

수치해석 및 현장계측을 통한 차량주행조건에 따른 BWIM 신호 변화 분석

Analysis of BWIM Signal Variation Due to Different Vehicle Travelling Conditions Using Field Measurement and Numerical Analysis

이 정 휘*
Lee, Jungwhae

요 지

Bridge Weigh-in-Motion(BWIM) 시스템은 중량의 차량이 정상적으로 교량을 주행하는 상태에서 측정된 교량의 응답을 분석하여 교량을 통과한 차량의 중량을 산출하는 시스템으로, 현재 관심지역을 통행하는 차량의 하중분포를 파악하고 이로 부터 도로교의 설계 및 해석을 위한 설계 활하중 모델의 개발이나 교량의 잔존 수명의 예측을 위한 피로하중모델 등의 개발에 활용될 수 있다. 이러한 BWIM 시스템의 개발을 위해 필수적으로 수행되어야 하는 것이 다양한 하중조건에 대한 실물차량 주행시험이다. 이 논문에서는 BWIM 시스템의 개발을 위해 필수적이지만 비용 및 시간이 많이 소요되는 실차량 주행시험을 보완할 수 있는 수치해석 기법을 사용하여 차량동특성 및 주행조건에 대한 교량응답의 변화를 관찰하고자 하였다. 수치해석의 적절성을 검증하기 위하여 실물차량 주행시험이 수행된 동일한 경우에 대하여 차량주행 시뮬레이션을 수행하였으며, 실측결과와 유사한 해석결과를 얻을 수 있었다. 수치해석에서 고려한 변수는 차량의 주행속도, 차량의 고유진동수, 진입부의 단차크기, 횡방향 주행위치 등이며, 이들 변수의 변화에 대한 교량의 응답의 변화를 분석한 결과, 정확한 BWIM 시스템의 개발을 위해 횡방향 주행위치와 차량 고유진동수의 영향이 고려되어야 함을 확인하였다. 수치시뮬레이션 기법을 사용하여 다양한 조건에 대한 주행데이터를 적은 비용으로 생성할 수 있으므로, 최소한의 실차량 주행시험과 병행하여 다양한 하중조건에 대한 BWIM 알고리즘의 검증이 가능할 것으로 생각된다. 또한 신경망기법을 사용하는 BWIM 시스템의 경우에는 학습자료의 생성에 활용하여 신경망기법을 활용할 때 어려운 점 중 하나인 충분한 양의 신뢰성있는 학습자료 확보에 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

핵심용어 : BWIM 시스템, 실차량 주행시험, 수치시뮬레이션, 차량동특성

Abstract

Bridge Weigh-in-Motion(BWIM) system calculates a travelling vehicle's weight without interruption of traffic flow by analyzing the signals that are acquired from various sensors installed in the bridge. BWIM system or data accumulated from the BWIM system can be utilized to development of updated live load model for highway bridge design, fatigue load model for estimation of remaining life of bridges, etc. Field test with moving trucks including various load cases should be performed to guarantee successful development of precise BWIM system. In this paper, a numerical simulation technique is adopted as an alternative or supplement to the vehicle traveling test that is indispensable but expensive in time and budget. The constructed numerical model is validated by comparison experimentally measured signal with numerically generated signal. Also vehicles with various dynamic characteristics and travelling conditions are considered in numerical simulation to investigate the variation of bridge responses. Considered parameters in the numerical study are vehicle velocity, natural frequency of the vehicle, height of entry bump, and lateral position of the vehicle. By analyzing the results, it is revealed that the lateral position and natural frequency of the vehicle should be considered to increase precision of developing BWIM system. Since generation of vehicle travelling signal by the numerical simulation technique costs much less than field test, a large number of test parameters can effectively be considered to validate the developed BWIM algorithm. Also, when artificial neural network technique is applied, voluminous data set required for training and testing of the neural network can be prepared by numerical generation. Consequently, proposed numerical simulation technique may contribute to improve precision and performance of BWIM systems.

Keywords : BWIM system, vehicle traveling test, numerical simulation, vehicle dynamic characteristics

† 책임저자, 정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 전임강사
Tel: 031-8005-3511 ; Fax: 031-8021-7213
E-mail: jwhee2@dankook.ac.kr

* 이 논문에 대한 토론을 2011년 4월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2011년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

Bridge Weigh-in-Motion(BWIM) 시스템은 중량의 차량이 정상적으로 교량을 주행하는 상태에서 측정된 교량의 응답을 분석하여 교량을 통과한 차량의 중량을 산출하는 시스템으로, 현재 관심지역을 통행하는 차량의 하중분포를 파악하고 이로부터 도로교의 설계 및 해석을 위한 설계 활하중 모델의 개발이나 교량의 잔존 수명의 예측을 위한 피로하중 모델 등의 개발에 활용될 수 있다(배두병 등, 2004; 황의승 등, 1999; 박민석 등, 2006B).

BWIM 시스템은 포장층에 직접 측정계를 매설하여 차량의 중량을 측정하는 일반적인 WIM 시스템과 달리 교량을 저울로 활용하는 형태이며, 교량의 응답을 측정하기 위한 각종 센서를 교량 하부에서 접근하여 설치하기 때문에, 신규 시스템의 설치나 기존 시스템의 유지관리 시 차량의 통행을 차단할 필요가 없다는 장점을 지니고 있다.

BWIM 시스템은 1979년 미국의 F.Moses 등(1979)에 의해 처음 시도된 후 호주(Peters, 1986), 슬로베니아(Znidaric, 1991), 아일랜드(Dempsey, 1995) 등에서 개발하여 사용하고 있으며, 우리나라에서도 한국도로공사를 중심으로 연구가 진행되어 왔다(박민석 등, 2006A; 2006B; 2008A; 2008B).

지금까지 개발된 대부분의 BWIM 알고리즘은 정적 영향선 이론에 기초하고 있으며, 이러한 이유로 차량과 교량의 동적거동 및 동적 상호작용에 의한 정확도의 저하 문제를 가지고 있었다. 이를 해결하기 위해 영향선의 이론식을 대체하는 실측영향선을 이용하는 방법이 제시되었으며(McNulty, 2003; O'Brien, 2006; 2008), 교량의 동적모델을 사용하는 모드중첩법 및 Tikhonov regularization을 이용한 moving force identification 이론이 2001년 Zhu와 Law에 의해 제시되었다. 또한, 기존의 1차원 보이론의 한계를 극복하기 위해 2차원 판이론을 적용한 moving force identification 이론이 제시된 바 있었다(Law, 2007).

최근에는 영향선이론을 사용하지 않고, 인공신경망 이론을 이용하는 BWIM 시스템에 관한 연구도 이루어졌다. 인공신경망 이론을 적용하는 경우 교량 또는 차량의 동적 수치모델을 구성하지 않고도 동적효과를 고려할 수 있는 장점이 있어, 복잡한 구조형식을 갖는 교량에 적용하기에 이점이 있는 것으로 파악되었으며, 우리나라의 한국도로공사에서 사장교인 서해대교와 PSC 거더교인 금당교를 대상으로 연구를 수행한 사례가 있다(박민석, 2008A). 이를 통해 인공신경망 이론을 적용하여 기존의 영향선이론을 사용하는 경우와 동등한 수준의 정확도를 확보할 수 있음을 확인하였으나, 인공신

경망의 구축을 위해 상대적으로 많은 수의 차량주행 신호가 필요하다는 문제점이 나타났다.

인공신경망 이론을 적용하는 경우 뿐만 아니라 영향선 이론을 적용하는 경우에도 BWIM 시스템의 개발을 위해 필수적으로 수행되어야 하는 것은 다양한 하중조건에 대한 실물 차량 주행시험이다. BWIM 시스템은 일종의 저울로도 생각될 수 있으므로 개발단계에서 선형성 및 정확도, 정밀도를 확인하기 위해 사전에 공인기관에서 정확한 중량을 측정하는 시험차량을 사용하여 다양한 중량과 속도, 주행조건 등을 변수로 여러 케이스의 시험을 수행하여야 한다. 그러나 현실적으로 시간적, 경제적 제약이 따르므로 제한된 조건 하에서 주행시험이 수행되고 있으며, 차량의 동특성변화, 횡방향 주행위치 변화의 효과와 같이 외부적인 불확실성 요인을 다양하게 실험에 포함하여 검증하는 것은 쉽지 않다.

따라서, 본 논문에서는 이와 같은 현장 주행시험의 제약조건을 해결하고 실물차량 주행시험의 효율성을 높일 수 있는 수치 시뮬레이션 기법을 함께 활용하였다. 이를 통하여 실물 차량 주행시험에서 모두 고려하지 못한 다양한 주행조건에 대한 교량의 응답을 수치적으로 얻을 수 있었으며, 이로부터 얻어진 다양한 조건에 대한 BWIM 신호의 변화를 분석할 수 있었다. 이러한 연구결과는 향후 보다 효율적이고 정밀한 BWIM 시스템 개발에 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

2. 대상 교량 및 현장시험

2.1 대상교량 개요

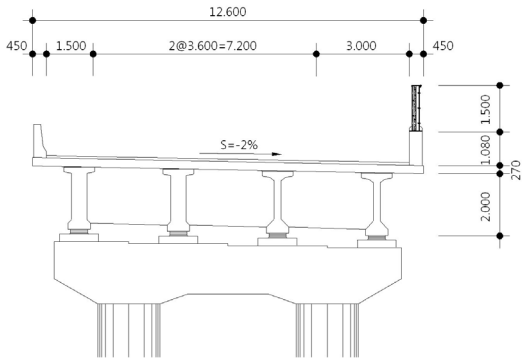
이 연구에서는 기존연구(박민석 등, 2008B)에서 수행한 현장시험의 자료를 활용하기 위해 동일한 교량을 대상교량으로 선정하고 실측데이터 및 수치해석 데이터의 분석을 수행하였다. 대상교량은 그림 1에 나타난 중부내륙 고속도로 상에 위치한 금당교이며, 30+40+40+40m의 경간구성을 갖는 4경간 연속 PSC I 거더교이다. 이 연구에서는 이 중 첫 번째 경간인 30m PSC I 거더교를 대상으로 하였다. 다음의 그림1에 나타난 바와 같이 형고 2m의 PSC 거더 4개로 구성되어 있으며, 교폭은 12.6m인 2차로의 교량이다.

2.2 현장 주행시험을 통한 데이터 획득

현장 주행시험은 3축 덤프트럭, 4축 덤프트럭 및 5축 트럭의 차량 3종을 사용하여 수행되었으며, 시험차량의 총 중량은 각각 245.3, 309.0, 412.0kN으로 사전 측정되었다. 다음의 표 1에 시험차량의 제원을 나타내었다.



(a) 전경



(b) 대표단면
그림 1 금당교

표 1 시험차량 제원

차종	축 중량(kN)					총 중량(kN)
	1축	2축	3축	4축	5축	
3축 덤프	65.0	91.4	91.7	-	-	245.3
4축 덤프	73.7	74.0	80.8	80.8	-	309.0
5축 트랙터	61.2	75.5	78.3	98.3	98.6	412.0

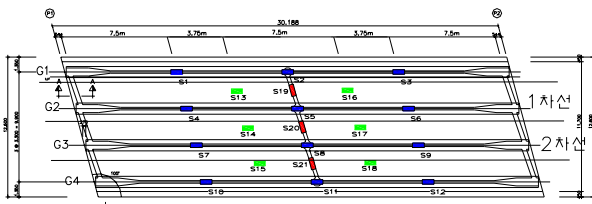


그림 2 금당교 센서 배치도

그림 2에는 금당교의 평면도와 센서 부착위치를 나타내었다. 총 21개의 변형률계가 교량 하부에 부착되었으며, 이 중 2차선 바닥판 하면에 부착된 변형률계(S18)로부터 수집된 주행속도 60km/h, 2차로 주행인 경우의 변형률 데이터를 그림 5(a)에 예시하였다. 이들 실측 데이터는 수치 시뮬레이션으로부터 생성된 신호와의 비교를 통한 수치해석 모델의 적정성 확인에 활용되었다.

2. 수치해석 모델링

2.1 수치해석기법 개요

화물차량 주행의 수치 시뮬레이션은 외연적 범용 수치해석 프로그램인 LS-DYNA(LSTC, 2007)를 사용하여 수행하였다. 차량과 교량을 각각 모델링하고 두 구조체 사이의 접촉 조건을 정의하여 차량의 중량이 하중으로 교량에 작용하도록 하였으며, 차량모델은 주어진 속도에 따라 교량 위에서 이동하도록 모델링되었다.

이와 같은 시뮬레이션 기법을 통하여 교량과 차량의 진동 및 상호작용이 현실적으로 묘사될 수 있으며, 차량의 부가질량 효과로 인한 교량의 고유진동수 이동도 표현이 가능하다.

2.2 차량 모델링

교량의 동적응답을 해석하기 위한 차량의 모델링 기법은 초기의 1자유도 이동질량(moving mass) 모델을 비롯하여 다자유도 3차원 차량모델까지 다양한 연구가 이루어져 왔다(정태주 등, 1994; 2008).

본 연구에서는 비교적 단순한 형태인 1자유도계 스프링-댐퍼 시스템으로 시험차량을 모델링하였다. 그림 3에 3축 시험차량의 수치모델 및 차량의 사진을 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 3축 차량의 경우는 3개의 차축과 좌, 우측 차륜을 고려하여 6개의 스프링-댐퍼 시스템을 구성하고, 각각의 스프링-댐퍼 시스템의 질량, 강성 및 감쇠계수는 축중량, 차량의 고유진동수 및 차량의 감쇠비를 이용하여 다음 식 (1)과 같이 계산하였다. 이때, 차량의 고유진동수 f 는 1.5Hz, 2.5Hz, 3.5Hz의 세 가지로 적용하였으며, 감쇠비 ξ 는 3%로 적용하였다. 표 2에 3축 시험차량에 대한 수치모델의 제원을 나타내었으며, 4축과 5축 시험차량의 경우도 마찬가지로

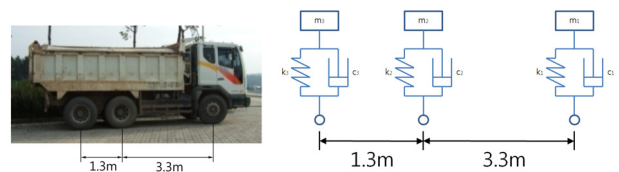


그림 3 3축 시험차량 및 수치모델

표 2 3축 시험차량 수치모델 제원

고유진동수	축	축중량(kN)	mass(kg)	stiffness(N/m)	damping(N.s/m)
1.5Hz	1	65.0	3,315	2.945E+05	1,875
	2	91.4	4,660	4.139E+05	2,635
	3	91.7	4,675	4.153E+05	2,644
2.5Hz	1	65.0	3,315	8.179E+05	3,124
	2	91.4	4,660	1.150E+06	4,392
	3	91.7	4,675	1.154E+06	4,406
3.5Hz	1	65.0	3,315	1.603E+06	4,374
	2	91.4	4,660	2.254E+06	6,149
	3	91.7	4,675	2.261E+06	6,169

방법으로 계산하였다.

$$k = (2\pi f)^2 \cdot m$$

$$c = 2\xi\sqrt{mk} \tag{1}$$

2.3 교량 모델링

대상 교량의 수치모델은 바닥판, 거더 및 가로보에 모두 4절점 shell 요소를 사용하여 그림 4와 같이 구성하였으며, 사용된 재료가 압축강도 60MPa인 고강도 콘크리트임을 고려하여 탄성계수 34.8GPa를 적용하였다. 또한 지점조건은 실제 구조물의 받침배치도를 참고하여 해당 자유도를 구속하였다.

진입부에는 rigid plane을 정의하고, 교량 바닥판과 5~15mm의 높이 차이를 두어 진입부 단차의 영향을 고려할 수 있도록 하였다.

대상교량의 수치모델이 적절히 작성되었는지 확인하기 위하여 수치모델을 사용한 모드해석을 수행하였으며, 1차 휨모드와 비틀림모드의 고유진동수와 모드형상을 다음의 표 3에 나타내었다. 기존의 연구결과에서 지간 20~30m의 PSC형교의 고유진동수가 약 3.3~7.4Hz 범위에 존재하는 것으로 분석된 바 있으며(이원태 등, 2000), 이로부터 해석모델의 고유진동수는 적절한 범위에 드는 것을 알 수 있다.

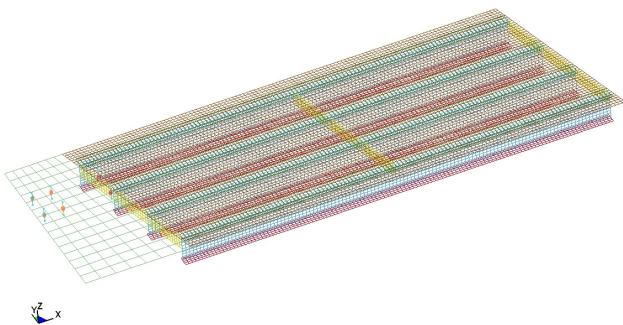

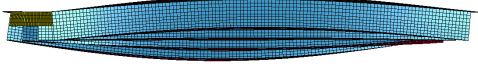


그림 4 대상교량 수치모델

표 3 고유진동수 및 모드형상 해석결과

구분	고유진동수 및 모드형상
1차 휨	 5.06Hz
1차 비틀	 5.15Hz

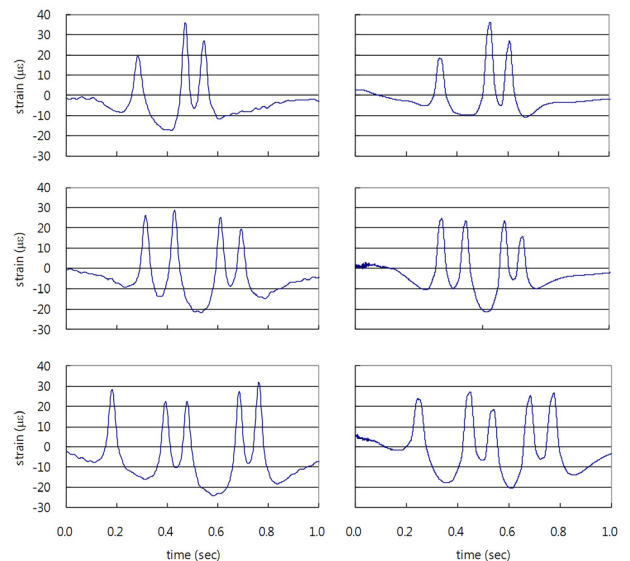
교량의 동적실험을 수행할 때는 가속도계를 사용하여 모드형상과 고유진동수를 측정하고, 그 측정결과를 해석결과와 비교하여 서로 검증하는 것이 일반적이다. 하지만, 본 실험에서는 변형률계만을 사용하여 현장계측을 수행하였고, 차량 통과시 2~3초간의 신호만을 저장하였기 때문에 측정 신호로부터 의미있는 교량의 동특성(고유진동수 및 모드형상)을 추출할 수 없었다. 따라서 교량 수치모델의 보정작업은 수행되지 않았으며, 수치해석 결과는 이로 인한 오차를 내포하고 있다. 하지만 이후에 다루는 수치해석 결과 및 이와 비교하는 실측값이 거더가 아닌 바닥판의 변형률 신호로, 교량의 전반적 진동특성보다는 바닥판의 국부적인 거동의 영향을 주로 받기 때문에 모델보정의 미수행으로 인한 오차의 영향은 크지 않을 것으로 생각된다.

4. 수치 시뮬레이션 및 결과분석

4.1 실험 및 수치해석 결과의 비교

수치해석을 통하여 얻어진 60km/h 2차로 주행시의 바닥판 하면의 변형률을 실측치와 비교하여 그림 5에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 유사한 경향의 응답이 산출되어 수치해석이 적절히 수행되었음을 확인할 수 있었다.

이후의 변수연구의 결과에서도 나타나는 바와 같이 차량주행에 의한 교량의 응답은 통과한 차량의 중량뿐만 아니라 통과속도, 차량의 고유진동수, 진입부 단차, 센서 설치위치와 차륜이 통과한 위치 사이의 거리 등에 따라 달라진다. 그림 5에는 횡방향 주행위치와 차량의 고유진동수를 변화시켜 가



(a) 실측 변형률신호 (b) 해석 변형률신호

그림 5 실측치와 해석치의 비교

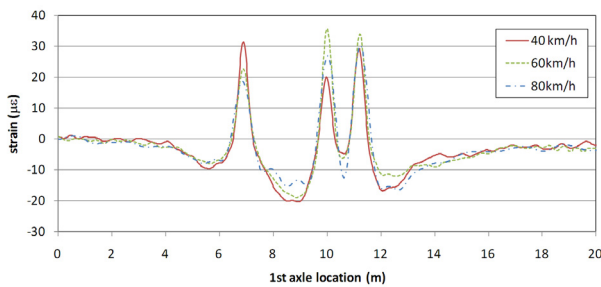
표 4 수치해석 결과와 실측값 비교

차종	구분	peak 변형률($\mu\epsilon$)				
		1축	2축	3축	4축	5축
3축 덤프 (3.5Hz, 61km/h)	실측	19.6	35.7	26.8	-	-
	수치해석	18.4	36.3	27.0	-	-
	오차(%)	-6.1	1.7	0.7	-	-
4축 덤프 (2.5Hz, 65km/h)	실측	26.2	28.8	25.1	19.4	-
	수치해석	24.7	23.5	23.5	15.8	-
	오차(%)	-5.7	-18.4	-6.4	-18.5	-
5축 트랙터 (1.5Hz, 50km/h)	실측	28.4	22.6	22.7	27.4	31.8
	수치해석	23.7	27.1	18.3	25.1	25.3
	오차(%)	-16.5	19.9	-19.4	-8.4	-20.4

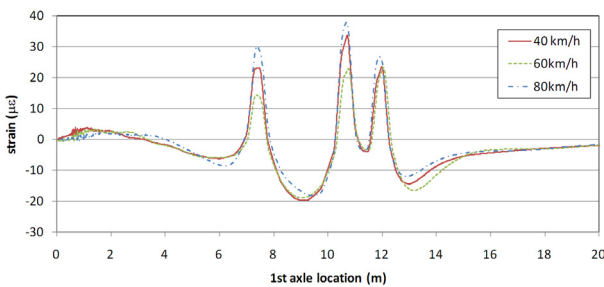
며 실제 측정된 신호와 가장 근사한 응답을 나타낸 경우를 수록하였으며, 이 때 발생된 각 축의 peak값을 표 4에 비교하였다. 표에 나타난 바와 같이 peak값의 오차는 대체적으로 20%이내의 값을 나타내었으며, 교량 모델의 보정을 수행하지 않은 점과 단순한 형태의 차량모델을 이용한 점을 고려하면 수치해석이 적절히 이루어진 것으로 판단할 수 있다.

4.2 주행 속도의 영향

차량의 주행속도가 변형률 동적응답에 미치는 영향을 살펴 보기 위해 동일한 3축 시험차량모델을 40, 60 및 80km/h의 속도로 이동시킬 때 발생하는 변형률 응답을 비교하였으며, 또한 해석결과를 유사한 조건의 주행시험 측정결과와 비교하였다. 다음의 그림 6에 나타난 바와 같이 해석결과와 실측결과에서 공통적으로 주행 속도가 증가함에 따라 1축과 2



(a) 실물차량 주행시험



(b) 수치해석(차량 고유진동수 3.0Hz)

그림 6 주행속도 변화에 따른 변형률 신호 변화

축의 최대 변형률값의 변화가 크게 나타났다. 주행속도가 40km/h에서 80km/h까지 변동하는 경우 2축의 변형률 첨두값은 약 20 $\mu\epsilon$ 에서 약 35 $\mu\epsilon$ 까지 변화하여 약 150%의 변화율을 나타내었다. 또한 2축과 3축의 정적 축중량은 표1에 나타난 바와 같이 거의 유사하지만 주행속도가 달라짐에 따라 최대 변형률을 나타내는 축이 2축과 3축 사이에서 이동하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 각 축에 의해 발생하는 최대 변형률 값을 축중량을 직접적으로 나타내는 것으로 보기 어려우며, 차량의 주행속도와 같은 축중량 이외의 변수의 영향을 함께 고려하여야 정확한 축중량의 산출이 가능함을 알 수 있다.

그림 6에서 속도의 변화에 따른 변형률 최대값의 변화 양상이 실측과 해석에서 다르게 나타나는 것은 주행차량의 동특성이 해석모델에 정확히 반영되지 않은 영향과 주행시험시 주행위치 등 속도 이외의 주행조건이 정확하게 제어되지 않은 영향으로 생각된다. 또한 앞에서도 언급한 바와 같이 교량의 수치모델에 대한 보정을 수행하지 않은 영향도 포함되어 있을 것으로 생각된다.

4.3 차량 고유진동수의 영향

주행 차량의 동적거동은 교량의 동적거동과 상호작용하여 교량응답의 변동을 유발하게 된다. 대상교량을 통행하는 중 차량의 동특성은 확률적으로 분포하게 될 것이고, 주행 차량의 동특성 변화와 무관하게 안정적인 BWIM 성과를 얻기 위해서는 사전에 다양한 동특성을 갖는 주행차량의 신호에 대한 BWIM 성능 검증이 필요할 것이다.

여기서는 차량모델의 고유진동수를 1.5Hz에서 3.5Hz까지 변동시켜가며 주행시뮬레이션을 반복하고 그 결과를 비교하였다.

주행속도의 변화에 의해 3축의 피크 변형률은 거의 변화하지 않았던 것과 달리 차량 고유진동수의 변화에 의해서 1, 2, 3축의 피크 변형률이 모두 변동하는 경향을 나타내었다. 3축 시험차량의 주행 시뮬레이션에서 가장 큰 변화를 보

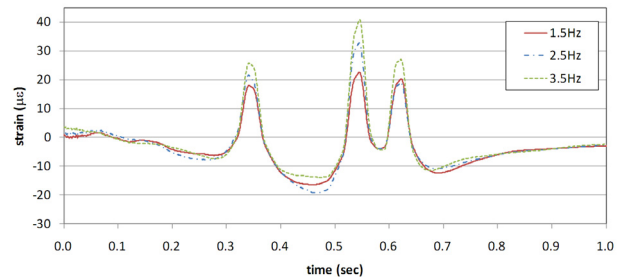


그림 7 차량 고유진동수에 따른 변형률 신호 변화 (주행속도 60km/h)

인 것은 2축의 피크 변형률이었으며, 주행속도의 경우보다 큰 약 200% 내외의 변화율을 나타내었다.

4.4 진입부 단차의 영향

교량 진, 출입부에 위치한 신축이음장치는 미소한 단차를 형성하여 차량이 교량에 진입/진출할 때 충격을 발생시킨다. 이러한 충격은 교량 노면의 불균일성(노면조도)과 함께 주행 중인 차량의 진동을 유발하여 교량의 응답이 증가할 수 있는 요인으로 작용한다.

이러한 충격효과를 파악하기 위해 교량 진입부 단차를 5mm와 15mm의 두 가지로 변화시켜 응답의 변화를 살펴 보았다. 다음 그림 8에 진입부 단차의 변화에 따른 변형률응답을 비교하였으며, 주행속도나 차량고유진동수의 변화의 경우에 비하여 응답의 변화량이 미소한 것으로 나타났다.

피크 변형률이 가장 크게 변화한 것은 첫 번째 축이며, 약 25% 내외의 변동을 나타내었다.

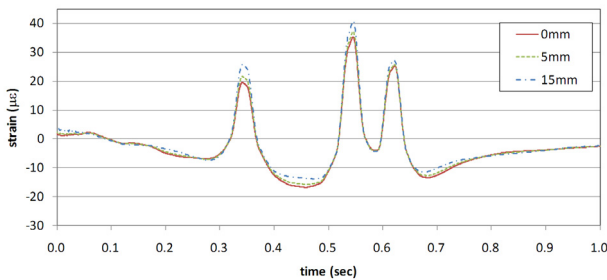


그림 8 진입부 단차의 크기에 따른 변형률 신호 변화 (주행속도 60km/h, 차량 고유진동수 3.5Hz)

4.5 횡방향 주행위치의 영향

동일한 차선으로 주행하는 경우에도 운전자의 운전습관 등의 영향으로 차선 내에서 좌, 우측으로 주행위치의 변동이 발생할 수 있으며, 이 또한 교량응답의 변화를 초래할 수 있다. 이러한 wandering효과의 영향을 파악하기 위해 횡방향

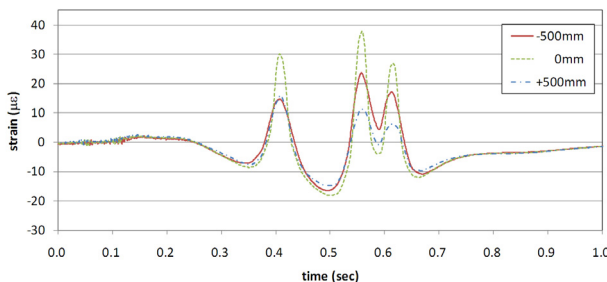


그림 9 횡방향 주행위치에 따른 변형률 신호 변화 (주행속도 80km/h, 차량 고유진동수 3.0Hz)

주행위치를 변화시켜가며 해석을 수행하였다.

2차선 중앙의 기준 주행위치에서 좌측과 우측으로 500mm 씩 주행위치를 이동하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 그림 9에 나타난 바와 같이 주행위치의 변화에 따른 응답의 변화가 매우 크게 나타났다. 이는 센서와 차량 바퀴의 상대위치의 변화에 따른 것으로, 바닥판 변형률계가 국부적인 바닥판의 휨거동을 주로 나타내기 때문인 것으로 이해된다.

5. 결 론

이 논문에서는 BWIM 시스템의 개발을 위해 필수적이지만 비용 및 시간이 많이 소요되는 실차량 주행시험을 대신할 수 있는 수치해석 기법을 활용하여, 기존에 수행한 실물차량 주행시험에서 포함하지 못한 다양한 주행조건에 대한 수치시뮬레이션을 수행하였다. 수치해석의 타당성을 확인하기 위해 기존의 실험데이터와 유사한 조건의 수치시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 비교하였다.

고려한 주행변수로는 차량의 주행속도, 고유진동수, 진입부 단차 크기 및 횡방향 주행위치가 있으며, 이들 주행조건이 변화함에 따라 교량의 응답이 어떻게 변화하는지 검토하였다.

이 연구의 결과로부터, 주행차량의 특성, 진입부 단차, 및 횡방향 주행위치 등 교량의 특성과 무관한 외부인자들에 의해 교량의 응답에 상당한 수준의 변화가 발생하는 것이 확인되었다. 따라서, 교량의 응답만을 사용하여 통과차량의 중량 정보를 추출하는 BWIM 시스템이 보다 안정적인 성능 및 정밀도/정확도를 확보하기 위해서는 다양한 차량 및 주행조건에 대한 검토가 필수적일 것으로 판단되며, 특히 차량의 고유진동수와 횡방향 주행위치는 교량의 응답에 미치는 영향이 매우 크므로 BWIM 시스템 설계시 반드시 고려되어야 할 것으로 판단된다.

이 연구에서 사용한 수치해석기법은 실차량 주행시험 데이터와 calibration된 뒤 실차량 주행시험에서 포함하지 못한 다양한 주행조건에 대한 BWIM 신호의 생성에 활용이 가능하며, 따라서 기 개발된 BWIM 시스템의 정기 검교정용 데이터로의 활용도 가능할 것으로 생각된다. 또한 인공신경망 기법과 같이 많은 수의 주행시험 데이터가 필요한 경우 실차량 주행시험을 보완하여 주행데이터를 생성하는 데에도 활용이 가능할 것으로 생각된다.

감사의 글

이 연구는 2009학년도 단국대학교 대학연구비 지원으로 연구되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다. 또한 귀중한

실측데이터를 사용할 수 있도록 배려하여 주신 한국도로공사 도로교통연구원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 박민석, 이정휘, 김성곤, 조병완** (2006A) BWIM 시스템을 사용한 사장교의 차량하중 분석, 한국지진공학회 논문집, 10(6), pp.1~8.
- 박민석, 조병완, 배두병** (2006B) BWIM 시스템을 이용한 고속도로 교량 차량하중 모형 개발, 대한토목학회 논문집, 26(1A), pp.143~153.
- 박민석, 조병완, 이정휘, 김성곤** (2008A) 인공신경망을 이용한 강합성 사장교 차량하중분석시스템 개발, 대한토목학회 논문집, 28(6A), pp.799~808.
- 박민석, 조병완, 이정휘, 김성곤** (2008B) 축감지기가 없는 PSC I거더교의 주행중 차량하중분석시스템 개발, 대한토목학회 논문집, 28(5A), pp.673~683.
- 배두병, 황의승** (2004) 강교량 설계를 위한 피로 하중 모형, 대한토목학회 논문집, 24(1A), pp.225~232.
- 이원태, 박영석, 정태주** (2000) 고속도로 교량의 충격계수에 관한 실험적 연구, 대한토목학회 논문집, 20(3A), pp.395~406.
- 정태주, 박영석** (1994) 3차원 차량모형을 사용한 강도로교의 동적응답에 관한 연구, 대한토목학회 논문집, 14(5), pp.1055~1067.
- 정태주, 신동구, 박영석** (2008) 동적해석에 의한 강관형교의 동적응답, 대한토목학회 논문집, 28(1A), pp.39~49.
- 황의승, 배두병, 정경섭, 조재병** (1999) BWIM 시스템을 이용한 중차량의 통행특성 분석, 한국강구조학회 논문집, 11(2), pp.223~232.
- COST 323** (2002) *WIM-LOAD - Final Report of the COST323 Action*, ed. B. Jacob, E. O'Brien, LCPC, Paris.
- Dempsey, A.T., Jacob, B., Carracilli, J.** (1999) Orthotropic Bridge WIM for Determining Axle and Gross Vehicle Weights, *Proceedings of the Final Symposium of the Project WAVE*, Ed. B. Jacob.
- Kim, S., Lee, J., Park, M.S., Jo, B.W.** (2009) Vehicle Signal Analysis Using Artificial Neural Networks for a Bridge Weigh-in-Motion System, *Sensors*, 9, pp.7943~7956.
- Law, S.S., Bu, J.Q., Zhu, X.Q., Chan, S.L.** (2007) Moving Load Identification on a Simply Supported Orthotropic Plate, *International Journal of Mechanical Sciences*, 49, pp.1262~1275.
- LSTC** (2007) *LS-DYAN Keyword User's Manual version 971*, Livermore Software Technology Corporation.
- McNulty, P., O'Brien, E.J.** (2003) Testing of Bridge Weigh-In-Motion System in a Sub-Arctic Climate, *Journal of Testing and Evaluation*, ASTM, 31(6), JTE11686_316.
- Moses, F.** (1979) Weigh-in-Motion System using Instrumented Bridge, *Transportation Engineering Journal*, ASCE, 105, TE3.
- O'Brien, E.J., Quilligan, M.J., Karoumi, R.** (2006) Calculating an Influence Line from Direct Measurements, *Proceedings of the ICE-Bridge Engineering*, 159(1), pp.31~34.
- O'Brien, E.J., Znidaric, A., Ojio, Tatsuya** (2008) Bridge Weigh-in-Motion - Latest Developments and Applications World Wide, *Proceedings of the International Conference on Heavy Vehicles*, Paris, Eds. B.Jacob, E.O'Brien, P.Nordengen, A.O'Connor, and M.Bouteldja, pp.25~38.
- Peters, R.J.** (1986) CULWAY - An Unmanned and Undetectable Highway Speed Vehicle Weighing System, *Proceedings of the 13th ARRB Conference*, Australian Road Research Board, 13/6.
- WAVE** (2002) *Weigh-in-Motion of Axles and Vehicles for Europe*, ed. B. Jacob, LCPC, Paris.
- Zanidaric, A., Moses, F.** (1995) Bridge Weigh-in-Motion Testing of Vehicle Gross Weights in Slovenia, *the 1st European WIM Conference*, Zurich.

- 논문접수일 2010년 8월 27일
- 논문심사일
 - 1차 2010년 9월 1일
 - 2차 2011년 1월 5일
- 게재확정일 2011년 1월 11일