

# Train Signature를 이용한 열차하중의 동적하중효과 비교

## Comparison of Dynamic Loading Effects Using the Train Signature

김현민\*                      오지택\*\*                      황원섭\*\*\*  
Kim, Hyun-Min      Oh, Ji-Taek      Hwang, Won-Sub

---

### ABSTRACT

In order to compare the dynamic loading effects of particular trains it is necessary to use methodology that separates the two inherent aspects of the dynamic response of the total dynamic system-the characteristics of the train and a bridge. Because the train signature profile is a function of axle spacing and axle loads, it can be calculated which is independent of the characteristics of an individual bridge. Thus the use of the train signature enables a rapid comparison of the effects of different trains to be made. If the magnitude of train signature for a new train type is less than of existing trains on a route then the route will be satisfactory for the new train. This study presents a quantitative analysis of the dynamic loading effects for various domestic real trains-PMC8, PMC16, Mugunghwa passenger coach, several freight coach, KTX and TTX(Tilting Train Express)- Using the train signature.

---

### 1. 서 론

Train Signature는 개별 교량 특성에 대해 독립적으로 추출이 가능한 열차의 축간(axle spacing) 및 축중(axle load)에 대한 함수로써 추출된 Train Signature를 이용하여 공진을 유발하는 열차 하중의 지배적인 가진 주기와 이에 따른 공진 속도를 추정할 수 있다. 따라서 특정 열차의 재편성 및 신규 투입 시 각 열차의 Train Signature를 상호 비교함으로써 열차하중의 동적 영향을 효과적으로 비교할 수 있다.

국내에 운행되고 있는 대표적인 열차유형인 새마을 PMC열차 8량 편성, 새마을 PMC 16량 편성, 디젤 1량+무궁화 객차 7량 편성, 디젤 1량+유개차 20량 편성, KTX 및 한국철도기술연구원 에서 개발 중인 TTX(Tilting Train Express) 열차를 대상으로 Train Signature를 이용한 동적하중효과를 분석한 결과 장대편성 열차, 특히 축중이 가장 큰 디젤 1량+ 화물열차(유개차) 20량 편성의 Train Signature가 크게 나타나는 것으로 분석되었다.

---

\* 한국철도기술연구원 구조물동특성연구그룹 주임연구원, 정회원

\*\* 한국철도기술연구원 구조물동특성연구그룹 선임연구원, 정회원

\*\*\* 인하대학교 토목공학과 부교수

## 2. Train Signature의 정의

### (1) DER method에 의한 Train Spectrum의 계산

ERRI-214 위원회에서 제안된 DER(Decomposition of Excitation at Resonance) method는 열차하중에 의한 공진 발생 시 단순보의 응답을 계산할 수 있도록 제안된 간편식이다. DER method에서는 교량의 진동을 교량의 영향선특성, 열차하중의 주행속도 특성, 열차하중 가진 특성의 곱으로 나타내며 수치적 방법을 통해 검증된 교량의 동적응답 산출 기법이다.

DER method는 계산을 단순화하기 위해 관성 상호작용을 무시하고 교량의 1차 모드에 대해서만 계산한 교량의 응답 중 공진과 관련된 항에 대한 Fourier 급수만을 추출하여 계산함으로써 계산 과정을 축소시킨다. 먼저 단순보 교량시스템은 1차 휨 모드만을 고려하여 최대 처짐은 정간중양에서 발생하는 것으로 가정함으로써 그림 1과 식 (1)에 나타난 것처럼 연속체 시스템을 단자유도 시스템으로 치환한다. 또한 열차하중은 규칙적 또는 불규칙적인 진격을 갖는 일련의 속하중( $P_k$ )의 군집으로 모델링된다.

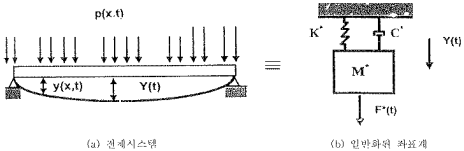


그림 1. 단순보의 단자유도 시스템 치환

$$EI \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + c \frac{\partial y(x,t)}{\partial t} + m \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = p(x,t) = M^* \ddot{Y} + C^* \dot{Y} + K^* Y(t) = F^*(t) \quad \text{식(1)}$$

일반화된 단자유도 시스템은 전제시스템과 동일한 포텐셜 에너지, 운동에너지, 소산에너지를 갖는 모델로 정의 된다. 따라서 열차하중으로부터 일반화된 등가하중  $F^*(t)$ 는 단자유도 시스템의 임과 전제시스템의 외부하중에 의한 일이 동일하게 함으로써 결정된다. 여기서 등가하중  $F^*(t)$ 는 Dirac Function 과 window distribution에 의해 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$F^*(t) = \sum_{k=0}^{N-1} P_k H_{L/b}(t-t_k) \cos\left(\frac{\pi v}{L}(t-t_k)\right) \quad \text{식(2)}$$

교량을 통과하는 열차하중은 통과시간(T)을 주기로 갖는 주기함수도 가정되므로 일반화된 열차하중은 Fourier 급수로 분해된다. 즉 열차하중에 의한 가진(excitation)과 관련된 스펙트럼은 식(3)과 같다.

$$S(n) = \frac{4L}{\pi(L + X_{N-1})} \frac{\cos(\frac{Ln\omega}{2v})}{(\frac{1 - Ln\omega}{\pi v})^2} \sqrt{\left(\sum_{k=0}^{N-1} P_k \cos(n\pi t_k)\right)^2 + \left(\sum_{k=0}^{N-1} P_k \sin(n\omega t_k)\right)^2} \quad \text{식(3)}$$

여기서는 축종의 편성(축종, 축간)이 교량의 동적응답에 끼치는 영향이 관심대상이므로 이와 관련된 항만 다시 표시하면 식 (4)와 같다.

$$\sqrt{\left(\sum_{k=0}^{N-1} P_k \cos(n\pi t_k)\right)^2 + \left(\sum_{k=0}^{N-1} P_k \sin(n\omega t_k)\right)^2} \quad \text{식(4)}$$

## (2) Train Signature의 정의

철도 모드에 대한 고유진동수  $w_o$ (hz)를 갖는 교량을 주행속도  $v$ (m/s)로 통과하는 열차하중에 의해 공진이 발생하는 조건은 식 (5)와 같다.

$$\lambda = \frac{v}{w_o} \quad \text{식(5)}$$

여기서,  $\lambda$ 는 하중의 축간격(m)

그러나 실제 열차의 편성은 축배치가 다양하므로 여러 가지 주기가 복합적으로 작용되게 된다. Train Signature는 축간(axle spacing)에 의해 발생하는 가진 주기 성분 중 교량의 동적응답에 지배적인 영향을 끼치는 가진 주기를 추출할 수 있는 기법으로 Train Signature를 이용하면 열차 하중에 의한 교량의 공진 발생을 회피하기 위한 수치적 분석 및 복잡한 계산을 단순화시킬 수 있다.

Train Signature는 DER method의 전개과정에서 추출된 식(4)의 Taylor급수로 전개하여 유도할 수 있다.

$$S_o(\lambda) = \text{Max}_{i=1 \rightarrow M} \sqrt{\left(\sum_{k=1}^i P_k \cos\left(\frac{2\pi x_k}{\lambda}\right)\right)^2 + \left(\sum_{k=1}^i P_k \sin\left(\frac{2\pi x_k}{\lambda}\right)\right)^2} \quad \text{식(6)}$$

여기서,

$\lambda$  : 하중의 가진주기

$M$  : 열차 총 축수

$P_k$  : k 번째 축의 축중

$x_k$  : 열차의 첫 번째 축으로부터의 k번째 축까지의 거리 ( $= v \times t_k$ ,  $t_k$ )

$t_k$  : k 번째 축의 교량 도달 시간

### 3. 국내 운행열차하중의 Train Signature

그림 3은 현재 운행되고 있는 대표적인 열차유형인 새마을 PMC 8량 편성, 새마을 PMC 16량 편성, 디젤 1량+무궁화 객차 7량 편성, 디젤 1량+화차(유개차) 20량 편성, KTX 및 한국철도기술연구원에서 개발 중인 TTX(Tilting Train Express) 열차의 Train Signature를 분석하여 나타내 것이다. 표 1은 Train Signature로부터 분석된 각 열차유형별 주요 가진 주기, Train Signature와 가진 주기에 대한 공진속도를 나타내었다. 여기서 공진속도는  $\omega_0=4\text{Hz}$ 인 교량을 대상으로 계산한 예이며 현재 가능한 운행속도 이내일 경우 음영으로 구분하여 표시하였다. 모든 검토대상 차량편성에서 동력차의 축간 보다는 반복적인 채하가 발생하는 객차부 또는 화차부의 대차 간격에 의해 지배적인 가진이 발생하는 것으로 분석되었다. 특히 새마을 PMC 16량 편성, 디젤 1량+유개차 20량 편성, KTX와 같이 장대편성의 열차에서 계산된 Train Signature가 더 큰 것을 알 수 있다.

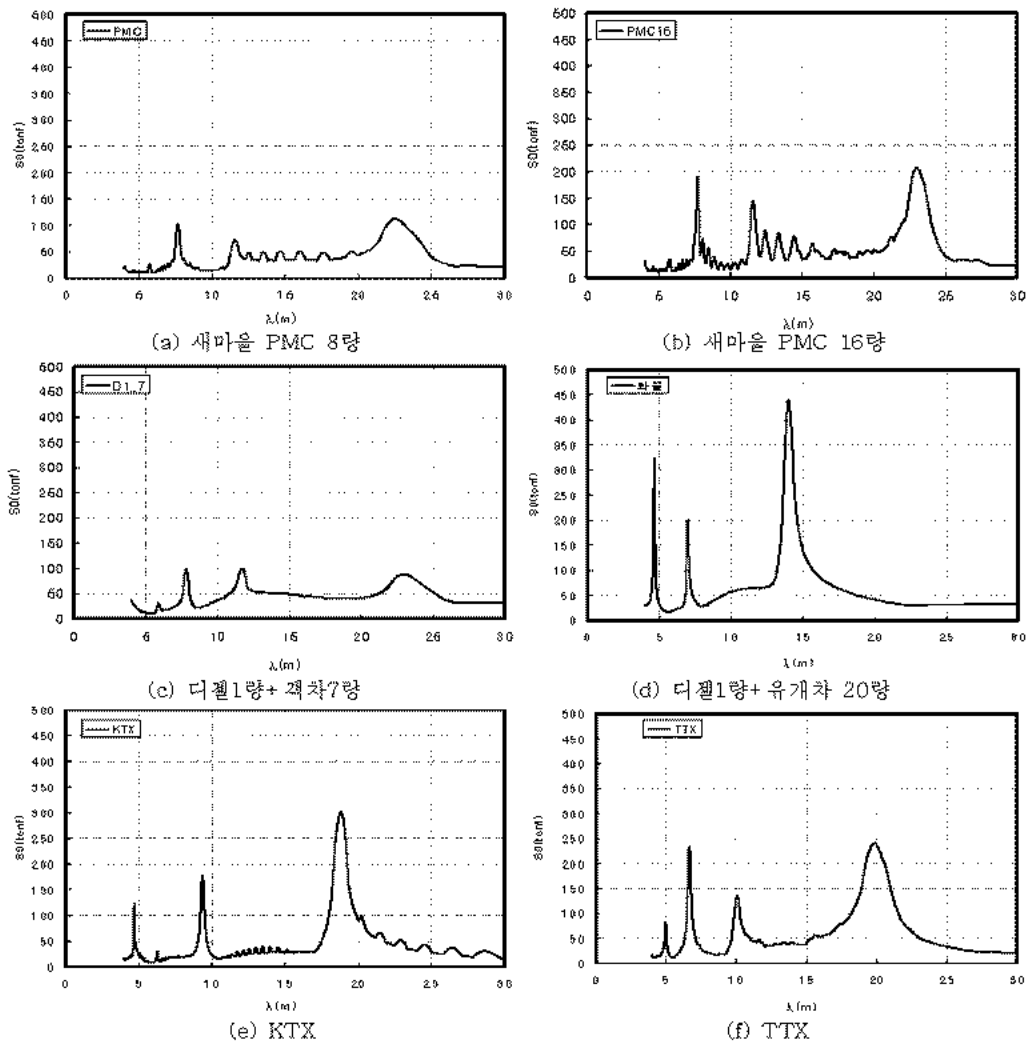


그림 3. 열차유형별 Train Signature

표 1. Train Signature에 의한 열차유형별 주요 가진 주기

열차유형	가진 주기(m)			공진 속도(km/hr) ( $\omega_0=4\text{Hz}$ )			$S_0$ (tonf)		
	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$v_{res1}$	$v_{res2}$	$v_{res3}$	$S_{01}$	$S_{02}$	$S_{03}$
새마을 PMC열차 8량	7.65	11.6	22.55	110.16	167.04	324.72	102.94	72.38	112.31
새마을 PMC 16량	7.7	11.6	23.00	110.88	167.04	331.2	189.89	144.66	207.73
디젤1량+ 객차7량	7.8	11.7	23.00	112.32	168.48	331.2	97.47	99.01	88.16
디젤1량+ 유개차 20량	4.65	7.00	14.00	66.96	100.8	201.6	325.04	200.04	440.12
KTX	4.7	9.35	18.80	67.68	134.64	270.72	121.48	176.80	301.13
TTX	6.65	10.1	19.80	95.76	145.44	285.12	235.15	135.36	240.58

여기서 Train Signature  $S_0$ 는 동적하중효과를 정량적으로 나타내는 하중강도라 할 수 있다. 따라서  $S_0$ 의 값이 클수록 공진발생시 해당 가진 주기에 의한 동적하중효과가 크다고 말할 수 있다. 그러나 교량의 동적응답은 열차의 주행속도와도 밀접한 관계를 가지고 있으므로 공진 속도가 다른 조건에서  $S_0$ 의 값만으로 단순히 동적하중효과를 평가하는 것은 바람직하지 않은 것으로 판단된다. 다만 새마을 PMC 8량 편성, 새마을 PMC 16량 편성, 디젤 1량+ 객차 7량 편성과 같이 매우 유사한 가진 주기를 갖는 경우에는 공진 속도가 크게 차이가 나지 않으므로  $S_0$ 에 의한 동적하중효과와 정량적인 상호 비교가 가능한 것으로 판단된다. 현재 운행속도 범위 내에서 이들에 대한  $\omega_0=4\text{Hz}$ 인 교량에서의 Train Signature 비교는 새마을 PMC 16량 편성의 경우  $\lambda_1=7.7\text{m}$ 에 대해  $v_{res1}=110.16\text{km/hr}$ ,  $S_0=189.89\text{tonf}$ 로 나타나 3가지 경우 중 열차 가진에 의한 동적하중효과가 가장 큰 것으로 나타났다. 또한 전반적으로 장대편성열차(새마을 PMC 16량 편성, 디젤1량+ 유개차 20량, KTX)의 Train Signature가 다른 편성에 비해 상당히 크게 나타나는 것으로 분석되었으며 특히 화물열차(유개차) 20량 편성의 Train Signature를 분석한 결과,  $\lambda_1=66.96$ 에 대해  $v_{res1}=66.96\text{km/hr}$ ,  $S_0=325.04\text{tonf}$ 로 현재 운행 속도 범위에서  $S_0$ 의 값이 크게 나타나 실험적, 수치적 다각적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

다양한 간격을 갖는 집중 하중이 연속적으로 교량에 재하되는 열차하중의 특성상 특정 축간에서 지배적인 가진 주기가 발생하게 된다. Train Signature는 이러한 열차하중의 특성을 조화함수로 일반화하여 교량의 동적응답에 지배적인 영향을 끼치는 가진 주기를 추출할 수 있는 기법이다. 국내에 운행되고 있는 대표적인 열차유형인 새마을 PMC열차 8량 편성, 새마을 PMC 16량 편성, 디젤 1량+ 무궁화 객차 7량 편성, 디젤 1량+ 유개차 20량 편성, KTX와 한국철도기술연구원에서 개발 중인 TTX(Tilting Train Express) 열차를 대상으로 Train Signature를 이용한 동적하중효과를 분석한 결과 장대편성 열차, 특히 축중이 가장 큰 디젤 1량+ 화물열차(유개차)의 Train Signature가 크게 나타나는 것으로 분석되었다. 그러나 교량의 동적응답은 열차의 주행속도와도 밀접한 관계를 가지고 있으므로 단순히 Train Signature를 이용한 열차 상호간의 동적하중효과를 정량적으로 비교하는 것은 적합하지 않을 수 있다. 다만 열차 유형별로 다르게 나타나는 공진속도 (resonance), 부공진속도의 추정, 신규 투입열차에 대한 기존열차와의 상호 비교를 위한 참고자료로 활용이 가능하다. 향후 열차 주행속도에 따른 영향을 고려한 Train Signature분석 기법에 대한 보완 연구가 필요할 것이다.

## 참고문헌

1. ERR D214, "Rail Bridge for Speeds >200KM/H Final Report", ERRI 연구보고서, pp.37~44
2. 오지택외 (2001), "철도시스템 기술개발연구-강철도구조물 건설도 진단시스템 분야", KRRI 연구보고서, p.108-125