

판형교의 열차유형별 동적응답에 대한 수치해석

Numerical Analysis for Dynamic Response of Railway Plate Girder Bridges according to Types of Train

오지택* 박문석** 최진유***
Ji-Taek, Oh Moonsuk, Park Jin-You, Choi

ABSTRACT

In this study, railway plate girder bridges are modeled in detail for finite elements within 3-dimension and analyzed by SAP 2000N, a commercial finite element analysis tool. Especially, loads of trains gained by statistical averages of measured true loads of trains are used for analysis. When the loads are adapted, the numerical dynamic responses are very close to real measurements. Resonant speed areas by train types are evaluated from the results of numerical analyses by different driving speeds of trains. For dynamic numerical analysis of railway bridges, reasonable guides are also discussed.

1. 서 론

본 연구에서는 L-22하중에 대한 표준설계단면을 갖는 경간길이 9m인 판형교의 열차유형 및 열차속도별 동적유한요소해석을 수행하였다. 판형교는 강성에 비하여 자중이 매우 작은 특성을 갖고 있으며, 현재 국내 철도 교량의 약 34%를 차지하고 있으며 상당한 노후가 진행되어 있는 형식의 교량이다. 열차하중의 유형은 대차의 형식에 따라 크게 2가지로 나뉘며, 새마을 PMC동력차, 일반객차, 화차 등에 쓰이는 단일 대차에 2개 차축이 있는 Bo-Bo형과 디젤기관차와 같이 3개 차축의 대차를 갖는 Co-Co형이 있다. 이러한 대차유형에 따라, 새마을 PMC 8량 1편성, 16량 1편성, 디젤기관차 1량 및 2량에 의해 견인되는 열차편성과 향후 기존선을 직결운행하게 될 KTX 20량 1편성을 열차하중으로 5, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 및 150km/h의 운행속도에 대한 판형교의 동적해석을 수행하였다. 본 연구에서는 기존의 상용유한요소해석프로그램인 SAP2000N을 이용하였으며, 판형교는 정교한 3차원 유한요소로 구성하였다. 특히, 해석에 사용한 열차하중은 실제 운행선상을 운행하는 여러 열차하중을 직접 측정하여 통계처리한 평균하중으로 하였다. 이러한 실제 선로에서 측정한 열차하중을 기존의 해석프로그램에 입력하중으로 사용한 결과 실측치와 매우 근접하는 동적응답을 산출 할 수 있었다. 다양한 운행속도에 대한 수치해석결과로부터 열차유형별 발생하는 공진속도대역을 평가할 수 있었다. 또한 향후 철도교량의 합리적인 동적수치해석을 위한 지침에 대하여 논의하였다.

* 한국철도기술연구원 철도구조물연구팀 팀장, 공학박사, 정회원, 031-461-8531 (교281), jttoh@krii.re.kr

** 한국철도기술연구원 철도구조물연구팀 연구원, 정회원, 031-461-8531 (교287)

***한국철도기술연구원 철도구조물연구팀 선임연구원, 공학박사, 정회원, 031-461-8531 (교284), jychoi@krii.kr

2. 수치해석

본 연구의 수치해석을 위해 상용 유한요소프로그램으로는 SAP2000을 사용하였고, L-22하중에 대한 철도교 표준단면을 사용하여 경간길이 9m인 판형교를 유한요소로 모델링하였다. 그림 1은 판형교에 대한 유한요소모델을 나타낸다. 교량 모델링에서 복부판과 상하부 플랜지는 각각 Shell요소로 모델링을 하였으며 레일, 침목, 그리고 수직 및 수평 브레이싱은 각각 Frame요소로 모델링 하였다. 레일의 궤간은 표준궤간인 1.435m를 적용하였고, 침목은 10m당 약25개 설치간격의 목침목으로 배치하였다. 동적해석에 사용한 고유진동수는 500차 진동모드까지 고려하였다.

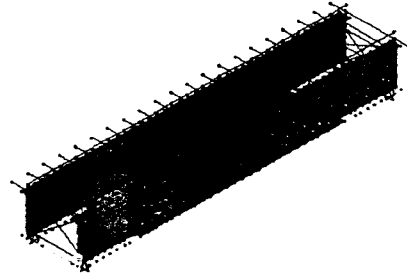


그림 1. 판형교(9m)의 유한요소모델

2.1 열차하중 모델

본 연구에서 사용한 열차하중은 5가지로, 각각 새마을 PMC 8량 1편성, 16량(중련) 1편성, 디젤기관차 1량 및 2량으로 견인되는 여객열차와 KTX이다. 실 운행열차에 대한 하중선도를 설정하기 위해 새마을 PMC는 15회, 디젤기관차는 47회 측정한 결과를 평균처리하였다. 그림 2부터 3은 각각의 열차하중선도의 축중크기와 축배치를 나타낸다.

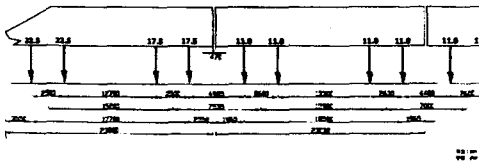


그림 2. PMC 새마을 열차 하중선도

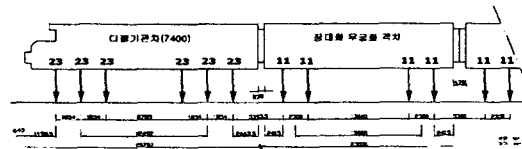


그림 3. 디젤 기관차(7100~7400호대) 하중선도

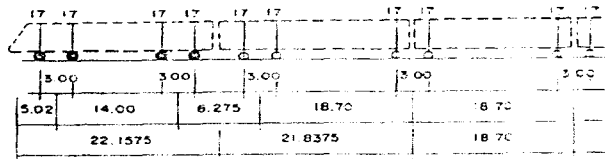


그림 4. KTX의 하중선도

2.2 수치결과

열차의 운행속도는 5, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 및 150km/h로 총 9가지를 선택하였으며, 최고속도를 150km/h로 한 것은 새마을 PMC 및 디젤기관차의 최고속도가 150km/h이기 때문이다. 좀더 높은 속도대역에 대한 해석은 차량의 축중 및 축배치가 변경될 수 있기 때문에 향후 운행될 차량의 제원을 고려하여 하중선도를 수립하여야 한다. 동적해석결과는 판형교의 중앙단면 하부 플랜지 위치에서의 진동가속도(g)와 연직변위(mm)로서 좌·우측 판형에 대하여 산출하였다. 그림 5부터 14는 해석에 사용한 5개 열차하중유형에 의해 판형교 수치해석모델의 좌측주형에서 발생한 연직 진동가속도와 연직변위에 대한 시간이력을 나타낸다.

1) 새마을 PMC 8량 1편성에 대한 동적응답

새마을 PMC 8량 1편성의 주행속도에 따른 동적수치해석결과 운행속도 140km/h대에서 그림 5, 6 및 표 1에서와 같이 공진현상이 발생하였다.

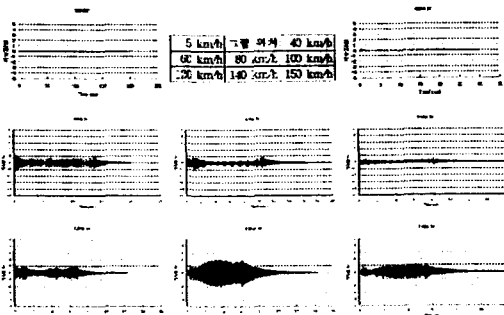


그림 5. PMC 8량 1편성시 진동가속도(g)

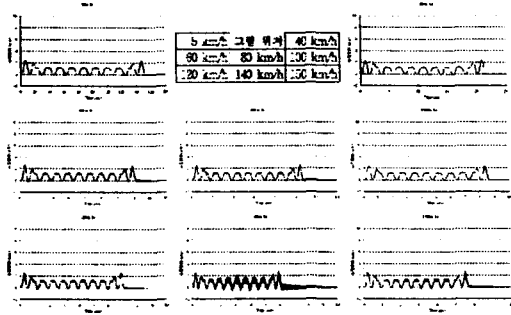


그림 6. PMC 8량 1편성시 연직변위(mm)

표 1. 새마을 PMC 8량 1편성의 운행속도 대비 최대동적응답

열차속도(km/h)		5	20	40	60	80	100	120	140	150
최대진동 가속도(g)	좌측관형	0.1646	0.0677	0.2506	1.1940	1.0656	0.6512	1.1235	2.0228	1.3018
	우측관형	0.0142	0.0647	0.2350	1.0512	0.9186	0.5770	1.1336	1.8515	1.1981
최대처짐(mm)	좌측관형	2.39	2.39	2.39	2.65	2.61	2.43	2.59	2.87	2.69
	우측관형	2.28	2.28	2.28	2.51	2.50	2.31	2.44	2.68	2.58

2) 새마을 PMC 16량 1편성에 대한 동적응답

8량 편성의 경우와 동일한 속도대인 140km/h에서 공진현상이 발생하였으며, 그 값의 크기도 매우 유사함을 나타내었다. 그러나, 본 연구에서 선정된 관형교의 길이가 9m인 관계로 교량 상에 동시에 인접 차량의 대차가 동시에 채워지지 못한 것으로 판단된다. 즉, 교량의 경간길이가 증가하여 2개의 대차가 교량의 중앙부위에 채워질 경우는 8량 및 16량 편성에 따른 동적응답의 크기는 매우 큰 차이를 나타낼 수 있다.

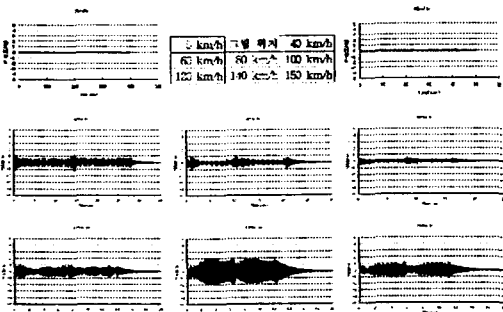


그림 7. PMC 16량 1편성시 진동가속도(g)

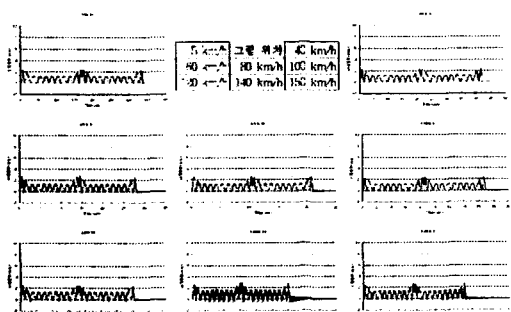


그림 8. PMC 16량 1편성시 연직변위(mm)

3) 디젤기관차 1량 견인편성에 대한 동적응답

디젤기관차는 Co-Co형 대차를 가진 관계로 새마을 PMC 열차의 Bo-Bo형 대차에 의한 동적효과와 다르게

발생함을 그림 9와 그림 10을 통하여 확인할 수 있었다. 특히 PMC와는 다르게 저속영역인 60km/h대에서 공진현상이 발생하였으며 오히려 최고속도인 150km/h에 근접할 수록 동적응답은 감소하는 것으로 나타났다.

표 2. 새마을 PMC 16량 1편성의 운행속도 대비 최대동적응답

열차속도(km/h)		5	20	40	60	80	100	120	140	150
최대진동 가속도(g)	좌측관형	0.0199	0.0677	0.2506	1.3057	1.1114	0.5770	1.2034	2.1129	1.3928
	우측관형	0.0166	0.0647	0.2350	1.2142	0.9418	0.6512	1.1336	2.1481	1.2411
최대처짐(mm)	좌측관형	2.39	2.39	2.39	2.70	2.62	2.43	2.59	2.89	2.70
	우측관형	2.28	2.28	2.28	2.57	2.50	2.35	2.44	2.79	2.59

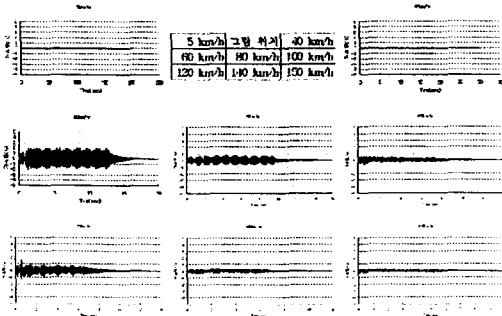


그림 9. 디젤기관차 1량건인시 진동가속도(g)

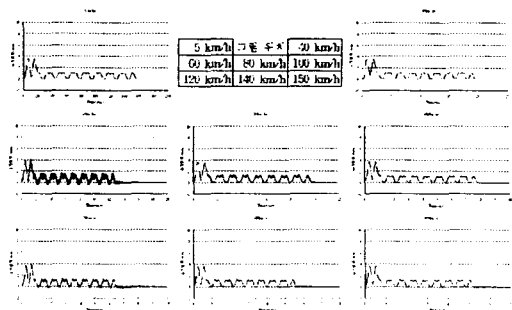


그림 10. 디젤기관차 1량건인시 연직변위(mm)

표 3에서 디젤기관차 1량 견인시 교량에서의 최대 처짐은 60km/h로 주행할 경우에 발생하였으며, 처짐량은 4.10mm로 새마을 PMC에 의한 2.89mm에 비하여 41.9%크게 발생하였다. 그러나, 처짐의 차이에 비하여 진동가속도는 2.1711g 로 PMC경우의 2.1129g 에 비하여 단지 2.7%큰 매우 근소한 차이를 나타내었다.

표 3. 디젤기관차 1량 견인시 운행속도 대비 최대동적응답

열차속도(km/h)		5	20	40	60	80	100	120	140	150
최대진동 가속도(g)	좌측관형	0.0185	0.0707	0.2367	2.1711	0.9553	0.7329	1.6634	0.5297	0.4324
	우측관형	0.0175	0.0649	0.2182	1.8722	0.9142	0.7986	1.4231	0.5117	0.5258
최대처짐(mm)	좌측관형	3.57	3.57	3.55	4.10	3.65	3.69	3.94	3.61	3.58
	우측관형	3.40	3.39	3.38	3.89	3.50	3.51	3.62	3.43	3.44

4) 디젤기관차 2량 견인편성에 대한 동적응답

본 열차하중의 경우도 디젤기관차 1량의 경우와 유사하게 60km/h 속도대역에서 공진현상이 발생하였다. 처짐은 3)의 경우에 비하여 단지 0.73% 크게 발생하였으나, 최대진동가속도는 14.46% 크게 발생하였다. 이러한 현상은 지배적인 하중효과를 유발하는 동력 차축이 6개에서 12개로 2배 증가하여 작용하여 하중의 크기는 변동이 없으나 재하시간이 증가한 것에 기인한 것으로 사료된다.

5) KTX 20량 1편성에 대한 동적응답

KTX의 경우는 그림 4에 보인 하중선도와 같이 관형교상에 동시에 두 개의 대차가 하중효과를 유발시킬 수 없는 관계로 기존의 KTX열차하중에 의한 동적응답 측정결과와는 다른 경향을 나타내고 있다. KTX열차의 전방과 후방에서는 대차의 간격이 상대적으로 좁아 하중집중효과가 발생하여 진동가속도 및 변위가 크게 발생

하나, 본 연구에서 선택한 9m 판형교에서는 앞서 새마을 PMC 16량 1편성, 디젤기관차 2량전인의 경우와 같이 하중집중효과가 발생하지 않은 것이다. 그림 13은 KTX에 의해 판형교에서는 새마을 PMC와 유사하게 140km/h에서 공진현상이 발생함을 나타내고 있다. 그림 14와 표 5는 속도대역별 연직변위에 대한 시간이력과 운행속도 대비 최대동적응답 결과를 나타낸다.

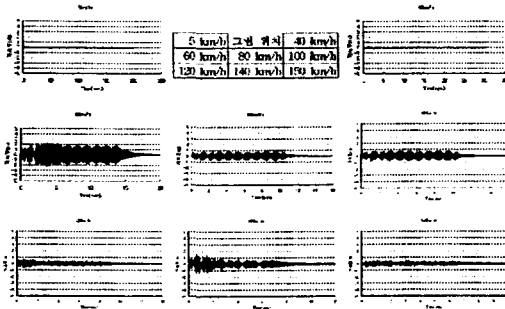


그림 11. 디젤기관차 2량전인시 진동가속도(g)

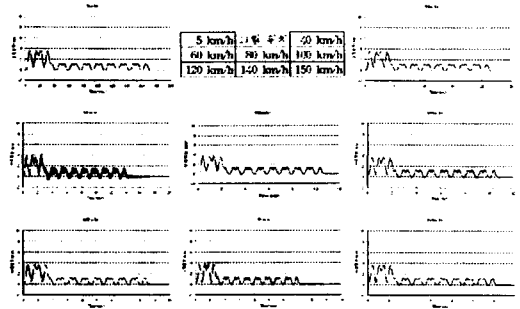


그림 12. 디젤기관차 2량전인시 연직변위(mm)

표 4. 디젤기관차 2량 전인시 운행속도 대비 최대동적응답

열차속도(km/h)		5	20	40	60	80	100	120	140	150
최대진동 가속도(g)	좌측판형	0.0189	0.0707	0.4172	2.4850	0.9534	0.8237	1.6634	0.5064	0.4278
	우측판형	0.0175	0.0649	0.3871	2.1492	0.9908	0.9802	1.8834	0.6795	0.4036
최대처짐(mm)	좌측판형	3.58	3.57	3.55	4.13	3.74	3.69	3.94	3.61	3.62
	우측판형	3.41	3.39	3.38	3.91	3.50	3.51	3.96	3.45	3.44

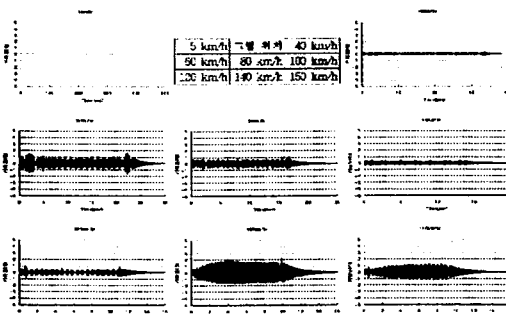


그림 13. KTX에 의한 진동가속도(g)

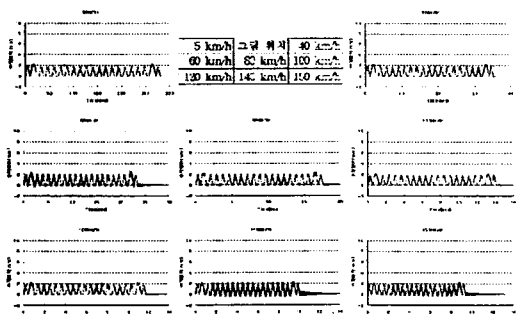


그림 14. KTX에 의한 연직변위(mm)

표 5에 나타낸 바와 같이 KTX에 의한 공진 최대동적변위는 140km/h에서 2.48mm가 발생하였으며, 이는 현재 국내에서 운행중인 새마을 PMC 16량 1편성에서 발생한 최대변위 2.89mm에 비하여 16.5%작은 값이다.

표 5. KTX 운행속도 대비 최대동적응답

열차속도(km/h)		5	20	40	60	80	100	120	140	150
최대진동 가속도(g)	좌측판형	0.0167	0.0869	0.2744	1.7352	1.2251	0.4683	0.9856	1.7897	1.3093
	우측판형	0.0134	0.0705	0.2757	1.5676	1.0366	0.5920	0.8873	1.6972	1.2246
최대처짐(mm)	좌측판형	2.16	2.17	2.21	2.50	2.32	2.19	2.31	2.48	2.37
	우측판형	2.05	2.06	2.11	2.32	2.16	2.05	2.17	2.35	2.23

2.3 측정결과와의 비교

본 연구에서 수치해석에 사용한 판형교의 유한요소모델과 통계적 평균열차하중에 대한 타당성을 검증하기 위하여 실험계측결과와 비교하였다. 실제 공용중인 9.14m 판형교에서 측정된 임의의 새마을 PMC 8량 1편성시, 디젤기관차 2량 견인시에 의한 동적변위에 대한 시간이력과 평균열차하중을 이용한 본 연구의 수치해석결과와 비교하여 그림 15와 16에 나타내었다. 실제 측정된 열차의 운행속도는 대략 60km/h±3km/h 수준으로 정확히 해석시 사용한 속도와 일치하지는 않았다.

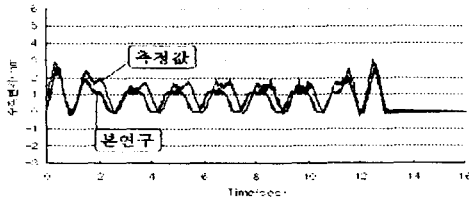


그림 15. PMC 8량에 대한 결과비교

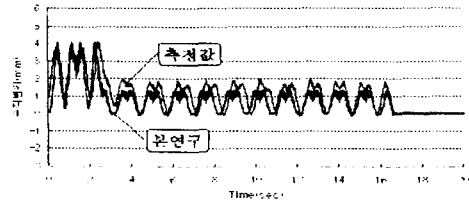


그림 16. 디젤 2량견인에 대한 결과비교

3. 동적효과의 비교

그림 17 및 18에서 판형교에 가장 큰 진동효과와 변위를 유발시키는 열차는 디젤기관차에 의해 견인되는 경우로 확인되었다. 또한, KTX는 해석에 사용한 150km/h 미만 주행시 판형교에 가장 작은 동적효과를 발생시키는 것으로 나타났다.

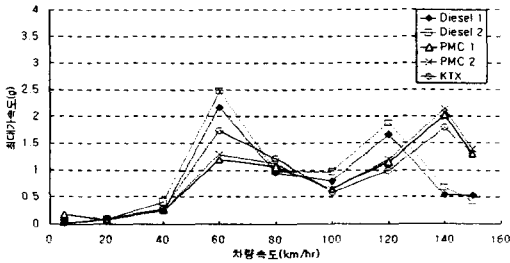


그림 17. 열차유형별 최대진동가속도의 비교

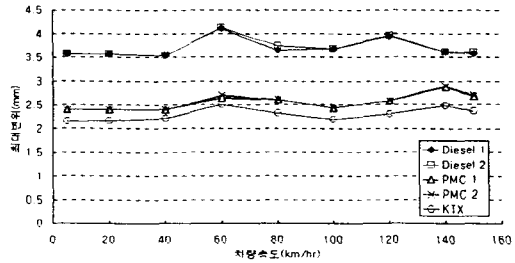


그림 18. 열차유형별 최대연직변위의 비교

4. 결 론

철도교량의 한 유형인 판형교에서 국내에서 운행중이거나 운행될 열차유형별 동적응답을 수치해석적으로 고찰하였다. 본 연구에서는 판형교의 동적수치해석시 정교한 실제 형상의 유한요소모델을 구성하고 실제 궤도상에서 측정된 열차하중을 이용하여 매우 신뢰도 높은 해석결과를 산출하였다. 가장 큰 동적하중효과를 발생시키는 열차유형은 디젤기관차로 견인될 경우이며, KTX가 가장 효과가 작음을 확인하였다. 그러나, 본 연구는 경간길이 9m인 경우로 제한되어있기 때문에 향후 다양한 제원의 판형교에 대한 검토를 수행하여 경간길이에 의한 영향을 규명하여야 할 것이다.

참고문헌

1. 철도청(1999), 철도설계기준(철도교편)
2. 철도청, 강형(용접)정규도 L-22
3. (사)철도차량기술검정단(1999), 한국철도차량 100년사