

장대레일 부가축력 및 변위 검토를 위한 설계차트 개발(II) - 일반철도 교량 설계차트

Development of Design Chart for Investigating an Additional Rail Stress and Displacement on CWR(II) - Design Chart for Railway Bridge of Conventional Line

최일윤[†] · 임윤식* · 양신추** · 최진유***

Il-Yoon Choi · Yun-Sik Lim · Sin-Chu Yang · Jin-Yu Choi

Abstract Displacement of the bridge and additional rail stress due to interaction between track and bridge should be limited to the design criteria. Interaction analysis was conducted to investigate the displacement and additional rail stress on CWR in railway bridge of conventional line. Particularly, various parameters affecting interaction phenomena were taken into account in the analysis to enhance an applicability. These parameters included configuration of structure, stiffness of deck and support, steel/concrete bridge, ballast/concrete track and FM/MFM type etc. The results were presented in the form of the design chart which could be useful in preliminary design of the bridge.

Keywords : CWR, Interaction, Additional rail stress

요 지 장대레일이 교량구간에 설치되면, 궤도와 교량의 상호작용에 의하여 부가축력과 변위가 발생하게 되므로 설계단계에서 장대레일의 부가축력 및 변위 검토가 필요하다. 본 논문에서는 장대레일 상호작용에 영향을 미치는 주요 인자들을 변수로 종방향 상호작용해석을 수행하였으며, 교량설계단계에서 장대레일 부가축력 및 변위 검토를 간단히 수행할 수 있도록 설계차트로 정리하였다. 본 논문에 제시된 설계차트는 일반철도 교량에 대한 결과로써, 강교량 및 콘크리트 교량, 자갈궤도 및 콘크리트궤도, 단순교(FM방식) 및 연속교(MFM방식)에 대하여 하부강성 및 상부강성별 설계차트로 구분하여 제시되었다.

주요어 : 장대레일, 상호작용, 부가축력

1. 서론

고속철도 교량구간에 장대레일을 부설하기 위해서는 교량-궤도 상호작용에 의한 장대레일의 부가축력 및 변위에 대한 안정성을 검토하여야 한다. 국외의 기준[1,2]에 따르면 장대레일 부가축력 및 변위와 관련하여 선로의 속도에 대한 규정은 명시되어 있지 않다. 장대레일의 안정성 검토는 부가응력에 의한 레일의 파단 및 좌굴, 그리고

교량의 과도한 변위발생에 따른 도상의 이완에 대한 안정성을 확보하기 위함이다. 따라서, 고속철도뿐만 아니라 일반철도에서도 장대레일 부설시에는 궤도-교량 종방향 상호작용을 고려한 장대레일의 부가축력 및 변위 검토가 요구된다.

본 논문에서는 고속철도 교량의 장대레일 부가축력 및 변위 검토 설계차트[3] 개발과 동일한 방법으로 일반철도 교량에 대한 설계차트를 개발하였다. 작용하중을 제외한 해석모델, 도상저항력, 해석시 고려된 매개변수 등은 고속철도 경우와 동일하게 설정하여 종방향 상호작용해석을 수행하였다.[3]

[†] 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 차륜궤도연구실, 선임연구원
E-mail : jychoi@krti.re.kr

TEL : (031)460-5347 FAX : (031)460-5814

* 한국철도기술연구원, 차륜궤도연구실, 연구원

** 한국철도기술연구원, 차륜궤도연구실, 수석연구원

*** 한국철도기술연구원, 차륜궤도연구실, 선임연구원

2. 해석모델 및 해석시나리오

일반철도의 궤도/교량의 종방향 상호작용해석에서 고속철도와의 차이점은 작용하중에 있다. 온도하중은 교량의 재료와 관련이 있으므로 고속철도와 일반철도의 별도 구분은 없다. 시제동하중 및 수직하중은 일반철도와 고속철도의 값이 상이하므로 일반철도의 부가응력 및 변위 검토에서는 다음과 같은 값을 이용하여 상호작용해석을 수행하였다.

시제동하중은

- ① 시동하중 : 24kN/m/궤도, 재하길이 30m 이하
- ② 제동하중 : 12kN/m/궤도, 재하길이 300m 이하

수직하중은 다음 Fig. 1과 같이 설계하중을 재하하였으며, 충격계수는 고려하지 않았다.

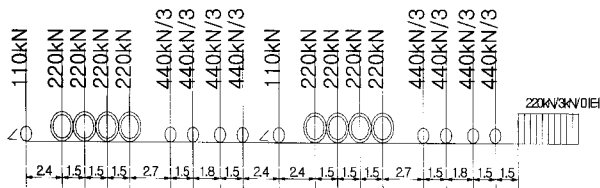


Fig. 1. Vertical load

수직하중에 의한 부가축력 및 변위는 상부강성(EI) 즉 상판의 휨강성에 따라 달라지며, 일반적으로 경간의 길이에 따라 단면의 크기를 다르게 설계하므로 다음 Table 1과 매개변수를 설정하였다. 등가하부강성($K_0=1.423 \times 10^9 \text{N/m}$)은 교각의 휨강성, 기초의 회전강성 및 기초의 수평이동강성을 고려한 등가강성을 의미한다. 자세한 사항은 참고문헌 [1,3,5]을 참조하기 바란다.

Table 1. Flexural rigidity and neutral axis position of the deck

경간길이 (m)	휨강성(EI) ($\text{kN} \cdot \text{m}^2$)	자갈궤도		콘크리트궤도	
		중립축-상연거리 (m)	거더높이 (m)	중립축-상연거리 (m)	거더높이 (m)
20	4.158E+07	1.0	2.7	-	-
25	7.636E+07	1.27	3.5	1.27	3.5
30	1.261E+08	1.10	3.5	1.27	3.5
35	1.936E+08	-	-	1.27	3.5
40	2.814E+08	1.20	3.5	1.27	3.5
50	5.285E+08	1.40	4.1	1.27	3.5
60	8.888E+08	1.60	4.5	1.27	3.5
70	1.384E+09	1.80	5.0	-	-
80	2.034E+09	1.90	5.5	-	-
90	2.861E+09	2.10	6.0	-	-

해석에 이용된 매개변수 및 해석시나리오 등 기타 다른 조건은 참고문헌[3]의 고속철도 설계차트의 경우와 동일하므로 본 논문에서는 지면관계상 생략하였다.

3. 장대레일 부가축력 및 변위 검토 설계차트

궤도/교량 종방향 상호작용 해석결과를 도상형식에 따라 자갈궤도와 콘크리트궤도, 지지조건에 따라 FM방식과 MFM방식, 교량 종류에 따라 강교량과 콘크리트 교량으로 구분하여 설계차트로 정리하였다.

3.1 일반철도_자갈궤도 설계차트

3.1.1 FM방식 단순교

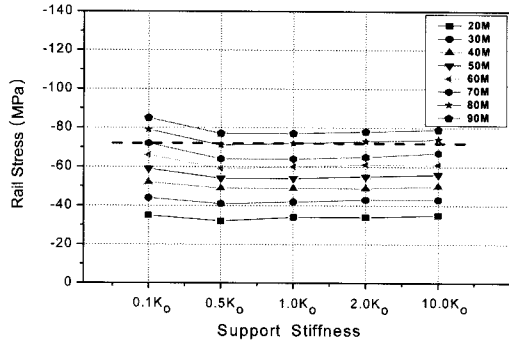
일반철도 자갈궤도를 갖는 단순교 FM방식에 대한 설계차트를 Fig. 2~5에 나타내었다. 이는 경간의 연속배치의 수가 10개인 경우에 대한 해석결과를 정리한 것이다.

Fig. 2과 3은 상부구조 형식이 각각 콘크리트 교량 및 강교량의 부가축력을 나타내고 있다. 여기서, 범례의 값은 경간길이를 의미하며, X축은 등가하부강성, Y축은 레일 부가응력으로써 온도하중, 시제동하중 및 수직하중에 의한 레일 부가응력의 합계를 의미한다. 여기서, 레일 부가응력을 합산하는 방법은 앞서 언급한 바와 같이 온도하중에 의한 레일 부가응력이 최대가 되는 위치의 온도하중, 시제동하중 및 수직하중에 의한 부가축력을 합산한 값을 의미한다. 그림에 나타난 굵은 점선은 관련 기준에 명시되어 있는 허용한계치를 의미한다.

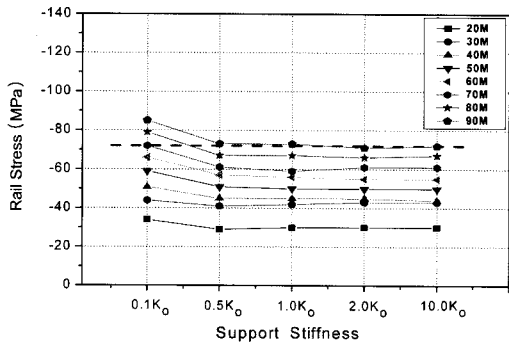
콘크리트교량의 자갈궤도형식의 결과를 나타낸 Fig. 2 (a), (b), (c)는 상부강성이 각각 1.0EI, 1.5EI, 2.0EI인 경우이다.

Fig. 2의 설계차트로부터 일반철도 자갈궤도를 갖는 단순교 FM방식의 콘크리트 교량은 상부강성이 1.5EI 이상인 경우에는 장대레일 축력 측면에서는 경간길이가 약 90m까지 부설이 가능함을 알 수 있다.

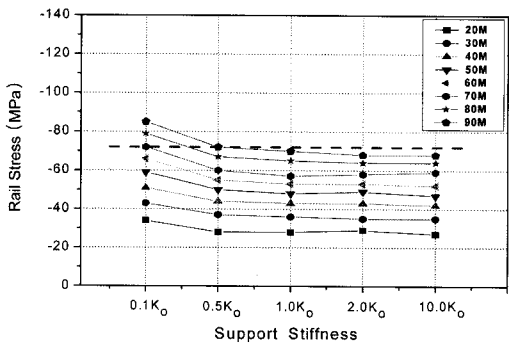
우선 하부강성의 영향을 살펴보면, 하부강성이 0.5Ko 이상에서는 하부강성이 증가하여도 부가축력 축력의 값은 거의 일정함을 알 수 있다. 이는 일반철도 교량에서는 하부강성이 0.5Ko 이상에서는 하부강성 증가가 장대레일 축력의 저감의 효과가 거의 없음을 의미한다. 즉, 90m의 경우를 살펴보면, 하부강성을 0.5Ko에서 10Ko로 증가시키면, 총 부가응력은 상부강성 1.0EI에서 오히려 3.8% 증가하고 상부강성 1.5EI와 2.0EI에서 각각 약 1%, 5% 감소하는 현상이 나타났다.



(a) Flexural rigidity of the deck_1.0EI



(b) Flexural rigidity of the deck_1.5EI



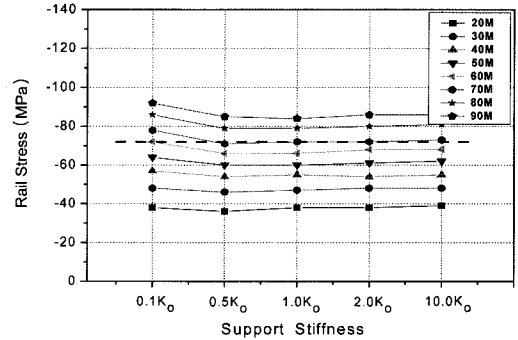
(c) Flexural rigidity of the deck_2.0EI

Fig. 2. Additional rail stress of the FM type in concrete bridge with ballast track

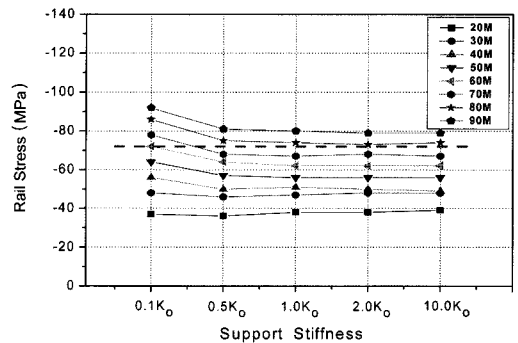
상부강성의 영향을 보면, 90m의 경우에 상부강성을 1.0EI에서 2.0EI로 증가시키면 총 부가응력은 하부강성 0.5K₀에서 약 6%, 10K₀에서 약 14% 정도 감소함을 알 수 있다. 상부강성의 증가에 따라 수직하중에 의한 부가응력이 약 50%정도 감소하지만, 총 부가응력에서 온도하중에 의한 부가응력의 비율이 약 60~70%정도로 큰 비율을 차지하고 있어서 상부강성 증가에 따른 효과가 비교적 크지 않음을 알 수 있다.

강교량 자갈궤도형식의 결과를 나타낸 Fig. 3을 살펴보면, Fig. 2의 콘크리트 교량의 경우와 유사한 경향을 보이고 있다. 온도하중에 의한 부가응력이 콘크리트교량 대비 약 17%정도 증가하였으며, 총 부가응력은 약 11%정도 증가하였다. 장대레일 부가응력 측면에서는 강교량 FM방식

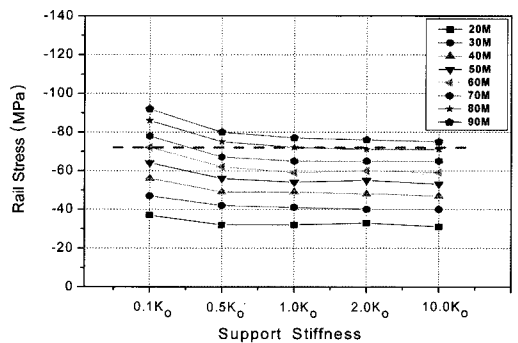
의 경우 약 70~80m 정도까지 부설 가능함을 알 수 있다.



(a) Flexural rigidity of the deck_1.0EI



(b) Flexural rigidity of the deck_1.5EI



(c) Flexural rigidity of the deck_2.0EI

Fig. 3. Additional rail stress of the FM type in steel bridge with ballast track

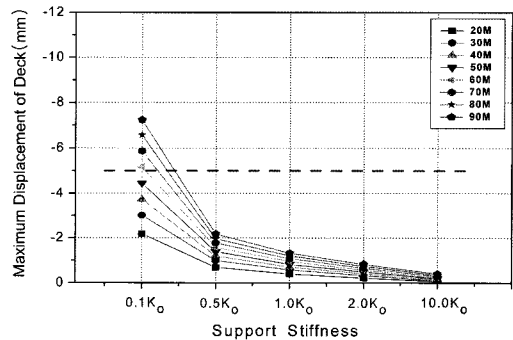


Fig. 4. Displacement of the FM type with ballast track due to traction and braking

한편, Fig. 4에 시제동하중에 의한 교량 상판사이의 변위 해석결과를 나타내었다. 하부강성에 매우 민감한 경향을 나타내며, 경간길이 약 60m 이하에서는 하부강성이 0.1K₀이상의 값을 가지면 허용변위를 만족하고 있으며, 60m 이상의 경간에서는 변위 안정성 확보를 위해서 요구되는 최소 하부강성은 약 0.1~0.3K₀가 되어야 함을 알 수 있다.

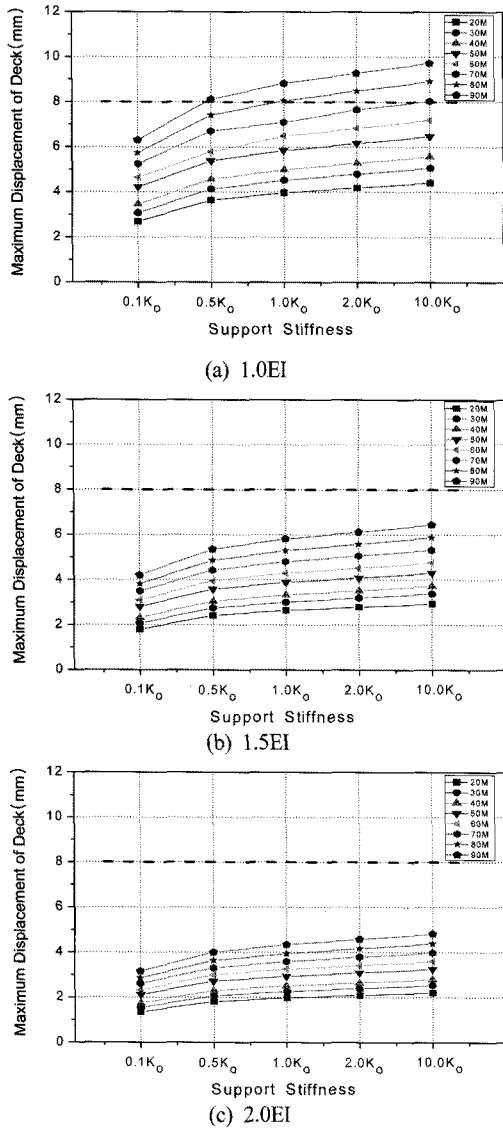


Fig. 5. Longitudinal displ. of the FM type with ballast track due to vertical action

수직하중에 의한 교량상판 상단사이의 종방향 변위를 나타낸 Fig. 5로부터, 변위는 상부강성의 영향이 지배적이나, 하부강성의 영향도 동시에 받고 있음을 알 수 있다. 특히, 하부강성이 증가할 수록 종방향 변위가 증가한다는 사실에 유의하여 교량설계를 하여야 할 것으로 판단된다. 상부강

성이 1.5EI 이상이 되면, 검토된 해석시나리오에서는 모두 변위에 대한 허용기준을 만족하였다. 또한, 상부강성이 1.0EI 인 경우에도 경간길이 70m까지는 변위에 대한 안정성을 확보하고 있음을 알 수 있다.

3.1.2 MFM방식 연속교

일반철도 자갈궤도를 갖는 2경간 연속교 MFM방식에 대한 설계차트를 Fig. 6~9에 나타내었다. 여기서, 범례의 값은 경간길이를 나타내며, 고정점간 거리는 범례값의 2배가 된다. 즉, 범례에서 50m의 값은 고정점간거리가 100m인 2@50m 교량이 10개 반복배치된 경우를 의미한다.

Fig. 6과 7은 축력해석결과이며, Fig. 8과 9는 시제동하중 및 수직하중에 의한 변위해석결과이다.

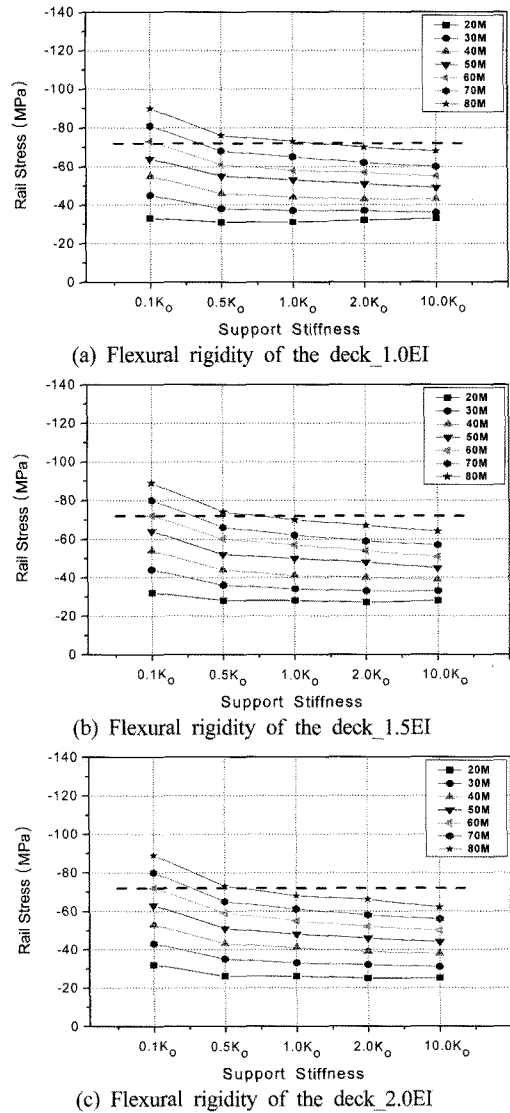


Fig. 6. Additional rail stress of the MFM type in concrete bridge with ballast track

콘크리트교량의 자갈궤도 도상의 축력해석결과를 나타낸 Fig. 6에서 상부강성 1.5EI인 경우에는 하부강성이 0.5K_o 이상이면 경간의 길이가 약 80m까지 부가축력이 허용기준 72MPa 이하가 됨을 알 수 있다.

강교량의 결과를 나타낸 Fig. 7을 보면, Fig. 6의 콘크리트 교량과 유사한 경향을 보이고 있다. 콘크리트교량의 결과와 비교해 보면, 강교량에서의 온도하중에 의한 부가응력은 1MPa 내외의 차이를 보이고 있어서 총 부가응력의 값의 차이값은 약 2% 미만으로 콘크리트 교량의 결과와 거의 동일한 값을 보였다. 따라서, MFM방식의 교량에서는 콘크리트교량과 강교량의 부가응력 검토 설계차트를 동일한 것으로 사용하여도 무방할 것으로 판단된다.

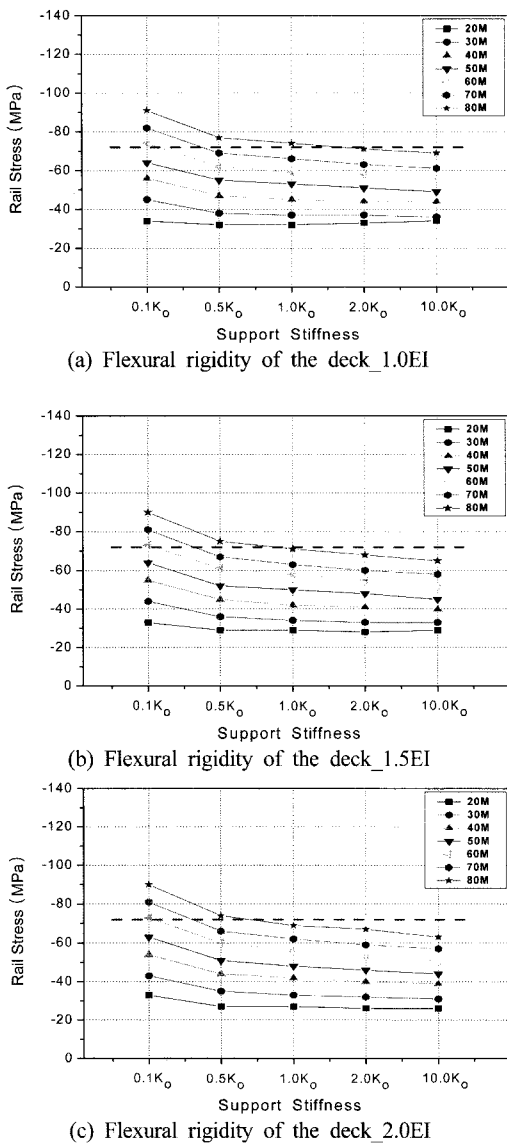


Fig. 7. Additional rail stress of the MFM type in steel bridge with ballast track

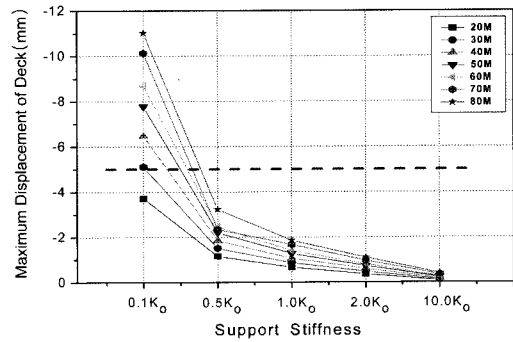


Fig. 8. Displacement of the MFM type with ballast track due to traction and braking

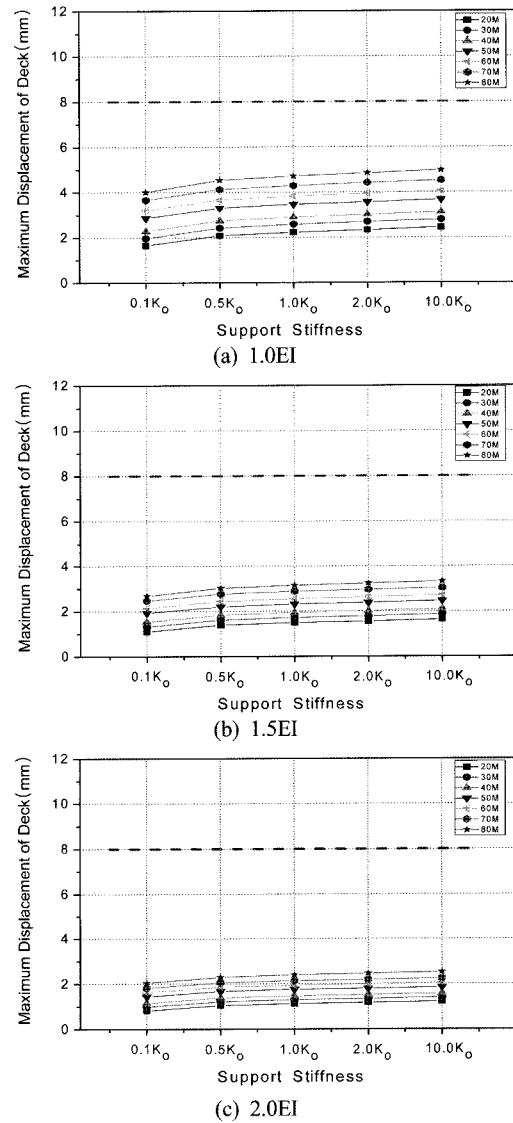


Fig. 9. Longitudinal displ. of the MFM type with ballast track due to vertical action

일반철도 MFM방식의 연속교에 대한 시제동하중에 의한 변위 검토결과를 나타낸 Fig. 8을 살펴보면, 시제동하중

에 의한 종방향 변위는 하부강성이 0.5K₀ 이상에서는 경간 길이 80m(2@80m)까지 변위허용기준을 모두 만족하였다. 경간길이 30m 이상의 경우에는 최소 하부강성은 약 0.1K₀ ~ 0.4K₀이 되어야 시제동하중에 의한 변위 안정성 기준을 만족함을 알 수 있다.

또한, 수직하중에 의한 종방향 변위는 검토대상의 해석시나리오에서 하부강성과 관계없이 모두 허용기준을 만족하였다. 또한, FM방식(Fig. 5) 보다 수직하중에 의한 종방향 변위가 작은 것은 단순보 FM형식 보다 2경간 연속교에서 열차하중에 의한 처짐이 작게 발생하기 때문이다.

3.2 일반철도_콘크리트궤도 설계차트

본 절에서는 일반철도 교량에 콘크리트궤도를 부설하는 경우에 대한 장대레일 축력안전성 검토결과를 수록하였다. 콘크리트 궤도에서는 장대레일 안정성 검토를 위한 별도의 변위제한규정이 없으며, 장대레일 부가축력의 허용 압축응력은 92MPa로써 자갈궤도(72MPa) 보다 크다.

3.2.1 FM방식 단순교

일반철도 콘크리트궤도를 갖는 단순교 FM방식에 대한 설계차트를 Fig. 10 및 11에 나타내었다.

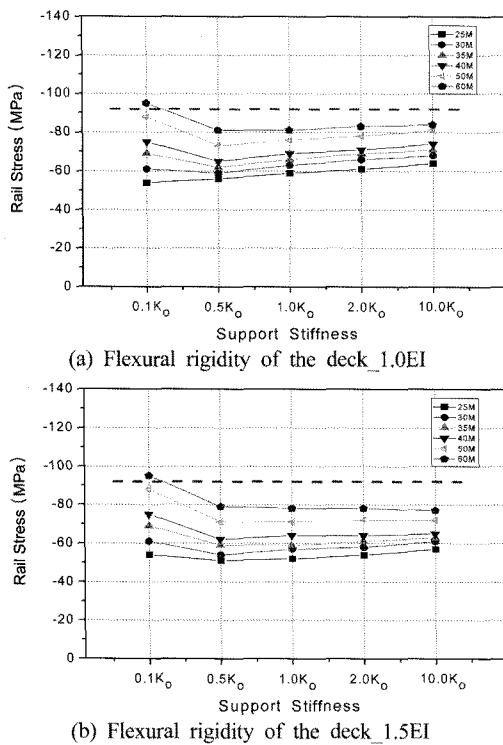
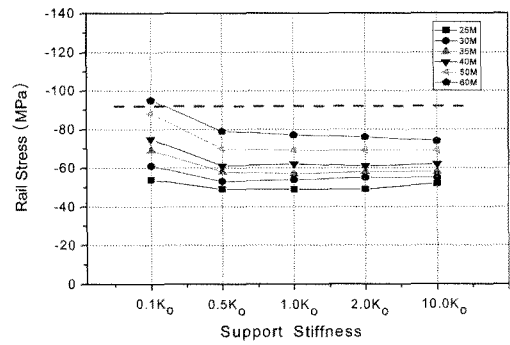
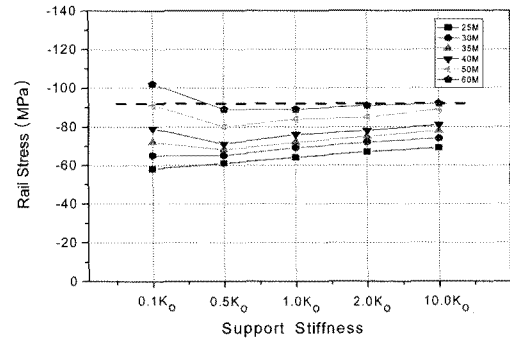


Fig. 10. Additional rail stress of the FM type in concrete bridge with concrete track (Continued)

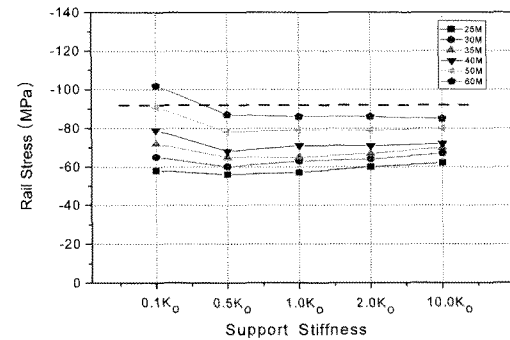


(c) Flexural rigidity of the deck_2.0EI

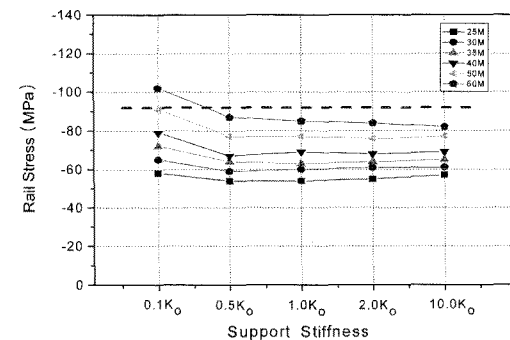
Fig. 10. Additional rail stress of the FM type in concrete bridge with concrete track



(a) Flexural rigidity of the deck_1.0EI



(b) Flexural rigidity of the deck_1.5EI



(c) Flexural rigidity of the deck_2.0EI

Fig. 11. Additional rail stress of the FM type in steel bridge with concrete track

상부구조 형식이 콘크리트 교량인 Fig. 10에서 하부강성이 0.5K₀ 이상인 경우에는 경간의 길이가 약 60m까지는

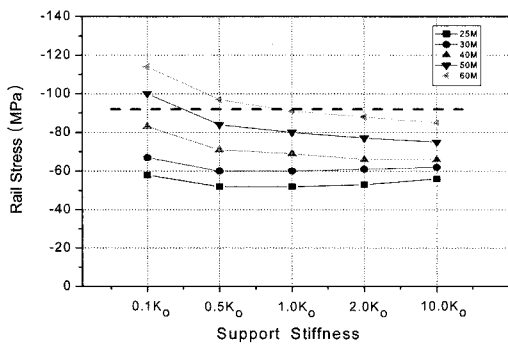
교량설계가 가능함을 알 수 있다. Fig. 11의 강교량의 경우에도 경간길이 60m까지는 하부강성이 0.5K₀ 이상이 되면 허용기준을 만족하였다. 콘크리트교량과 비교하여 강교량 경우, 온도하중에 의한 응력은 약 15% 증가하였고 총 부가응력은 약 10%정도 증가하였다.

한편, Fig. 10(a)와 1(1a)에서 하부강성이 0.5K₀ 이상인 경우에는 하부강성 증가에 따라 부가축력이 다소 증가하는 현상이 발생하고 있는데, 이는 하부강성 증가에 따른 시제동하중에 의한 응력의 감소량 보다 수직하중에 의한 응력 증가량이 더 크기 때문에 발생하는 현상이다. 따라서, 콘크리트도상 FM방식 단순교에서는 최소 하부강성이상으로 증가시켜도 장대레일 부가축력 측면에서는 특별한 장점이 없음을 감안하여 설계하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

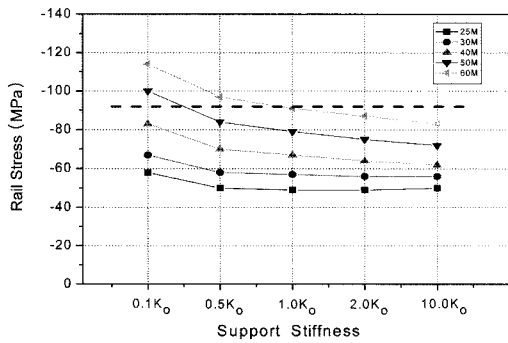
3.2.2 MFM방식 연속교

일반철도 콘크리트궤도를 갖는 MFM방식의 부가축력에 대한 설계차트를 Fig. 12 및 13에 나타내었다.

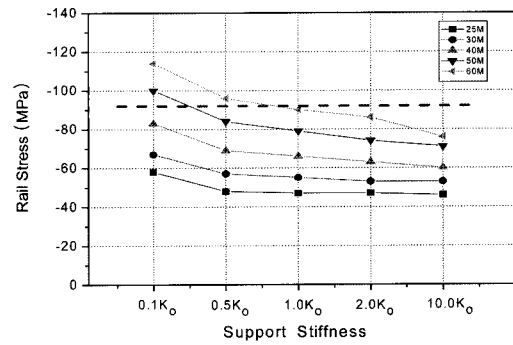
MFM방식에서 콘크리트 교량과 강교량의 부가축력은 거의 유사한 값을 나타내었다. 경간길이 약 50m, 즉 2@50m의 교량이 연속적으로 배치되는 경우에는 부가축력은 허용기준을 만족하였다. 한편, 이 형식의 교량에서는 상부강성에 따른 장대레일의 부가축력의 저감효과는 비교적 크지 않음을 알 수 있다.



(a) Flexural rigidity of the deck_1.0EI

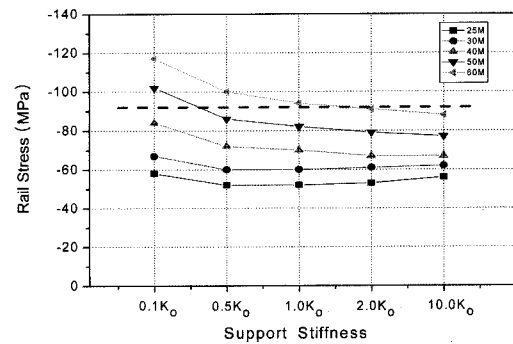


(b) Flexural rigidity of the deck_1.5EI

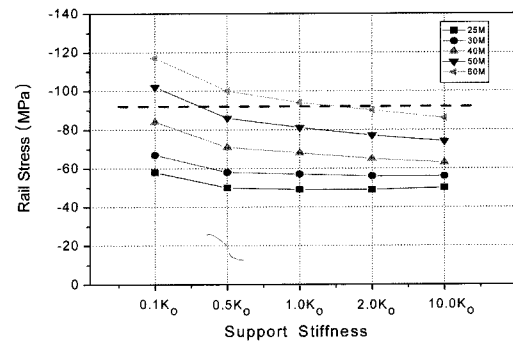


(c) Flexural rigidity of the deck_2.0EI

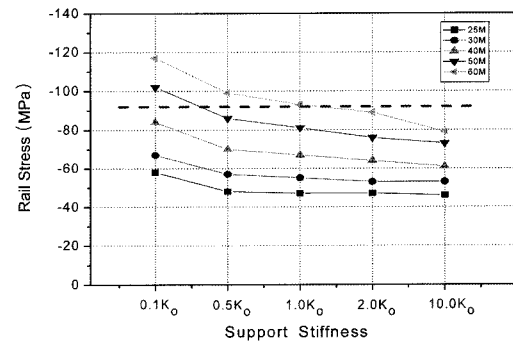
Fig. 12. Additional rail stress of the MFM type in concrete bridge with concrete track



(a) Flexural rigidity of the deck_1.0EI



(b) Flexural rigidity of the deck_1.5EI



(c) Flexural rigidity of the deck_2.0EI

Fig. 13. Additional rail stress of the MFM type in steel bridge with concrete track

Fig. 12. Additional rail stress of the MFM type in concrete bridge with concrete track (Continued)

4. 결론

교량형식, 도상형식, 경간길이, 지지조건, 하부강성 및 상부강성 등의 여러 가지 영향인자를 고려하여 일반철도 교량에 장대레일이 부설되는 경우에 대한 장대레일의 부가축력과 변위에 대한 안정성 검토를 위한 설계차트를 제시하였다.

일반철도의 경우, 고속철도와 동일한 방법 및 절차에 따라 해석을 수행하였으나, 수직하중 및 시제동하중이 고속철도의 경우보다 다소 작으므로 고속철도 교량보다 다소 장대레일 부가축력 및 변위가 다소 작게 나타났다. 한편, MFM 방식의 경우에는 강교량 및 콘크리트교량의 부가축력이 거의 동일한 값을 보였다.

본 논문에서 제시된 일반철도교량에 대한 종방향상호작용검토 설계차트의 실무적용절차와 방법은 고속철도의 경우와 동일하며, 개발된 설계차트의 실무적용에 관해서는 참고문헌[5]에 실무적용예제 및 활용방법이 상세히 기술되어 있다. 본 논문에서 교량상부구조형식은 박스거더교를 대상으로 하였으나, 박스거더교의 온도신축거동과 유사한 경우에는 트러스, 빔거더, 아치교의 형식에도 제시된 설계차트의 활용이 가능하다.

마지막으로, 본 논문에서 제시된 결과는 일정한 교량형식이 반복 배치되는 것으로 가정하였기 때문에 실제의 조건보다는 다소 안전측의 결과를 제시하고 있다. 따라서, 설계차트를 이용한 검토결과에서 허용기준을 초과하는 경우에도 하부강성 및 교량배치 등을 정확하게 반영하여 종방향 상호작용해석을 수행한 결과가 허용기준 이내가 되면 해당 형식의 교량 부설이 가능함을 유의하여야 한다.

참고문헌

1. UIC Code 774-3R, 2001.
2. Eurocode 1 (Part 2), 2003, pp. 97-108.
3. 최일윤, 조현철, 양신추, 최진유, 유진영(2009), "장대레일 부가축력 및 변위 검토를 위한 설계차트 개발(I)," 2009 한국철도학회 논문집.
4. 한국철도기술연구원(2007), "콘크리트궤도 인터페이스 성능향상에 대한 연구."
5. 한국철도시설공단(2008), "교량상 장대레일 축력저감 및 궤도 안정성 향상방안 연구."

접수일(2009년 4월 23일), 수정일(2009년 5월 21일),
게재확정일(2009년 8월 7일)