

단순지지 거더교의 실측 변형을 응답을 이용한 변위 추정 방법

전준창^{1*}, 이희현²

A Method Estimating Displacement using Measured Strain Response of Simply Supported Girder Bridges

Jun-Chang Jeon^{1*}, Hee-Hyun Lee²

Abstract: This study presents a simple method which can estimate displacement using measured strain response of simply supported girder bridges. The basic concept of the present method is derived from a relation between displacement and strain, and is generalized by introducing analytical tool. Static and dynamic laboratory test are conducted on simply supported plate which is designed to respond dynamically similar to actual bridges to experimentally verify the present method, and displacement and strain are measured at the midpoint of specimen. Displacement estimated by using measured strain is well agreed with measured one. This study demonstrates that the present method is suitable for estimating displacement of real simply supported bridge, in which the installation of a displacement transducer at the fixed reference point is difficult.

Keywords: Simply supported girder bridge, Displacement, Displacement estimation method, Displacement-strain relationship, Strain

1. 서론

현장재하실험을 통해 교량구조물의 안전성 및 사용성을 평가하기 위해서는 기본적으로 외부하중에 의한 변형을, 변위 및 가속도를 측정하는 것이 일반적이다. 앞서 열거한 측정 항목 중 변위는 구조계의 강성과 직접 관련되어 전체적인 구조 거동 특성을 나타낼 뿐만 아니라 인간이 감지할 수 있는 물리량이므로 교량의 안전성 및 사용성 평가에 있어서 매우 중요한 측정항목이다.

변형을 및 가속도는 달리 변위를 측정하기 위해서는 움직이지 않는 기준점이 요구된다. 변위를 측정하기 위한 기준의 변위계로는 접촉식 LVDT(Linear Variable Displacement Transducer), 레이저 변위계 등이 있는데, 이들 센서는 고정된 기준점 위에 설치되어야만 절대 변위를 측정할 수 있다. 예를 들어 바(bar) 형태의 접촉식 LVDT를 사용하는 경우에는 지면으로부터 측정점(주로 주거더 하면) 근처까지 조립식 동바리 등을 이용하여 변위계를 고정시키기 위한 프레임(frame)을 조립하고, 여기에 변위계를 설치한다. 다리밑 공간이 높은 교

량은 변위계 고정을 위한 프레임 설치에 많은 시간 및 비용이 소요되고, 설치된 프레임의 상부는 바람 및 교량 하부를 통행하는 차량에 의한 진동 등의 영향을 받으므로 고정된 기준점의 역할을 못하는 경우도 발생한다. 물론, 교량 하부에 하천, 바다, 도로, 철도 등이 있는 경우 또는 다리밑 공간이 매우 높은 경우에는 접촉식 LVDT를 이용한 변위 계측은 거의 불가능하다.

교량 변위의 측정에 여러 제약이 따르므로 가속도, 속도 또는 변형을 이용하여 변위를 간접적으로 추정하는 연구가 수행되어 왔다. Jung et al.(2001)은 가속도, 속도 및 변위에 대한 변환응답(transformed response)을 주파수영역에서 정의하여 변위를 추정하는 알고리즘을 제안하였다. 응답변환 알고리즘을 실교량에 적용하여 타당성을 입증하였으나, 변위 추정과정에서 초기시간(자유진동과 무제하 시간영역을 정의하는 변수) 설정에 따른 오차를 최소화시키기 위한 수렴조건을 만족하도록 하기 위해 복잡한 계산과정 및 방대한 계산량이 필요하였다. Yun과 Ryu(2011)는 측정된 가속도를 분석하여 얻어진 진동모드별 고유진동수를 모드중첩법에 적용하여 변위를 추정하는 연구를 수행하였다. 이 연구에서는 일반 거더 교량에서 분석이 용이치 않은 7차 진동모드까지의 고유진동수를 분석에 고려하였다.

가속도를 이용하여 변위를 추정하기 위해서는 2회의 적분이 필요하며, 이에 따라 적분오차가 누적된다는 점을 고려하여 속도신호로부터 변위를 추정하는 연구가 Joh et al.(2015)

¹정회원, 씨티씨주식회사 전문이사, 교신저자

²정회원, 씨티씨주식회사 대표이사

*Corresponding author: jcyj@ctceng.co.kr

Hanrim Human Tower 605, 172, LS-ro, Gunpo-si, Gyeonggi-do, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2016년 6월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 7월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

에 의해 시도된 바 있으나, 분석과정에서 속도계의 응답특성에 대한 보정이 필요할 뿐만 아니라 초기조건을 임의로 가정함으로써 추정결과에 다소의 오차가 내재되는 문제가 있었다.

주행차량에 의해 교량에서 발생하는 변위에는 정적 변위에 의한 상당히 낮은 저주파성분이 존재하는데, 이러한 성분은 가속도신호만을 분석하여 도출하기가 용이하지 않다. 정적 변위에 의한 저주파성분을 얻기 위해 가속도와 더불어 변형률 응답을 추가적으로 이용하는 연구(Bell et al., 2015; Shin et al., 2009)가 수행된 바 있다. Shin et al.(2009)은 변형률 응답과 일부 저차 진동모드의 모드형상을 이용하여 모드중첩법과 곡률-변형률 관계로부터 변위를 추정하였다. 비교적 정확한 결과를 도출하기 위해서는 최소 7차 진동모드까지의 응답이 필요하였으며, 이에 따라 변형률 측정 수도 다수가 필요하였다. Bell et al.(2015)은 변형률과 1차 진동모드만의 응답을 이용하여 변위를 추정하는 개선된 방법을 제안하였다. 그러나 이 방법은 해석적 연구에 국한되었으며, 다축 차량이 주행하는 경우에는 다소 발산하는 경향을 나타내었다.

변형률 응답만을 이용하여 변위를 추정하는 연구는 Park et al.(2001), Cho와 Kim(2008)에 의해 수행된 바 있다. Park et al.(2001)은 곡률-변형률 관계식을 이용하여 2중 적분에 의해 변위를 추정하는 알고리즘을 제안하였으며, 실교량을 대상으로 제안한 방법의 타당성을 검토하였다. 한편, Cho와 Kim(2008)은 FBG 변형률 센서를 이용하여 현수교의 정적 변위 형상을 추정하였다. 현수교의 처짐이론에 근거한 곡률-변형률 관계를 이용하였는데, 분석에 필요한 여러 변수의 가정치를 도출하기 위해 정밀한 구조해석이 필요하였다.

앞서 살펴본 바와 같이 대부분의 기존 연구는 주파수영역 또는 시간영역에서의 적분과정을 거쳐 변위를 추정하게 되는데, 적분에 의한 오차, 초기조건 가정, 방대한 계산량 및 여러 단계의 분석과정 등의 문제가 있어 본 연구에서는 보다 간단하고 편리하게 변위를 추정할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

본 연구에서는 단순지지 거더교를 대상으로 변위와 변형률의 관계를 이용하여 실측 변형률을 변위로 환산하는 방법을 제안하였다. 기본적인 구조역학 지식을 이용하여 기본 개념을 도출하고, 해석적 방법을 부가적으로 도입하여 본 연구에서 제안하는 방법을 일반화시켰다. 본 연구에서 제안하는 변위 추정방법을 검증하기 위해 단순지지 보에 대한 정·동적 실내실험을 수행하였다. 정적재하실험은 실험체의 L/4 위치와 L/2 위치에 모형차량을 각각 재하하였으며, 동적재하실험은 모형차량을 일정한 속도로 주행시켜가며 실시하였다. 실험시 실험체 중앙점의 변위 및 변형률을 정·동적으로 측정하였다. 실험을 통해 얻어진 실측 변형률을 이용하여 변위를 추정하고, 이를 실측 변위와 비교하여 본 연구에서 제안하는 방법의 타당성을 확인하였다.

2. 변형률 응답을 이용한 변위 추정 방법

Fig. 1과 같이 휨강성이 전체 지간길이에 대해 일정한 단순보의 임의의 위치에 집중하중 P 가 작용하는 경우, 중앙점의 변위 δ_c 와 변형률 ε_c 는 식 (1) 및 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\delta_c = \frac{Pb(3L^2 - 4b^2)}{48EI} \quad \text{for } a \geq b \quad (1)$$

$$\varepsilon_c = \frac{Pby}{2EI} \quad (2)$$

여기서, P : 집중하중의 크기

EI : 보의 휨강성

L : 보의 지간길이

y : 보 단면 중립축으로부터의 연단거리

a, b : 집중하중의 작용위치를 나타내는 상수

식 (1)과 식 (2)를 EI 에 대해 정리하고 등치시키면 식 (3)과 같이 표현되며, 식 (3)을 중앙점 변위 δ_c 에 대해 정리하면 식 (4)와 같다.

$$\frac{Pb(3L^2 - 4b^2)}{48\delta_c} = \frac{Pby}{2\varepsilon_c} \quad (3)$$

$$\delta_c = \frac{(3L^2 - 4b^2)}{24y} \cdot \varepsilon_c \quad (4a)$$

$$\delta_c = \alpha_1 \cdot \varepsilon_c \quad \text{where, } \alpha_1 = \frac{(3L^2 - 4b^2)}{24y} \quad (4b)$$

식 (4)에 나타난 바와 같이 중앙점 변위 δ_c 와 중앙점 변형률 ε_c 는 계수 α_1 에 의해 선형적으로 비례하지만 계수 α_1 이 상수가 아닌 변수 b 의 함수로 주어지므로 집중하중의 작용점 위치에 따라 계수 α_1 은 서로 다른 값을 갖는다. 이는 변위와 변형률의 관계를 일정한 하나의 상수를 이용하여 정의할 수는 없

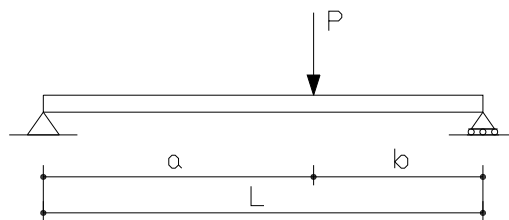


Fig. 1 Simply supported beam subjected to concentrated load at arbitrary location

Table 1 Coefficient α_1 with respect to location of concentrated load

b	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
α_1	31.3	31.2	30.8	30.3	29.6	28.7	27.5	26.2	24.6	22.8	20.8

지만 하중이 특정한 위치에 작용하는 경우에는 L, y, b 에 의해 계산되는 계수 α_1 에 의해 변형률을 변위로 환산할 수 있다는 것을 의미한다. 예를 들어 $L=10\text{ m}$, $y=0.47\text{ m}$ 경우에 집중하중의 위치 b 에 따른 계수 α_1 은 Table 1과 같다. 1축의 집중하중이 $L/2$ 에 작용하는 경우에는 중앙점 변형률 ϵ_c 에 20.8을, $L/4$ 에 작용하는 경우에는 중앙점 변형률 ϵ_c 에 28.7을 곱하면 중앙점 변위 δ_c 를 구할 수 있다.

작용하중이 1축이 아닌 2축 이상인 경우에도 중첩의 원리에 의해 식 (4)의 개념은 동일하게 적용될 수 있다. 식 (5)에서 다른 하중을 갖는 2축 하중의 경우에 대해 중앙점 변위 δ_c 와 중앙점 변형률 ϵ_c 의 관계를 나타내었다. 계수 α_2 가 다소 복잡하게 표현되어 있지만, L, y, P_1, P_2, c 는 모두 기지의 상수이므로 계수 α_2 는 집중하중의 작용위치에 따른 상수이다. 또한, 식 (4) 및 식 (5)에서는 중앙점의 응답을 대상으로 하였지만 식 (4)와 식 (5)의 개념은 중앙점 뿐만 아니라 임의의 위치에 대해서도 성립한다.

$$\delta_c = \frac{[P_1 b(3L^2 - 4b^2) + P_2(b-c)(3L^2 - 4(b-c)^2)]}{24[P_1 b y + P_2(b-c)y]} \cdot \epsilon_c \quad (5a)$$

for $a \geq b$

$$\delta_c = \alpha_2 \cdot \epsilon_c$$

$$\text{where, } \alpha_2 = \frac{[P_1 b(3L^2 - 4b^2) + P_2(b-c)(3L^2 - 4(b-c)^2)]}{24[P_1 b y + P_2(b-c)y]} \quad (5b)$$

여기서, P_1, P_2 : 첫 번째 및 두 번째 축의 하중 크기
 c : 첫 번째와 두 번째 축의 축간 거리

식 (4)와 식 (5)에 나타난 계수 α_1 및 α_2 는 횡강성이 일정한 단순보를 대상으로 하므로 비교적 간단하게 계산되지만, 보의 횡강성이 일정하지 않거나 작용하중의 형태가 복잡한 경우에는 변위와 변형률의 관계를 나타내는 계수 α 를 수계산으로 산출하기는 용이하지 않다. 따라서, 앞서 설명한 방법을 일반화시키기 위해 식 (6)에 나타난 바와 같이 계수 α 를 범용구조해석프로그램을 이용한 구조해석으로부터 얻어지는 변위와 변형률의 비로서 정의하고자 한다.

$$\alpha = \delta_{analyzed} / \epsilon_{analyzed} \quad (6)$$

여기서, $\delta_{analyzed}$: 구조해석에 의한 변위
 $\epsilon_{analyzed}$: 구조해석에 의한 변형률

구조해석을 통해 얻어지는 변위와 변형률을 이용하여 계산된 계수 α 를 식 (7)과 같이 실측 변형률에 곱하면 실제 변위를 추정할 수 있다. 여기서, 계수 α 는 작용하중의 위치에 따라 달라지므로 반드시 변형률이 측정된 하중경우를 대상으로 계산되어야 한다. 또한, 하중의 작용위치별로 계수 α 가 계산되는 경우에는 동적 응답에도 적용 가능하므로 본 연구에서 제안하는 방법은 실측 정·동적 변형률을 이용하여 정적 뿐만 아니라 동적 변위도 추정할 수 있다.

$$\delta_{estimated} = \alpha \cdot \epsilon_{measured} \quad (7)$$

여기서, $\delta_{estimated}$: 추정 변위
 $\epsilon_{measured}$: 실측 변형률

3. 실내실험 및 결과

본 연구에서 제안하는 변위 추정 방법을 실험적으로 검증하기 위해 실내실험을 수행하였다. 실험체는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 2,100×250×9.5 mm(L×W×T) 제원을 갖는 강판을 이용하여 지간길이 2.0 m의 단순보 형태로 제작하였다. 실험체가 실험량과 유사한 동적 거동을 나타내도록 하기 위해 실험체의 고유진동수를 약 5 Hz 내외로 조정하였다.

실험체 상면에는 차량을 모사한 2축 카트(cart)가 실험체 횡단면의 중앙을 주행할 수 있도록 아크릴(acrylic) 소재의 가이드 레일(guide rail)을 설치하였다. 모형차량의 중량 및 축간거리는 각각 98 N 및 120 mm이다. 실험체 중앙점 하면에는 전기저항식 변위계 및 변형률 게이지를 설치하였으며, 센서는 데이터 로거에 연결하여 모형차량의 재하에 따른 응답이 측정되도록 하였다.

실내실험은 정적재하실험과 동적재하실험으로 구분하여 실시하였다. 정적재하실험은 실험체의 L/4 위치와 L/2 위치

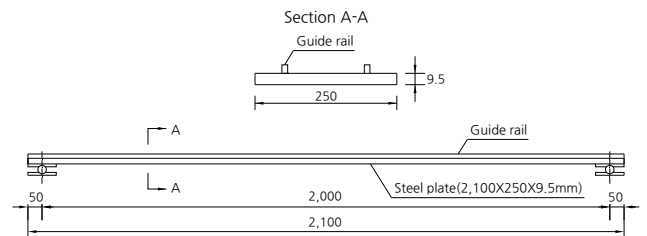


Fig. 2 Geometry of specimen



Photo 1 Overall view of laboratory test

Table 2 Results of laboratory test

Items	Displ. (mm)	Strain ($\times 10^{-6}$)	Ave. velocity (m/sec)	
Static test	#1	2.92	30.8	
	L/4 #2	2.89	30.6	
	Ave.	2.91	30.7	
	#1	4.38	60.0	
	L/2 #2	4.34	59.8	
	Ave.	4.36	59.9	
Dynamic test	#1	4.41	60.2	0.29
	#2	4.40	60.3	0.21
	Ave.	4.41	60.3	-

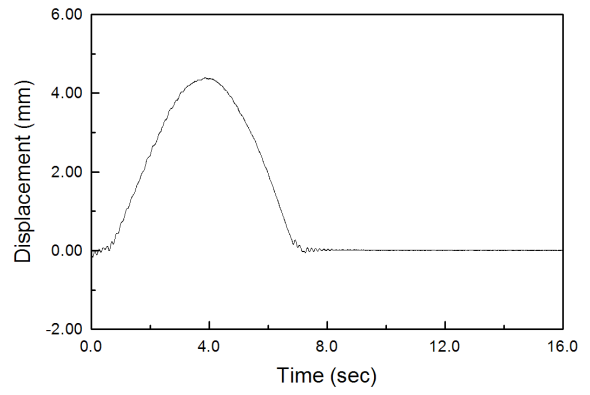
에 모형차량을 각각 재하한 후, 중앙점의 변위 및 변형률을 측정하였다. 동적재하실험은 모형차량을 약 0.25 m/sec 내외의 속도로 주행시켜가며 200 Hz의 데이터 sampling rate로 응답을 측정하였다. 모든 실내실험은 2회씩 반복하였으며, 실험전경은 Photo 1과 같다.

실내실험을 통해 얻어진 실험결과를 Table 2에 정리하여 나타내었다. Table 2에서 동적재하실험 결과는 최대 변위 및 최대 변형률을 나타낸 것이다. 동적재하실험으로부터 측정된 변위 및 변형률 시간이력곡선을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에 나타낸 변형률 시간이력곡선은 변위 시간이력곡선에 비해 다소의 노이즈(noise)가 포함되어 있는데, 이는 60 Hz의 전기적 노이즈 성분으로 판단된다.

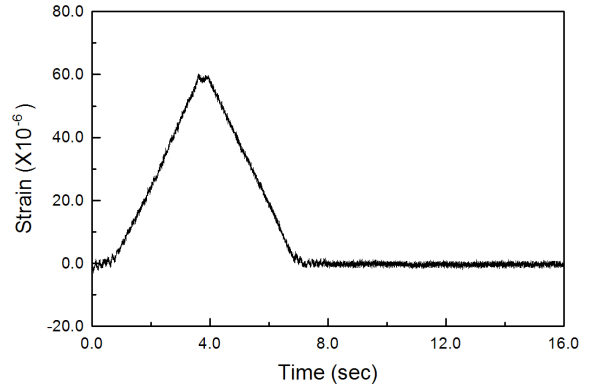
4. 실험결과를 이용한 정·동적 변위 추정

4.1 정적 변위 추정

정적재하실험을 통해 측정된 변형률을 이용하여 변위를 추정하기 위해 식 (5)를 이용하여 계수 α_2 를 계산하였으며, 그



(a) Displacement



(b) Strain

Fig. 3 Results of dynamic test

Table 3 Coefficient α_2 calculated by Eq. (5)

Items	P_1, P_2 (N)	L (mm)	b (mm)	c (mm)	y (mm)	α_2 (mm)
L/4	48	2000	560	120	4.75	96112.3
L/2	48	2000	940	-	4.75	74259.7

Table 4 Results of displacement estimation using static test data

Items	α_2 (mm)	Measured strain ($\times 10^{-6}$)	Estimated displ. ① (mm)	Measured displ. ② (mm)	% of deviation ①/② (%)
L/4	96112.3	#1 30.8	2.96	2.92	1.37
		#2 30.6	2.94	2.89	1.73
L/2	74259.7	#1 60.0	4.46	4.38	1.83
		#2 59.8	4.44	4.34	2.30

결과를 Table 3에 나타내었다.

Table 3의 계수 α_2 및 Table 2의 실측 변형률로부터 추정된 변위를 실측 변위와 비교하여 Table 4에 나타내었다. Table 4를 살펴보면 실측 변위에 대한 추정 변위의 편차율이 3% 미만으로서 매우 작다는 것을 알 수 있으며, 이로부터 본 연구에서 제안하는 단순지지 거더교에 대한 변위 추정방법은 타당하다고 판단된다.

4.2 동적 변위 추정

차량이 주행하는 상태에서 측정된 동적 변형률을 이용하여 변위를 추정하기 위해서는 차량 재하위치마다 계수 α 가 우선적으로 계산되어야 한다. 본 연구에서 수행한 동적재하실험은 200 Hz로 데이터를 샘플링하였으므로 실측 변형률 시간이력곡선을 변위 시간이력곡선으로 변환하기 위해서는 모형차량이 실험체의 시점부터 종점까지 주행하는 동안 0.005 sec 간격으로 모형차량 위치에 따른 α 를 계산하여야 하는데, 이를 수계산 또는 범용 정적구조해석프로그램을 이용하여 수행하기에는 매우 많은 시간 및 노력이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 이동하중에 의한 시간이력해석 전용 프로그램(Lee et al., 2012; Lee et al., 2006)을 사용하여 모형차량의 재하위치별 검토대상 위치의 변위 및 변형률을 구한 후, 이를 이용하여 α 를 계산하였다. 이동하중에 의한 시간이력해석시 분석 목적을 고려하여 동적 영향은 배제하고 정적 응답만 산정되도록 하는 옵션(option)을 사용하였다. 또한, 동적 영향이 배제된 상태이므로 모형차량이 실험체에 재하되는 경우, 즉 강제진동 상태만을 해석대상으로 하였다.

이동하중에 의한 시간이력해석 프로그램은 Newmark의 직접적분법에 의해 식 (8)과 같은 운동방정식의 해를 구한다.

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = P(t) \quad (8)$$

여기서, M , C , K 는 각각 구조물의 질량, 감쇠 및 강성매트릭스이며, u 와 $P(t)$ 는 각각 절점변위와 하중벡터이다. 식 (8)에서 ‘ \cdot ’는 시간에 관한 미분을 의미한다.

프레임요소로 모형화한 해석모형에 대해 이동하중에 의한 시간이력해석을 수행하였다. 시간이력해석을 통해 얻어진 강제진동상태하의 해석모형 중앙점의 변위 및 변형률 시간이력곡선을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 5에는 해석을 통해 얻어진 변위 및 변형률 시간이력곡선을 이용하여 계산된 모형차량의 재하위치별 계수 α 를 나타내었다.

Fig. 5에 나타난 모형차량의 재하위치별 계수 α 와 실내실험을 통해 얻어진 실측 변형률을 이용하여 추정된 변위를 실측 변위와 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 실측을 통해 얻어진 변위와 본 연구에서 제안하는 방법에 의해 추정된 변위를 비교하여 나타낸 Fig. 6을 살펴보면 추정 변위에 다소의 노이즈 성분이 포함된다는 점과 모형차량의 첫 번째 축이 약 1.2~1.5 m에 위치할 때 약간의 편차가 발생한다는 점을 제외하면 실측 변위와 추정 변위는 거의 일치한다는 것을 알 수 있다.

추정 변위에 노이즈가 포함되는 것은 실측 변형률 데이터 자체에 전기적 노이즈 성분이 존재하기 때문이다. Fig. 6(a)의 추정 변위에 대한 FFT(Fast Fourier Transform) 분석결과를 나타낸 Fig. 7에 의하면 국내의 전기 주파수인 60 Hz에서 피크

(peak)가 형성되는 것을 알 수 있다. Fig. 6(a)의 추정 변위에 대해 50 Hz의 로패스 필터(low pass filter)로 필터링한 결과를 Fig. 8에 나타내었으며, 필터링에 의해 전기적 노이즈가 제거된 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 변형률 게이지는 측정에 사용되는 여타 센서에 비해 노이즈에 민감하므로 추정 변위의 정확도를 향상시키기 위해서는 접지, 풀 브릿지(full bridge) 회로 구성 및 신호처리 등의 방법을 통해 노이즈를 저감시킬 필요가 있다.

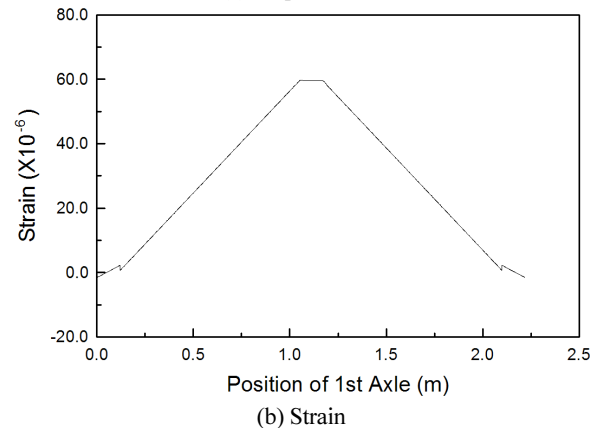
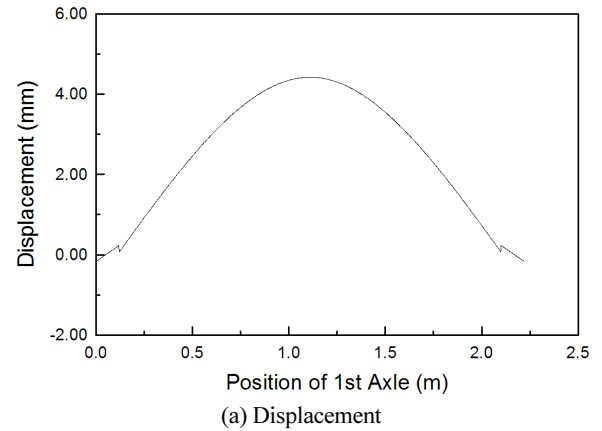


Fig. 4 Results of time history analysis due to moving vehicle

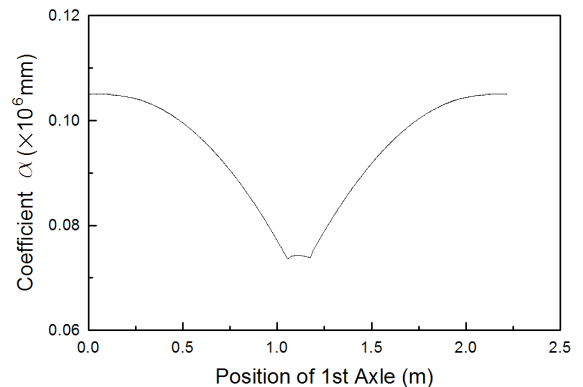


Fig. 5 Coefficient α with respect to location of model vehicle

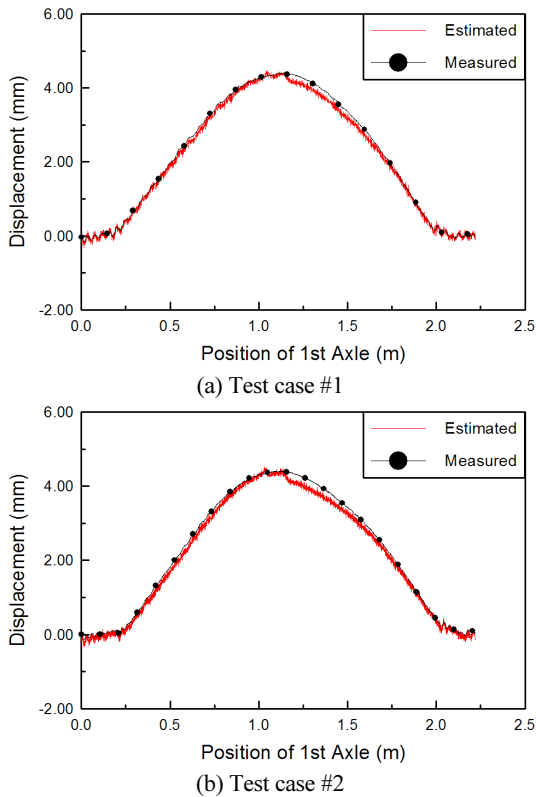


Fig. 6 Comparison of estimated and measured displacement

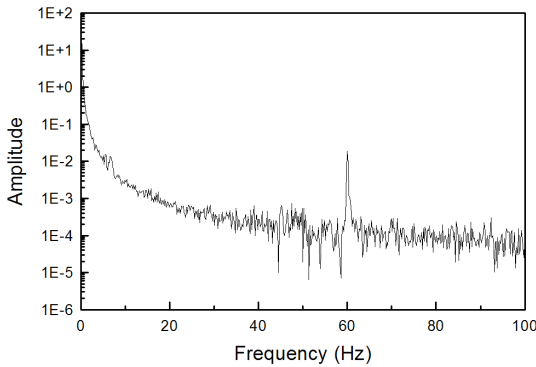


Fig. 7 FFT analysis result for estimated displacement shown in Fig. 6(a)

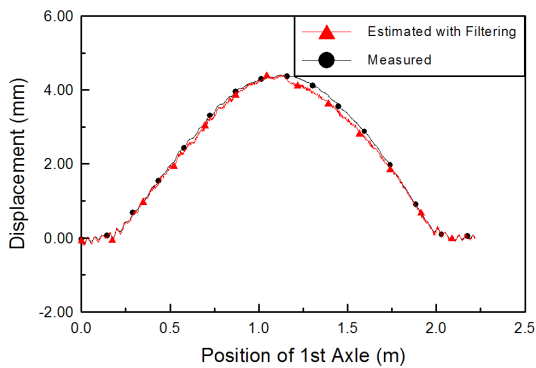


Fig. 8 Comparison of estimated displacement with signal processing and measured displacement

모형차량의 첫 번째 축이 실험체의 시점에서부터 약 1.2~1.5 m 떨어진 위치를 통과할 때 실측 변위와 추정 변위 사이에 약간의 편차가 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 편차는 Fig. 5의 계수 α 는 동적재하실험시의 평균 주행속도를 이용하여 계산되는 반면에 모형차량은 실험체를 주행할 때 동일한 속도를 유지하지 못하였기 때문으로 사료된다. 즉, 해석과 실험에 있어서 모형차량의 재하위치가 완전히 일치하지 않아 편차가 발생된 것으로 판단된다. Fig. 5에 나타난 계수 α 의 형상을 살펴보면 중앙부의 기울기가 시·중점부에 비해 가파르다는 것을 알 수 있으며, 이로 인해 실험체 중앙부에서의 모형차량 재하위치의 미세한 차이가 편차를 유발시킨 것으로 추정된다.

본 연구에서 제안하는 단순지지 거더교에 대한 동적 변위 추정 방법은 변형률 게이지의 특성에 따른 노이즈의 영향 및 해석과 실험시의 주행차량 재하위치 편차에 따른 영향에 의해 실측 변위와 추정 변위 사이에 미세한 차이가 있지만, 공학적인 관점에서 볼 때 단순지지 거더교의 현장측정에 충분히 적용 가능하다고 판단된다.

5. 결론

본 연구를 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 단순지지 거더교의 실측 변형률을 이용하여 변위를 추정하기 위해서 기본적인 구조역학 지식을 이용하여 기본 개념을 도출하고, 해석적 방법을 부가적으로 도입하여 본 연구에서 제안하는 방법을 일반화시켰다.
- 2) 단순지지 보에 대한 정·동적 실내실험을 통해 얻어진 결과를 이용하여 변위를 추정하였으며, 추정된 변위와 실측 변위 사이의 편차는 매우 작은 것으로 나타나 본 연구의 타당성이 실험적으로 입증되었다.
- 3) 본 연구에서 제안하는 방법은 단순지지 거더교의 정적 변위 뿐만 아니라 강제진동상태하의 동적 변위 추정에도 적용 가능하다. 단, 실측 동적 변형률을 이용하여 동적 변위를 추정하기 위해서는 재하차량의 주행속도 및 교량 시·중점부 통과시각 등을 명확히 파악하여 재하차량의 시간 대별 위치를 해석에 반영하여야 한다.

본 연구에서 제안하는 방법은 비록 단순지지 거더교의 정적 변위 및 강제진동상태하의 동적 변위 추정에 한정되며, 노이즈에 민감한 변형률 응답을 대상으로 한다는 제약조건을 갖고 있지만 향후 다양한 해석, 실내실험 및 현장실험을 통해 다양한 조건에 적용가능하도록 보완 및 개선할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원에서 주관하는 2015년 국토교통기술사업화 지원사업의 연구비로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

1. Bell, M., Ma, T. W., and Xu, N. S. (2015), Recovering Bridge Deflections from Collocated Acceleration and Strain Measurements, *Proceedings of SPIE*, 9435.
2. Cho, N. S., and Kim, N. S. (2008), Prediction of the Static Deflection Profiles on Suspension Bridge by Using FBG Strain Sensors, *Journal of Civil Engineering*, KSCE, 28(5A), 699-707 (in Korean).
3. Joh, S. H., Jeon, J. C., Hwang, S. K., and Lee, H. H. (2015), Experimental Verification of Displacement Estimation Algorithm using Velocity Time History, *Journal of the Korean Society of Safety*, KOSOS, 30(4), 99-105 (in Korean).
4. Jung, B. S., Shin, K. Y., and Lee, C. M. (2001), Estimation of Displacement Responses Using Acceleration Data Measured on Bridge Superstructure, *Journal of Civil Engineering*, KSCE, 21(5-A), 677-686 (in Korean).
5. Lee, H. H., Jeon, J. C., and Kyung, K. S. (2012), Determination of

- a Reasonable Impact Factor for Fatigue Investigation of Simple Steel Plate Girder Railway Bridges, *Engineering Structures*, 36, 316-324.
6. Lee, H. H., Jeon, J. C., Kyung, K. S., and Mori, T. (2006), Influence of Moving Vehicle on Fatigue of Steel Girder Bridge, *International Journal of Steel Structure*, KSSC, 6(4), 269-278.
7. Park, H. S., Park, K. T., and Lee, K. W. (2001), An Experimental Study on Characteristics Analysis of Deflection Response of RC Structures using Measured Strain, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 5(3), 173-180 (in Korean).
8. Shin, S., Yun, B. G., and Kim, J. C. (2009), Estimation of Dynamic Displacements of a Bridge using FBG Sensors, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 13(3), 101-109 (in Korean).
9. Yun, Y. K., and Ryu, H. J. (2011), Calculation of Deflection Using the Acceleration Data for Concrete Bridges, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 15(5), 92-100 (in Korean).

Received : 09/14/2015

Revised : 11/03/2015

Accepted : 04/21/2016

요 지 : 본 연구에서는 기존의 가속도 등을 이용하여 변위를 추정하는 방법의 문제점을 개선시키기 위해 단순지지 거더교의 실측 변형률로부터 변위를 추정할 수 있는 간단한 방법을 제안하였다. 제안된 변위 추정 방법의 기본 개념은 변위와 변형률의 관계로부터 유도되었으며, 해석적 방법을 부가적으로 도입하여 일반화시켰다. 실교량과 유사한 동적 거동특성을 갖는 단순지지 강판에 대한 정-동적 실내실험을 수행하였으며, 실험을 통해 실험체 중앙점의 변위 및 변형률을 측정하였다. 실험체에 대한 실측 변형률을 이용하여 추정된 변위는 실측 변위와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 제안한 변위 추정 방법은 변위계 설치를 위한 고정된 기준점 확보가 곤란한 실교량(단순지지 거더교)의 변위 측정에 적합하다고 판단된다.

핵심용어 : 단순지지 거더교, 변위, 변위 추정 방법, 변위-변형률 관계, 변형률
