

검증된 고속철도 차량의 20량편성 정밀모형에 의한 철도교량의 동적응답 분석

Verified 20-car Model of High-speed Train for Dynamic Response Analysis of Railway Bridges

김 상 효* 김 병 석** 허 진 영*** 최 성 락****
Kim, Sang-Hyo Kim, Byung-Suk Huh, Jin-Young Choi, Sung-Lak

ABSTRACT

The dynamic analysis model is developed with the high-speed train (KTX) and a 2-span continuous prestressed concrete box girder bridge with a double track. The analytical results are compared with the dynamic field test results and found to be valid to yield quite accurate dynamic responses. The various trainset models with different number of cars are developed and compared with the results of the regular 20-car trainset model. It is concluded that the reduced trainset models, such as 7-car and 10-car models, cannot exactly produce the dynamic responses of bridges, especially when the train speed is high. Under the coincidence condition of two trains traveling with resonance velocity in the opposite directions, it is found that the impact factor under two-way coincidence is three times larger than that under one-way traffic. Consequently, for the bridge with a double-track it is necessary to check not only the dynamic responses of the bridge with one-way traffic but those with two-way coincidence.

1. 서 론

최근 설계기법과 사용재료의 발전에 따라 최적화된 교량의 건설이 가능해지고 있으며, 열차의 제작기술 발달에 힘입어 열차의 중량화와 고속화가 점차 가속되고 있다. 이에 따라 철도교량의 적정한 안전수준을 확보하기 위해서 열차와 교량 상호간의 동적응답에 대한 보다 정확한 분석의 필요성이 증대되고 있다.

따라서 본 연구에서는 고속철도 차량과 교량 구조물의 상호작용에 의해 발생하는 교량 구조물의 동적응답을 보다 정밀하게 구현할 수 있는 3차원의 동적거동 해석모형을 개발하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 열차모형은 경부고속철도 열차의 정규편성인 20량에 대하여 연직변위, 횡변위, 종변위의 3가지 변위성분과 피칭(pitching), 롤링(rolling), 요잉(yawing)의 3가지 회전성분에 의한 동적 효과를 동시에 고려할 수 있는 3차원의 주행차량모형을 적용한 20량편성정밀모형을 개발하였으며, 대상 PSC 박스거더 교량을 3차원 뼈대요소로 모형화하였다. 이렇게 개발된 3차원의 열차·교량모형을 이용하여 고속주행 열차하중을 받는 철도교의 동적거동을 해석할 수 있는 프로그램을 개발하였고, 고속철도 열차의 주행시험에 의한 실측결과와의 비교를 통해 본 연구에서 제시한 해석모형 및 프로그램의 타당성을 검증하였다. 또한 열차의 편성모형과 하중모형 간의 조합에 의해 개발된 다양한 열차모형에 의한 결과를 검증된 20량편성정밀모형의 결과와 비교·분석하여 보다 효율적이며, 간편한 열차의 모형화기법을 제시하였다.

* 정회원 · 연세대학교 사회환경건축공학부 교수
** 정회원 · 한국건설기술연구원 선임연구원
*** 정회원 · 연세대학교 사회환경건축공학부 박사과정
**** 연세대학교 산업기술연구소 연구원

2. 고속철도 열차의 모형화

본 연구에서는 동력차 38자유도, 동력객차 22자유도, 객차 22자유도(키객차 38자유도)를 각각 별도로 모형화한 후, 각 차량들의 자유도가 서로 중속되는 규칙성에 따라 전체의 운동방정식을 재구성하는 방법을 사용하였다^[1]. 특히, 경부고속철도 열차의 경우에는 동력차와 동력객차 각각 2량, 객차 15량(키객차 1량 제외)의 차량이 반복적으로 구성되어 있으므로 더욱 효율적이다. 이와 같은 방법으로 KTX의 정규편성인 20량 전체를 모형화한 결과 총 435개의 자유도로 재구성되었다.

3. 고속철도 열차의 주행시험결과에 의한 철도교의 동적해석 프로그램 검증

본 연구에서 개발한 3차원의 열차모형과 교량의 동적해석 방법의 알고리즘을 검증하기 위하여 한국건설기술연구원에서 실시한 주행시험에 의해 실측된 결과^[2]와 본 연구에서 개발한 동적해석 프로그램에 의한 해석결과를 비교·검토하였다.

3.1 경부고속철도 열차의 주행시험

주행시험을 위해 선정된 계측 대상교량은 경부고속철도의 시험선구간 내에 위치한 연제교로서, 교량형식은 2경간 연속 PSC 박스거더교이며 폭 14m의 복선 유도상 교량이다.

그림 1의 가는 실선은 경부고속철도 열차가 하행방향으로 300km/h로 주행한 경우 계측된 연직방향 변위의 시간이력곡선이며, 그림 2는 이 곡선을 대상으로 FFT(Fast Fourier Transform) 기법을 이용하여 스펙트럼 분석을 실시한 결과를 나타낸 것이다. 그림 2로부터 다른 대역의 주파수에 비해 약 0~2Hz와 약 4~6Hz 범위의 주파수에 대한 출현빈도가 월등히 높은 것을 알 수 있다. 그림 2에서 0~2Hz 범위의 주파수영역은 열차의 고유진동수에 의한 영향을 반영한 것이며, 4~6Hz 범위의 영역은 교량의 고유진동수인 것으로 판단된다.

분석결과로부터 경부고속철도 차량과 교량의 주요 모드에 대한 고유진동수는 해석결과뿐만 아니라 실측 결과에 대한 스펙트럼 분석을 통해서도 모두 10Hz 이내의 값인 것으로 확인되었으므로, 실측된 데이터에서 10Hz 이상의 주파수영역은 교량의 진동에 큰 영향을 미치지 않는 진동성분으로 간주할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 주행시험에 의해 계측된 데이터를 대상으로 10Hz 이상의 고주파영역에 대하여 저역통과 디지털 필터를 적용하여 필터링을 실시하였으며, 필터링을 실시한 후의 시간이력곡선은 그림 1의 굵은 실선과 같다.

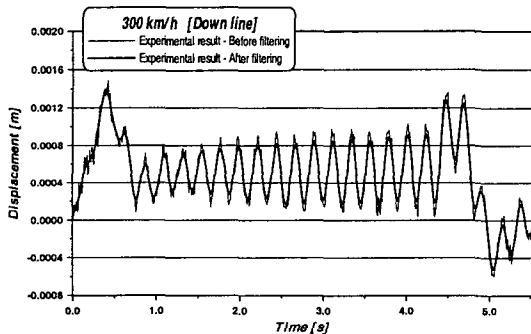


그림 1. 하행시 300km/h의 시간이력곡선

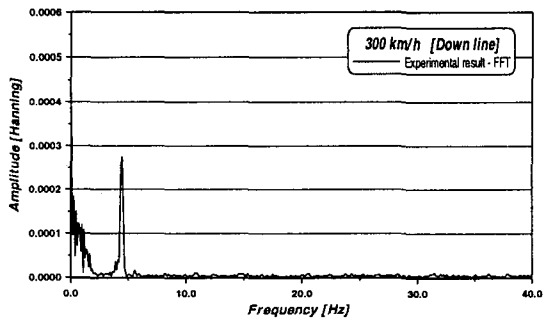


그림 2. 하행시 300km/h의 동적처짐에 대한 스펙트럼

3.2 경부고속철도 교량의 감쇠시험

감쇠시험을 위해 선정된 대상교량은 경부고속철도의 갑천교로서, 주행시험 대상교량과 동일한 형식과 단면을 갖는 2경간 연속 PSC 박스거더교이다.

대상교량의 고유진동수와 감쇠비는 계측으로부터 구한 가속도의 시간응답이력으로부터 계산되었다. 이 때 실측된 교량의 1차와 2차 모드의 고유진동수는 각각 4.75Hz, 6.37Hz로 나타났으며, 평균 2.4%의 대수감쇠비를 갖는 것으로 계산되었다.

3.3 동적해석 프로그램의 검증

본 연구에서 개발한 동적해석 프로그램의 교량부분 모형을 위해 선정된 대상교량은 주행시험을 실시한 연제교로서, 3차원의 뼈대요소를 사용하여 그림 3과 같이 모형화하였다

경부고속철도의 경우 열차의 운행속도를 고려하여 장대레일을 사용하였으며, 국철에 비해 강화된 궤도 허용요차를 제시하고 있다. 따라서 본 연구에서는 경부고속철도의 궤도불규칙성을 무시하기로 한다. 또한 열차모형은 주행시험 대상차량과 동일한 편성을 갖는 20량편성정밀모형을 사용하였다. 이러한 교량·열차모형을 이용하여 교량의 고유진동수와 연직방향 처짐을 구하였다. 이 때 시간적분 간격은 0.0004초를 적용하였다.

주행시험 대상교량인 연제교에 대한 고유진동수가 실측되지 않았으므로, 연제교와 동일한 단면과 형식을 갖는 갑천교에 대한 감쇠시험시 실측된 고유진동수와 본 연구에서 개발된 프로그램 및 범용 구조해석 프로그램인 ANSYS에 의한 해석결과를 표 1에 나타내었다. 분석결과로부터 1차 모드의 경우 본 프로그램에 의해 해석된 고유진동수는 ANSYS에 의한 해석결과와 정확히 일치하였으나, 실측한 결과와는 약 5%의 차이를 보였다. 또한 2차 모드의 경우 본 프로그램에 의한 해석결과는 ANSYS에 의한 결과와 약 1%의 차이를 보였으며, 실측결과와는 약 6%의 차이를 나타내었다. 이와 같이 본 프로그램과 ANSYS에 의한 해석결과가 거의 일치하는 것과는 달리 실측결과와 해석결과의 사이에는 약 5~6% 정도의 차이가 발생하였다. 그러나 대상교량에 대한 고유진동수를 실측하는 과정에서 발생할 수 있는 오차나 도면만을 이용하여 대상교량을 모형화하는 과정에서 생길 수 있는 오차 등을 고려해 볼 때, 본 연구에서 실시한 교량의 모형화가 타당한 것으로 판단된다.

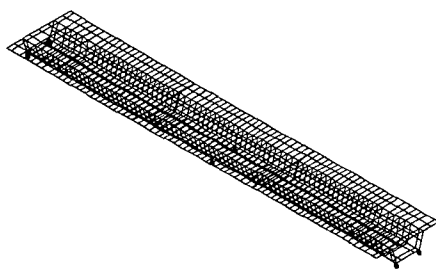
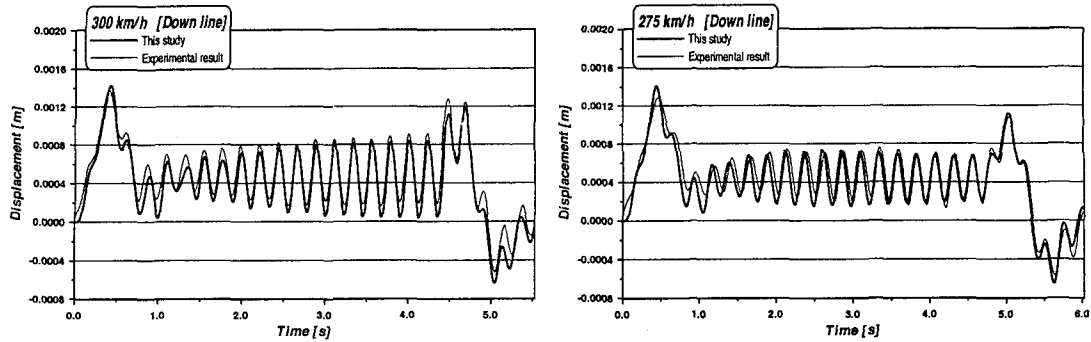


그림 3. 대상교량의 모형화

표 1. 대상교량의 고유진동수 비교

결과의 구분		대상교량의 고유진동수 (Hz)	
		1차 모드	2차 모드
실측결과		4.75	6.37
해석 결과	본 연구	4.5	6.8
	ANSYS	4.5	6.9

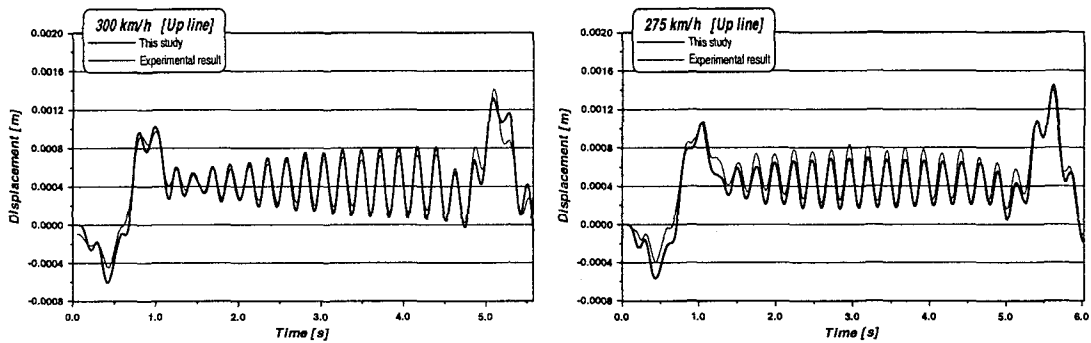
그림 4와 5는 주행시험에 의해 실측된 교량의 연직방향 처짐과 본 연구에서 개발한 프로그램을 이용하여 계산된 해석결과에 대한 시간이력곡선을 상·하행으로 나누어 나타낸 것으로서, 가는 실선은 원래의 실측데이터를 필터링한 후의 결과이고, 굵은 실선은 본 연구에서 개발한 프로그램에 의한 해석결과이다.



(a) 주행속도 300km/h

(b) 주행속도 275km/h

그림 4. 하행선의 실측결과와 해석결과에 대한 처짐이력곡선



(a) 주행속도 300km/h

(b) 주행속도 275km/h

그림 5. 상행선의 실측결과와 해석결과에 대한 처짐이력곡선

열차의 주행속도나 처짐 측정 등 실측시의 오차나 궤도불규칙성의 영향, 교량이나 차량의 모형화 과정에서 발생하는 오차에 의한 영향 등을 감안하면, 주행시험과 본 연구에서 개발한 프로그램에 의한 교량 동적거동의 크기와 경향이 매우 비슷하다는 것을 알 수 있다. 따라서 이와 같은 결과들을 종합해 볼 때 본 연구에서 개발한 열차모형과 교량모형은 타당한 것으로 판단된다.

또한 대상교량의 공진을 유발하는 열차의 공진속도(V_R)는, 경부고속철도 열차의 유효하중간격인 18.7m와 대상교량의 1차 모드 고유진동수인 4.32Hz로부터 아래의 식^{[1])}을 이용하여 구할 수 있다. 이 때 아래의 식으로부터 계산된 공진속도는 291km/h인 것으로 나타났다.

$$V_R = 3.6 \omega_n S_{eff} \tag{1}$$

4. 고속철도 열차에 의한 철도교의 동적응답 분석

본 장에서는 검증된 동적해석 프로그램을 이용하여 경부고속철도 차량의 모형화기법, 즉 열차의 편성모형과 하중모형간의 조합에 따른 다양한 열차모형에 의한 결과를 비교하였으며, 열차의 교행에 의해 발생하는 대상교량의 동적응답을 단독주행에 의한 결과와 비교·분석하였다.

4.1 열차의 편성모형에 따른 교량의 동적거동 분석

본 연구에서는 검증된 20량편성정밀모형과의 비교를 통해 해석결과의 정확성뿐만 아니라 차량의 모형화 과정에서 소요되는 노력 등의 측면에서 보다 효율적인 차량의 편성모형을 제시하기 위하여 KTX 차량의 7량, 10량 및 16량편성을 대상으로 3차원의 주행차량모형을 적용하여 모형화를 실시하였다. 이 때 각각의 편성모형들은 20량편성정밀모형에서 적용한 모형화 방법과 동일한 방법으로 모형화하였다. 이와 같은 방법으로 KTX의 7량편성을 모형화한 결과 총 188자유도로 재구성되었다. 또한 10량편성정밀모형의 경우 245자유도로, 16량편성정밀모형의 경우에는 총 359자유도로 재구성되었다.

그림 6은 열차의 편성모형에 따른 대상교량의 각 경간 중앙점에서의 처짐에 대한 증폭계수를 열차의 주행속도에 따라 나타낸 것이다. 그림 6(a)는 첫 번째 경간에 대한 증폭계수를 비교한 것으로서, 본 연구에서 선정한 대상교량의 공진속도인 291km/h 부근에서 공진으로 인한 증폭계수의 뚜렷한 증가가 나타났으며, 각 편성모형에 따른 대상교량의 증폭계수가 20량편성정밀모형에 의한 결과와 거의 일치하는 경향을 보이는 것으로 분석되었다. 반면에 두 번째 경간의 증폭계수를 나타낸 그림 6(b)를 보면 그림 6(a)와는 달리 열차의 주행속도에 따라 매우 불안정한 동적거동을 보이고 있으며, 20량편성정밀모형의 경우에는 계산된 공진속도보다 약간 앞선 285km/h 부근에서 발생한 공진현상으로 인해 첫 번째 경간에서의 증폭계수보다 약 7% 가량 큰 결과가 나타났다. 이것은 대상교량이 2경간 연속교이기 때문에 나타나는 현상인 것으로 판단된다. 그림 6(b)의 두 번째 경간에 대한 증폭계수는 모형화된 차량의 수에 따라 상이한 동적특성을 나타내고 있으며, 분석결과의 특성은 7량·10량편성의 중량편성모형과 16량·20량편성의 다량편성모형으로 분류된다. 다량편성모형의 경우에는 최대증폭계수가 285km/h 부근에서 발생하였으나, 중량편성모형의 최대증폭계수는 275km/h 부근에서 발생하며, 일반적으로 275km/h 이상의 주행속도에 대해서는 다량편성모형에 비해 최대 10% 정도 작은 동적응답을 나타내었다.

이상의 결과로부터 경부고속철도 열차를 모형화할 경우 차량의 편성모형은 16량 이상의 편성을 고려하면 타당한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 16량 이하의 편성모형을 사용할 경우에는 고속주행에 의한 교량의 동적거동을 정확하게 해석할 수 없으므로 이에 대한 충분한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

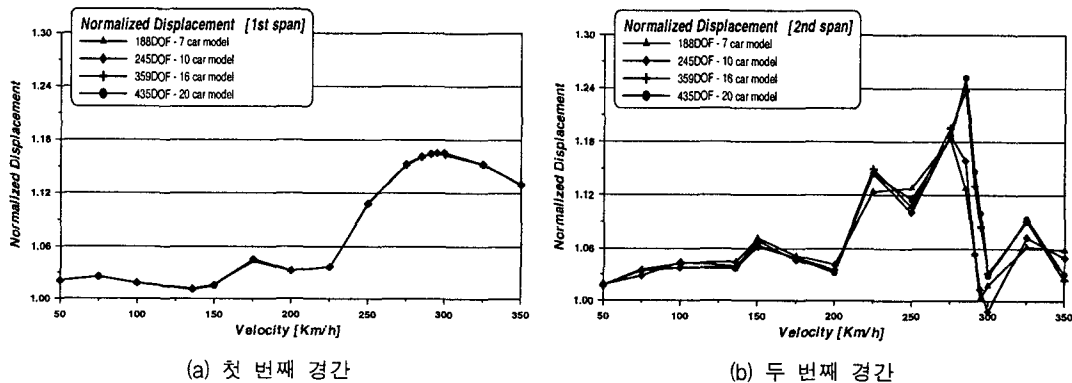


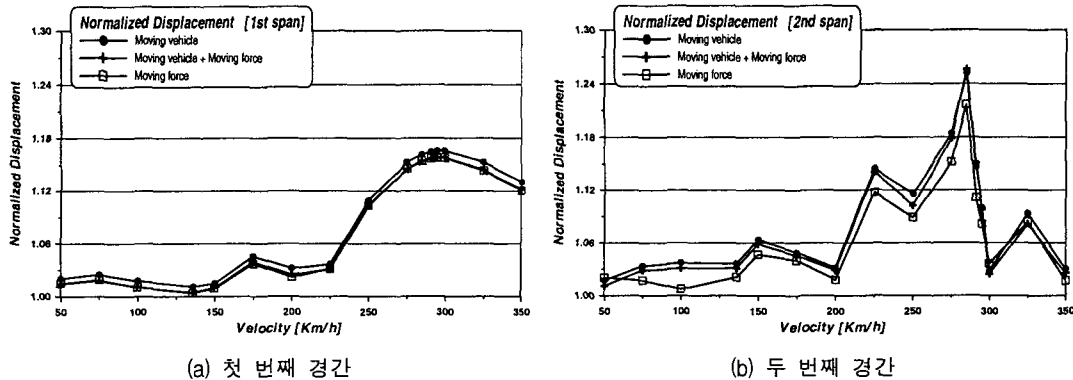
그림 6. 편성모형에 따른 각 경간의 처짐에 대한 증폭계수 비교

4.2 열차의 하중모형에 따른 교량의 동적거동 분석

본 연구에서는 KTX의 정규편성인 20량을 대상으로 보다 효율적인 하중모형을 제시하기 위해 주행하중모형, 주행차량모형과 주행하중모형의 혼합모형을 각각 개발하였으며, 실측결과와의 비교를 통해 검증된 3차원의 주행차량모형을 기준으로 해석결과의 정확성뿐만 아니라 차량의 모형화 과정에서 소요되는 노력 등의 측면에서 각 모형의 효율성을 비교·검토하였다. 이 때 개발된 혼합모형은 고속철도 차량 중 하중효과가 가장 큰 동력차만을 대상으로 3차원의 주행차량모형을 적용하였고 나머지 차량들은 주행하중모형을 사용하였으며, 종방향의 자유도가 서로 종속되는 것으로 가정하여 총 75자유도로 모형화하였다.

그림 7은 차량의 하중모형에 따른 대상교량의 각 경간 중앙점에서의 처짐에 대한 증폭계수를 비교하여 나타낸 것이다. 그림 7(a)는 첫 번째 경간에 대한 증폭계수를 비교한 것으로서, 주행하중모형과 혼합모형의 경우 주행차량모형에 의한 증폭계수와 비교해 볼 때 약 0.7% 가량 낮은 결과를 보여주고 있다. 반면에 그림 7(b)는 두 번째 경간에 대한 증폭계수로서 그림 7(a)와는 달리 혼합모형의 경우 첫 번째 경간에서 발생했던 오차보다 줄어들어 주행차량모형과 매우 근접한 결과를 나타냈지만, 주행하중모형의 경우에는 오히려 최대 3% 정도로 오차가 커진 것으로 나타났으며, 150km/h 이하의 운행속도에서는 교량의 동적응답을 정확히 해석하지 못하는 것으로 나타났다. 이는 주행하중모형은 차량의 현가장치 특성과 질량의 관성효과 등을 고려하지 못하기 때문에 발생한 현상인 것으로 판단된다.

따라서 KTX의 20량 전체를 대상으로 모형화해야 할 경우에는 주행차량모형과 주행하중모형을 혼합하여 사용하는 것이 가장 효율적인 것으로 판단된다.



(a) 첫 번째 경간

(b) 두 번째 경간

그림 7. 하중모형에 따른 각 경간의 처짐에 대한 증폭계수 비교

4.3 열차의 교행에 의한 교량의 동적거동 분석

현재 국내에 도입되어 건설되고 있는 경부고속철도의 교량구간은 총연장의 27%인 112km로 이루어져 있으며, 이들 교량의 대부분은 PSC 박스거더교로서 상·하행선의 왕복선로가 나란히 부설되는 복선구조이다. 이와 함께 경부고속철도 열차의 최대운행시 출발시간 간격은 4분이다. 이와 같은 조건들을 종합해 볼 때 동일한 교량 위를 상·하행의 열차가 동시에 교행할 확률이 매우 높다는 것을 알 수 있다. 또한 본 연구에서 대상으로 선정된 교량과 같이 경부고속철도 교량 중 가장 일반적인 단면과 형식을 갖는 2경간 연속 PSC 박스거더교의 공진속도가 열차의 최대운행속도에 근접한 291km/h로 계산됨에 따라 열차들이 이 교량 위를 공진속도로 교행할 확률 또한 매우 높을 것이다. 그러므로 이 경우에는 열차의 단독주행에 의한 공진현상보다 증폭된 교량의 동적응답이 발생할 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 본 절에서는 경부고속철도 열차가 공진속도로 동일한 교량을 교행할 경우 발생하는 교량의 동적 거동에 대하여 분석하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서 개발한 20량편성정밀모형을 이용하여 교행하는 열차가 대상교량에 동시에 진입하는 경우와 진입거리에 차이가 발생하는 경우에 대하여 해석이 가능한 동적해석 프로그램을 개발하였다. 여기서, 진입거리(d_E)는 상행선 방향으로 진행되는 열차가 대상교량에 진입하는 순간을 기준으로 하여 하행선 차량이 대상교량에 진입하기까지 남은 거리로서, 경부고속철도 열차의 유효중간격(S_{eff})인 18.7m와의 비율을 이용하여 표현하였다.

그림 8은 각 경간 중앙점에서의 처짐에 대한 증폭계수를 열차의 유효중간격에 대한 진입거리의 비율에 따라 나타낸 것으로 열차의 유효중간격에 대한 진입거리의 비율이 0.5, 1.5, 2.5, ... 인 경우에는 열차의 교행에 의해 발생하는 충격계수가 단독주행에 의한 충격계수에 비해 최대 3배 가량 증가하는 것으로 나타났다. 반면에 비율이 0.0, 1.0, 2.0, ...과 같이 배수관계인 경우에는 오히려 단독주행의 충격계수보다 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 본 연구에서 대상으로 선정한 교량이 2경간 연속교이기 때문에 나타나는 현상으로서, 이러한 교량의 한쪽 선로에 열차가 진입하는 순간에 반대편 선로에 열차의 유효중간격의 배수에 해당하는 간격을 두고 동일한 속도의 열차가 진입할 경우에는 이들 두 열차에 의해 교량의 동적응답이 서로 상쇄되어 매우 안정된 거동을 보이는 것으로 판단된다. 또한 반대편 선로의 열차가 유효중간격의 절반 간격으로 진입할 경우에는 앞의 경우와는 달리 양쪽 선로를 공진속도로 주행하는 열차에 의해 가진되어 발생하는 주행진동수가 대상교량 고유진동수의 1/2이 되므로, 이 경우에는 대상교량의 공진현상이 단독주행에 의한 것보다 더욱 증폭되는 것으로 판단된다.

따라서 경부고속철도의 교량과 같이 상·하행선의 왕복선로가 분리되지 않고 하나의 교량에 부설되는 복선구조의 교량일 경우에는 열차의 단독주행에 의한 교량의 동적응답뿐만 아니라 열차의 교행에 의해 증폭되어 발생할 수 있는 교량의 동적응답 특성에 대한 체계적인 검토가 필요한 것으로 판단된다.

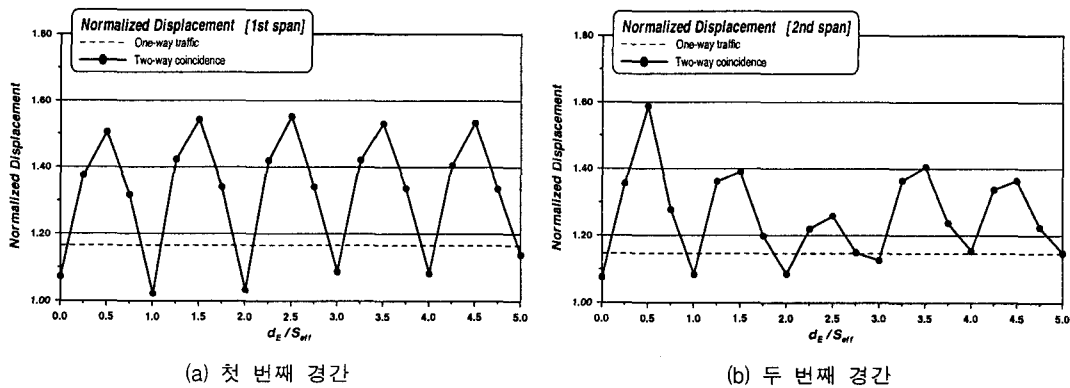


그림 8. 진입거리에 따른 각 경간의 처짐에 대한 증폭계수 비교

5. 결 론

본 연구에서는 고속철도 열차와 교량구조물의 동적응답을 보다 정밀하게 구현할 수 있는 3차원의 동적거동 해석모형을 개발하였다. 열차모형은 경부고속철도 열차의 정규편성에 대하여 3차원의 주행차량모형을 적용한 20량편성정밀모형을 개발하였으며, 대상교량인 2경간 연속(2@40m) PSC 박스거터교는 3차원의 뼈대요소를 사용하여 모형화하였다. 이와 같이 개발된 3차원의 교량·열차모형을 이용하여 고속주행 열차하중을

받는 철도교의 동적거동을 해석할 수 있는 프로그램을 개발하였고, 고속철도열차의 주행시험에 의한 실측결과와의 비교에 의해 본 연구에서 제시한 해석모형과 프로그램의 타당성을 검증하였다. 또한 보다 효율적이며 간편한 열차의 모형화기법을 제시하기 위해 열차의 편성모형과 하중모형간의 조합에 의한 다양한 열차모형에 의한 결과를 검증된 20량편성정밀모형의 결과와 비교·분석을 실시하였다.

1. 본 연구에서 개발한 동적해석 프로그램의 타당성을 검증하기 위해 경부고속철도 교량에서의 실측결과와 해석결과를 비교한 결과, 고유진동수에서는 약 5~6% 정도의 오차가 발생하였으나, 무시할 수 있는 정도이며, 교량의 연직방향 처짐에 대한 시간이력곡선에서는 크기와 경향이 매우 비슷한 것으로 나타나, 본 연구에서 개발한 20량편성정밀모형과 교량모형이 타당한 것으로 판단된다.
2. 열차의 하중모형 중 가장 정밀한 모형인 3차원의 주행차량모형과 편성모형의 조합에 따른 분석결과 7량·10량편성 등과 같은 축소된 편성모형을 사용할 경우에는 고속주행에 의한 교량의 동적거동을 정확하게 해석할 수 없는 것으로 분석되었다. 20량 정규편성열차에 대한 보다 간편한 열차모형으로는 가장 중량이 무거운 KTX의 동력차를 대상으로 주행차량모형을 적용하고 나머지 차량들은 주행하중모형을 이용하여 모형화한 혼합모형이 효율적인 것으로 판단된다.
3. 열차가 대상교량을 공진속도로 단독주행 및 교행하는 경우에 발생하는 교량의 동적처짐을 비교한 결과 열차의 교행에 의해 발생하는 충격계수가 단독주행에 의한 충격계수에 비해 최대 3배 가량 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 경부고속철도의 교량과 같이 복선구조의 교량인 경우에는 열차의 단독주행에 의한 교량의 동적응답뿐만 아니라 열차의 교행에 의해 증폭될 수 있는 교량의 동적응답 특성에 대한 체계적인 검토가 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원에서 실시한 경부고속철도 열차의 주행시험과 감쇠시험 결과^[4]를 인용하였음을 밝히며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. 최성락, 고속철도 차량의 모형화기법에 따른 철도교량의 동적응답 분석, 연세대학교 석사학위논문, 2001. 6.
2. 한국건설기술연구원, “고속전철 구조물 안전성 기술 개발”, 2단계 1차년도 연차보고서, 건설교통부, 과학기술부, 산업자원부, 2000. 10.