

철도트러스 교량의 횡진동 특성에 관한 연구

A study on behavior of lateral-vibration about Railway truss bridge

유승훈* 조선규** 오지택***
Yoo, Seung-Hun Cho, Sun-Kyu Oh, Ji-Taek

ABSTRACT

At present, the highest operation speed of general domestic train is in the level of 140km/h and it is being improved to reach at the level of 200km/h in 2011. The improved environment of train operation speed which inevitably occurs owing to the operation of KTX on the existing line badly requires technology development such as testing and evaluating technology of factors hindering high speed of railway infrastructure including railway bridge, technology to ensure operation safety and technology to evaluate structure stability.

Comparing dynamic numerical interpretation for railway truss bridge and load of design standard by using dynamic response measurement and analysis for the railway truss bridge currently in use, this study established the improvement program to ensure the lateral dynamic safety of truss bridge with the increased speed of train.

1. 서 론

현재 일반국내열차의 최고운행속도는 140km/h대로 2011년 200km/h의 속도향상을 목표로 하고 있으며, KTX의 기존선 투입에 따라 필연적으로 발생하게 될 열차운행속도의 향상환경은 그 어느 때보다도 철도교량을 포함한 철도시설인프라에 대한 고속화 장애요소의 실험 및 평가기술, 주행안전성 확보기술, 구조 건전성 평가기술과 같은 기술개발이 절실히 요구된다고 할 수 있다. 특히 철도교량에서의 속도향상을 위한 기술적 축적의 근간이라 할 수 있는 국내 철도교량의 운행열차유형에 따른 동적응답에 대한 실험적 분석결과가 거의 전무하고 횡방향 특성에 대하여는 설계기준도 정립되지 않은 상태이다. 향후 남북횡단철도, 대륙횡단철도 등 철도연계망 구축에 따라 운행열차의 통과른수 및 중축중(heavy axle load)의 증가에 대비하기 위해서 기존 철도교량의 동적 안전여유도를 실험적으로 평가하는 것은 매우 중요한 연구라 할 수 있다. 일반적으로 운행열차의 속도가 증가할수록 교량에 대한 동적중폭현상이 상승하므로 열차의 주행안전성과 승객에 대한 승차감에 큰 영향을 미치게 된다. 또한 수직진동가속도 수준의 수평진동가속도가 발생하는 이상진동현상으로 교량의 손상축진 및 승차감저하가 발생된다. 이러한 동적중폭현상에 대하여 본 연구에서는 실제 교량상을 통과하였던 운행열차하중에 대한 횡방향 동적응답계측을 이용하여 트러스교량에 대한 동적수치해석과 설계기준상의 횡방향하중과 비교하여 열차의 속도증가에 따른 트러스교량의 횡방향 동적 안전성을 확보하기 위한 개선방향을 수립하고자 한다.

* 서울산업대학교 철도대학원 석사과정, 정희원

** 서울산업대학교 교수, 정희원

*** 한국철도기술연구원, 정희원

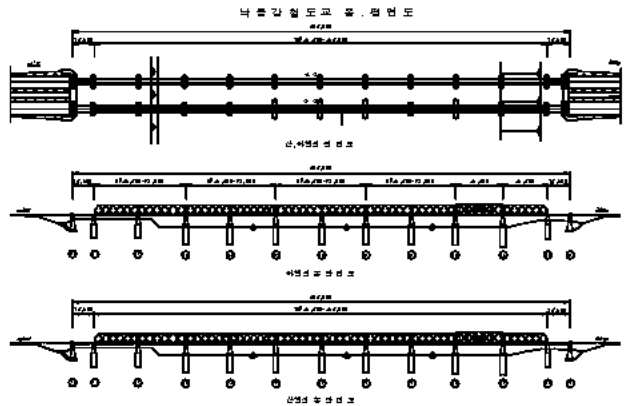
2. 철도트러스 교량의 동특성 실험적 분석

현장계측은 낙동강에 부설되어있는 낙동강 트러스교(왜관철교)를 통과하는 모든 운행열차 유형에 대한 교량에서의 동적응답(진동가속도, 변위, 변형률, 열차하중)을 측정하여 통계적인 분석을 통하여 정량화된 자료를 획득할 목적으로 시행하였으며 대상교량의 현황은 다음과 같다.

<표1> 트러스 교량의 제원

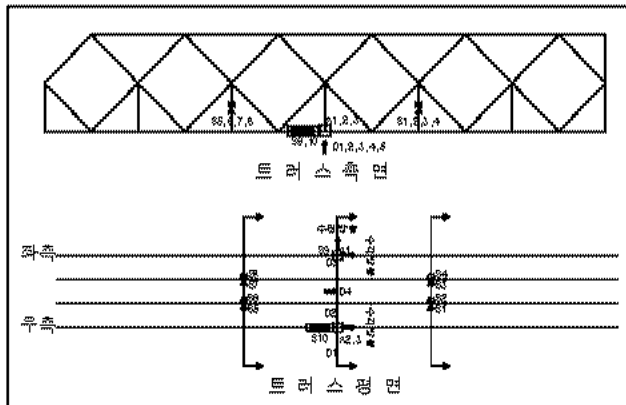
교량명	낙동강 교량
계측년월일	2002. 12. 14 ~ 12. 23
상부형식	트러스교 + 강관형교
하부구조	T형 : 18EA, 라멘형 : 4EA
교 폭	5.2m
경간수	12경간
받침구조	선반침, 핀롤러받침
경간길이	트러스 : 45m, 관형교 : 15m

<그림1> 낙동강 트러스 종평면도



동적재하시험의 계측위치 및 항목은 대상교량의 구조적 특성과 케이지부착 및 측정장비 설치의 용이성, 시험차량의 가속거리 등의 현장여건을 종합적으로 고려하여 선정하였으며 계측위치 및 항목, 측정횟수는 다음과 같다.

<그림2> 케이지 부착위치도

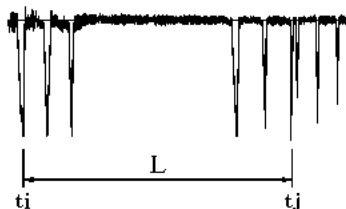


기호				
계측센서명	변형률계	가속도계	처짐계	윤증, 횡압

<표2> 측정열차 분류

선로	구분	측정회수
하행선	새마을PMC 16량 1편성	12회
	새마을PMC 8량 1편성	11회
	무궁화 (기관차 2량 중련 견인)	18회
	무궁화 (기관차 1량 견인)	30회
	화물열차	16회
상행선	합계	82회
	새마을PMC 16량 1편성	5회
	새마을PMC 8량 1편성	6회
	무궁화 (기관차 2량 중련 견인)	5회
	무궁화 (기관차 1량 견인)	22회
	화물열차	21회
	합계	59회

트러스교량의 운행열차에 대한 동특성을 파악하기위한 계측자료중 새마을 16량, 디젤2량의 계측치를 속도별로 분석하였다. 열차의 속도는 다음과 같은 방법으로 산출하였다.



여기서

t_i 첫 번째 윤증케이지 부착위치에 열차 첫바퀴가 재하된 시간

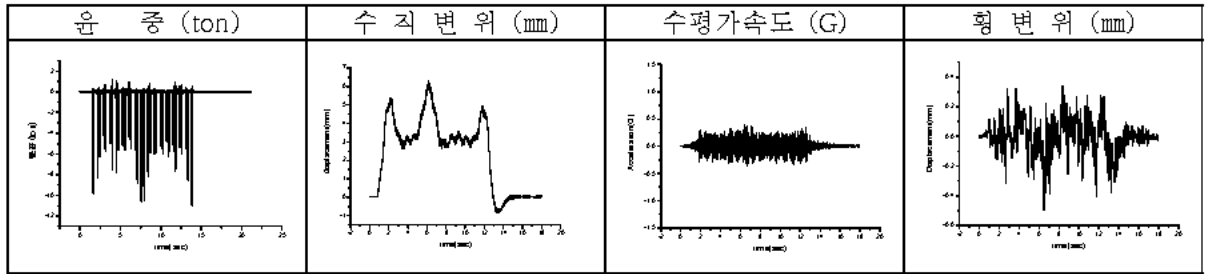
t_j 두 번째 윤증케이지 부착위치에 열차첫바퀴가 재하된 시간

L 윤증케이지 부착위치간 거리

$$V_{(km/h)} = \frac{L}{t_j - t_i} \times 3.6$$

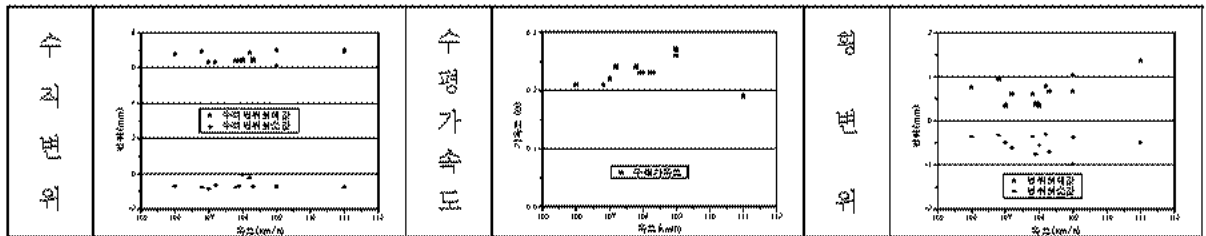
동적응답 측정결과 및 분석

• 새마을 PMC 16량

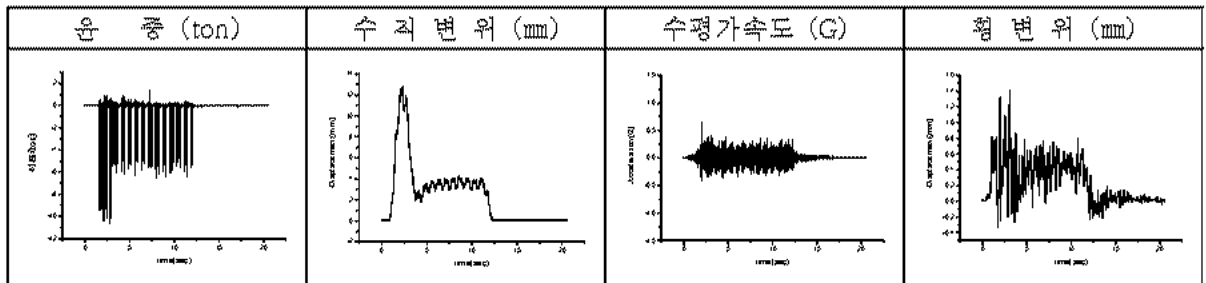


새마을 PMC 16량 속도별 최대값/최소값

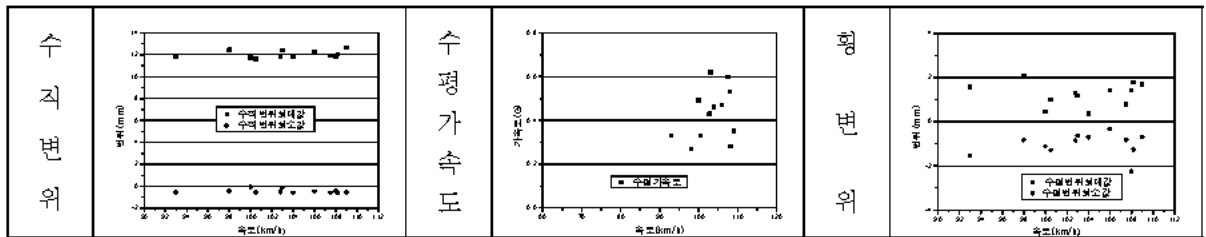
구분 \ 속도 km/h	106	107	107	107	108	108	108	108	108	108	109	109	111
수직변위 (mm)	6.78 / -0.71	6.92 / -0.77	6.29 / -0.87	6.30 / -0.66	6.41 / -0.77	6.36 / -0.71	6.45 / -0.05	6.84 / -0.23	6.43 / -0.74	6.99 / -0.77	6.08 / -0.70	6.95 / -0.76	
수평가속도 (g)	0.21	0.21	0.22	0.24	0.24	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.26	0.27	0.19
횡변위 (mm)	0.75 / -0.36	0.94 / -0.33	0.84 / -0.49	0.61 / -0.63	0.60 / -0.36	0.37 / -0.76	0.34 / -0.56	0.78 / -0.32	0.66 / -0.71	1.03 / -0.38	0.66 / -0.99	1.36 / -0.50	



• 디젤기관차(2련)

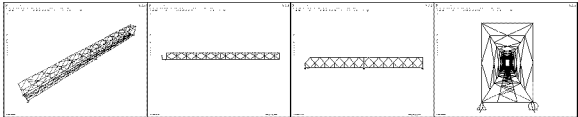


구분 \ 속도 km/h	93	98	100	100	103	103	104	106	108	108	108	109
수직변위 (mm)	11.77 / -0.56	12.46 / -0.47	11.76 / -0.04	11.59 / -0.53	11.81 / -0.56	12.41 / -0.16	11.81 / -0.62	12.24 / -0.50	11.92 / -0.62	11.85 / -0.46	12.02 / -0.63	12.62 / -0.60
수평가속도 (g)	0.33	0.27	0.49	0.33	0.43	0.62	0.46	0.47	0.60	0.53	0.28	0.35
횡변위 (mm)	1.57 / -1.55	2.04 / -0.83	0.45 / -1.13	0.99 / -1.30	1.28 / -0.86	1.16 / -0.64	0.35 / -0.72	1.40 / -0.33	0.76 / -0.83	1.42 / -2.27	1.76 / -1.27	1.70 / -0.71



3. 철도트러스교의 동적 수치해석

본 남동강 트러스교의 구조해석은 현장에서 조사된 실측자료와 설계도면을 토대로 동적해석을 수행하였고 그 동적해석 결과와 실험값과의 비교를 통하여 그 결과값을 분석하여 하중모델의 적정성을 검증하였다. 구조해석 도구인 일반적인 범용 Program인 Sap2000을 이용하였으며 트러스 구간의 구조해석은 부재를 프레임 요소를 이용하여 해석모델을 수행하였고 상·하현제와 사제, 브레이싱의 사설점은 강결로 가정하여 해석하였다. 해석모델과 지점조건은 <그림3>과 같다.



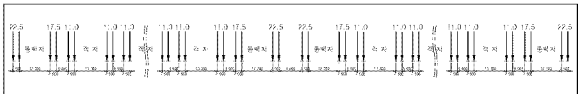
<그림3> 구조해석 모델 및 경계조건

열차하중의 횡압은 차륜과 레일의 담반의 기하학적인 현상으로 주기적으로 변동되는 특성이 있다. 이러한 열차하중의 횡방향 거동은 트러스 교량의 해석모델의 자유진동해석에 의하여 각 구조물의 동특성을 파악하고 유요진동 모드수를 결정하여 Klingel Movement 이론적 모델과 실측된 횡압분포 측정실험에 근거하여 열차하중에 대한 수치적 하중모델을 수립할 수 있다. 본 연구에서는 해석모델의 자유진동 해석에 따른 주기를 결정하여 실측된 횡압을 정량화된 수치로 전환하여 동적수치해석을 수행하였다.

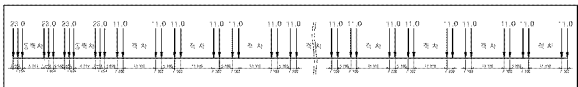
<표3> 요유진동수

Mode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
PERIOD (TIME)	0.5827	0.3821	0.3065	0.2167	0.2152	0.1799	0.1787	0.1776	0.1775	0.1774
FREQUENCY (cyc/Time)	1.7166	2.6166	3.2618	4.6149	4.6465	5.5584	5.5955	5.6292	5.6327	5.6353

<그림4> 열차의 하중선도

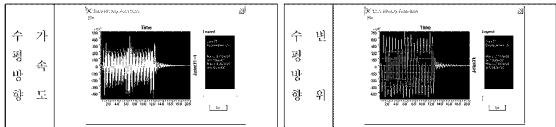


세마울 PMC 16량

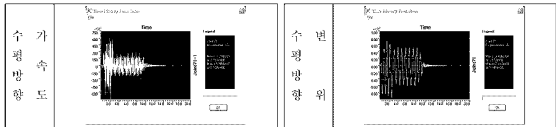


디젤기관차 2련 견인 무궁화열차

주어진 해석모델에 그림4에 나타난 하중선도를 제하여 동적수치해석은 수행하여 그 결과를 그림 5와 그림 6에 변위와 가속도에 대한 시간이력으로 나타내었다.

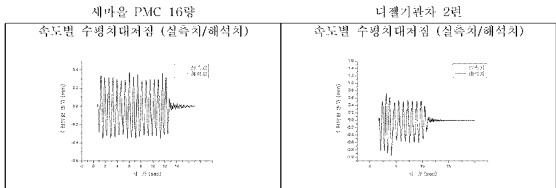


<그림5> 세마을 PMC 16층



<그림6> 디젤기관차 2면

그림7은 실측자료와 수치해석에 의한 결과를 표시한 것으로 수직지점의 경우 이론치와 계측치에 의한 값이 거의 일치하는 것으로 나타나며 수평지점의 경우 유증반 고려한 경우는 실측치와 상당한 차이를 두게 나타나며 유증 및 췌압을 모두 고려하는 경우는 실측치와 유사한 값을 나타낸다.

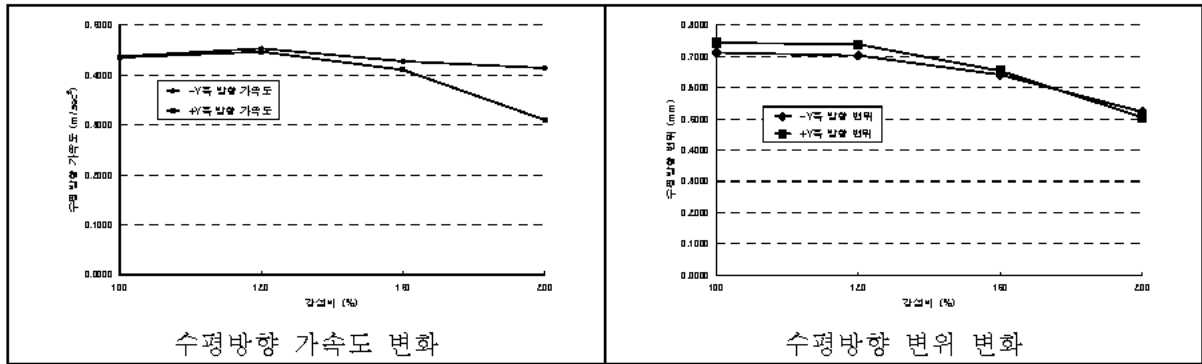


<그림7> 실측변위와 이론변위의 비교

4. 설계변수에 의한 동적수치해석

철도트러스 교량의 실측자료와 수치해석에 의해 나타난 결과 수직진동 가속도의 50~60% 수준의 수평진동가속도가 발생하는 이상진동 현상으로 교량의 손상축진 및 승차감 저하가 예상된다. 따라서 본 연구에서는 횡방향 동적증폭 현상을 감소시키기 위하여 주어진 해석모델에 있어서 횡방향 강성을 일정수준으로 증가시켜 열차종류별 속도별 횡방향 기동치를 분석하였다.

그림 8은 횡방향 강성의 증가에 따른 수평변위와 수평가속도를 나타낸 것으로 횡방향 강성의 증가에 따라 수평변위와 가속도가 감소됨을 알 수 있다.



<그림8> 횡방향 강성에 따른 응답비

5. 결 론

공용중인 철도트러스교의 동적 수평변위 및 진동가속도의 현장측정을 수행하고 측정된 결과를 열차유형별 속도별로 교량상에서 변동되는 횡압의 분포특성을 분석하여 Klingel Movement의 이론적 모델과 측정실험에 근거하여 횡압에 대한 수치적 하중모델을 수립하고 이를 이용한 해석 결과와 실험결과 비교로부터 하중작용의 타당성을 검토하였다. 또한 트러스 교량의 횡방향 강성의 변화가 구조물의 응답에 미치는 영향을 고찰하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 직선교 상에서 주행열차의 횡압은 차륜과 궤도의 답변 특성에 따라 주기적으로 변동되는 특성뿐만아니라 차량주행 특성에 따른 비주기적 변동특성과 구조물 자체의 횡방향 강성정도에 따라 교량의 횡거동에 영향을 주는 것으로 판단된다.
- 2) 동적수평변위의 분석결과, 현재의 열차주행환경과 구조물 상태하에서는 차량의 동적 수직처짐의 증폭현상은 뚜렷하게 나타나지 않으며 설계기준(수직처짐의1/2)상의 한계범위 내에서 양호한 결과를 보여준다.
- 3) 동적수평가속도를 분석한 결과 현재 트러스 교량에서 발생하는 수평가속도는 상당히 큰수준이며 속도변화에 대한 증폭현상이 나타나 향후 속도향상에 대비한 저감대책이 필요할 것으로 판단된다.
- 4) 구조물의 횡방향 강성의 증대에 따라 일정수준까지 수평가속도의 저감효과를 가질수있는 것으로 나타나므로 기존선에서의 횡방향 강성을 키울수 있는 방안의 연구가 필요하다.

참고문헌

1. 오지택 외 (2003), “기존선의 속도향상에 대비한 판형교의 동적안정성 향상기술개발” 한국철도기술연구원 PP148 ~ 151
2. 오지택 외 (2002), “철도교량의 동특성 개선을 위한 설계기술개발” 한국철도기술연구원
3. 오지택 외 (2003), “무도상 판형교의 횡방향 동적거동특성 분석을 위한 실험적 연구” 한국철도기술연구원
4. 김현민 외 (2003), “무도상 판형교의 횡거동 분석을 위한 주행하중 매개변수연구” 한국철도기술연구원
5. 민경주 외 (2002), “철도트러스 교량의 동적응답 측정보고서” 한국철도기술연구원(주철도안전연구소)