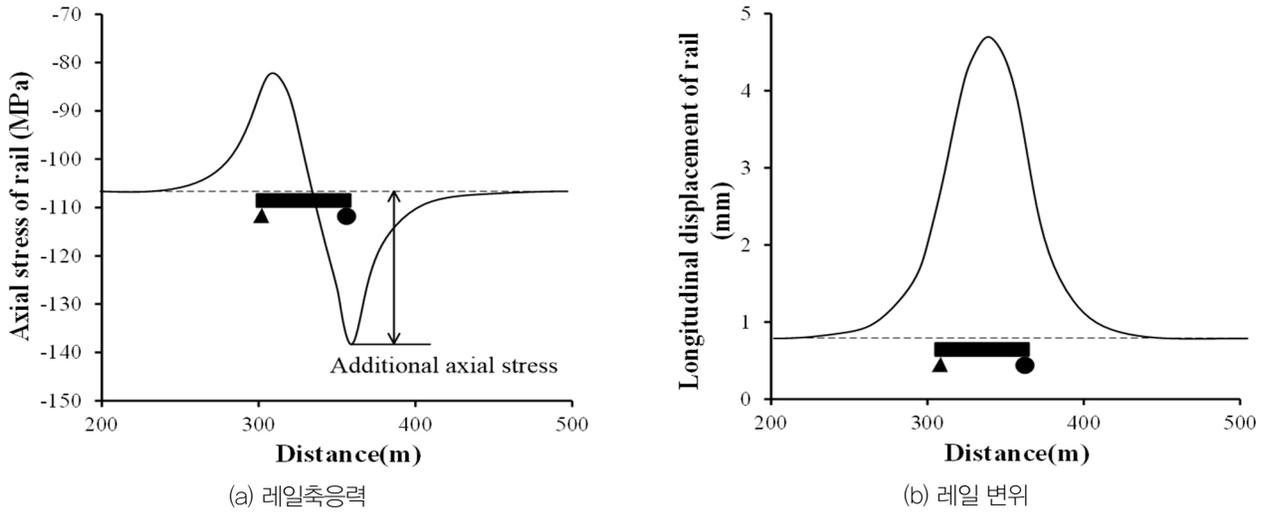


그림 2 궤도-교량 상호작용에 의한 레일축응력 및 레일 변위

하나 레일은 부동상태이므로 거더의 신축량 만큼 레일 내부에 추가응력이 발생하게 된다. 이와 같은 궤도-교량 상호작용 현상은 교량상 궤도에 레일신축이음매, 분기기 등이 존재하는 경우에도 발생하며, 자갈도상궤도 뿐만 아니라 콘크리트 도상궤도에서도 발생하게 된다. 궤도-교량 상호작용은 온도변화 및 열차하중과 같은 각종 외력이 작용 시 발생하며, 이로 인해서 발생하는 물리적인 현상은 그림 2와 같이 레일에 발생하는 부가적인 응력, 교량 거더의 변위, 교량 거더와 레일의 상대변위 등이 있다.

이상과 같은 궤도-교량 상호작용에 의해 발생하는 각종 물리적인 현상을 해석하고 제한하기 위해서 국내에서는 교량 상 궤도 설계 시 한국철도시설공단 지침 KR C-08080(궤

도-교량 종방향 상호작용 해석)¹⁾을 운영하고 있다. 유럽의 UIC 774-3R2)을 참고하여 작성된 KR C-08080은 보수적인 해석방법과 물성치를 적용하여 제시되고 있다.

2. 궤도-교량 상호작용 해석

2.1 모형화

궤도-교량 종방향 상호작용 해석을 위한 모형화 시 교량 받침 배열, 상부구조 및 교각의 제원 및 물성치, 상부구조의 휨강성 및 높이, 상부구조의 중립축위치, 기초의 수평 및 휨강성 등의 구조물 파라메타를 고려해야 한다. 그리고

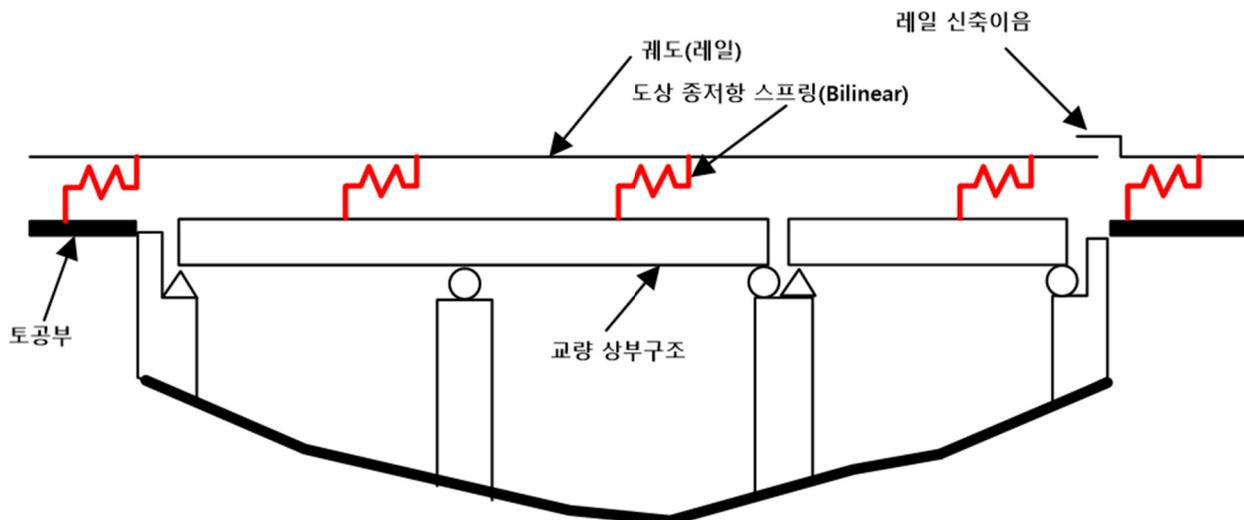


그림 3 궤도-교량 상호작용 모델의 구성

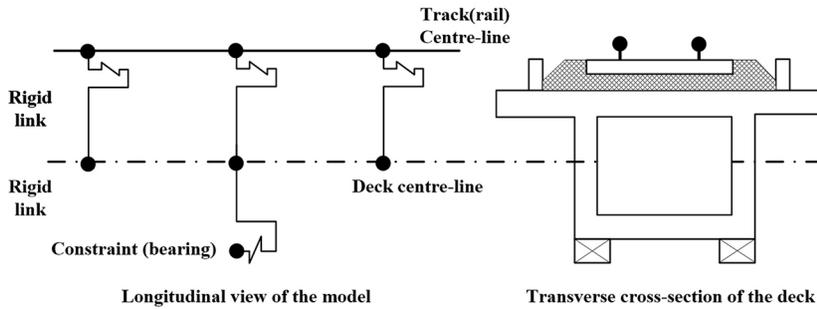


그림 4 레일과 교량 상부구조, 상부구조와 교량받침의 연결

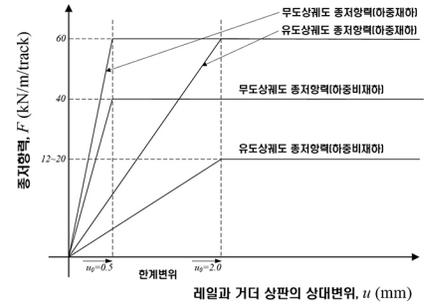


그림 5 궤도 유형 및 열차하중 재하상태별 하중-변위 선도

레일 단면적, 궤도의 종방향 저항력 등 궤도의 파라메타를 고려해야 한다(그림 3). 궤도, 교량 상부구조 및 교량받침의 실제 높이에 대한 영향을 고려할 수 있도록 레일과 교량 상부구조, 상부구조와 교량받침의 연결은 높이를 고려한 강체요소(Rigid Link)로 모형화 한다. 이때 단순화를 위하여 레일의 높이는 교량 상부구조 상부면과 일치하는 것으로 간주할 수 있다(그림 4).

궤도-교량 상호작용 해석 시 사용되는 궤도 종방향 저항력은 궤도 및 하중 조건에 따라서 그림 5의 값을 사용하되 궤도 및 하중조건이 특별히 다르다고 판단되는 경우 국내 한국철도시설공단 승인을 얻어 별도의 값을 사용할 수 있다.

지 하중(온도하중, 차량의 시제동하중, 차량 수직하중)을 적용한다.

2.3 해석 방법

국외 UIC 774-3R의 경우 교량의 구조설계와 중요도에 따라 두 가지 해석방법(Separate analysis, Complete analysis)을 제시하고 있다. 국내의 경우 해석 시 전자인 개별해석법(Separate analysis)을 하도록 제시가 되어있으나 최근 다양한 연구를 통하여 Complete analysis(이하 순차해석, Sequential analysis)를 적용하고자 하는 연구가 진행되고 있다.

2.2 하중

궤도-교량 상호작용 해석 시 하중은 그림 6과 같이 3가

1) 개별해석법(Separate Analysis Method)

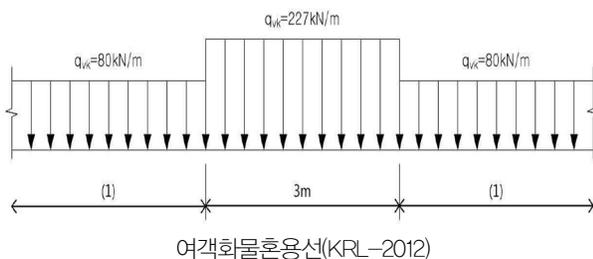
개별해석법은 궤도-교량 종방향 상호작용을 유발하는 온도하중, 차량의 수직하중과 시/제동하중에 의한 응답이 독

구분		온도	
레일	온도상한	+ 40 °C	
	온도하한	- 50 °C	
구조물	콘크리트구조	±25 °C	
	강구조	보통인 지방	±35 °C
		한랭한 지방	±45 °C

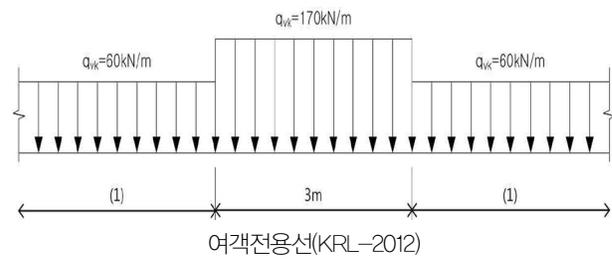
(a) 온도하중

구분	하중	재하길이
시동하중	화물혼용	33 kN/m/tr
	여객전용	25 kN/m/tr
제동하중	화물혼용	20 kN/m/tr
	여객전용	15 kN/m/tr

(b) 시·제동하중



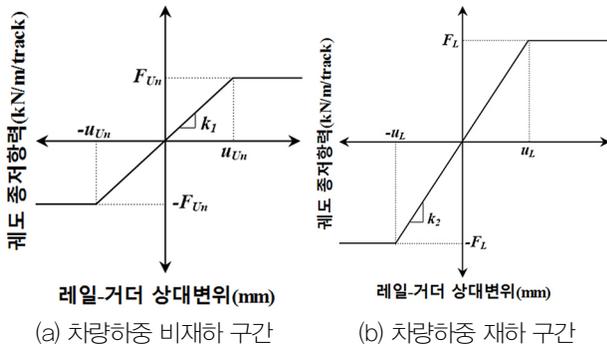
여객화물혼용선(KRL-2012)



여객전용선(KRL-2012)

(c) 열차 수직하중

그림 6 설계하중

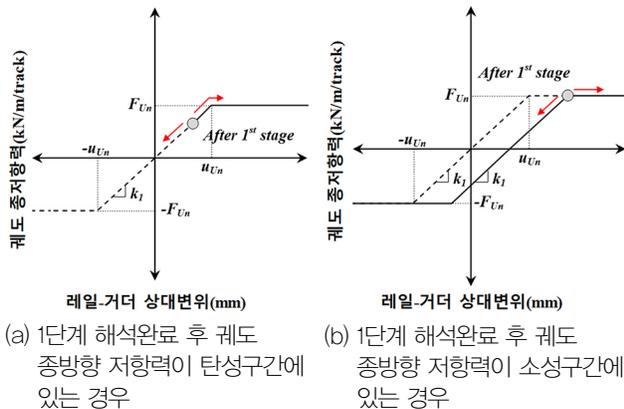


(a) 차량하중 비재하 구간 (b) 차량하중 재하 구간
그림 7 궤도 종방향 저항력의 하중-변위 선도(개별해석)

립적인 것으로 가정하여, 재하 순서에 상관없이 각 하중의 응답을 중첩하여 전체 응답을 산출하는 방법이다. 현재 KR C-08080에서 제시하고 있는 방법으로 해석이 간단하지만 도상 종방향 저항력의 비선형 거동에 따른 오차를 포함하고 있다. 부가 레일 응력(RS)은 다음과 같이 각 하중에 대한 응답을 중첩하여 산정한다.

$$RS_{\text{개별해석}} = RS(\text{온도하중}) + RS(\text{시·제동하중}) + RS(\text{열차수직하중})$$

온도하중에 대한 응답은 수직하중(차량하중) 비재하 시의 하중-변위 선도(그림 7 (a))를 사용한다. 차량하중(시·제동하중, 열차 수직하중)에 대한 응답은 차량하중의 재하 위치에 따라 수직하중 비재하 시의 하중-변위 선도과 수직하중 재하 시의 하중-변위 선도를 모두 사용한다(그림 7). 여기서 F_{U_n}, u_{U_n}, k_1 은 각각 수직하중 비재하 시 궤도의 종방향 저항력, 탄성한계변위, 초기강성이며, F_L, u_L, k_2 는 각각 수직하중 재하 시 궤도의 종방향 저항력, 탄성한계변위, 초기강성이다.



(a) 1단계 해석완료 후 궤도 종방향 저항력이 탄성구간에 있는 경우 (b) 1단계 해석완료 후 궤도 종방향 저항력이 소성구간에 있는 경우

그림 8 궤도 종방향 저항력의 하중-변위 선도 (순차해석 2단계, 차량하중 비재하구간)

2) 순차해석법(Sequential Analysis Method)

부가 레일 응력은 궤도-교량 종방향 상호작용을 유발하는 온도하중, 차량의 수직하중과 시/제동하중의 순차성 및 상관성을 고려하는 것으로, 온도하중에 의한 궤도 및 교량 구조물의 응답 상태를 초기조건으로 하고 차량하중(수직하중, 시/제동하중)을 재하하여 전체 응답을 산출하는 방법이다.

부가축응력 산정 시 단계별 해석(온도하중에 의해 발생된 궤도 종방향 저항력의 변화가 차량하중 재하 시 초기저항력 상태로 고려되는 2단계 해석)을 사용하여 산정한다.

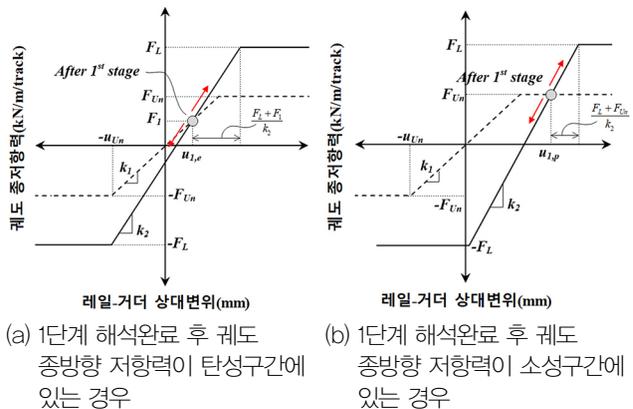
- ① 1단계 해석 : 차량하중이 재하되기 전에 장기적으로 고려되는 온도하중만을 고려한 해석 단계이다.
- ② 2단계 해석 : 1단계 해석으로부터 변경된 응답을 초기조건으로 고려하여 차량하중을 재하하는 해석 단계이다.

$$RS_{\text{순차해석}} = RS(1\text{단계 : 온도하중} \rightarrow 2\text{단계 : 차량하중})$$

1단계 해석(온도하중에 대한 응답)은 수직하중 비재하 시의 하중-변위 선도(그림 7(a))를 사용한다. 2단계 해석은 차량하중(시·제동하중, 열차 수직하중)의 재하 위치와 1단계 해석에 의한 궤도 종방향 저항력의 변화에 따라 그림 8, 그림 9와 같은 선도를 선별하여 사용한다. 그림 9에서 $F_{1,e}, u_{1,e}$ 는 각각 1단계 해석 후 궤도 종방향 저항력이 탄성범위 내에 있는 경우의 저항력, 변위이며, $u_{1,p}$ 는 종방향 저항력이 소성범위에 도달한 경우의 변위이다.

3. 해석방법에 따른 영향

3.1 대상교량



(a) 1단계 해석완료 후 궤도 종방향 저항력이 탄성구간에 있는 경우 (b) 1단계 해석완료 후 궤도 종방향 저항력이 소성구간에 있는 경우

그림 9 궤도 종방향 저항력의 하중-변위 선도 (순차해석 2단계, 차량하중 재하구간)

단선, 자갈궤도용으로 설계된 20개 교량을 대상으로 해석방법에 따른 영향을 분석하였다. 궤도-교량 종방향 상호작용 해석을 위하여 위에서 언급된 2가지 해석이 적용 가능한 범용 유한요소해석 프로그램인 LUSAS Ver.15.0을 사용하였다. 자갈궤도(Ballast track)의 종방향 저항선도는 그림 5와 같이 고려하였으며, 하중은 온도하중, 시·제동하중, 열차 수직하중을 다양한 위치를 고려하여 가장 불리한 결과가 발생하는 위치에 재하하였다.

3.2 해석 결과

부가축응력 및 시제동하중 작용 시 궤도-교량 상대변위에 대하여 해석 기법에 따른 결과를 분석하였다. 해석기법에 따라 발생하는 최대 응력, 상대변위 및 변화비(Ratio, Separate/Sequential)는 그림 10과 같다.

4. 맺음말

현대 철도는 승차감 개선과 고속주행을 위하여 장대레일(CWR)을 사용하며, 교량 상 부설된 장대레일 궤도는 온도 변화와 차량하중에 의한 궤도-교량 상호작용 효과가 발생한다. 궤도-교량 종방향 상호작용 해석 시 고려되는 하중에 대한 특성을 고려했을 때 장기하중인 온도가 재하된 상태에서 단기하중인 차량하중이 재하되므로 하중의 순차를 고려하는 순차해석(Sequential analysis)이 더욱 합리적인 해석 방법으로 판단된다. 최근 궤도-교량 상호작용에 의한 궤도 및 교량의 응답을 정확하게 예측하기 위하여 해석적 연구뿐만 아니라, 실내 실험, 현장계측과 관한 연구가 수행되고 있다. 또한 궤도-교량 상호작용을 근본적으로 저감하기 위한 대안으로 콘크리트 궤도 슬래브 하면과 교량 바닥 상판 사이에 저마찰층을 형성한 궤도 시스템인 슬라이딩 궤도가

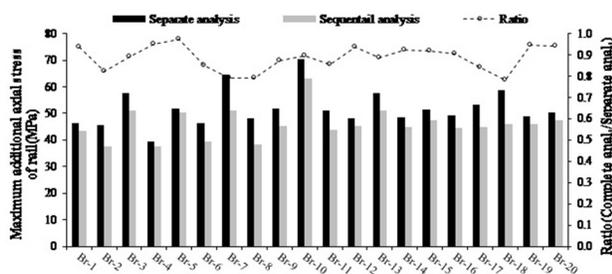
개발 되는 등 기술개발도 완성단계에 있다. 앞으로 지속적인 연구를 통하여 궤도 안정성이 확보된 상태에서 교량상 장대레일 부설 시 설계자유도 증진이 이뤄져야 할 것이며, 연구결과가 설계 시 반영될 수 있도록 제도적인 차원에서 움직임도 활발히 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

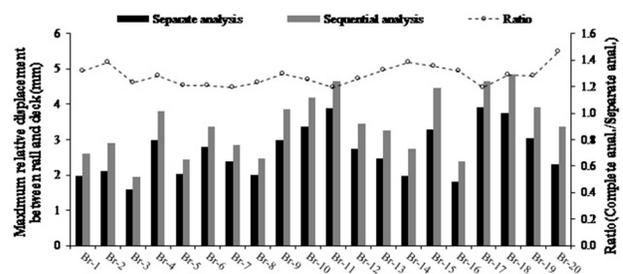
본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원(17RTRP-B067919-05)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Korea Rail Network Authority. KR C-08080: Track-Bridge Longitudinal Interaction Analysis (in Korean), KR 2014.
2. UIC CODE 774-3R. Track/bridge Interaction Recommendations for Calculations. UIC 2001; Paris; France.
3. Yun KM, Choi JY, Lee JO and Lim NH. Modification of the conventional method for the track-bridge interaction. Applied Mechanics and Materials 2012; Vol.204-208; 1988-1991.
4. Lusas Inc., LUSAS User's manual, Surrey, KT1 1HN, UK, 2006.
5. LIM NH, LEE KC, LEE JH and Youn SG, Reduction technology of track-bridge interaction to enhancing the application of railway bridges with longer continuous span, Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government, 2017. 



(a) 레일 부가축응력



(b) 레일-교량 상대변위

그림 10 해석방법에 따른 응답차이