

무도상 연속 강철교량의 레일장대화에 관한 연구

CWR in Continuous Steel Bridge with Ballastless Track

민경주*
Min, Kyung-Joo

반걸용**
Ban, Geol-Yeong

김영국***
Kim, Yung-Gook

ABSTRACT

The additional rail axial force due to temperature change in the ballastless long span bridge with CWR may be higher than common simply supported plate girder bridges. This higher axial force will increase track maintenance costs.

In this study, CWR policies of existing long span railway bridges, especially truss bridges, are studied for various supporting condition of bridge such as combination of roller, hinge and semi-fixed supporting conditions.

In several numerical tests show that the use of semi-fixed shoes is effective in decreasing rail axial forces and seismic response of bridges. It is expected that the continuous welded track in ballastless long span bridge will increase riding quality of train and decrease maintenance costs and vibrations and noises.

1. 서론

철도교에서 무도상 장경간 교량의 레일장대화는 장대레일의 온도축력과 교량거더의 온도신축으로 인한 추가 축력의 발생이 단시간 교량에 비하여 크게 작용됨으로 레일 축력의 증가 또한 크게 된다. 레일 축력의 증가는 그만큼 교량받침의 종방향력 증가를 가져오고 또한 레일과 거더의 상대변위의 증가 등으로 유지관리에 불리하게 된다.

본 연구는 우리나라 기존 철도에 다수 존재하고 있는 장대교량 특히 트러스교량을 중심으로 장대화 방안에 대하여 여러 가지 조건으로 검토하여 장대화 가능성을 검토 하고 합리적인 장대화 방안을 제시하고자 한다.

대부분의 트러스 교량들이 리벳이음으로 시공되어 있음으로 목침목과 거더사이의 거동에 대한 특성이 복잡하고 현장의 상태에 따라 차이가 있으며 또한 실험치들이 부족으로 본 연구에서는 이들이 1mm 정도의 유간이 있는 것으로 가정하여 해석하였다.

2. 국내 무도상 장대교량

2.1 국내 무도상 장대교량 현황

한국철도공사 자료에 따르면 무도상 장경간 트러스 교량들은 경부선 한강A선 철교 등 14개 교량이 있으며, 무도상 판형 교량으로서는 충북선 남한강(상,하)교량 등 최대 경간장 30m 판형거더 3경간 연속 교량 등 상당수가 공용 중에 있다.

무도상교량 들은 대부분 강판형 또는 트러스교량들로 안전성이 높은 반면 이에 따라 거더 단면의 감소로 교량의 강성이 비교적 낮고 또한 상부구조가 경량임으로 열차주행에 따른 처짐이 크게 발생되고 교량 진동문제를 발생시키는 경우가 많다. 특히 무도상 교량들은 횡 강성이나 비틀 강성이 상대적으로 낮음으로 횡진동 및 비틀진동에 취약하게 되고 수직진동과 더불어 열차 주행에 많은 문제점이 노출되고 있는 실정이며 진동으로 인하여 주행안정성의 저하는 물론 승차감 향상에도 불리하게 된다. 이러한 교량에는 레일장대화시 장대레일의 온도 축력 외에도 거더의 온도신축

민경주*	한국철도시설산업(주)	연구소장	정회원
반걸용**	한국철도공사 시설기술단	선로관리팀장	정회원
김영국***	한국철도시설공단 서울지역본부	건설2처장	정회원

에 의한 추가적인 레일축력의 증가로 교량상 레일을 장대화시키지 못하고 있는 실정이다.

무도상교량상 레일은 정척레일 또는 장척레일로 설치하고 있으나 이들의 레일 이음매에서 발생되는 충격량은 연속된 레일에 비하여 유간이나 궤도의 틀림 정도에 따라 차이가 크나 수배에 이르는 것으로 계측 및 연구보고 되고 있는 실정이다. 이들 충격은 앞에서 언급한바와 같이 교량의 진동에도 영향을 주지만 거더의 피로 수명단축과 피로파괴를 다수 발생시키고 있으며, 교량받침의 파손 특히 보자리 파손의 주된 영향요소이며 무도상 궤도의 레일체결구의 파손, 레일패드의 탈락, 침목고정장치의 훼손 등을 유발시켜 결국은 진동증가의 요인과 궤도의 틀림을 신속하게 증가시켜 유지보수 노력의 증가는 물론 열차주행안정성을 저해하고 이들로 인한 궤도 부담력의 증가 등 상승작용이 발생되게 된다.

열차속도의 향상, 레일이음매, 궤도의 신속한 파괴, 거더의 피로 손상 및 보자리의 침하 등은 무도상교량에서의 안정성, 열차 주행성, 승차감의 저하 및 유지관리비용의 증가는 물론 소음진동의 증가로 철도교도 2010년도부터 환경소음 규제 대상임을 고려할 때 대책이 필요한 시점이다.

이들 교량에 관절형 대차를 사용하는 KTX의 주행은 비교적 다른 철도차량에 비하여 경량구조임에도 불구하고 관절대차의 특성상 윤종의 집중으로 소음, 충격 및 거더의 진동 등의 문제점들을 더욱 증가시키고 있는 실정이다.

2.2 교량과 장대레일 안정 해석

장대레일의 안정성해석을 위하여 궤도의 재료 특성치를 사용할 때와 교량의 안정성해석을 위하여 사용하는 궤도재료 특성치는 이들의 해석상 저항측면에서 적용시키느냐 아니면 작용외력의 측면에서 사용하느냐에 따라 그 특성치의 적용을 다르게 해야 할 것이다. 즉 궤도의 안정성해석을 위해서는 구조물의 저항으로 작용하는 도상저항력을 안전치 즉 낮은 값을 사용하여야 하나, 교량의 안정성해석을 위해서는 이들 저항력이 외력 발생기구가 되므로 실제 저항력을 사용하거나 이들은 불확실성이 비교적 높으므로 안전을 위하여 높은 값을 사용하여야 안정성해석의 신뢰성을 높일 것으로 판단되므로 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 궤도재료의 특성치를 사용하였다.

대부분의 트러스 교량들이 리벳이음으로 시공되어 있음으로 목침목과 거더사이의 거동에 대한 특성이 복잡하고 현장의 상태에 따라 차이가 있으며 또한 실험치들이 부족으로 본 연구에서는 이들이 1mm 정도의 유간이 있는 것으로 가정하여 해석하였다. 기타 온도 증가는 레일 및 거더에서 각각 45℃ 및 35℃를 적용하였다. 레일의 경우에는 우리나라 중부지방을 기준으로 일반적인 설정온도와 비교할 때 어느정도의 현실성이 있으나, 거더의 경우에는 동절기 기온이 약 -20℃ 정도까지 하강하는 경우가 가끔 있게 됨으로 재설정할 때의 거더온도 15℃일때에 해당되게 된다. 이러한 현장 조건에 대해서는 현실에 맞게 시공시 유의하여야 하며 유지관리 중에 실시하는 교량상 장대레일 재설정에서도 유의하여야 할 것이다.

2.3 안정성 해석대상 교량

장경간 무도상교량의 레일 장대화 검토 교량은 아래 표와 같이 한강철도교량을 포함하여 각각 특성들이 다른 교량들을 대표적으로 선택하여 장대레일화 방법에 대하여 기존의 교량받침을 사용한 방법, 교량받침의 조건 변화(FFMM) 및 반고정식(신기술 제437호) 등을 적용시켜 검토하였다.

표 1. 장경간 무도상 교량 장대레일 안정성 검토 대상교량

선 별	역 간	교량명	연 장	거 더 구 성
경부선	용산-노량진	한강A선	1,113.5	판형18.3×12, 24.4×9, 트러스 61.0×10
경부선	용산-노량진	한강C선	1,113.4	판형18.3@3×4, 24.4@3×4, 트러스(53+76+53)×3, 60.5
경부선	매포-신탄진	금강제1	290.5	트러스60.6×4, 판형17.8, 18.3
경부선	약목-왜관	낙동강상	507.7	판형15.2, 트러스45.2@2×4, 43.50×2, 판형15.2
경부선	약목-왜관	낙동강하	507.8	판형15.2, 트러스45.20×10, 판형15.2

3. 장경간 무도상 교량의 장대레일화에 따른 안정성

교량받침의 구속조건에 따라 장대레일 축력 변위 및 교량받침에 작용되는 온도 변화에 따른 종방향력 등에 많은 차이가 있으나 여기서 모든 조건을 검토할 수 없으므로 경험에 의한 여러 가지 가능한 방법들을 고려하여 구속조건을 설정하고 이에 대한 안정성 해석을 수행하였다.

레일과 거더의 최대 온도변화는 레일의 경우에는 대부분 45℃를 사용하고 있으나 거더의 경우에는 35℃~45℃를 사용하고 있다. 실제로 레일의 재설정에서 설정온도는 여러 가지 방법에 의하여 어느 정도 인공인 방법으로 가능하나 교량상 장대레일 재설정시 거더의 온도를 인공적으로 조정한다는 것은 사실상 불가능하다. 우리나라 중부지방의 경우 동절기 -20℃ 정도까지는 기온이 하강하는 것으로 보아야 할 것임으로 온도차이를 35℃로 가정한다면 실제 재설정시 거더의 온도는 +15℃ 이하에서 재설정을 하여야함에 유의하여야 한다. 만약 중부 지방에서 장대레일을 재설정할 때 기온이 25℃라면 거더의 온도 변화가 45℃가 될 것이다. 본 연구에서 검토하는 교량이 비교적 장경간임을 고려할 때 거더의 온도 신축에 의한 추가적인 축력이나 교량받침 종방향력이 크게 증가되어 레일 장대화에 거동이 상당히 불리하게 된다. 따라서 본 연구에서는 거더의 최대 온도차를 35℃로 가정하여 해석하였다.

3.1 한강A선 철도교

위의 표에서 보는 바와 같이 한강A선 철도교는 단경간 판형거더 1개의 경간 18.3m와 9개의 경간 9개 및 61m의 트러스 11개로 총연장은 1,113.5m이다.

3.1.1 기존 교량받침에 의한 안정성 해석

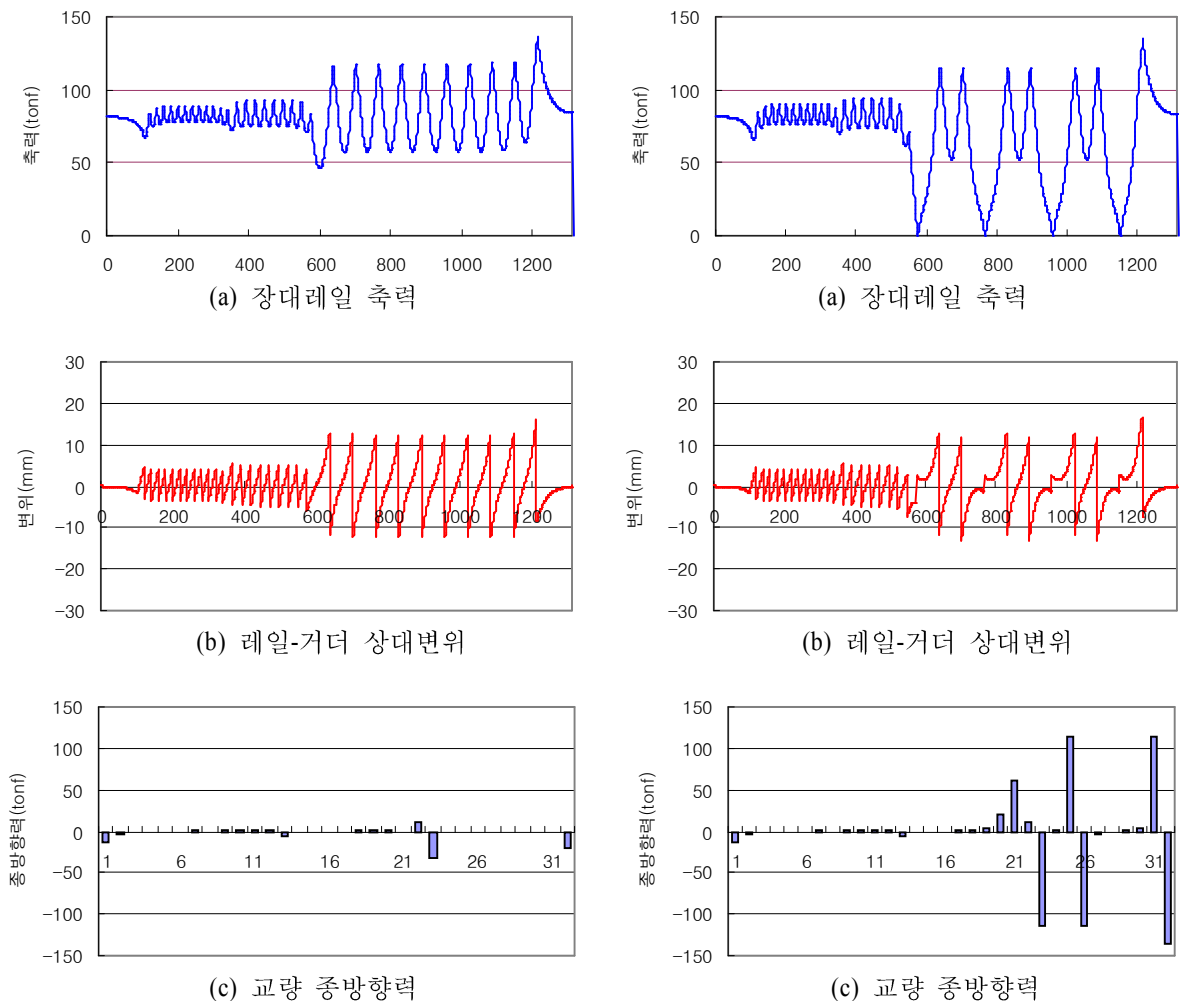
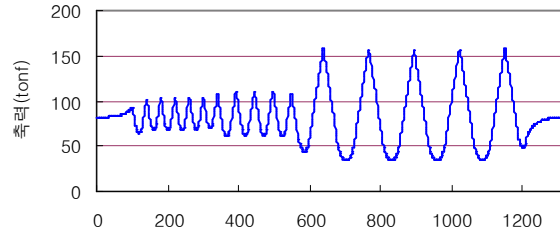


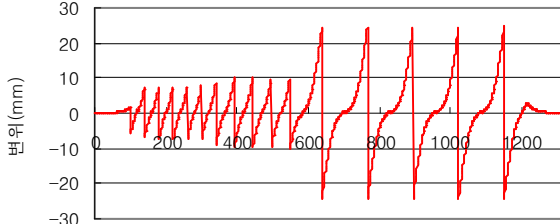
그림 1. 한강A선(기존받침 / 전체 레일장대화)

그림 2. 한강A선(레일신축 4개소설치)

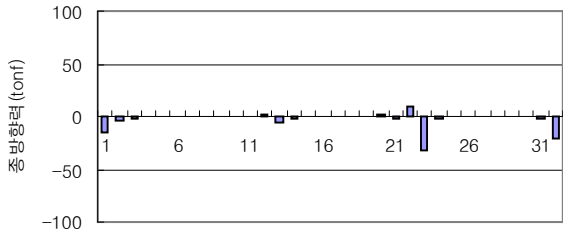
3.1.2 FFMM 방식 교량받침 배치에 따른 안정성 해석



(a) 장대레일 축력

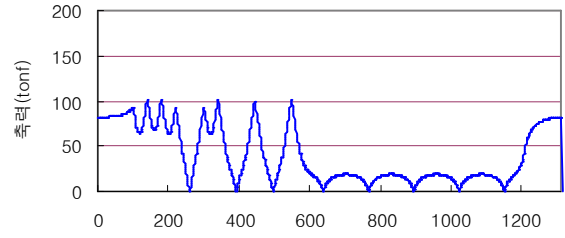


(b) 레일-거더 상대변위

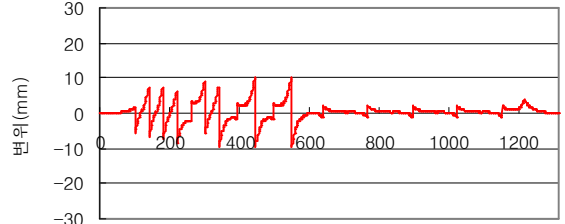


(c) 교량 종방향력

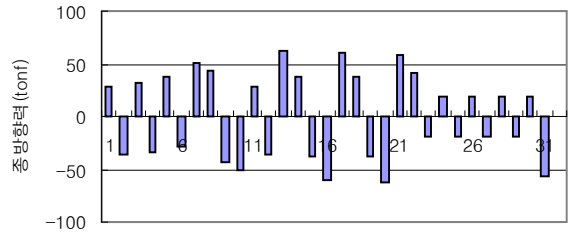
그림 3. 한강A선(FFMM / 전체 레일장대화)



(a) 장대레일 축력



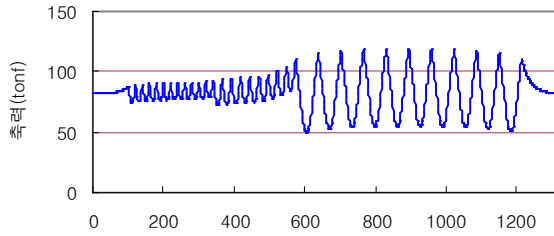
(b) 레일-거더 상대변위



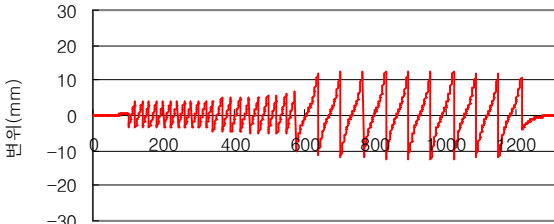
(c) 교량 종방향력

그림 4. 한강A선(FFMM/레일신축 8개소설치)

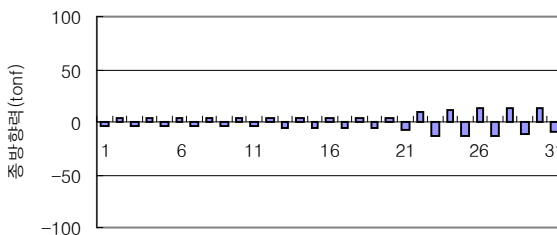
3.1.3 반고정형 교량받침 배치에 따른 안정성 해석



(a) 장대레일 축력

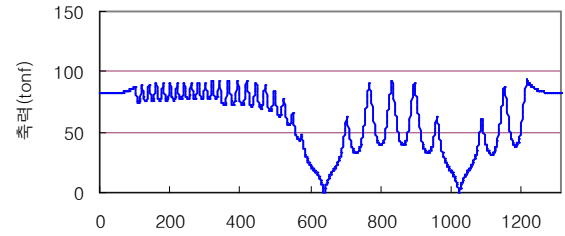


(b) 레일-거더 상대변위

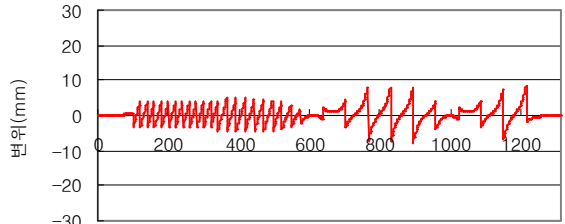


(c) 교량 종방향력

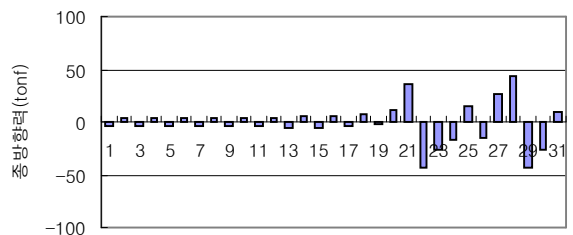
그림 5. 한강A선(반고정형 / 전체 레일장대화)



(a) 장대레일 축력



(b) 레일-거더 상대변위



(c) 교량 종방향력

그림 6. 한강A선(반고정형/레일신축 2개소설치)

3.2 한강C선 철도교

위의 표 1에서 보는 바와 같이 한강C선 철도교는 단경간 판형거더 18.3m 3경간연속 4개와 24.5m 3경간 연속 3경간 및 61m의 트러스 11개로 총연장은 1,113.4m 복선교량이다.

3.2.1 기존 교량받침에 의한 안정성 해석

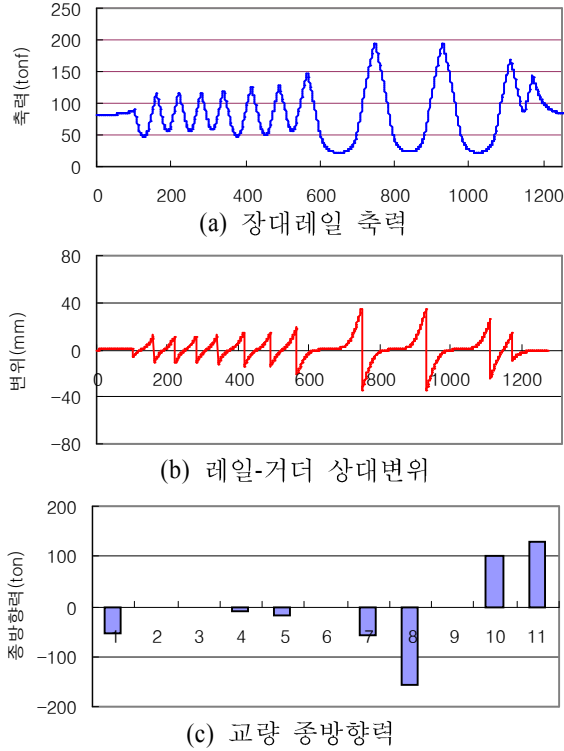


그림 7. 한강C선(기존받침 / 전체 레일장대화)

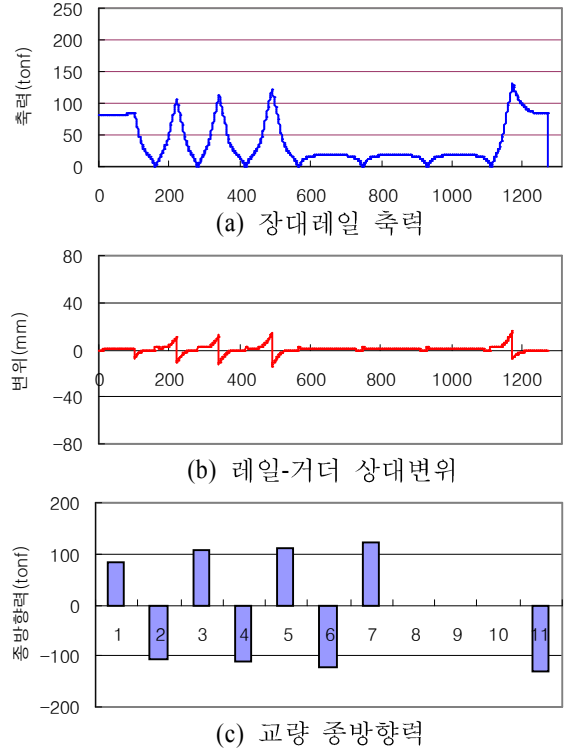


그림 8. 한강C선(레일신축 7개소설치)

3.2.2 FFMM 방식 교량받침 배치에 따른 안정성 해석

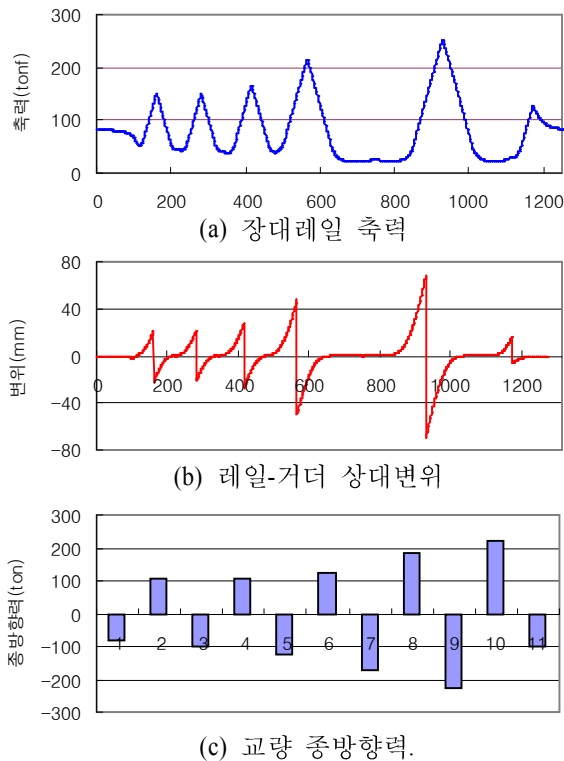


그림 9. 한강C선(FFMM / 전체 레일장대화)

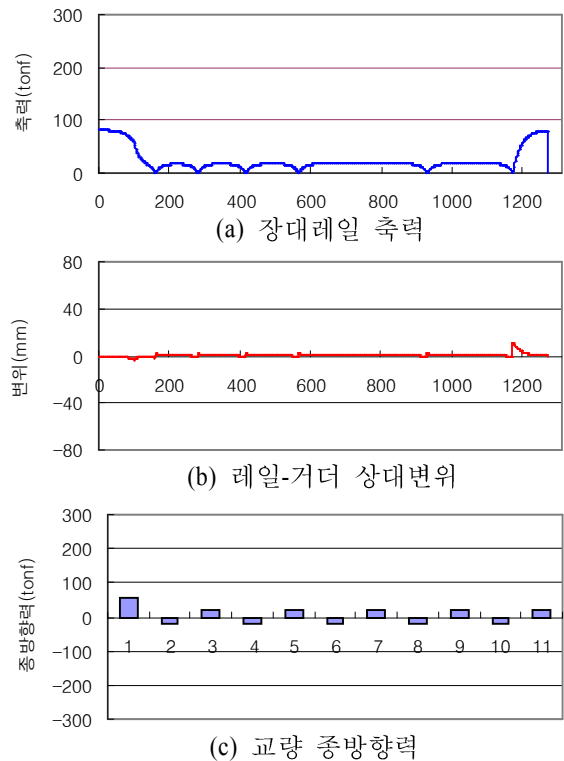
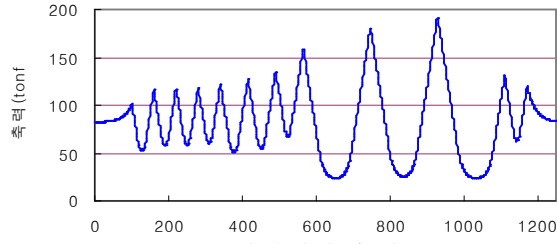
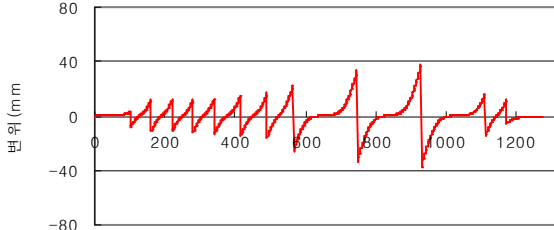


그림 10. 한강C선(FFMM/레일신축 6개소설치)

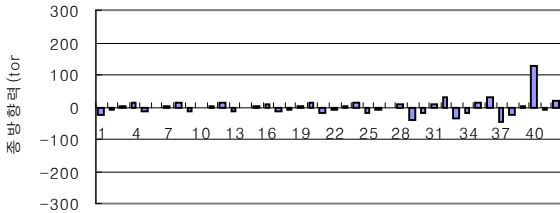
3.2.3 반고정형 교량받침 배치에 따른 안정성 해석



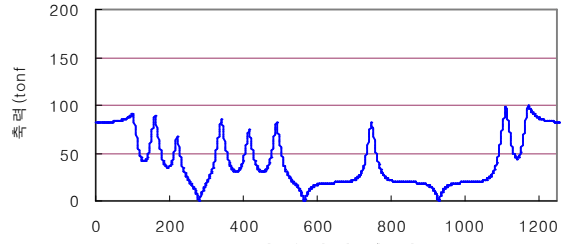
(a) 장대레일 축력



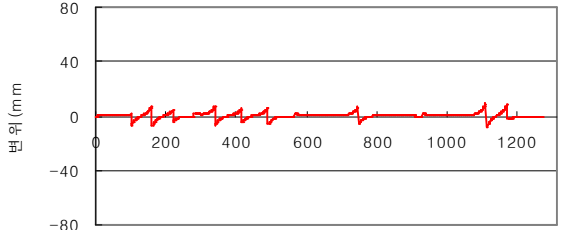
(b) 레일-거더 상대변위



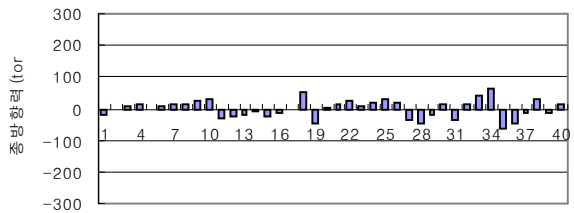
(c) 교량 중방향력



(a) 장대레일 축력



(b) 레일-거더 상대변위



(c) 교량 중방향력

그림 11. 한강C선(반고정형 / 전체 레일장대화)

그림 12. 한강C선(반고정형/레일신축 3개소설치)

3.3 경부선 금강제1교 및 낙동강교 장대레일 안정성 해석결과

금강제1교와 낙동강교 상·하선에 대한 교량받침의 구속조건에 따라 장대레일 축력 변위 및 교량받침에 작용되는 온도 변화에 따른 중방향력을 위 조건과 동일한 방법으로 안정성 해석을 수행하였다. 본 절에서는 신축이음매가 없는 경우와 반고정형으로 장대레일을 부설할 수 있는 경우에 따른 기존 지점형식의 경우에서의 레일축력 결과를 그림 13 ~ 14와 같이 나타내었다.

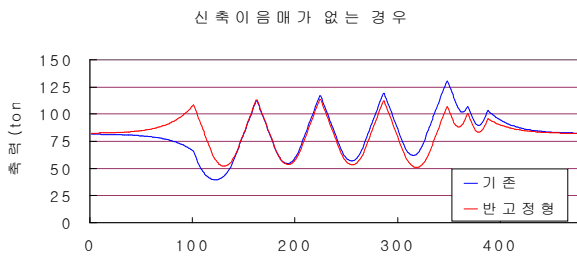


그림 13. 금강제1교량 기존방식과 반고정형 지점조건시 레일축력 비교

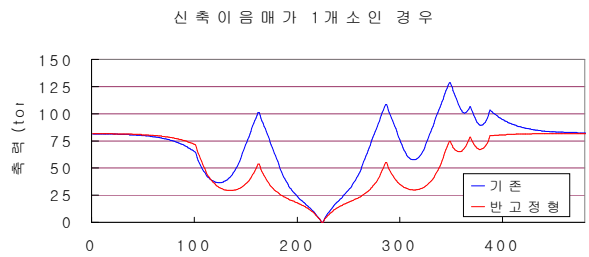


그림 13. 금강제1교량 기존방식과 반고정형 지점조건시 레일축력 비교

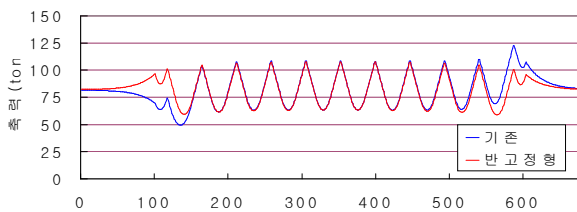
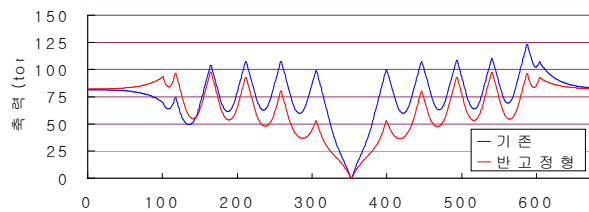


그림 14. 낙동강교(상) 기존방식과 반고정형 지점조건시 레일축력 비교



3.4 지점조건에 따른 내진해석(한강C선 교량)

내진안정성은 내진에 비교적 불리한 구조인 한강C선을 선택하여 해석하였으며, 본 교량은 3경간 연속 연장이 189.7m인 트러스교 교량이다. 내진해석법에는 하중의 종류(정적해석법, 동적해석법, 응답스펙트럼 해석법), 재료 비선형성(선형 탄성해석법, 비선형 해석법) 및 기하학적 비선형성(P-δ효과 등)에 따라 여러 가지 방법으로 구분된다. 본 해석에서는 특정 지진이력에 의한 구조물의 거동을 확인할 수 있는 비교적 정확한 해석방법인 지반운동의 시간이력을 이용한 구조물의 동적 해석법을 이용하였으며 이는 중요한 구조물의 설계, 구조물의 비선형해석 등 보다 정밀해석을 요구되는 경우에 사용하고 있으나 예상되는 지진의 지반운동을 예측하기가 어렵고 계산시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 해석에 필요한 지진이력은 El Centro 지진을 이용하였다.

해석 대상 교량은 그림 15와 같이 현재 운용중인 MFMM방식과 반고정방식으로 구분하여 해석하였으며, 교각(P25, P26)에 대한 결과는 그림 16~17 및 표 2와 같다.

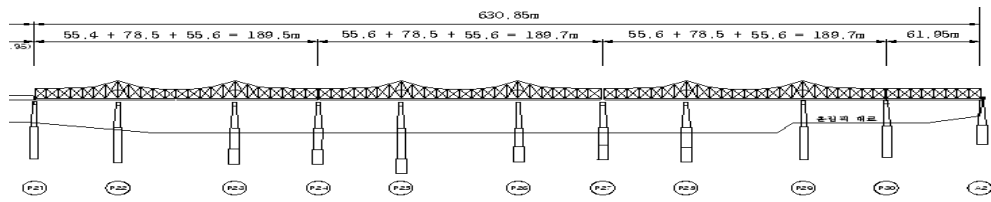
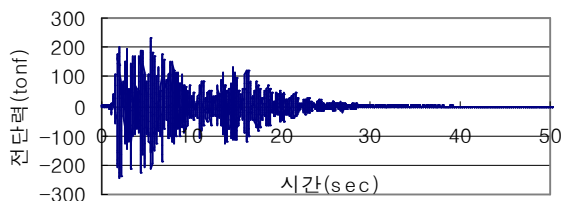
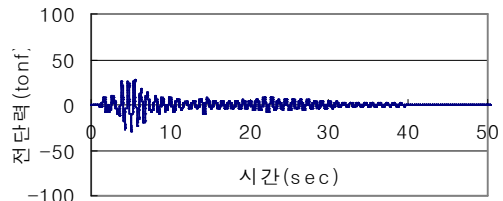


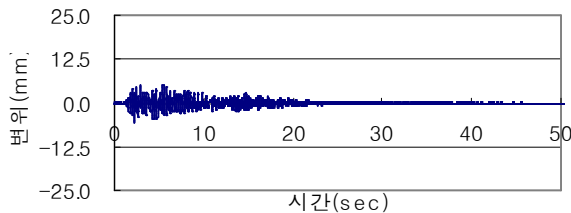
그림 15. 한강C선 3경간 연속 트러스교



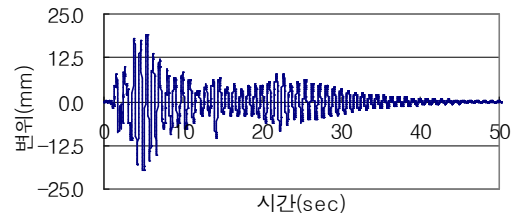
(a) P25 힌지반침 전단력



(a) P25 반고정형반침 전단력



(b) P26 롤러반침 변위



(b) P25 반고정형반침 변위

그림 16. 기존 MFMM방식

그림 17. 반고정 교좌방식

위 그림들과 표 2에서보는 바와 같이 반고정형 교량반침에서 교량 반침 및 교각 상부에 작용되는 전단력은 기존방식의 고정단보다 크게 감소되나 변위는 반대로 반고정단에서 크게 나타난다. 이는 교량반침과 구조형식의 차이에서 오는 당연한 결과일 것이다.

그러나 교각저부에서의 전단력과 모멘트에서는 반고정방식에서

의 감소효과가 거의 없는 것으로 나타나고 있는데 이는 1개교각의 자중이 약 6500tonf으로 상부구조의 4배나 되어 교각의 영향이 큰 것도 한 원인으로 파악되나 이에 대해서는 좀 더 내진해석방법과 적용에 대한 더 많은 해석과 고찰을 통하여 구명하고자 한다.

표 2. 기존(MFMM)방식과 반고정방식의 시간이력해석 결과

TRUSS (L=189.7m)			교각 저부		교각 상부			교좌장치	
			모멘트 (tf·m)	전단력 (tf)	전단력 (tf)	변위 (mm)	가속도 (g)	변위 (mm)	전단력 (tf)
반고정	P25	Max	24,339	1,982	196	2.14	0.982	19.1	28
	P26	Min	-28,286	-1,686	-218	-2.41	-1.068	-19.7	-29
MFMM	P25	Max	18,287	1,332	488	2.04	0.373	0.0	234
		Min	-18,075	-1,200	-532	-1.74	-0.268	0.0	-242
	P26	Max	24,696	2,037	214	2.17	1.012	5.1	0.0
		Min	-29,234	-1,712	-217	-2.51	-1.094	-5.6	0.0

3.5 해석결과 고찰

한강철교 등 경부선에 위치한 장경간 무도상 교량들에 대한 장대레일 설치를 위한 안정성을 검토한 결과 거더의 온도 신축으로 인한 추가 축력에 의하여 장대레일의 축력이 증가를 효율적으로 감소시킬 수 있는 교량 받침의 구속조건에 따라 해석한 결과를 나타낸 것이 표 3이다.

표 3에서 보는 바와 같이 한강A선의 경우 장대레일을 1개로 연속했을 경우 반고정형에서 장대에일 최대 축력이 119ton으로서 시방서규정을 약 20%정도를 초과하고 있으나 UIC/774-3규정을 적용한다면 신축이음을 사용하지 않고도 가능할 것으로 나타났고, 낙동강교(상)의 경우에는 반고정형 교량받침을 적용할 경우 신축이음을 사용하지 않고서도 가능한 것으로 나타났으며 1개 거더의 연장이 188m로 가장 긴 한강 C선의 경우에도 반고정형 교량받침을 적용하게 되면 3곳의 레일신축이음을 설치하게 되면 장대레일의 안정성 조건을 충족하는 것으로 나타났다.

기존교량 받침을 사용한 경우 한강 A선 및 C선에서 신축이음을 4개 및 7개를 사용한 경우에도 각각의 축력은 130ton을 초과하고 있으며, 레일 축력을 100ton이하로 하기 위해서는 연속판형구간이나 트러스 구간에서는 거더 마다 레일신축을 설치하여야 가능하였으므로 사실상 레일 장대화는 불가능한 것으로 나타났다. 교량 받침 구속조건을 FFMM으로 하였을 경우에도 장경간 거더가 있는 경우 가동단에서는 모두 레일 신축이음이 필요한 것으로 나타났다.

반고정형 교량받침은 온도신축에 의한 레일의 상대변위 및 교량받침의 종방향력도 크게 감소시킴은 물론 지진에서도 기타 방식보다 유리하게 나타남을 확인할 수 있었다.

4. 결론

우리나라 기존 철도에 다수 존재하고 있는 무도상 장대교량 특히 트러스교량을 중심으로 장대화 방안에 대하여 여러 가지 지점조건 즉 FMFM, FFMM 및 반고정을 검토하여 장대화 가능성을 검토 하고 합리적인 장대화 방안에 대하여 고찰하였다.

한강A선 등 장경간 트러스 교량들에 대한 레일장대화 가능성을 검토한 결과 대상 교량에서 현재의 지점조건으로는 안정성을 확보하지 못하는 것으로 나타났다. FFMM 방식은 신축이음이 2개의 경간마다 사용되어야 가능한 것으로 나타났으며, 이는 내진에서도 불리할 것으로 사료된다. 반고정형 교량받침(신기술437)을 적용시킨 결과 한강C선, 한강A선 및 기타트러스교량에서 레일신축이음을 각각 3, 2 및 1개소 적용시키면 안정성이 확보되는 것으로 나타났으며, 내진 안정성에서도 유리한 것으로 나타났다.

장경간 무도상교량인 한강 트러스 교량상 레일을 반고정형 교량받침을 이용하여 레일을 장대화 시키게 된다면 승차감의 향상 및 유지관리 노력의 감소는 물론 철도 소음의 저감으로 민원해소에 도 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 철도청, 경부고속철도 기존선 활용에 따른 판형교 장대부설 및 장대레일 관리방안연구, 2000.12
2. 민경주, 반결용, 남보현, '무도상교량특성을 고려한 장대화방안 연구', 철도학회학술발표회, 2005.5
3. 철도안전연구소, 두산중공업, 건설신기술 제437호 지정서, 2004.11
4. 철도청, 철도설계기준(철도교편), 1999
5. 佐藤吉彦, "新軌道力學", 1997

표 3. 교량별 안정성해석 결과 단위 ton, m

교량명	교량 받침 형식	신축이음비 적용			신축이음매 사용시			
		축력	상대 변위	받침 종방향력	개소	축력	상대 변위	받침 종방향력
한강 A선	반고정	119	12.4	15	2	93	8.2	44
	기존	140	16.3	33	4	135	16.8	135
	FFMM	176	24.3	152	8	102	10.1	62
한강 C선	반고정	191	38.2	125	3	99	9.4	66
	기존	185	35.3	156	7	132	16.1	132
	FFMM	253	69.2	225	6	20	11.6	56
금강교	반고정	114	11.3	17	1	82	5.4	39
	기존	130	14.7	75		129	14.8	112
낙동강 교	반고정	108	9.1	11	1	98	7.9	36
	기존	123	11.6	46		123	11.6	100