

# 공진소멸 현상을 이용한 기존선 철도교량의 지간 최적화를 위한 연구

## A Study on the Optimal Span Length Selection of Conventional Railway Bridges considering Resonance Suppression

김성일<sup>1</sup> · 정원석<sup>1</sup> · 최은수<sup>1</sup>

Sungil Kim · Wonseok Chung · Eunsoo Choi

### Abstract

The possibility of resonance exists always in railway bridges unlike highway bridges because railway bridges are loaded repeatedly by specific trains which has equidistant wheel loads. Resonance phenomenon of the bridge can be broken out when exciting frequencies by train determined from the speed and effective beating interval coincides with natural frequencies of the bridge. Excessive fluctuations of dynamic displacements and accelerations by resonance cause unpleasant passenger comfort and instability of railway structures. On the other hand, resonance suppression phenomenon that all the previous loads which pass through the bridge sum to zero can be occurred. In case we apply this resonance suppression properly, design of stable railway bridge from dynamics point of view can be made. In the present study, most dominant beating interval of conventional trains will be find. After that, specific span length of the bridge which derives resonance suppression can be selected for railway bridges which accomplishes superior dynamic behavior.

**Keywords** : Resonance(공진), Resonance Suppression(공진소멸), Effective Beating Interval(유효타격간격), Span Length(지간), Moving Load Analysis(이동하중해석)

### 1. 서론

기존선 구간의 철도교량은 다수가 노후화 되어 있어 보수보강 및 교체가 요구되고 있으며 신선 건설에 따른 새로운 철도교량의 적용도 다수 예상되고 있다. 철도교량은 도로교량과 달리 일정한 축간격을 가진 특정열차 하중이 반복 운행되므로 항상 공진의 발생가능성이 존재한다.

한편, 교량 위를 주행하는 차량이 고속화, 중량화 됨에 따라 이동차량하중에 의한 교량의 동적거동에 관하여 많은 연구자들의 관심이 집중되었다. 초기의 해석적, 실험적 연구에 이어 근래에 컴퓨터의 발달과 더불어 보다 실제에 가까운 교량 및 차량의 이상화물 적용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 가장 불안정한 교량의 동적거동을 유발하는 공진현상은 이동하중 해석에 있어서 매우 중요한 요소로서 인식되고 있다. 이동하중에 의한 철도교의 공진현

상은 일정한 간격을 가진 연행하중 하의 공진의 이론적 개념에서 알 수 있듯이 차량의 속도와 유효타격간격에 의해 결정되는 이동하중의 가진진동수와 교량의 고유진동수가 일치할 경우 발생하게 된다. 이러한 공진현상이 발생하게 되면 교량의 동적거동은 매우 불안정한 거동을 나타내어 동적 증폭효과가 매우 클 수 있으며, 교량의 감쇠에 민감한 반응을 보인다. 공진 발생 시 예상되는 과도한 변위와 가속도의 발생은 궤도 및 교량 구조물의 안정성 및 열차 승객의 승차감에 매우 나쁜 영향을 줄 수 있다[1].

한편, 이러한 공진발생과 반대되는 개념으로 특정 지간에 대하여는 교량의 특성 및 열차의 동적 특성과 관계없이 오직 열차의 축간격과 교량의 지간에 의해서 공진이 소멸되는 현상이 발생할 수 있다. 이러한 공진소멸현상을 적절히 응용할 경우 설계속도 내에 공진을 발생시키는 임계속도가 존재하더라도 운행 열차하중에 대하여 공진발생이 억제되어 동적거동이 매우 안정적인 철도교량의 설계를 유도할 수 있다.

Received for consideration, 2004. 12. 15.

철도교량의 경우 중량의 열차가 고속으로 주행하므로 공진을 일으키는 임계속도가 설계속도 내에 존재할 확률이 크기 때문에 이동열차하중에 대한 동적해석과 공진에 대한 고려는 필수적이라 할 수 있다. 기존의 공진 및 공진소멸에 관한 연구를 정리하면, Wakui 등은 공진 및 공진소멸에 대한 개념을 정의하고 철도교량의 충격계수에 관한 연구를 수행하였다[2]. Yang 등은 이동집중하중과 단순보에 대한 이론적 연구를 수행하여 공진과 공진소멸에 대한 해를 제시하고 이를 증명하고자 하였다[3]. 김성일 등은 교량 및 고속열차(KTX)의 2차원 및 3차원 모델링을 적용하여 제동하중, 레일의 불규칙성 등을 고려한 연구를 수행하였으며, 유효타격 간격에 따른 공진속도를 결정하여 이에 대한 다양한 매개변수 연구를 수행하였다[4].

본 연구에서는 기존철도에 운행되고 있는 대표적인 열차 형식인 새마을호, 무궁화호, 화물열차에 대하여 주행 열차하중에 대한 동적해석을 수행하여 공진을 발생시키는 가장 지배적인 타격간격을 찾아내고 이를 바탕으로 공진소멸을 유도하는 특정 지간을 찾아 동적안정성에 대한 검토를 수행하고, 이 결과를 토대로 대상 운행열차 하중에 대하여 공진발생이 억제되어 동적거동이 우수한 철도교량 설계 유도를 위한 연구를 수행하고자 한다.

## 2. 공진과 공진소멸 (Resonance & Resonance Suppression)

열차하중에 의한 교량의 동적거동은 교량의 동적특성과 차량의 동적운동에 의해 결정되어진다. 특히, Fig. 1의 일정 간격 하중의 연행에 의한 공진의 개념도에서 보듯이 열차하중에 의한 교량의 공진현상은 교량의 고유진동수와 차량의 운행진동수가 일치할 경우 발생한다. 여기서, 차량의 운행진동수는 다음식과 같이 열차의 유효타격간격(effective beating interval)과 속도에 의해서 결정된다.

$$\Omega(\text{Hz}) = V / S_{eff} = \omega_1(\text{Hz}) \tag{1}$$

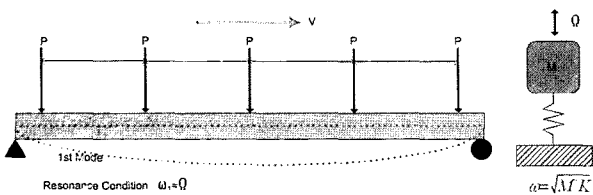


Fig. 1. Concept of Resonance under the equidistant loads condition

여기서,  $\Omega$ 는 열차의 운행진동수,  $V$ 는 차량의 속도이며  $S_{eff}$ 는 열차의 유효타격간격,  $\omega_1$ 은 교량의 첫 번째 휨 모드 고유진동수를 나타낸다.

그러므로, 공진을 유발하는 차량의 임계속도(critical speed)는 다음식과 같이 나타낼 수 있으며, 교량의 고유진동수와 열차의 유효타격간격을 알면 공진을 유발하는 임계속도를 미리 예상할 수 있다. 임의의 차량이 임의의 간격으로 통과하는 도로교량과 달리 철도교량은 특정 열차만 주행하게 되므로 식 (2)와 같이 공진을 발생시키는 임계속도의 파악이 가능하다.

$$V_{cr} = \omega_1 \times S_{eff}$$

$$V_{scr} = \frac{\omega_1}{n} \times S_{eff} \quad n = 1, 2, 3, \dots \tag{2}$$

여기서,  $V_{cr}$ 은 열차의 임계속도이며,  $V_{scr}$ 은 열차의 부임계속도이다.

열차의 부임계속도(subcritical speed)는 열차의 주행속도에 대하여 교량의 진동주기가  $n$ 배로 반응하는 경향을 나타내며, 공진이 발생하는 임계속도에 비하여 정수배만큼 나뉘 주어 구하게 된다.

교량의 운행열차하중에 의한 동적응답은 특정시간에서 교량위에 위치한 축하중에 의한 동적응답과 이미 교량을 통과한 축하중에 의한 자유진동효과가 합쳐져 결정된다[3,5]. 공진현상은 교량을 통과한 하중에 의한 자유진동 효과가 무한대로 발산하면서 결정되는 것으로 위의 식 (1)과 동일하다. 공진소멸현상은 이와 달리 교량을 통과한 이동하중의 자유진동효과가 모두 소멸되는 항이 존재함으로써 교량의 동적응답이 현재 교량에 위치한 하중에 의해서만 결정될 때 발생하는 현상이다. 즉, 공진을 발생시키는 임계속도이나 소멸조건이 발산조건에 비해 우선됨으로써 안정적인 동적응답을 나타내는 것으로 수학적으로 다음식과 같다. 상세한 유도과정은 생략하였다[3,6].

$$L(m) = S_{eff}(m) \times (i + 0.5) \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \tag{3}$$

여기서,  $L$ 은 교량의 지간이다.

윗 식에서 주목할 점은 열차의 속도, 교량의 물성치 및 고유진동수 등과 관계없이 열차의 유효타격간격과 교량의 지간만으로 나타내어진다는 점이다. 즉, 열차의 유효타격간격이 결정되면 다른 어떠한 매개변수와 관계없이 교량의 특정 지간을 결정해 공진소멸을 유도하여 안정적인 동적거동을 확보할 수 있는 교량의 설계가 가능하다는 점이다.

### 3. 주행열차하중에 의한 동적해석

본 연구에서는 일반철도 구간에서 운행되는 새마을호, 화물열차 등의 가장 지배적인 유효타격간격 및 공진소멸이 나타나는 최적지간을 찾기 위해 임의의 대상 교량을 선정하고 수치모델을 구성하였다.

주형 및 가로보의 모델링에는 Fig. 2와 같은 공간뼈대요소를 사용하였다. 전단변형을 고려할 수 있는 Timoshenko 보 요소로서 요소 당 2개의 절점과 절점 당 6개의 자유도를 갖는 요소이다[5].

교량의 운동방정식은 일반적인 유한요소법 정식화 과정에 따라 다음과 같이 구성된다.

$$[M]_B \ddot{u}_B + [C]_B \dot{u}_B + [K]_B u_B = \{F\}_B \quad (4)$$

여기서,  $[M]_B$ 는 교량의 질량행렬,  $[K]_B$ 는 강성행렬,  $[C]_B$ 는 감쇠행렬이며  $\{F\}_B$ 는 교량에 작용하는 열차의 하중벡터이다.

위의 운동방정식은 열차가 진행하는 때 시간간격에 Newmark- $\beta$  방법에 의하여 계산한다. 교량의 고유진동수를 구하기 위한 자유진동해석은 부공간 반복법(Sub-Space Iteration Method)를 이용하여 구한다[5].

개발된 주행열차하중에 대한 교량의 동적해석 프로그램에 대한 검증은 '고속전철 교량/터널구조 및 유지시스템 개발[6]' 등을 통해 이론 및 실험적으로 이루어졌다. 열차의 각 방향 운동을 고려해 차량-교량 상호작용해석을 수행할 경우 열차의 질량 및 현가장치의 특성 등에 의해 전체시스템에 변화가 발생할 수 있어 공진발생 임계속도 등의 변화가 있을 수 있으나, 본 연구에서는 이를 단순화하여 유효타격간격 및 공진소멸 지간을 찾는 데 주력하기 위하여 이동집중하중에 대한 해석만을 수행하였다.

### 4. 기존선 열차의 지배적인 타격간격

Fig. 4, 5는 일반철도 구간에서 운행 중인 새마을호 (동력차 1량+ 객차 6량+ 동력차 1량)와 화물열차(동력차 1량+ 화차 19량)의 하중선도를 나타낸다. 부궁화호의 경우 화물



Fig. 2. Sign Convention of Space Frame Element

열차의 동력차와 같이 6축 디젤동력차를 사용하며, 객차의 축중 및 축간격은 새마을호와 거의 동일하다.

관절형 대차 형식을 사용하는 고속열차 KTX의 경우 공진 및 공진소멸을 발생시키는 지배적인 타격간격은 동일한 간격인 객차사이의 간격 및 대차사이의 간격 18.7m로 결정되나, 객차 별로 독립된 2개의 대차를 갖는 일반열차의 경우 일정한 타격간격이 여러가지의 경우가 나타날 수 있다.

하중선도를 통해 공진 및 공진소멸과 밀접한 관계인 가장 지배적인 타격간격을 찾기 위해 반복 작용할 수 있는 축간격을 정리하면 Table 1과 같다.

기존선에서 흔히 볼 수 있는 25m PSC-Beam 6주형 철도 교량에서 트래구조를 질량효과만 고려한 자유진동해석 결과 첫 번째 휨 고유진동수는 해석결과 5.51Hz로 나타났다.

식 (2) 및 Table 1의 축간격을 이용해 공진을 유발할 수 있는 임계속도를 구하면 다음과 같다.

$$V_{cr} = \omega_1 \times S_{eff} = 3.6 \times 5.51 \times S_{eff}(m) \quad (m/sec) \quad (5)$$

새마을호 등은 실제로 150km/h 이하로 주행하고 있으며, 1급선 설계기준을 적용하여도 최대 200km/h 이하로 주행하게 되나, 정확한 유효타격간격 파악 및 공진 시 거동, 공진소멸 현상 규명 등을 위하여 본 연구에서는 200km/h 까지는 20km/h 간격으로 해석을 수행하고, Table 2의 임계속도 및 부임계속도에 대한 시뮬레이션을 모두 수행하여 정확한 유효타격간격을 파악하고자 하였다.

Table 1. Effective Beating Interval of Conventional Trains (m)

	새마을호	부궁화호	화물열차
대차사이의 간격	15.9	15.9	9.75
객차사이의 간격	23.5	23.5	13.95
대차 내 축간격	2.6	2.3	1.676
앞뒤 객차의 대차사이 간격	7.6	7.6	4.2

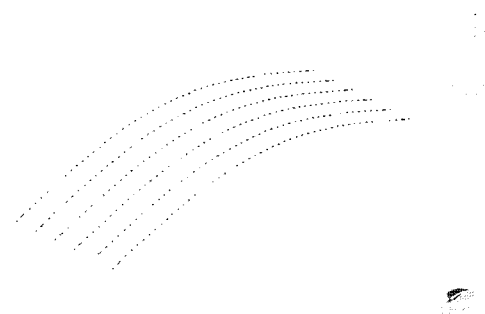


Fig. 3. The 1st Bending Frequency of 25m PSC-Beam Bridge ( $\omega_1=5.51$  Hz)

동적하중에 의한 응답의 증가분, 즉 동적확대계수(Dynamic Magnification Factor, DMF) 혹은 충격계수는 다음과

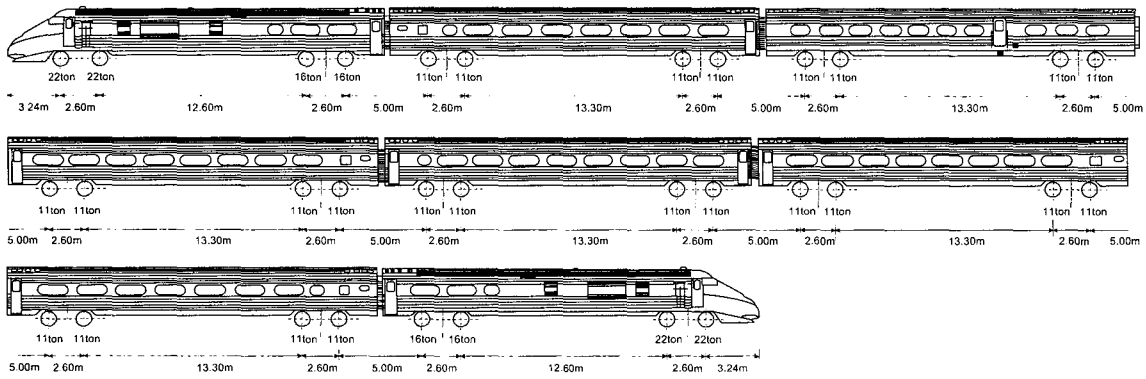
같이 정의할 수 있다.

$$DMF = \text{최대동적응답} / \text{최대정적응답} \quad (6)$$

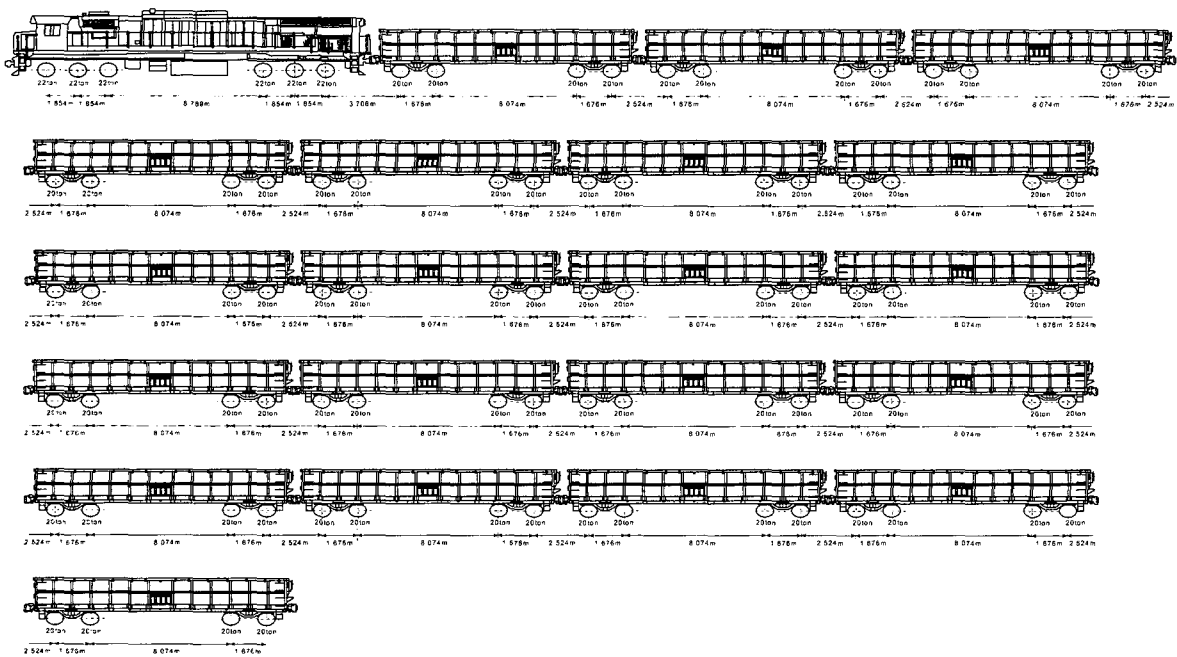
**Table 2.** Critical & Subcritical Speed on the 25m PSC-Beam Railway Bridge (km/h)

		새마을호	무궁화호	화물열차
대차사이의 간격	A <sub>0</sub>	315.39	315.39	193.40
	A <sub>1</sub>	157.70	157.70	96.70
객차사이의 간격	B <sub>0</sub>	466.15	466.15	276.71
	B <sub>1</sub>	233.07	233.07	138.36
대차 내 축간격	C <sub>0</sub>	51.57	45.62	33.25
	C <sub>1</sub>	25.79	22.81	16.62
앞뒤 객차의 대차사이 간격	D <sub>0</sub>	150.75	150.75	83.31
	D <sub>1</sub>	75.38	75.38	41.66

Fig. 6은 새마을호 주행 시 동적확대계수의 속도별 변화를 나타낸다. 각 유효타격간격에 대한 검토 결과 객차사이의 간격인 B<sub>0</sub>에 의한 임계속도인 466.15km/h에서 매우 큰 동적응답 증가가 발생함을 알 수 있다. 이의 부공진영역인 233.07km/h에서도 이에 따른 응답 증가 현상을 보이고 있다. 한편, 대차사이의 간격인 A<sub>0</sub>에 의한 임계속도인 315.39 km/h에서는 응답의 증가가 상대적으로 매우 미약함을 알 수 있다. 다른 반복타격간격인 C<sub>0</sub>, D<sub>0</sub>에 의한 임계속도인 51.57 km/h, 150.75km/h 주행 시에도 공진으로 추측되는 큰 응답



**Fig. 4.** Axle Load & Distance of Saemaul Train



**Fig. 5.** Axle Load & Distance of Freight Train

의 증가는 나타나지 않고 있다.

각 임계속도에 대한 시간이력곡선을 살펴보면 공진의 발생을 더욱 확실하게 파악할 수 있다. Fig. 7은 열차 주행면에 근접한 거더 중앙부 수직변위의 주요 속도별 시간이력곡선을 나타낸다. Fig. 7에서 보듯이 466.15km/h에서 발산형태의 명확한 공진 시간이력곡선을 나타내고 있으며, 상대적으로 315.39km/h에서는 일반적인 동적 시간이력곡선의 형태임을 파악할 수 있다. B<sub>0</sub>의 부공진 영역인 B<sub>1</sub>에 의한 233.07km/h의 경우 교량 내에 열차의 축이 위치할 경우 공진에 의한 발산 형태를 나타내지는 않으나 열차의 모든 축이 완전히 교량을 통과한 후 나타나는 자유진동 파형이 150.75km/h나 315.39km/h 등 다른 속도에 의한 주행에 비하여 상대적으로 크게 동요(fluctuation)함으로 인해 공진의 부공진영역을 알 수 있다.

앞뒤 객차의 대차사이 간격에 의한 D<sub>0</sub>의 경우 오히려 지배적인 유효타격간격인 B<sub>0</sub>의 두 번째 부공진 영역과 근접함으로 인해 동적효과가 증대된 것으로 판단된다. 이상의 결과로 볼 때 새마을호의 지배적인 타격간격은 객차사이의 간격을 확인할 수 있다.

무궁화호 및 화물열차 주행에 의한 속도별 동적증폭효과를 나타낸 Fig. 8과 9에서 보듯이 새마을호와 같이 객차사이의 간격 혹은 화차사이의 간격 B<sub>0</sub>에 의한 임계속도에서 큰 동적응답 증가가 발생함을 알 수 있다.

무궁화호 주행 시 대차사이의 간격인 B<sub>0</sub>에 의한 임계속도에서의 응답과 지배적인 유효타격의 부공진영역인 A<sub>1</sub>에 의한 응답을 비교한 시간이력곡선인 Fig. 10을 보면 응답의 최대값은 B<sub>0</sub>의 경우가 약간 크게 나타났으나 열차가 교량을 완전히 통과한 후의 자유진동영역의 파형으로 보아 공진에 대한 지배적인 유효타격은 객차사이의 간격을 확인할 수 있다.

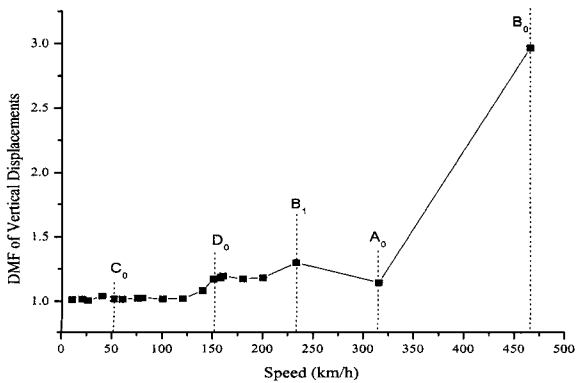


Fig. 6. DMF variation under the passage of Samael Train (25m bridge)

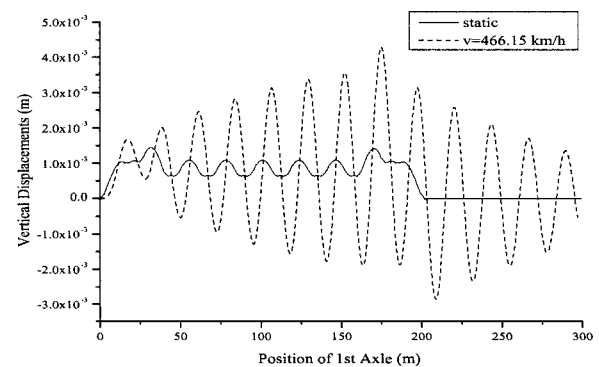
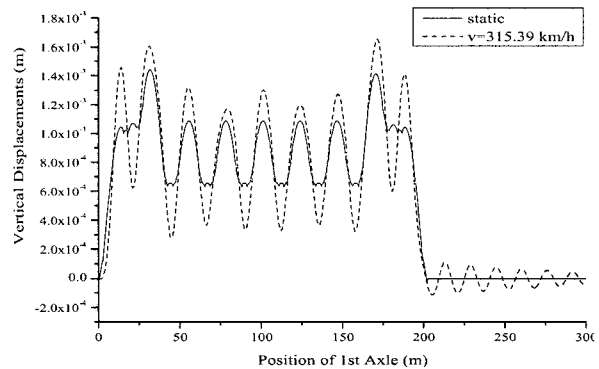
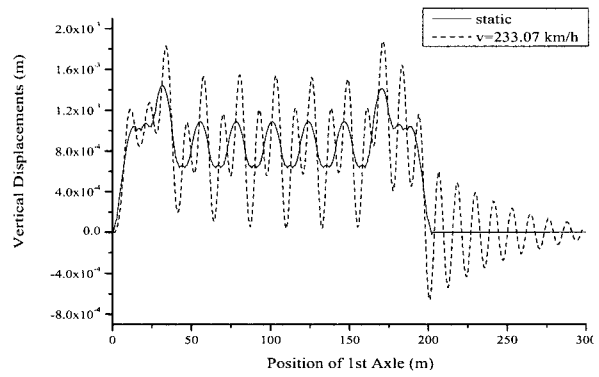
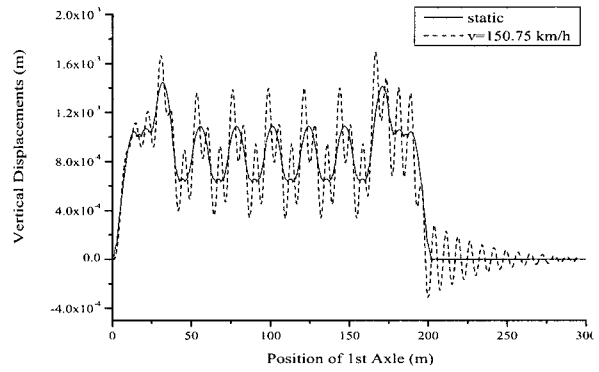


Fig. 7. Time history curve of vertical displacements (Samael, 25m bridge)

한편, 이 결과에서 기존선에 많이 시공된 25m PSC-Beam 교량의 경우 상대적으로 큰 단면과 강성에 의한 비교적 높은 고유진동수로 인해 설계속도(1급선 200 km/h) 내에서 기

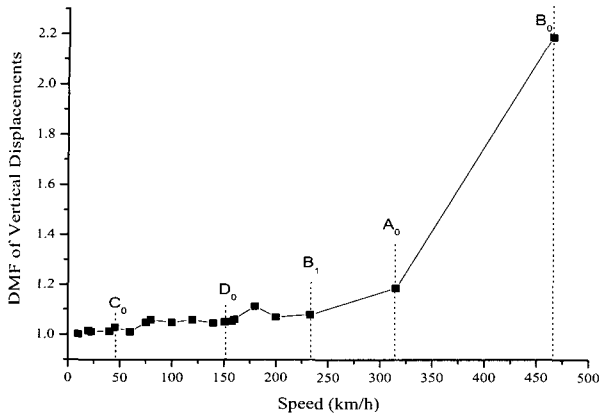


Fig. 8. DMF variation under the passage of Mugunghwa Train (25m bridge)

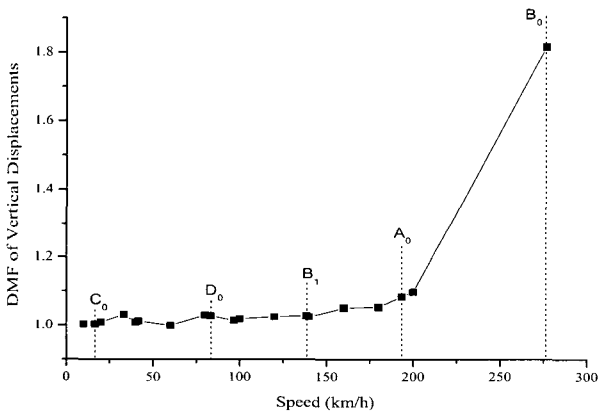


Fig. 9. DMF variation under the passage of Freight Train (25m bridge)

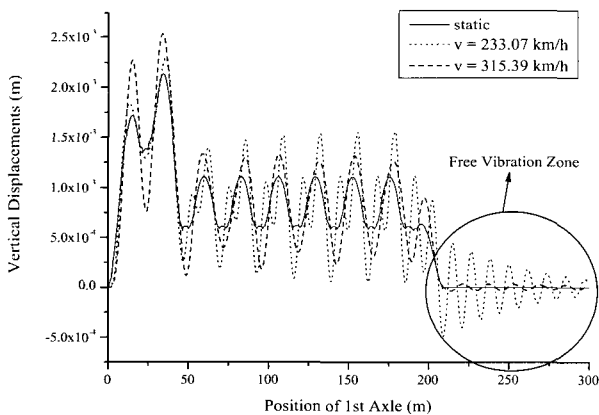


Fig. 10. Time history curve of vertical displacements (Mugunghwa, 25m bridge)

존 열차하중에 대해 공진 발생을 피하며, 이로 인해 동적하중에 의한 증폭효과가 적은 안정적인 동적거동을 보일 수 있음을 알 수 있다. 변위의 증폭효과 외에 가속도 및 단부격 임각 등도 같은 경향을 나타냈다. 그러나, 기존의 PSC-Beam 철도교량은 단면효율성 등에 의해 지간이 25m로 제한되는 단점이 있으므로 보다 장지간이 필요할 경우에는 다른 형식이 요구된다.

### 5. 기존선 열차에 대한 동적안정성을 고려한 최적지간의 선정

이상의 결과를 통해 새마을호 및 무궁화호, 화물열차의 공진을 유발하는 가장 지배적인 타격간격이 객차사이의 거리(화물열차의 경우 화차사이의 거리)임을 알 수 있다. 이를 식 (3)에 대입하면 공진소멸을 유도하여 공진발생을 피할 수 있는 안정적인 동적거동을 보일 수 있는 지간의 결정이 가능하다.

$$L(m) = S_{eff}(m) \times (i + 0.5) \quad (i = 1, 2, 3, \dots)$$

$$= 35.25(m), 58.75(m) \dots \text{for 새마을호, 무궁화호} \quad (7)$$

$$= 20.925(m), 34.875(m) \dots \text{for 화물열차}$$

식 (7)에서 흥미로운 점은 화물열차의 화차사이 간격의 새마을호 및 무궁화열차와 다르나 약 35m 지간에서 모두 공진소멸이 유도될 수 있는 공통점을 갖고 있다는 점이다. 새마을호 및 무궁화열차에 대해 35m, 60m, 화물열차에 대하여는 20m, 35m 등의 지간이 공진을 억제할 수 있는 적합한 지간으로 예상된다. 따라서, 공통 지간으로 보이는 35m 교량에 대한 수치해석을 수행해 이를 입증하고자 하였다.

Fig. 11과 같은 임의의 6주형 교량 35m 지간을 선정한 후

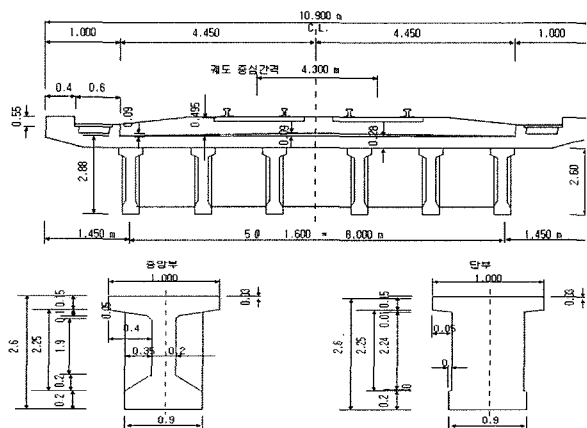


Fig. 11. Cross Section of 35m Bridge

자유진동해석에 의한 고유진동수는 3.475Hz로 나타났으며, 앞의 예제교량인 25m 교량의 경우와 마찬가지로 식 (2)와 Table 1을 이용해 각 축간격에 대한 임계 및 부임계속도를 구하면 Table 3과 같다.

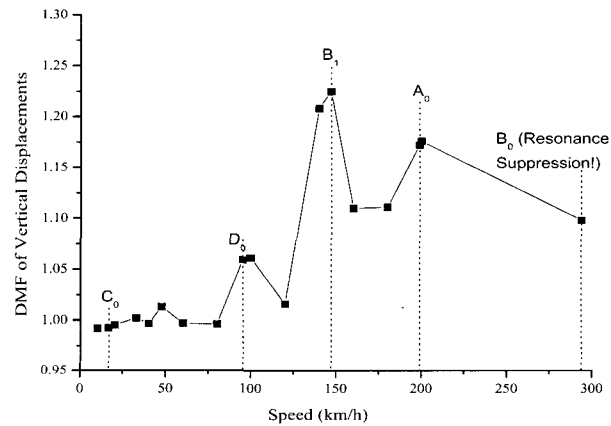
35m 교량의 각 열차 속도별 중앙부 수직변위의 동적증폭 효과를 나타낸 Fig. 12, 13, 14에서 보듯이 공진발생이 예상된 임계속도에서 공진소멸현상이 발생하여 공진발생에 의한 과도한 동적응답 증가 현상이 발생하지 않았음을 알 수 있으며, 오히려 고속의 다른 속도 주행에 의한 응답보다 더 작은 증폭을 보여주고 있다.

Fig. 15, 16의 시간이력곡선은 이러한 결과를 더욱 명확히 보여주어 공진발생이 예상되는 임계속도에서 Fig. 7과 달리 일반속도 주행에 의한 결과와 같은 경향의 시간이력곡선이 도시됨을 확인 할 수 있다. 이는 열차의 축이 교량을 통과 후 발생하는 자유진동효과에 의한 동적증폭이 상쇄됨으로 인한 결과이다.

이러한 결과는 교량의 강성이나 질량 등 특성치 및 열차의 동특성과 관계없이 오직 시간과 축간격에 의해 결정되는

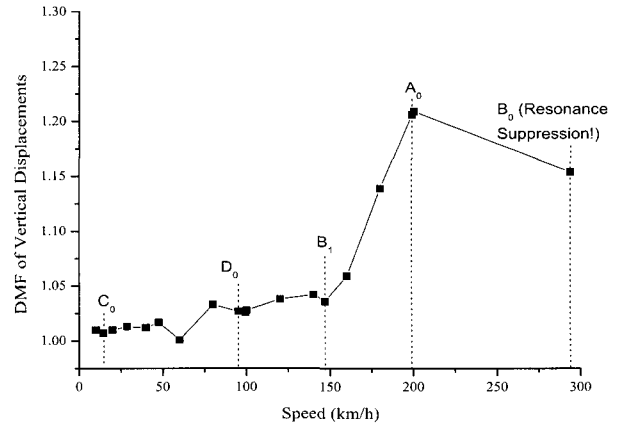
**Table 3. Critical & Subcritical Speed on the 35m Railway Bridge (km/h)**

		새마을호	무궁화호	화물열차
대차사이의 간격	A <sub>0</sub>	198.91	198.91	121.97
	A <sub>1</sub>	99.45	99.45	60.99
객차사이의 간격	B <sub>0</sub>	293.99	293.99	174.51
	B <sub>1</sub>	146.99	146.99	87.26
대차 내 축간격	C <sub>0</sub>	32.53	32.53	20.97
	C <sub>1</sub>	16.26	16.26	10.48
앞뒤 객차의 대차사이 간격	D <sub>0</sub>	95.08	95.08	52.54
	D <sub>1</sub>	47.54	47.54	26.27

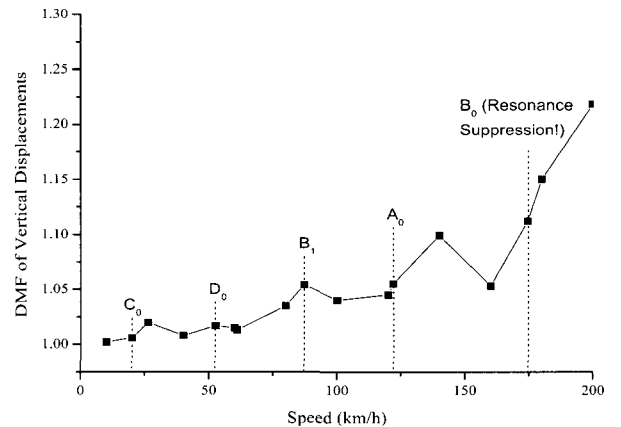


**Fig. 12. DMF variation under the passage of Saemaul Train (35m bridge)**

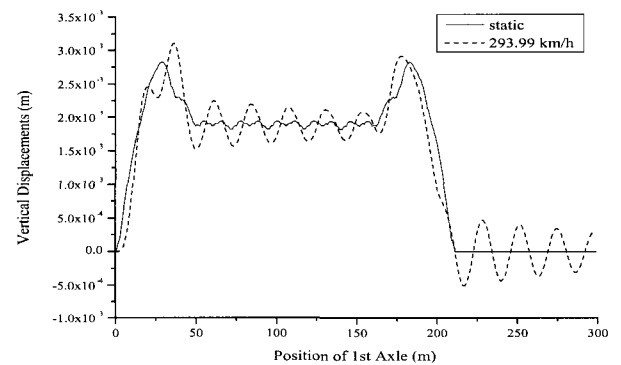
결과로서 기존선을 운행하는 새마을호, 무궁화호, 화물열차에 대하여 35m 시간의 철도교량은 공진발생을 억제할 수



**Fig. 13. DMF variation under the passage of Mugunghwa Train (35m bridge)**



**Fig. 14. DMF variation under the passage of Freight Train (35m bridge)**



**Fig. 15. Time history curve of vertical displacements at critical speed : resonance suppression (Saemaul, 35m bridge)**

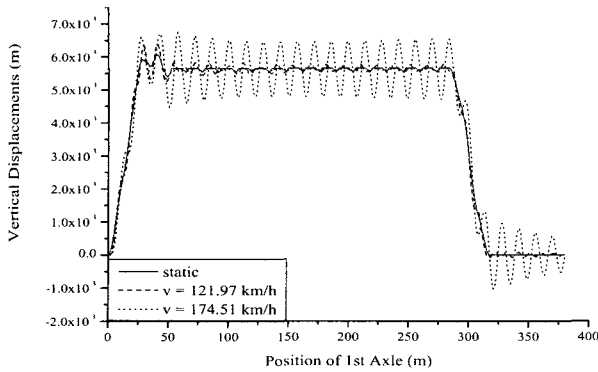


Fig. 16. Time history curve of vertical displacements at critical speed : resonance suppression (Freight, 35m bridge)

있어 다른 지간의 교량에 비하여 안정적인 동적거동을 보임을 밝혀준다. 즉, 교량의 단면효율화 등에 의해 고유진동수가 작아 설계속도 내에서 공진이 발생할 수 있더라도 35m 지간은 새마을호, 무궁화호, 화물열차에 대하여 공진소멸이 발생함으로 인해 불안정한 동적거동이 나타나지 않을 수 있다는 것이다.

## 6. 결론

특정한 열차가 주행하는 철도교량의 경우 항상 공진의 발생가능성이 존재한다. 임계속도 주행에 의해 공진이 발생하게 되면 교량의 응답은 매우 불안정한 거동을 나타내게 되며, 응답의 크기는 교량의 감쇠비에 매우 민감하다. 공진에 의한 과도한 변위 및 가속도 등은 구조물의 불안정성을 초래하며, 승객의 승차감에 피해를 주게 된다.

공진을 피할 수 있는 교량의 설계는 동적거동의 안정화 및 궤도, 교량구조물의 안정성 측면에서 매우 바람직할 것이며, 이에 대한 방법으로는 설계속도 내에서 공진을 피할 수 있는 고강성의 구조물 설계가 있을 수 있다. 그러나 이러한 설계는 매우 비경제적이며 비효율적인 단면설계가 될 가능성이 크다. 그러므로 설계속도 내에서 공진발생이 가능한 임계속도를 허용하더라도 유효타격간격과 교량의 지간에 의한 함수인 공진소멸현상을 이용하는 설계가 바람직할 것이다.

본 연구에서는 기존선에서 운행되고 있는 대표적인 열차 형식들에 대한 가장 지배적인 타격간격을 찾아 이를 이용하여 공진소멸을 유도할 수 있는 지간을 결정하고자 하였다.

일정한 간격으로 반복 작용하는 다양한 축간격에 대한 시뮬레이션 결과 새마을호 및 무궁화호, 화물열차의 지배적인 타격간격은 객차사이의 간격임을 알 수 있었다. 실제 주행 속도 내에 존재할 가능성이 큰 부임계속도에 의한 주행의 경우 응답 시간이력에서 자유진동 효과가 다른 속도에 비하여 동요가 크다는 것을 확인 할 수 있었으며, 이를 이용하면 현장 실험 등에서 고유진동수 및 감쇠비를 구하는데 유용할 것으로 판단된다.

기존선에서 주행하는 세 가지 형식의 열차에 대해 결정된 지배적인 타격간격을 이용하여 공진소멸을 유도하는 지간을 결정하면 세 열차 모두에 대하여 35m 지간이라는 공통점이 발견되었다.

35m 지간의 철도교량은 그 형식 및 재료와 상관없이 위의 열차하중에 대하여 공진발생을 억제할 수 있으므로 동적 안정성 측면에서 다른 지간의 교량보다 매우 우수한 교량이라고 말할 수 있다. 이와 같은 연구결과는 기존선 외에도 초고속 하중에 의해 더 큰 동적안정성이 요구되는 고속철도교량 및 자기부상열차의 경우에도 설계 시 적극 활용해야 할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 2005년도 선로구축물 핵심기술연구 사업의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 전합니다.

## 참고 문헌

1. Rail Bridges For Speeds > 200km/h, ERRI D 214/RP9, European Rail Research Institute, 1999.
2. Wakui, H. Matsumoto, N. and Watanabe, T., "Design Impact Factor for Concrete Railway Bridges", Quarterly Report of RTRI, Vol.30, No.2, May 1989, pp.89-96
3. Y.B. Yang, J.D. Yau & L.C. Hsu, "Vibration of Simple Beams due to Trains Moving at High Speeds", Engineering Structures, 19(11), 1997, pp.936-944
4. 김성일, 박종원, 장승필, "교량의 지간장과 고속전철하중 유효타격간격 사이의 관계에 따른 공진현상", 한국지진공학회 논문집, 제 3권 2호, pp.67-75, 1999.6
5. 김성일, "고속철도 교량의 교량-열차 상호작용해석", 박사학위논문, 서울대학교, 2000.
6. 고속전철 교량/터널구조 및 유지관리 시스템 개발(교량부문) 1단계 보고서, 한국건설기술연구원, 1999.10