

장대레일 부가축력 및 변위 검토를 위한 설계차트 개발(I) - 고속철도 교량 설계차트

Development of Design Chart for Investigating an Additional Rail Stress and Displacement on CWR(I) - Design Chart for High Speed Railway Bridge

최일윤[†] · 조현철* · 양신추** · 최진유*** · 유진영****

Il-Yoon Choi · Hyun-Cheol Cho · Sin-Chu Yang · Jin-Yu Choi · Jin-Young Yu

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 high speed railway bridge. 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 고속철도 교량에 대한 결과로서, 강교량 및 콘크리트 교량, 자갈궤도 및 콘크리트궤도, 단순교(FM방식) 및 연속교(MFM방식)에 대하여 하부강성 및 상부강성별 설계차트로 구분하여 제시되었다.

주 요 어 : 장대레일, 상호작용, 부가축력

1. 서 론

레일 용접을 통한 장대레일의 부설은 진동 및 소음 저감, 궤도재료 손상감소와 승차감 향상 등의 장점 때문에 장대레일 부설이 일반화 되고 있으나, 교량에 설치되는 장대레일은 교량 상판의 온도신축, 열차의 시제동하중 및 수직하중에 의해 부가축력 및 변위가 발생하게 된다. 따라서, 교

량설계 단계에서 궤도/교량 종방향 상호작용해석을 통한 부가축력 및 변위에 대한 안정성을 검토하여야 한다. 그러나, 장대레일 부가축력 및 변위 검토가 다소 복잡하여 교량 기술자가 교량의 기본설계단계에서 다양한 형식의 교량을 검토하는데 어려움이 있었다. 본 연구에서는 교량기술자가 철도교량의 부가축력 및 변위에 대한 안정성 검토를 간단하게 수행할 수 있도록 설계차트를 제시하였다. 설계차트 개발을 약 7,000개의 경우에 대하여 궤도/교량 종방향 상호작용해석을 수행하였으며, 본 논문에서는 고속철도 교량설계를 위한 장대레일 부가축력 및 변위검토 설계차트를 상부구조형식(콘크리트교량/강교량) 및 도상종류(자갈궤도/콘크리트궤도)로 구분하여 제시하였다.

[†] 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원, 차륜궤도연구실, 선임연구원
E-mail : iychoi@krii.re.kr

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

* 한국철도기술연구원, 차륜궤도연구실, 연구원

** 한국철도기술연구원, 차륜궤도연구실, 수석연구원

*** 한국철도기술연구원, 차륜궤도연구실, 선임연구원

**** 한국철도시설공단, 영남본부, 차장

2. 해석모델 및 해석시나리오

2.1 해석모델

궤도/교량의 종방향 상호작용해석은 다음 Fig. 1과 같은 해석모델을 적용한 장대레일 부가축력 및 변위해석 전용프로그램인 CWRAP[1]를 사용하여 수행하였으며, 토공구간은 교량 시중점 교대부로부터 400m까지 모델링하였다.

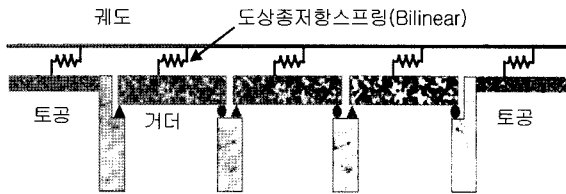


Fig. 1. Structural diagram for the evaluation of track-bridge interaction effects

한편, 자갈궤도와 콘크리트궤도의 도상 종방향 저항력은 다음 Fig. 2와 같이 고려하여 해석을 수행하였다.[2-5]

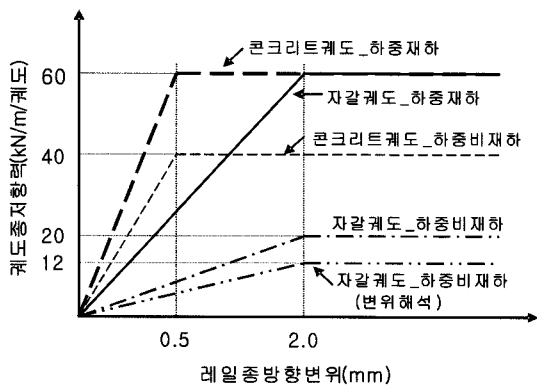


Fig. 2. Resistance of the track as a function of the longitudinal displacement of rail

2.2 해석시나리오

궤도/교량의 종방향 상호작용에 영향을 미치는 요인으로는 교량의 정적배열(교좌장치, 경간길이, 고정점간거리, 경간의 연속배치 등)과 하부강성, 상판강성 및 궤도의 강성 등이 있으며, 작용하중은 온도하중, 시제동하중 및 수직하중 등을 고려하여야 한다. 설계차트 개발을 위하여 관련 기준 및 연구결과[2-4]에 따라, 교좌장치 배치조건, 교량의 연속배치, 경간길이, 하부강성, 상부강성 등을 매개변수로 하여 다양한 형식의 교량에 대한 종방향 상호작용해석을 수행하였으며 해석시 고려한 매개변수를 Table 1에 나타내었다. 또한, 해석시 고려한 경간길이별 상판의 휨강성 및 중립축 위치는 Table 2에 나타내었다. 교좌장치의 높이는 고려하지 않았으며, 거더높이는 교좌장치에서 레일까지의 높

이를 의미한다. 거더의 단부는 교좌장치에 위치하고, 이동단의 마찰은 고려하지 않았다.

Table 1. Parameters in analysis

구분	해석 매개변수
하부강성 ^{주1)}	0.1K ₀ , 0.5K ₀ , 1.0K ₀ , 2.0K ₀ , 10K ₀
상부강성 ^{주2)}	1.0EI, 1.5EI, 2.0EI
경간길이 ^{주3)}	20~90m
지지조건 ^{주4)}	단순교 : FM, MFFM, FFFF, FMMF 연속교 : FMM, MFM
경간의 연속배치수	1, 4, 6, 8, 10
궤도형식	자갈궤도, 콘크리트궤도
교량형식	강교량, 콘크리트교량

- 주) 1. 등가하부강성(K₀)=1.423×10⁹N/m(참고문헌[6] 참조)
 2. 상판휨강성(EI) : HL하중 복선재하시 L/1700 처짐이 발생하는 휨강성(Table 2 참조)
 3. 궤도형식별 경간길이 : Table 2 참조
 4. 지지조건 : Fig. 3 참조

Table 2. Flexural rigidity and neutral axis position of the deck

경간길이 (m)	휨강성(EI) (kN*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	-	-

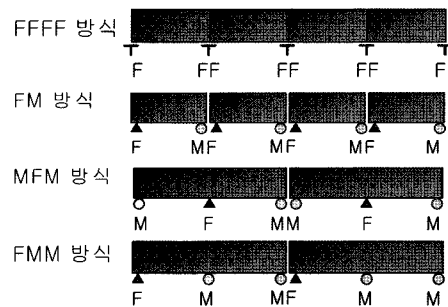


Fig. 3. Outline of the static arrangements

본 연구에서는 설계차트로써의 활용성을 높이기 위

하여 가능한 많은 경우의 수에 대하여 궤도-교량 종방향 상호작용해석을 수행하고자 하였으나, 실제 교량 설계에서 발생가능한 모든 조건을 고려하는 것은 불가능하기 때문에 다음과 같이 몇 가지 전제조건을 도입하였다.

① 교량구간내에서 하부구조 강성은 일정한 것으로 가정

실제 교량에서는 교각의 높이, 기초조건 등에 따라 하부구조의 강성이 인접 교각과 동일하지 않게 되지만, 본 연구에서는 하부구조 강성은 교량 시점에서 종점부까지 일정한 것으로 가정하였다. 다만, 하부강성의 값은 Table 1에 나타난 바와 같이 5가지의 경우를 가정하였다.

② 상부구조의 강성 및 경간길이는 일정한 것으로 가정.

하부구조와 마찬가지로 교량상판의 강성과 길이는 교량 시점에 종점부까지 일정하게 반복 배치되는 것으로 가정하였다.

개발된 설계차트를 이용하여 실제 교량설계시 장대레일 축력/변위 검토를 수행할 때에는 해석과정에서 부득이하게 도입된 상기의 두 가지 가정을 유념하여 검토하여야 한다. 즉, 설계하고자 하는 교량 구간내에서 하부강성 및 상부구조 배치조건을 감안하여 장대레일 축력/변위에 가장 불리한 조건을 산정하여 설계차트에서 안전측의 검토가 될 수 있도록 하여야 한다.

본 연구에서 제시된 설계차트는 레일신축이음장치(REJ)가 부설되지 않은 조건에서 적용 가능함을 유의하여야 한다.

2.3 작용하중 및 재하방법

궤도-교량 종방향상호작용 해석에서 재하되는 하중은 온도하중, 시제동하중 및 수직하중으로 구분된다.

온도하중은 교량상판에 온도에 따라 신축하여 레일에 부가축력 및 변위를 유발하는 하중을 의미하며, 강교 35°C, 콘크리트 교량 25°C의 하중을 재하하였다.

시제동하중은

- ① 시동하중 : 33kN/m/궤도, 재하길이 30m 이하
- ② 제동하중 : 20kN/m/궤도, 재하길이 400m 이하

수직하중은 다음 Fig. 4의 설계하중과 경간중앙부에 동일한 처짐을 발생시키는 등가등분포 하중으로 환산된 하중을 재하하였으며, 충격계수는 고려하지 않았다[3].

부가축력해석에서 하중의 재하위치는 온도하중해석을 수행한 후, 온도하중에 의한 최대 부가축력 발생 위치에

서 시제동하중에 의한 부가축력이 최대가 되도록 시제동하중을 재하하였다. 수직하중은 온도하중에 의한 최대 부가축력 발생 위치의 인접경간에 재하하였으며, 시제동하중이 경간의 일부에만 재하되는 경우에도 해당 경간 전체에 하중을 재하하여 안전측의 해석을 수행하였다 [3].

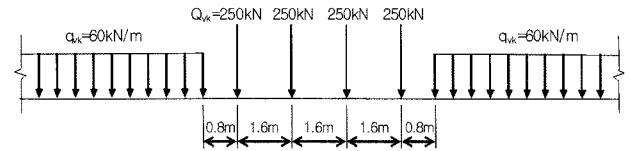
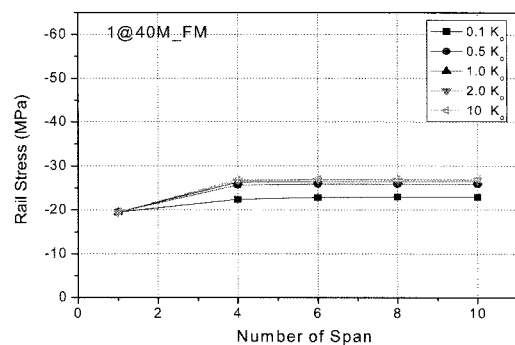


Fig. 4. Vertical load

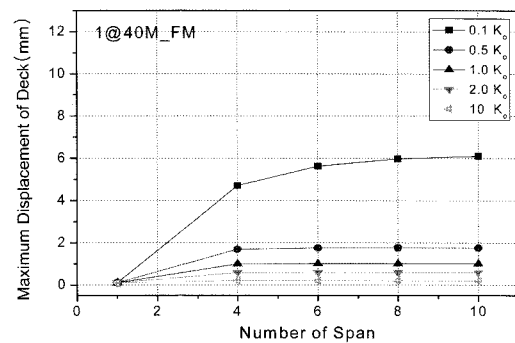
3. 종방향 상호작용해석 결과

궤도/교량 종방향 상호작용해석 결과에 대한 분석결과 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

첫째, 경간의 연속배치의 효과(Fig. 5)를 살펴보면, 경간의 연속배치의 수가 증가하면 장대레일의 부가축력/변위는 증가하다가 약 6-10경간 정도에서 일정한 값으로 수렴함을 알 수 있었다. 따라서, 본 연구에서 제시된 설계차트는 교량형식이 10개 반복배치되는 결과에 대하여 정리하였다.



(a) Rail stress due to thermal effect



(b) Displacement due to traction and braking

Fig. 5. Effect of the number of span

둘째, 하부강성이 증가할수록 온도하중에 의한 부가축력은 증가하나, 시제동하중에 의한 변위는 감소함을 Fig. 5에서 확인할 수 있다. 또한, 시제동하중에 의한 변위는 하부강성에 매우 민감함을 알 수 있다.

4. 장대레일 부가축력 및 변위 검토 설계차트

궤도/교량 종방향 상호작용 해석을 통한 지지조건 형식별 축력 및 변위는 참고문헌[6]에 상세히 수록되어 있다. 표 1의 지지조건에 따른 부가축력 및 변위 분포 특성은 단순교에서는 FM방식이 MFFM방식과 FMMF방식 보다 유리하고, 연속교에서는 MFM방식이 FMM방식보다 유리함을 알 수 있었다.

본 논문에서는 지면관계상 장대레일 축력 및 변위 측면에서 유리한 형식인 FM방식과 MFM방식에 대한 설계차트에 대해 기술하였다.

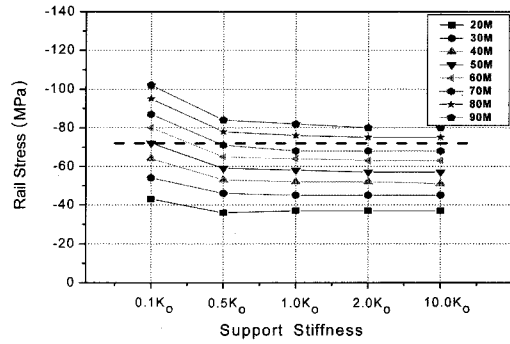
4.1 고속철도 자갈궤도 설계차트

4.1.1 FM방식 단순교

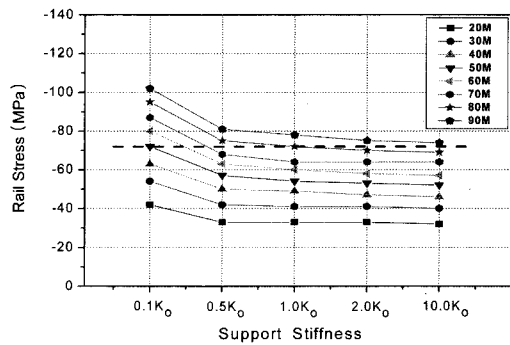
고속철도 자갈궤도를 갖는 단순교 FM방식에 대한 설계차트를 Fig. 6~9에 나타내었다. 이는 경간의 연속배치의 수가 10개인 경우에 대한 해석결과를 정리한 것이다.

Fig. 6과 7은 상부구조 형식이 각각 콘크리트 교량 및 강교량에 해당하며, 상부강성에 따라 구분하여 나타내었다. Fig. 6과 7에서 X축은 하부강성을 의미하며, Y축은 레일 부가응력을 의미한다. 여기서, 레일부가응력은 온도하중, 시제동하중 및 수직하중에 의한 레일부가응력의 합계를 의미한다. 레일부가응력을 합산하는 방법은 앞서 언급한 바와 같이 온도하중에 의한 레일부가응력이 최대가 되는 위치의 온도하중, 시제동하중 및 수직하중에 의한 부가축력을 합산한 값을 의미한다. 그림에 나타난 굵은 점선은 관련 기준에 명시되어 있는 허용한계치를 의미한다.

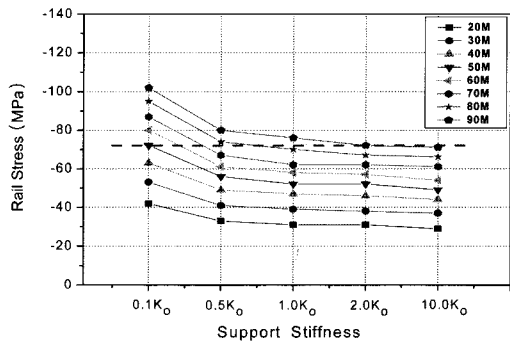
콘크리트교량의 자갈궤도형식의 결과를 나타낸 Fig. 6 (a), (b), (c)는 상부강성이 각각 1.0EI, 1.5EI, 2.0EI인 경우이다. Fig. 6(a)의 상부강성 1.0EI인 경우에는 하부강성이 0.5K_o 이상이면 경간의 길이가 70m까지 허용기준 72MPa 이내가 됨을 알 수 있다. 상부강성을 증가시키면 총 부가응력이 감소되며, Fig. 6(c)의 상부강성 2.0EI의 경우에는 하부강성이 약 0.5K_o 이상이면 FM방식의 경간길이가 80m가 되는 경우에도 장대레일 부가축력은 허용기준이내가 됨을 알 수 있다. 상부강성을 1.0EI에서 2.0EI로 2배 증가시키면, 총 레일부가응력은 약 6~20% 정도 감소하였다.



(a) Flexural rigidity of the deck_1.0EI

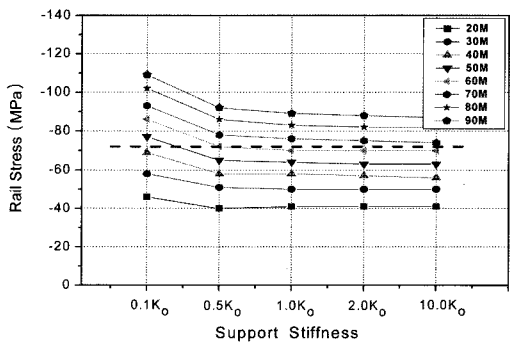


(b) Flexural rigidity of the deck_1.5EI



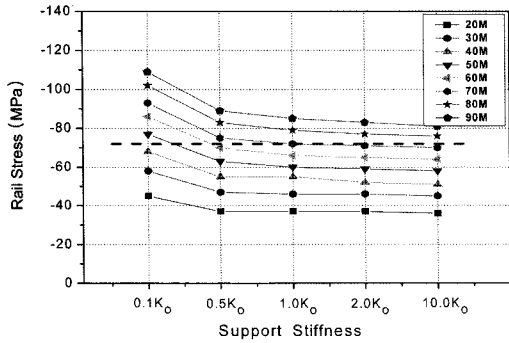
(c) Flexural rigidity of the deck_2.0EI

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

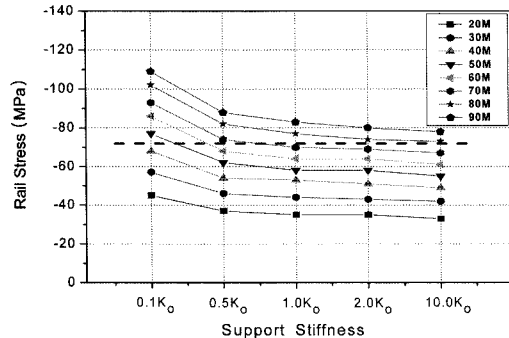


(a) Flexural rigidity of the deck_1.0EI

Fig. 7. Additional rail stress of the FM type in steel bridge with ballast track (Continued)



(b) Flexural rigidity of the deck 1.5EI



(c) Flexural rigidity of the deck 2.0EI

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

교량 자갈궤도형식의 결과를 나타낸 Fig. 7을 살펴보면, 하부강성이 약 0.5K₀ 이상에서는 상부강성 1.0EI, 1.5EI, 2.0EI에서 각각 약 55m, 60m, 65m 경간길이까지는 장대레일 부가축력 허용기준을 만족함을 알 수 있다.

한편, 자갈궤도에서는 장대레일의 종방향 신축에 따른 자갈의 이완을 방지하기 위해 허용기준을 두고 있으므로, 자갈궤도의 장대레일에서는 시제동하중 및 수직하중에 의한 종방향 변위를 검토하여야 한다. 설계차트 개발을 위하여 수행한 변위해석 결과를 다음 Fig. 8과 9에 정리하였다.

시제동하중에 의한 교량상판사이의 종방향 변위는 교량상판의 강성 및 교량 종류와는 관련이 없으며, Fig. 8에 나타낸 바와 같이 하부강성에 매우 민감함을 알 수 있다. 경간길이 40m 교량의 경우, 하부강성이 0.1K₀에서는 5.3mm의 값을 갖으나, 하부강성이 0.5K₀에서는 1.7mm로 급격하게 감소하였다. Fig. 8로부터 자갈궤도 장대레일 부설을 위해서는 종방향 변위 허용기준 5mm를 만족하여야 하므로 FM 방식의 지지조건을 갖는 교량길이별 최소 하부강성을 구할 수 있다.

수직하중에 의한 교량상판 상단사이의 종방향 변위는 상부강성의 영향이 지배적이나, 하부강성이 증가할수록 다소 증가하는 특성을 나타냈다. Fig. 9에 나타낸 바와 같이 상부강성이 1.5EI이상인 경우에서는 허용기준 8mm를 모두 만족하고 있음을 알 수 있다.

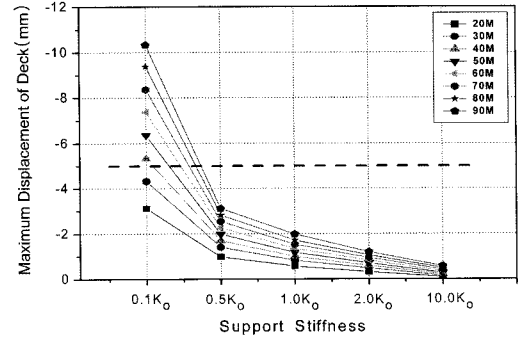
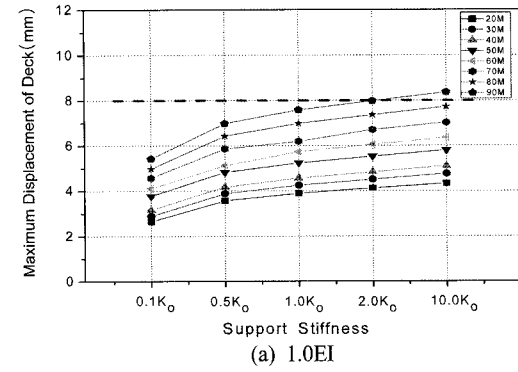
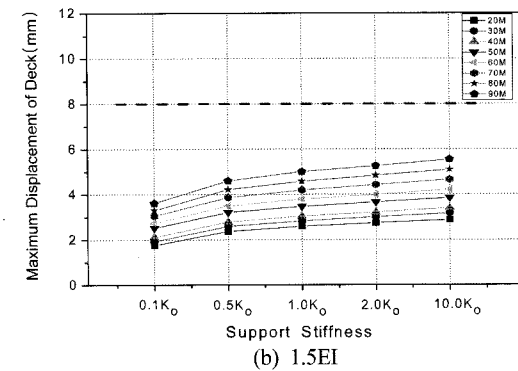


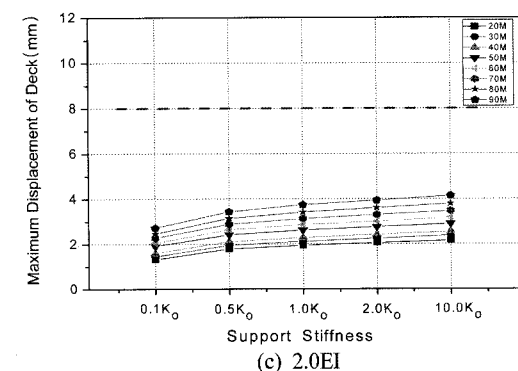
Fig. 8. Displacement of the FM type with ballast track due to traction and braking



(a) 1.0EI



(b) 1.5EI



(c) 2.0EI

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

4.1.2 MFM방식 연속교

고속철도 자갈궤도를 갖는 2경간 연속교 MFM방식에 대한 설계차트를 Fig. 10~13에 나타내었다. 여기서, 범례

의 값은 경간길이를 나타내며, 고정점간 거리는 범례값의 2배가 된다. 즉, 범례에서 50m의 값은 고정점간거리가 100m인 2@50m 교량이 10개 반복배치된 경우를 의미한다.

Fig. 10과 11은 각각 콘크리트 교량 및 강교량의 축력해석결과이며, Fig. 12와 13은 각각 시제동하중 및 수직하중에 의한 변위해석결과이다.

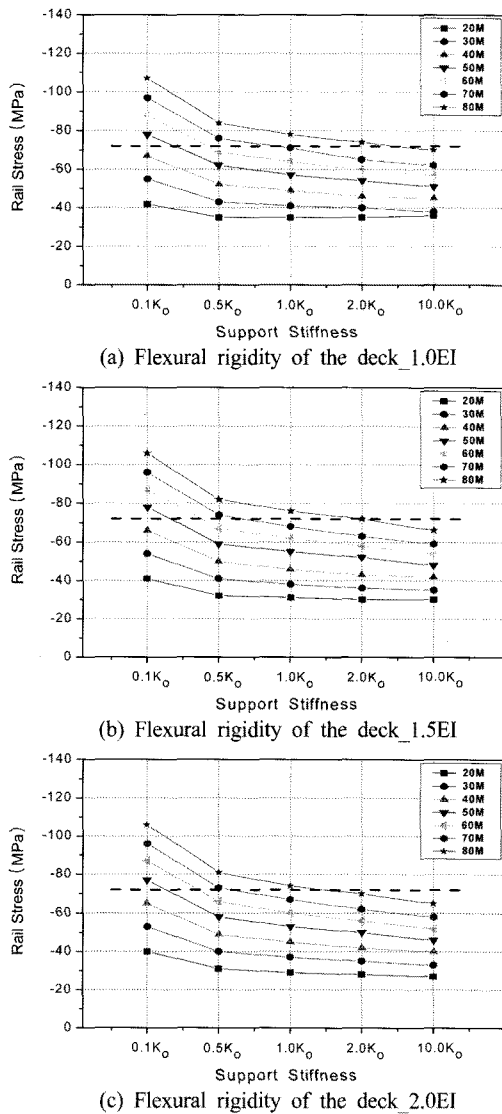


Fig. 10. Additional rail stress of the MFM type in concrete bridge with ballast track

콘크리트교량의 자갈궤도형식의 결과를 나타낸 Fig. 10에서 상부강성 1.0EI인 경우에는 하부강성이 0.5Ko 이상이면 경간의 길이가 약 60m까지 부가축력이 허용기준 72MPa이하가 됨을 알 수 있다. 상부강성을 2.0EI까지 증가시키면 하부강성이 0.5Ko 이상인 조건에서는 장대레일 축

력 측면에서 70m 경간길이까지 교량 부설이 가능함을 알 수 있다. Fig. 11의 강교량 자갈궤도 교량의 경우에도 콘크리트 교량과 유사한 결과를 보이고 있다.

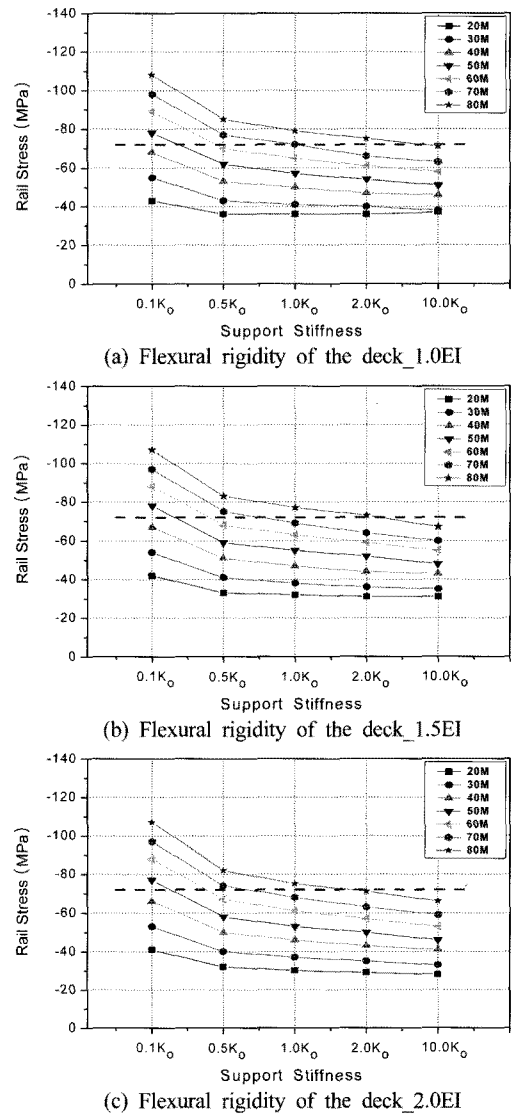


Fig. 11. Additional rail stress of the MFM type in steel bridge with ballast track

시제동하중에 의한 교량상판사이의 종방향 변위는 검토 결과인 Fig. 12를 보면, 하부강성이 0.5Ko 이상에서는 경간길이 80m까지 변위허용기준을 모두 만족하였다. 또한, 수직하중에 의한 종방향 변위는 하부강성과 관계없이 모두 허용기준을 만족하였다. 또한, FM방식 보다 수직하중에 의한 종방향 변위가 작은 것은 단순보 FM형식 보다 2경간 연속교에서 열차하중에 의한 처짐이 작게 발생하기 때문이다.

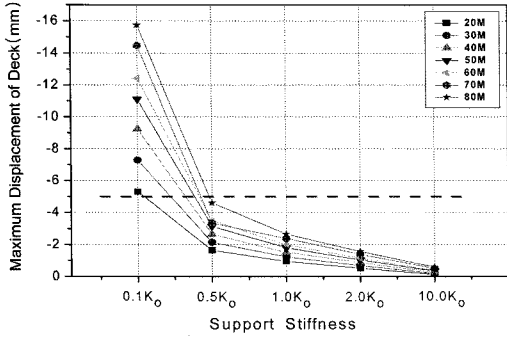
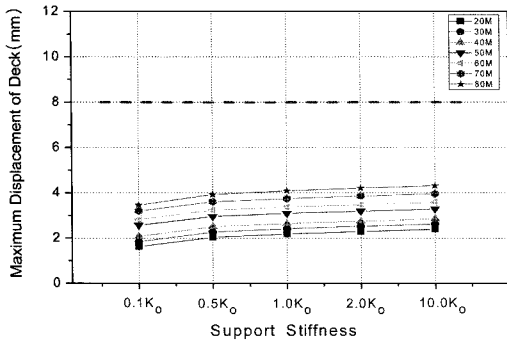
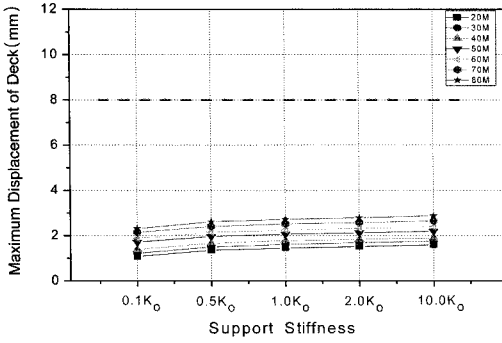


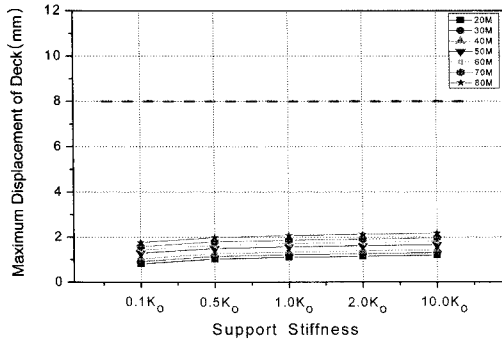
Fig. 12. Displacement of the MFM type with ballast track due to traction and braking



(a) 1.0EI



(b) 1.5EI



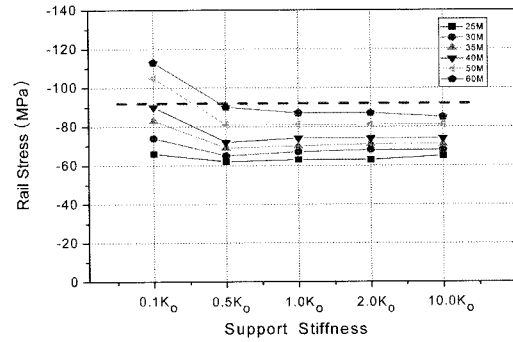
(c) 2.0EI

Fig. 13. Longitudinal displ. of the MFM type with ballast track due to vertical action

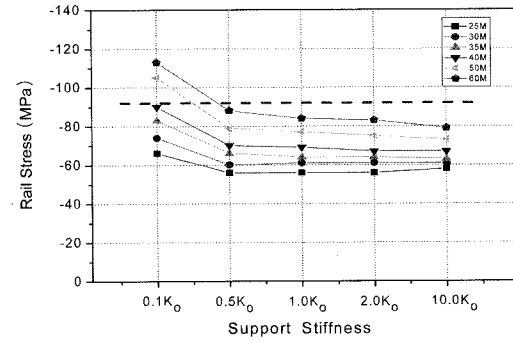
도의 장대레일축력 검토의 차이점은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 콘크리트궤도의 도상저항력이 크며, 궤도의 안정성을 위하여 별도의 변위제한조건을 부가하지 않는다. 또한, 장대레일 부가축력의 허용기준이 인장응력은 92MPa로써 자갈궤도와 동일하지만, 압축응력은 92MPa로써 자갈궤도 (72MPa) 보다 크다.

4.2.1 FM방식 단순교

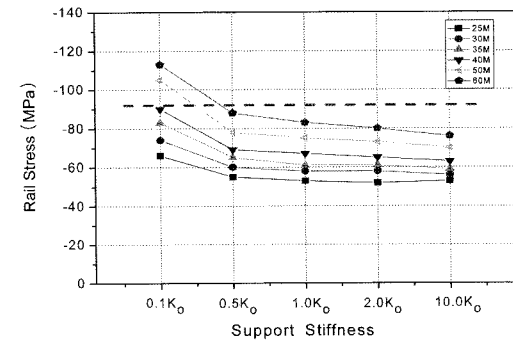
콘크리트궤도를 갖는 고속철도 단순교 FM방식에 대한 설계차트를 Fig. 14 및 15에 나타내었다.



(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. 14. Additional rail stress of the FM type in concrete bridge with concrete track

4.2 고속철도_콘크리트궤도 설계차트

본 절에서는 콘크리트궤도를 갖는 교량에 대한 장대레일 부가축력 검토결과를 수록하였다. 자갈궤도와 콘크리트 궤

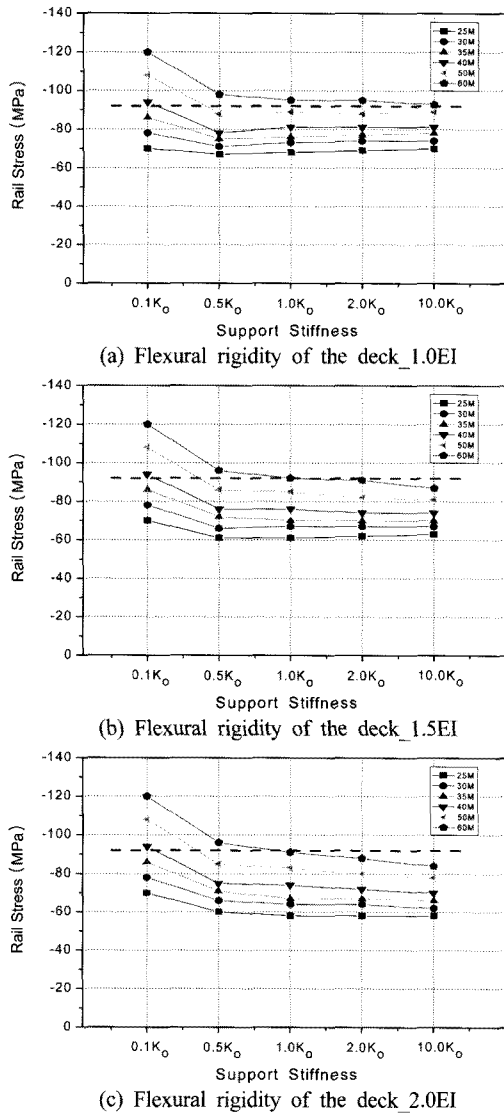


Fig. 15. Additional rail stress of the FM type in steel bridge with concrete track

상부구조 형식이 콘크리트 교량인 Fig. 14를 보면, 하부강성이 0.5Ko 이상인 경우에는 경간의 길이가 약 60m까지는 허용기준(92MPa)을 만족하고 있음을 알 수 있다. 강교량에 해당하는 Fig. 15에서는 경간길이 50m까지는 하부강성이 0.5Ko 이상이 되면 허용기준을 만족하지만 60m에서는 허용기준을 초과하는 경우가 발생하였다.

한편, Fig. 14 (a)와 15 (a)에서 하부강성이 0.5Ko보다 증가할수록 부가축력이 다소 증가하는 현상이 발생하고 있는데, 이는 하부강성 증가에 따른 시제동하중에 의한 응력의 감소량 보다 수직하중에 의한 응력의 증가량이 더 크기 때문에 발생하는 현상이다.

4.2.2 MFM방식 연속교

고속철도 콘크리트궤도를 갖는 MFM방식의 부가축력에 대한 설계차트를 Fig. 16 및 17에 나타내었다.

Fig. 16와 17의 하부강성 0.5Ko에서 경간 길이 50m의 경우를 살펴보면, 각각 93, 95MPa로써 허용기준을 다소 초과하고 있지만, 하부강성을 일부 조정한다면 콘크리트 도상의 MFM 지지방식 교량에서는 50m 경간길이까지 장대레일 부가축력의 허용기준을 만족할 수 있는 것으로 파악되었다.

한편, 강교량과 콘크리트교량의 결과의 값이 거의 유사하며, 상부강성에 따른 축력이 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 콘크리트궤도를 갖는 교량의 MFM 지지조건에서는 상판 단면을 증가시키거나 교량의 재료를 바꾸어도 장대레일의 축력의 값이 감소하거나 증가하지 않음을 의미한다.

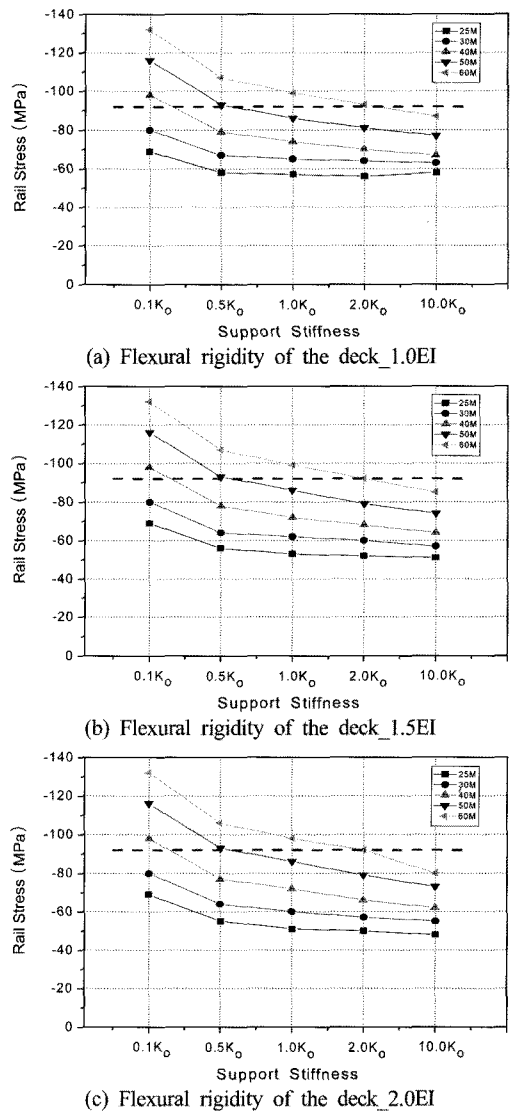


Fig. 16. Additional rail stress of the MFM type in concrete bridge with concrete track

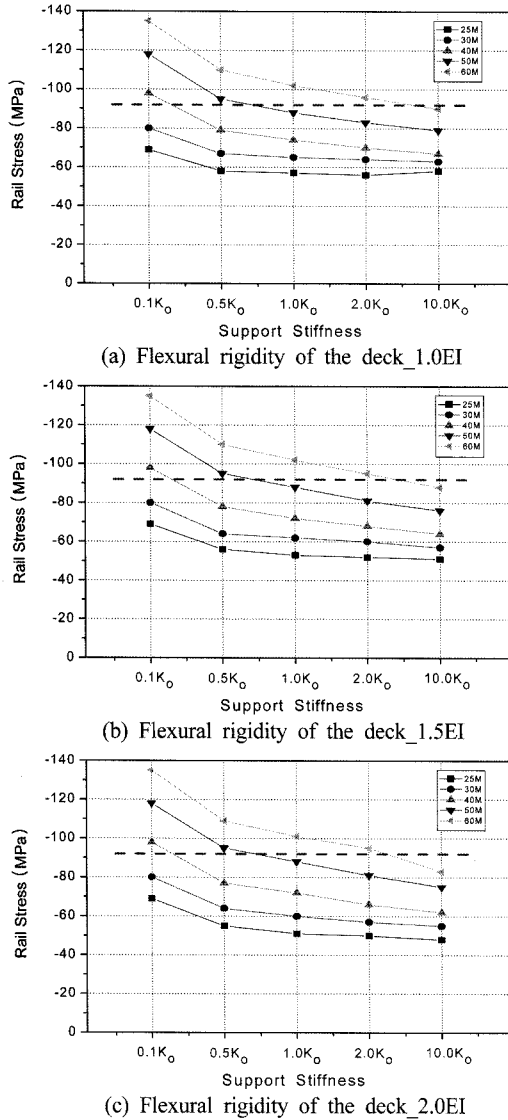


Fig. 17. Additional rail stress of the MFM type in steel bridge with concrete track

5. 결론

교량상에 장대레일을 부설하고자 하는 경우에는 교량설계단계에서 장대레일의 부가축력과 변위에 대한 안정성을 검토하여야 한다. 장대레일의 부가축력 및 변위는 교량형식, 도상형식, 경간길이, 지지조건, 하부강성 및 상부강성 등의 여러 가지 인자에 따라 달라지므로 이러한 영향인자를 고려한 해석을 수행하여야 한다.

본 논문에서는 장대레일 부가축력 및 변위에 영향을 미치는 영향인자를 고려하여 고속철도교량에 대한 종방향상호작용해석을 수행하여 설계차트 형식으로 제시하였다. 설계하고자 하는 교량형식에 대하여 최대 경간길이 또는 최소 하부강성을 갖는 경우에 대한 장대레일 부가축력 및 변위 검토를 제시된 설계차트를 이용하여 간편하게 수행할 수 있다. 즉, 설계단계에서 상부구조의 교량형식이 정해지면 하부구조의 최소요구강성 등을 제시된 설계차트를 이용하여 구할 수 있다. 또는, 일정한 하부강성의 조건하에서 교량형식별 최대 경간길이 등을 구할 수도 있다.

검토된 내용이 박스거더교를 대상으로 하였으나, 박스거더교의 온도신축거동과 유사한 경우에는 트러스, 빔거더, 아치교의 형식에도 제시된 설계차트의 활용이 가능하리라 판단된다. 개발된 설계차트의 실무적용에 관해서는 참고문헌[6]에 실무적용예제 및 활용방법에 대해 상세히 기술되어 있다.

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. 이지하, 양신추, 이종득(1998), “고속철도 교량상의 장대레일 축력해석”, 1998 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp. 556-563.
2. 한국철도기술연구원(2007), “콘크리트궤도 인터페이스 성능향상에 대한 연구.”
3. UIC Code 774-3R, 2001
4. Eurocode 1 (Part 2), 2003, pp. 97-108.
5. 최일윤, 조현철, 최진유, 양신추(2007), “교량설계를 위한 장대레일 축력 특성 분석,” 2007 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp. 1395-1400.
6. 한국철도시설공단(2008), “교량상 장대레일 축력저감 및 궤도 안정성 향상방안 연구.”

접수일(2009년 4월 23일), 수정일(2009년 5월 20일),
 게재확정일(2009년 8월 6일)