

이동하중 재현 시험 기법에 대한 선행 연구

A Pilot Study of Moving Loads Simulation Techniques

김현민†
Hyun-min Kim

김성일*
Sung-il Kim

ABSTRACT

This paper is intended as an development of moving load simulation techniques. The concern with dynamic problem of railway bridge caused by the moving train loads has been growing. Over the past few years, several studies have been made on dynamic stability of railway bridge analytically. But very few attempts have been made at experimental research. From the dynamic stability view point, the moving train loads simulation test is revolutionary idea. It can be replace restrictive filed test with new laboratory test. This study investigates minimum specifications of hardware and basic parameters. it is used 39m girder and 4 actuators for experimental verification

1. 서 론

철도분야에 있어서 열차의 최고 속도에 대한 경쟁이 심화되고 있으며 시스템의 안정성 확보에 대한 중요성이 대두되는 있다. 이에 따라 철도교량분야에서도 동적안정성 평가가 필수적인 절차로 인식되고 있으며 이에 대한 활발한 연구가 진행 중이다. 뿐만 아니라 철도 구성용품 및 시스템의 성능검증체계에 대한 근본적 검토에 대한 필요성이 부각되고 있으며 이는 향후 부분적인 철도용품의 인증체계가 전 시스템에 적용될 가능성을 시사하는 것이다. 최근 교량의 동적안정성 검토와 관련하여 시험적 평가에 대한 요구가 높아지고 있으나 일반적 방법인 기존선을 활용한 증속 시험은 시간적, 공간적 제약으로 인해 시행되기 어려운 것이 현실이다. 따라서 이에 대한 대체 시험기법이 요구에 부응하기 위해 본 연구는 다점식 actuator를 이용한 연행하중 재현 시험 기법을 제안하였다. 이동하중 해석에서 교량 상을 주행하는 열차하중의 이동하중 해석을 구현하기 위해 경과시간에 따라 주행경로의 절점에 순차적으로 등가절점하중으로 치환하여 하중의 이동을 재현한다. 본 시험기법은 이에 착안하여 이동 경로상의 다수의 Actuator를 설치하여 각 Actuator에 적절한 하중 profile을 입력하고 이를 연동하여 작동함으로써 이동하중을 재현하는 방법이다. 이에 따라 시험을 위한 하드웨어 측면에서의 최소 요구사양과 입력하중의 profile생성을 위한 하중구현 알고리즘에 대해 선행 연구하였다. 기본적인 하드웨어의 요구사양 만족도를 검증하기 위해 시험체는 25m 지간길이의 PC 거더를 사용하였으며 고성능 Actuator 4대를 등간격으로 배치하였다. 또한 기초 시험 검증을 통해 열차의 고속주행을 모사하기 위한 전제조건인 하드웨어적인 인수와 이를 구현하기 위한 파라미터 분석을 수행하였다.

† 정회원, 한국철도기술연구원, 선임연구원
E-mail : hmkim@krrri.re.kr
TEL : (031)460-5348 FAX : (031)460-5359
* 정회원, 한국철도기술연구원, 선임연구원, 공학박사

2. 이동하중의 구현

교량의 레일선상으로 통과하는 열차하중의 시간이력을 구현하기 위하여 레일에 재하되는 윤중 및 횡압을 시간에 따른 등가절점하중으로 치환하였다. 여기서는 윤중 및 횡압과 이로 인한 모멘트하중만을 고려하였으며 직선교에서 큰 영향을 미치지 않는 비틀림하중은 고려하지 않았다.

다수의 집중하중으로 재하되는 열차하중의 시간이력을 해석에 적용하기 위해 먼저 각 축의 요소 내 위치를 Time Step마다 요소길이에 대해 무차원화하여 식(1)과 계산한다.

$$x_n = \frac{V_T \times T_n}{L_e} \quad (n = \text{Time Step}) \quad (1)$$

여기서, x_n 은 절점*i*로부터의 축위치

V_T 는 열차속도

T_n 은 시간

L_e 은 요소의 길이

임의 요소의 양단 절점 i, j 에서의 치환되는 절점 하중 및 절점 모멘트하중은 축중크기와 보로 모델링된 레일요소의 Shape Function(2),(3)의 곱으로 나타낼 수 있으며 Time step마다 각 절점 별로 하중을 합산하여 하중의 시간이력을 나타낸다.

$$P(x) = Q_V \times N(x) \quad (2)$$

$x = 0$ $x = 1$

$(0 \leq x \leq 1)$

$N_1 = 2x_n^3 - 3x_n^2 + 1$

$N_2 = x_n \times L_e \times (x_n - 1)^2$

$N_3 = -2x_n^3 + 3x_n^2$

$N_4 = x_n^2 \times L_e \times (x_n - 1)$

(3)

3. 실험장비 및 하드웨어 요구사항 분석

3.1 다축가진기의 기본 사양

본 연구의 목적인 다점식 가진기를 이용한 이동하중의 모사시험은 고속의 열차하중을 재현해야 하기 때문에 하드웨어적인 성능이 전제되어야 시험목적을 달성할 수 있다. 일반적인 동하중 또는 피로하중 재하를 위한 가진기의 성능은 재하길이(Stroke), 최대가진주파(Frequency), 최대가력 하중(Maximum Load)로 정의되며 최대성능을 구현하기 위한 가진 장치이외에 이를 운영하기 위한 유압시설이 구비되어야 한다. 본 시험에 적용하여 검토된 2가지 Type의 가진기의 일반적인 사양은 표 1과 같다.

표 1. 가진기 사양

	Hybrid Actuator	Dynamic Actuator
Load(KN)	250	500
stroke(mm)	250	250
Frequency(Hz)	50	5
수량(개)	4	4

일반적으로 사용되는 Dynamic Actuator는 최대하중의 구현의 범위가 Hybrid Actuator에 비해 크지만 동적성능이 충분치 않은 단점이 있다. 반면 Hybrid Actuator는 동적성능이 매우 우수하지만 설치가 복잡하고 동시 가동하기 위해서는 제반 유압시설이 커야 하며 제어가 복잡한 단점이 있다. 따라서 일반 Dynamic Actuator를 기본 장착할 하드웨어로 가정하고 이에 수반하는 필요 성능에 대한 파라미터를 수행하여 사용 적정성에 대해 검토하였다.

2.2 하드웨어 사양 정의를 위한 단축이동 시험

단순 반복재하 시험에 대한 동적성능의 정의와 더불어 이동하중의 구현을 위한 성능은 각 가진기별 상호 연동 시간으로 정의되어야 한다. 따라서 25m 콘크리트 교량 시험체를 이용하여 가진기 4대의 연동에 의한 단축 이동하중 재현을 통해 기본 성능 검토 시험을 수행하였다.

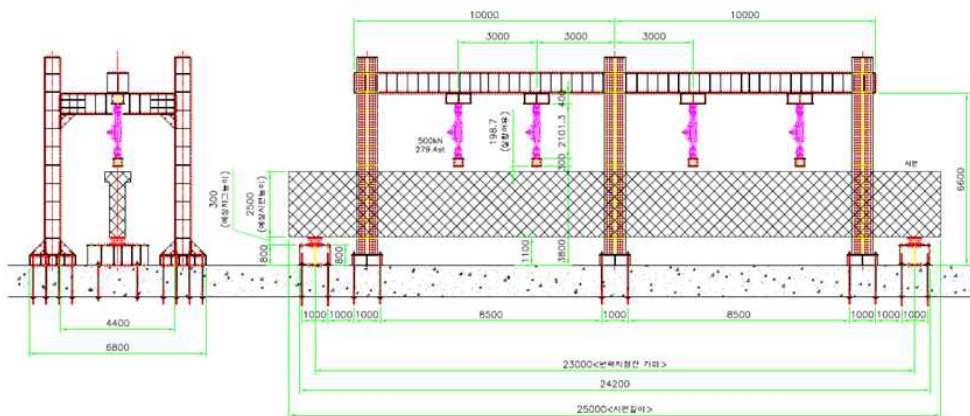


그림 1. 시험체 및 Actuator배치 개요

이동하중 재현시험의 가장 중요한 성능은 가진기간 상호 연동 시간(Δs)이다. 그림 2와 같이 단축의 이동하중을 모사하기 위해서는 각 절점별로 계산된 등가 절점하중을 하드웨어적으로 구현시켜야 한다. 이때 발생하는 각 Actuator간의 시간차 Δs 는 식(4)와 같이 정의 된다.

$$\Delta s = D / V \times 3.6 \tag{4}$$

여기서,

D : 가진기 배치간격(m)

V : 연행하중 시험속도(km/hr)

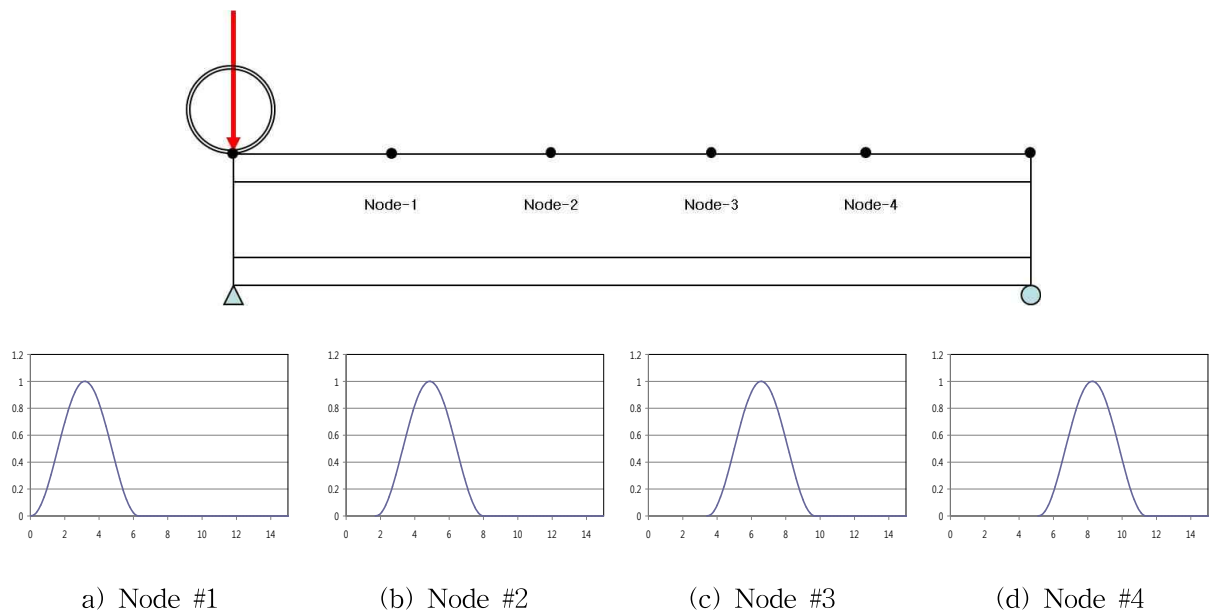


그림 2. 단축이동재하 시험 개요 및 입력 파형

본 시험체 및 가진기 설치 조건에 따라 확보되어야 하는 Δs 는 표 2와 같다.

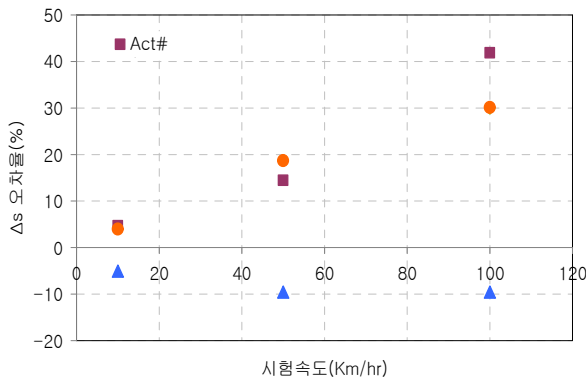
표 2. 시험속도별 가진기 상호 연동시간(Δs)

시험속도 (km/hr)	Δs
10	1.7280
50	0.3456
100	0.1728
150	0.1152
200	0.0864
250	0.0691
300	0.0576

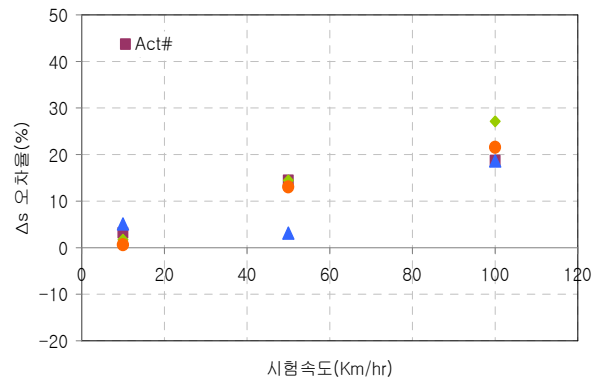
배치된 가진기에 각 속도에 따른 하중신호를 입력하고 이에 대한 Δs 피드백을 분석하여 현재 설치된 Actuator의 성능을 검토한 결과는 표 3 및 그림 3과 같다.

표 3. 단축 이동하중 재하시험 Δs 오차율

가력하중	구분	속도별 오차율(%)		
		10(km/hr)	50(km/hr)	100(km/hr)
10KN	Act1	4.7	14.4	41.8
	Act2	4.0	18.7	29.9
	Act3	4.0	18.7	30.1
	Act4	-5.1	-9.6	-9.5
100KN	Act1	3.2	14.4	18.7
	Act2	1.7	14.4	27.1
	Act3	0.6	13.0	21.5
	Act4	5.1	3.2	18.6



(a) 10KN



(b) 100KN

그림 3. 단축하중 이동시험 속도별 Δs 오차율

그림 4는 단축하중의 10km주행시 4개의 actuator로 구현한 케이스에 대한 수치해석과 실제 시험을 비교한 것이다. 그림은 Y축을 각 케이스에 대한 처짐을 최대처짐비로 무차원화 하여 시간이력에 대한 형상을 나타낸 것이다. Δs 오차율이 작은 10km/hr의 시험범위에서는 매우 정확한 재현이 가능한 것을 확인하였다. 그러나 현재 장착한 일반 Dynamic Actuator의 경우 기본 사양에 정의된 최대 동적성능에 비해 4개의 기기 연동시에 feedback response가 충분하지 않은 것은 검토되었다. 따라서 현재 Hybrid Type Actuator로 교체하여 시험을 준비 중에 있으며 40m시험체 설치 작업을 병행하고 있다.

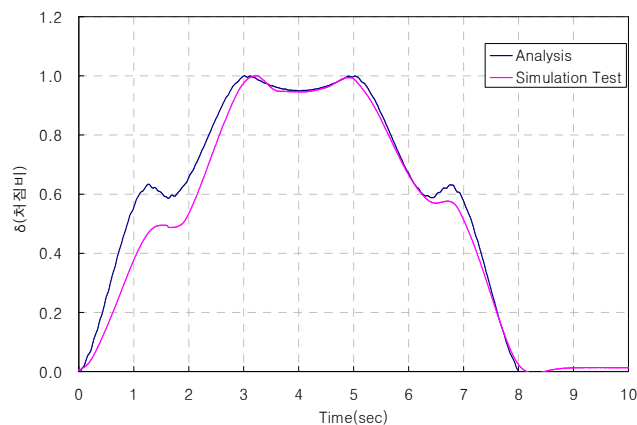


그림 4. 단축하중 이동시험과 수치해석의 처짐 시간이력비교

3. 시험재현을 위한 매개변수 분석

일반적으로 수치해석에서 정확한 해석결과를 얻기 위해 해석대상 모델링시 적절한 개수 이상의 절점을 분할하여야 한다. 동해석의 경우 이에 대한 중요성은 더욱 부각된다. 절점의 분할은 모드형상 및 동해석 결과에 크게 영향을 미친다. 그림 4는 절점 분할에 따른 25m교량 시험체의 처짐 시간이력을 나타낸 것이다. 절점 분할이 조밀할수록 이상적인 시간이력을 나타내는 것을 알 수 있다.

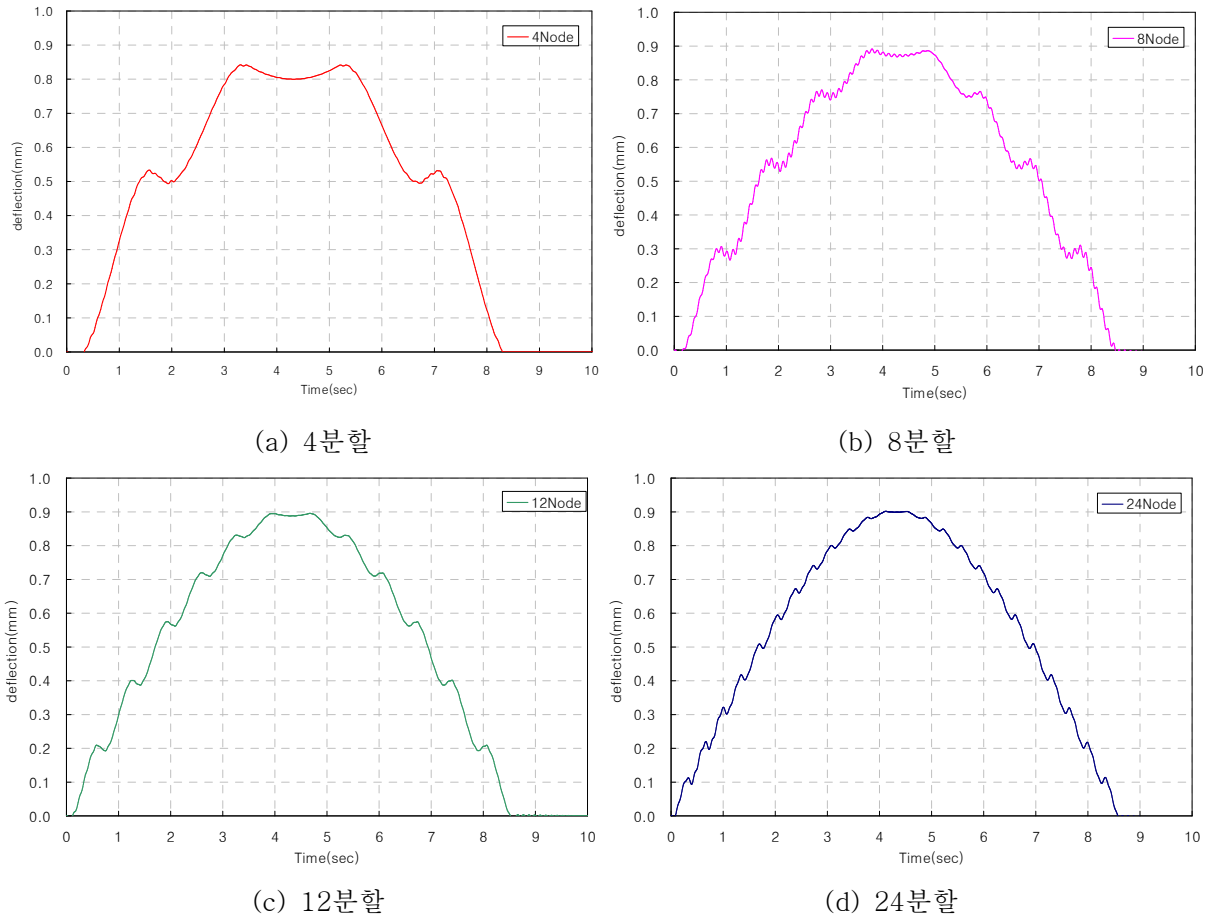


그림 5. 절점 분할에 따른 처짐 시간이력

표 4와 그림 5는 절점분할에 따른 최대처짐을 최다분할 모델인 24분할 모델과 비교하여 요소분할에 따른 최대처짐을 비교한 것이다. 8개 이상의 절점 분할시 1%내외의 타당한 오차를 나타내지만 4분할의 경우 7%에 가까운 큰 오차를 나타낸다.

표 4. 절점분할에 따른 최대처짐 오차율

절점분할수	최대처짐(mm)	오차율%
4	0.8422	6.59
8	0.8915	1.12
12	0.8957	0.65
24	0.9016	0.00

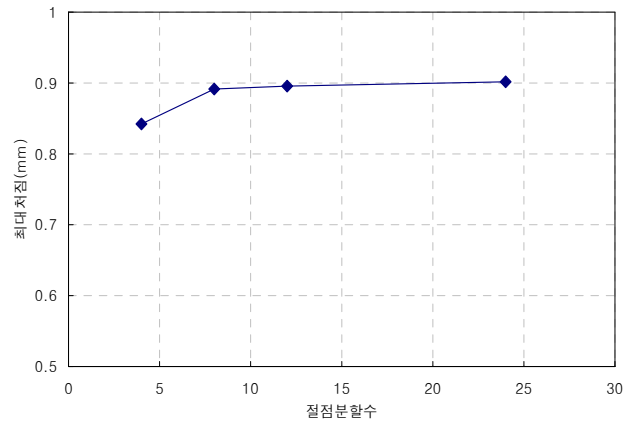


그림 6. 절점 분할에 따른 처짐 시간이력

해석의 경우 충분한 절점 분할은 해석시간이 확보되는 범위내에서 자유롭게 반영하기 쉽지만 시험의 경우 이와는 다른 환경을 내포하고 있다. 먼저 일정이상의 절점분할을 확보하기 위해서는 그에 해당되는 고성능의 가력장치와 이에 대한 전원, 유압시설이 전제되어야 하기 때문에 큰 비용을 발생시킨다. 또한 절점의 증가에 따라 가진기가 추가 배치될 경우 조밀한 간격에 따른 고도의 성능이 추가적으로 요구되기 때문에 시험 수행에 큰 제약이 된다. 따라서 최소의 절점 즉, 최소의 actuator를 이용하여 시험이 가능한 시험기법의 개발이 필요하다.

참고문헌

1. 김현민, 오지택 “철도교량의 동해석을 위한 하중모델의 개발” 한국전산구조공학회 추계학술대회 논문집, pp.97-102, 2003.
2. 김현민, 오지택, 이소진 “무도상관형교의 횡거동특성 분석을 위한 주행하중 매개변수 연구” 한국철도학회 추계학술대회 논문집, 2003.
3. Coenraad Esveld, “Modern Railway Track” , MTR-Production, pp.19~21
4. Robert D. Cook, “Concepts and Applications of Finite Element Analysis”, Jon Wiley & Sons,1989