

계측이 어려운 환경에 가설된 교량의 변위 추정 기술 개발

Development of Displacement Estimation Technique for Bridges Located under Poor Measurement Circumstances

전준창* · 이희현

Junchang Jeon · Heehyun Lee

Abstract In this paper, to verify the field application of a displacement estimation technique based on the relationship between displacement and strain, static and dynamic field load test are performed on three-span continuous real bridge structures. The superstructure types of the test bridges are IPC girder highway bridge and steel box girder AGT bridge. LVDTs and strain gauges are attached to them; then, the responses due to test vehicle are measured. To obtain the displacement-strain relationship of the test bridges, the bridges are modeled as grillage system with 6 DOFs for the purpose of structural analyses. Static and dynamic displacements, which are estimated using both the calculated displacement-strain relationship and the measured strain signal, agree well with the values measured by LVDT. This study demonstrates that the displacement estimation technique using the strain signal can be effectively applied to the displacement measurement of bridge structures that cross rivers/roads/railways or have high clearance.

Keywords : Displacement estimation technique, Displacement-strain relationship, Bridge, Load test

초 록 이 논문에서는, 변위-변형률 관계로부터 변위를 추정하는 선행 연구의 현장 적용성을 검토하기 위하여 실교량에 대한 현장재하실험을 실시하고, 그 결과에 대해 고찰하였다. 3경간 연속 IPC 거더 도로교 및 강합성 박스거더 경량전철 교량에 변위계 및 변형률 게이지를 부착하고, 재하차량에 의한 응답을 측정하였다. 현장재하실험을 통해 얻어진 실측 변형률을 변위로 변환시키기 위해 변위와 변형률의 관계를 이용하였다. 해석적인 방법으로 변위-변형률 관계를 도출하기 위해 연구대상 교량을 격자구조로 모형화하고 구조해석을 수행하였다. 연구결과, 사전 구조해석에 의해 얻어진 변위-변형률 관계와 실측 변형률을 이용하여 변위를 추정하여도 실용상 만족할 만한 결과를 도출할 수 있었다. 이 연구 결과는 향후 계측이 어려운 환경하에 놓여 있는 교량의 변위 측정에 널리 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 변위 추정 기술, 변위-변형률 관계, 교량, 현장재하실험

1. 서 론

현재 국내에서는 「시설물의 안전관리에 관한 특별법」에 따라 1, 2종 시설물에 해당하는 교량에 대해 주기적으로 정밀안전진단을 실시하고 있다. 교량의 정밀안전진단을 위한 주요 측정항목은 변위를 비롯하여 변형률과 가속도 등이다. 교량의 변위는 여러 측정항목 중 구조물의 전체적인 건전성 여부를 직접적으로 나타낼 뿐만 아니라 구조계의 강성(stiffness)과 관련되므로 중요하게 취급된다. 그러나 교량 하부에 하천이나 도로가 존재하거나 다리밑 공간이 높아 변위계를 설치하여 직접 변위를 측정하기 어려운 교량이 상당수 존재한다.

이러한 문제를 해결하기 위하여, 많은 연구자들이 오래전부터 가속도 또는 속도 신호를 적분하여 교량의 변위를 추정하는 연구를 수행하여 왔으며[1-7], 최근에는 영상처리기법을 이용하거나 레이저 변위계 등과 같은 센서를 이용하는 연구[8-11]도 수행되고 있다. 가속도 또는 속도 신호를 적분하여 변위를 추정하는 경우, 적분상수 처리 방법과 저주파 영역에서의 정확한 신호획득의 문제로 실용적인 연구결과가 도출되지 않았으며, 레이저 또는 영상처리기술을 이용하는 경우 장비 가격이 고가이거나 정밀도가 낮다는 문제로 인해 해상의 장대교량 유지관리계측시스템을 제외하고는 일반 교량에 대한 적용실적은 거의 없다. 즉, 소정의 정확도를 갖고, 설치가 용이하며, 경제적으로 변위를 측정할 수 있는 기술은 오래 전부터 실무에서 필요로 해 왔던 기술이다.

*Corresponding author. E-mail: jcj@ctceng.co.kr.

© 2016 The Korean Society for Railway. All rights reserved.

<https://doi.org/10.7782/JKSR.2016.19.6.755>

이 논문에서는 고정점을 설치하기 어려운 환경에 위치한 교량의 실제 정·동적 변위를 합리적으로 추정하기 위한 선행 연구 [12]의 현장적용성을 확인하기 위하여 IPC 거터 도로교 및 강합성 박스거터 경량전철(AGT, Automated Guideway Transit) 교량을 대상으로 정·동적재하실험을 실시하고, 그 결과에 대해 기술하였다.

2. 변형률 신호를 이용하여 변위를 추정하는 이론적 방법

측정 변형률을 이용하여 변위를 추정하는 기존의 연구[13]에서는 적분과정이 필요한 처짐과 곡률의 관계로부터 도출된 공식을 사용하므로 적용성에 한계가 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 문헌[12]에서는 기존 연구와 달리 변형률을 변위로 환산하는 과정에서 적분이 필요없는 알고리즘을 제안하였으며, 단순지지 모형실험체에 대한 동적주행실험을 통해 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

문헌[12]에 기술된 변형률 신호로부터 변위를 추정하는 이론적인 과정은 다음과 같다. Fig. 1과 같이 휨강성이 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. 이를 이용하여 변위와 변형률의 관계를 정리하면 식(3)이 얻어진다. 가장 단순한 경우에 대해 유도된 식(3)의 개념은 구조해석적 방법을 도입하여 식(4)와 같이 일반화함으로써 하중조건 및 구조형식 등에 무관하게 적용 가능하다.

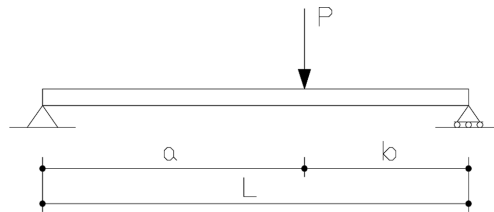


Fig. 1 Simply supported beam subjected to concentrated load at arbitrary location.

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

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

여기서, P : 집중하중의 크기, EI : 보의 휨강성, L : 보의 지간길이, y : 보 단면 중립축으로부터의 연단거리, a, b : 집중하중의 작용위치를 나타내는 상수.

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

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

$$\delta_{estimated} = a \cdot \varepsilon_{measured} \quad (4)$$

$$a = \delta_{analyzed} / \varepsilon_{analyzed} \quad (5)$$

여기서, $\delta_{estimated}$: 추정 변위, $\varepsilon_{measured}$: 실측 변형률, $\delta_{analyzed}$: 구조해석에 의한 변위, $\varepsilon_{analyzed}$: 구조해석에 의한 변형률.

3. 현장재하실험

제시된 방법의 현장적용성을 확인하기 위하여 국내에서 가설실적이 많은 PSC Beam 계열 교량과 강합성 박스거터교를 대상으로 정·동적 재하실험을 실시하였다. Table 1에 나타낸 바와 같이 A교는 3경간 연속 IPC 거터 도로교이며, B교는 3경간 연속 강합성 박스거터 경량전철 교량이다.

Table 1. Specifications of field load tested bridges.

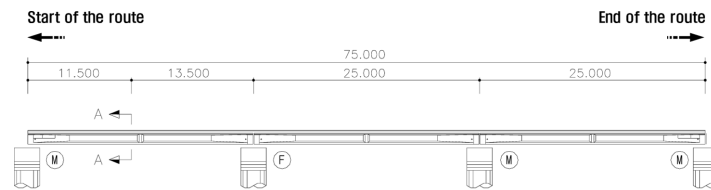
Bridge name assumed	Superstructure type	Span length (m)	Width (m)	Field test type	Remarks
A	IPC girder	3@25=75.0	10.44	Static	Highway bridge
B	steel box girder	3@40=120.0	7.95	Static, dynamic	Automated guideway transit bridge

3.1 A교의 현장재하실험

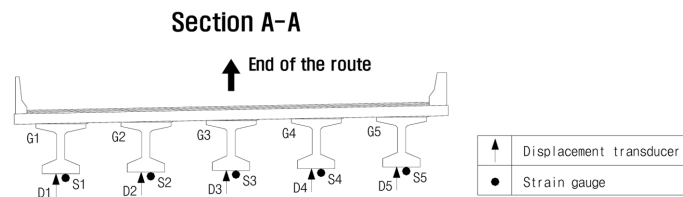
A교의 개략적인 제원 및 센서부착위치는 Fig. 2와 같으며, 이 교량에 토사를 만재한 3축 덤프트럭(Fig. 3 참조)을 Fig. 4에 나타난 위치에 재하시켜 정적재하실험을 실시하였다. 실험은 각 2회씩 반복하였다. 이 교량의 경우, 장시간 현장 교통통제가 불가능하여 정적재하실험만을 수행하였다.

3.2 B교의 현장재하실험

B교에 대해서는 경량전철이 통행하지 않는 심야시간에 정적 및 동적재하실험을 실시하였다. 재하차량에 의한 정·동적 응답을 측정하기 위해 Fig. 5와 같이 두 번째와 세 번째 경간 중앙부에 변위계 및 변형률 게이지를 부착하였다. Fig. 5에서 게이지 S2와 S4는 정적 응답만을 측정하기 위한 센서이다. 재하차량은 6량 1편성(Mc1-M1-M2-M3-M4-Mc2)의 고무차륜형식 AGT 차량이며, 중량 및 축간거리는 Fig. 6과 같다.



(a) Geometry and measurement section



(b) Sensor locations at section A-A

Fig. 2. Geometry and sensor locations of 'A' bridge.

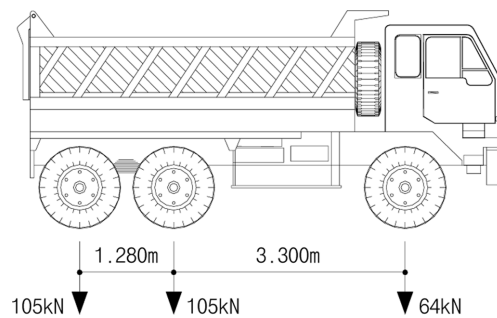
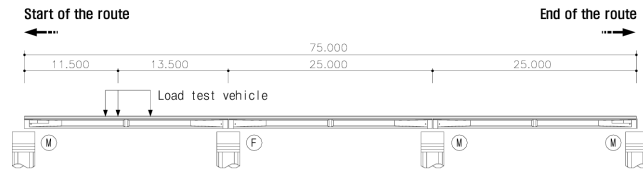
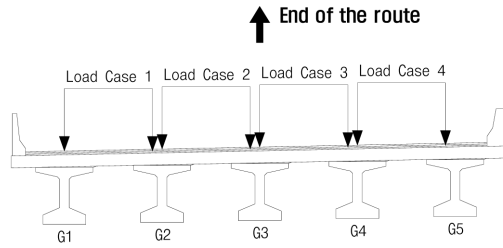


Fig. 3. Axle weights and spacings of the load test vehicle.

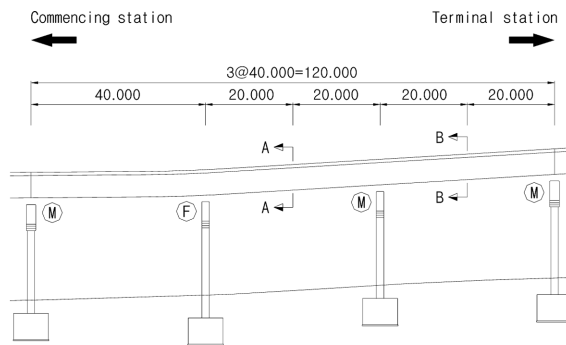


(a) Longitudinal direction

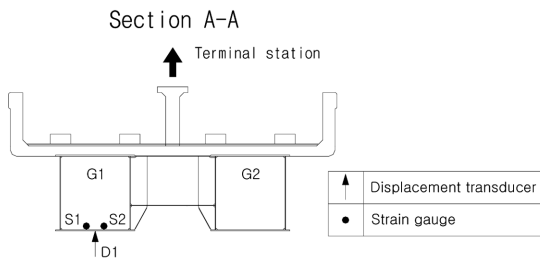


(b) Transverse direction

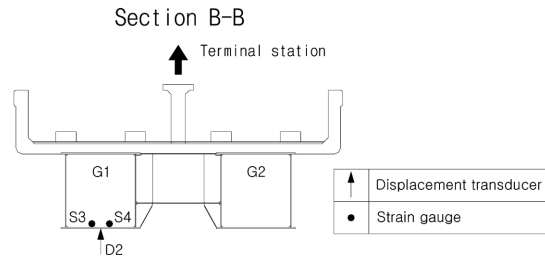
Fig. 4. Load cases of 'A' bridge.



(a) Geometry and measurement sections



(b) Sensor locations at section A-A



(c) Sensor locations at section B-B

Fig. 5. Geometry and sensor locations of 'B' bridge.

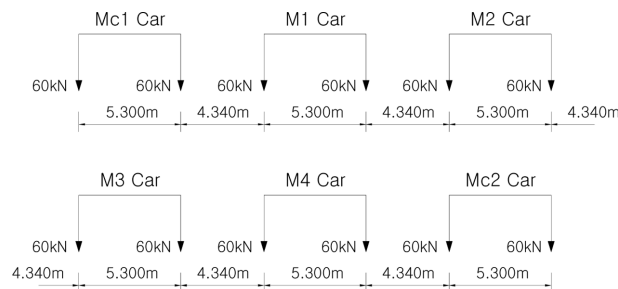


Fig. 6. Axle weights and spacings of the load test AGT vehicle.

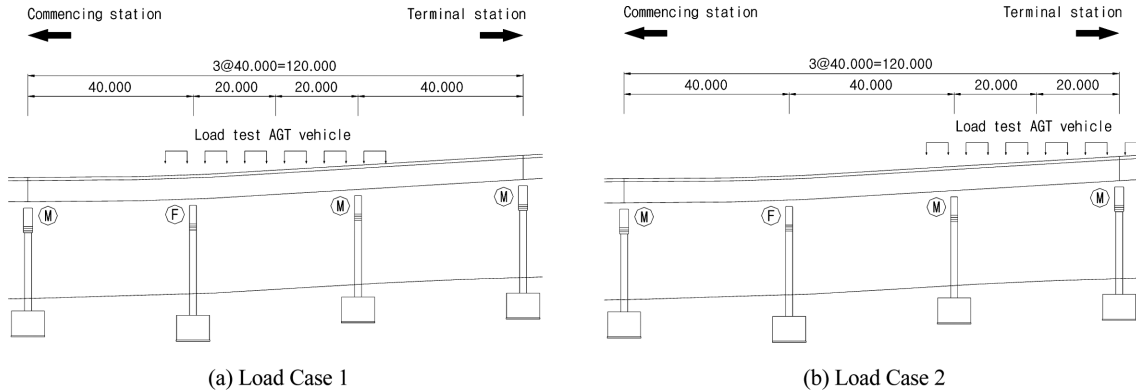


Fig. 7. Load cases of 'B' bridge.

정적재하실험은 Fig. 7에 나타난 바와 같이 재하차량의 중심이 각각의 측정단면 위치에 놓이도록 하여 총 2가지의 하중경우에 대해 실시하였다. 한편, 동적재하실험은 재하차량을 종점측에서 시점측으로 주행시켰으며, 주행속도는 50, 60 및 70km/h이다.

4. 구조해석 및 변위 추정

4.1 A교에 대한 구조해석 및 변위 추정

A교의 응답 측정점에서 계수 a 를 구하기 위해 정적 구조해석을 수행하였으며, 구조해석에 사용된 재료특성 및 단면특성은 각각 Table 2 및 Table 3과 같다.

Table 2. Material properties of 'A' bridge.

Items		Properties of materials
Concrete	Girder	Design strength 40MPa, Young's modulus 3.00×10^4 MPa
	Deck slab, Floor beam	Design strength 27MPa, Young's modulus 2.67×10^4 MPa
PS strand		SWPC 7B($\phi 15.2\text{mm} \times 15\text{EA}$), Young's modulus 2.0×10^5 MPa

Table 3. Sectional characteristics of 'A' bridge.

Section Id.	Sectional area (m ²)	2nd moment of area (m ⁴)	
Outer girder (G1, G5)	Sec. #1	1.5976	0.3109
	Sec. #2	1.4562	0.2970
	Sec. #3	1.1937	0.2715
	Sec. #4	1.0727	0.2598
Inner girder (G2 ~ G4)	Sec. #5	1.5763	0.3055
	Sec. #6	1.4348	0.2920
	Sec. #7	1.1723	0.2674
	Sec. #8	1.0513	0.2562

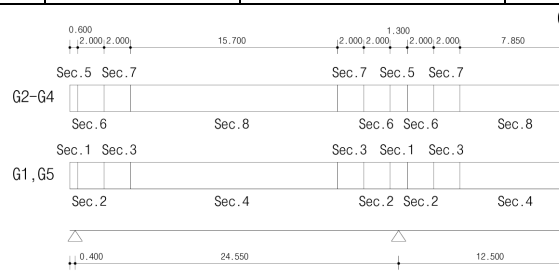


Table 4. Comparison of measured and estimated displacements of ‘A’ bridge by static field test.

Load case			a ($\times 10^6$ mm)	Measured strain ($\times 10^{-6}$)	Measured displ. (mm)	Estimated displ. (mm)	Deviation (%)
G1 center	LC1	#1	0.04704	41	1.87	1.93	3.12
		#2		37	1.79	1.74	2.79
G2 center	LC1	#1	0.05505	27	1.34	1.49	11.19
		#2		25	1.32	1.38	4.55
	LC2	#1	0.04702	23	1.13	1.08	4.42
		#2		22	1.13	1.03	8.85
G3 center	LC2	#1	0.04653	21	1.04	0.98	5.77
		#2		22	1.04	1.02	1.92
	LC3	#1	0.04648	21	1.02	0.98	3.92
		#2		24	1.03	1.12	8.74
G4 center	LC3	#1	0.04725	23	1.08	1.09	0.93
		#2		23	1.10	1.09	0.91
	LC4	#1	0.04766	22	1.09	1.05	3.67
		#2		26	1.12	1.24	10.71
G5 center	LC4	#1	0.04756	28	1.25	1.33	6.40
		#2		28	1.24	1.33	7.26

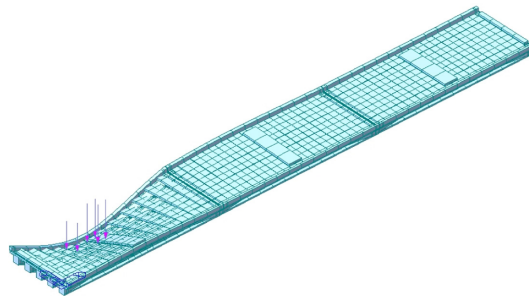


Fig. 8. Example of static structural analysis results of ‘A’ bridge (LC1, deformed shape).

범용구조해석 프로그램인 MIDAS Civil 2012[14]를 이용하여 A교를 격자구조로 모형화하고 Fig. 4에 나타낸 4가지의 하중경우에 대한 정적 구조해석을 수행하였다. 구조해석 결과 중 하중경우 LC1에 대한 A교의 변위 형상을 Fig. 8에 일례로서 나타내었다.

A교에 대한 정적 구조해석 결과로부터 산정한 계수 a , 계수 a 와 실측 변형률을 이용하여 추정된 변위 및 변위계를 이용하여 실측된 변위를 비교하여 Table 4에 나타내었다. 이 표에 의하면 실측 변위에 대한 추정 변위의 편차가 10%를 약간 초과하는 경우(Table 4에 음영으로 표현된 부분)도 있으나 평균적으로는 약 5%의 편차 범위내에서 추정이 가능하다는 것을 알 수 있다. A교에 대한 정적 변위 추정 결과가 기존의 연구결과[12]에 비해 다소 정밀도가 저하되는 것으로 나타났는데, 이러한 결과의 원인은 현장재하실험의 실험환경이 열악하여 측정오차가 커질 개연성이 크다는 점 및 구조해석을 위한 구조계의 모형화 과정에서 이상화, 단순화 등을 들 수 있다. 구조해석을 위한 이상화 및 단순화를 논외로 하면, 현장여건이 허락하는 범위 내에서 반복실험을 통해 다수의 측정데이터를 확보하여 변위를 추정하는 것이 추정 정밀도를 향상시킬 수 있는 하나의 방안이라고 판단된다.

4.2 B교에 대한 구조해석 및 변위 추정

B교에 대한 현장재하실험을 통해 얻어진 정·동적 변형률로부터 변위를 추정하기 위해 이동하중에 의한 시간이력해석 전용 프로그램[15-17]을 이용하여 구조해석을 수행하였다. 구조해석에 사용된 프로그램은 동적해석 뿐만 아니라 동적 영향을 배제하는

Table 5. Material properties of 'B' bridge.

Items		Properties of materials
Steel	Girder	SM490($F_y=315\text{MPa}$), Young's modulus $2.05 \times 10^5 \text{MPa}$
	Floor beam	SM400($F_y=235\text{MPa}$), Young's modulus $2.05 \times 10^5 \text{MPa}$
Concrete (Deck slab)		Design strength 27MPa , Young's modulus $2.67 \times 10^4 \text{MPa}$

Table 6. Sectional characteristics of 'B' bridge.

Section Id.	Sectional area (m^2)	2nd moment of area (m^4)
Sec. #1	0.3765	0.2539
Sec. #2	0.3807	0.2672
Sec. #3	0.4117	0.3181
Sec. #4	0.2654	0.1645
Sec. #5	0.2964	0.1971
Sec. #6	0.3765	0.2672

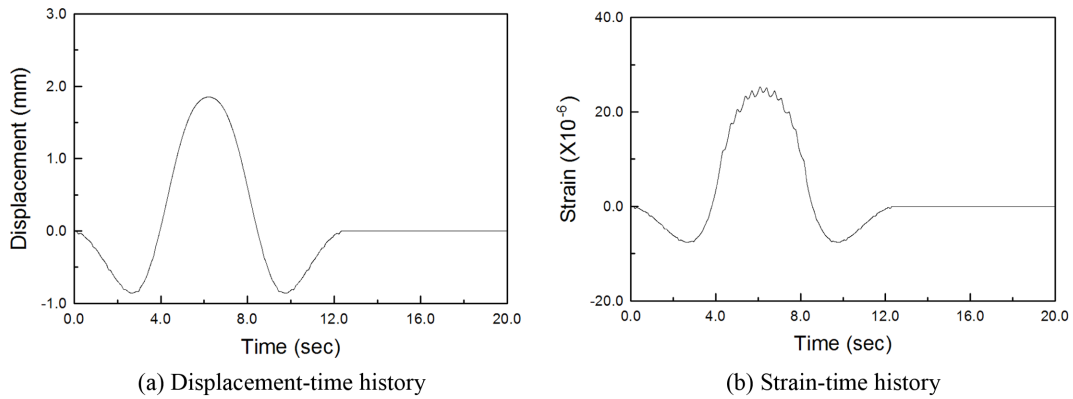
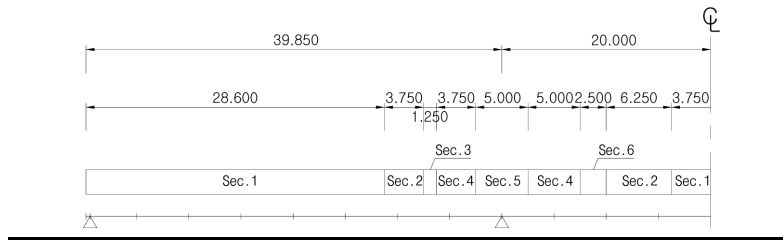


Fig. 9. Example of time history analysis results of 'B' bridge (running speed 50km/h, center of midspan).

옵션(option)을 사용하면 정적해석도 가능하다. 시간이력해석에 사용된 B교의 재료특성 및 단면특성을 각각 Table 5 및 Table 6에 나타내었다.

이동하중에 의한 시간이력해석을 위해 B교를 격자구조로 모형화하였으며, 정적 및 동적해석을 통해 얻어진 변위 및 변형률 시간이력곡선을 이용하여 계수 a 를 산정하였다. 동적 시간이력해석에 의한 변위 및 변형률 시간이력곡선의 일례를 Fig. 9에 나타내었다.

B교에 대한 정적 구조해석 결과로부터 산정한 계수 a 와 실측 평균 변형률을 이용하여 추정된 변위를 변위계에 의한 실측 변위와 비교하여 Table 7에 나타내었다. B교의 정적 변위 추정 결과를 나타낸 Table 7에 의하면 실측 변위에 대한 추정 변위의 편차가 최대 4% 미만으로서 매우 양호한 추정 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

Table 7. Comparison of measured and estimated displacements of 'B' bridge by static field test.

Load case		a ($\times 10^6$ mm)	Measured average strain ($\times 10^{-6}$)	Measured displ. (mm)	Estimated displ. (mm)	Deviation (%)
Midspan center	LC1	0.07678	39.0	3.00	2.99	0.33
Sidespan center	LC2	0.08225	45.5	3.60	3.74	3.89

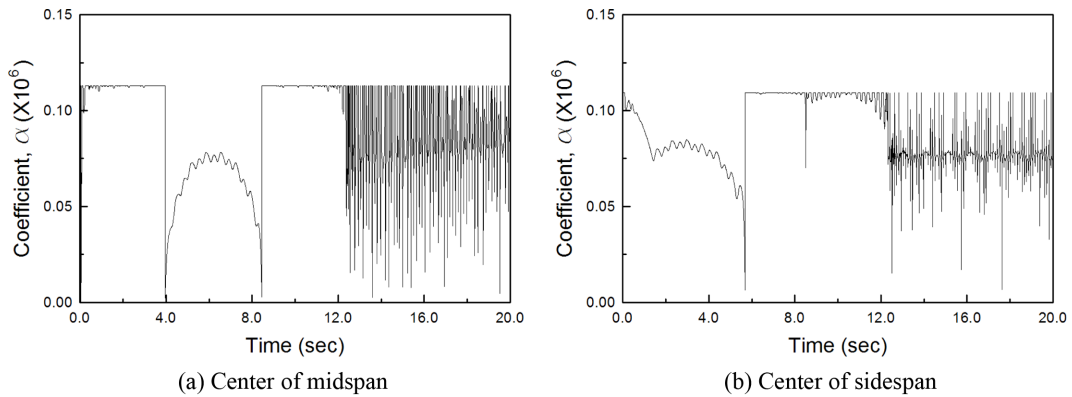


Fig. 10. Coefficient a calculated by time history analysis of 'B' bridge (running speed 50km/h).

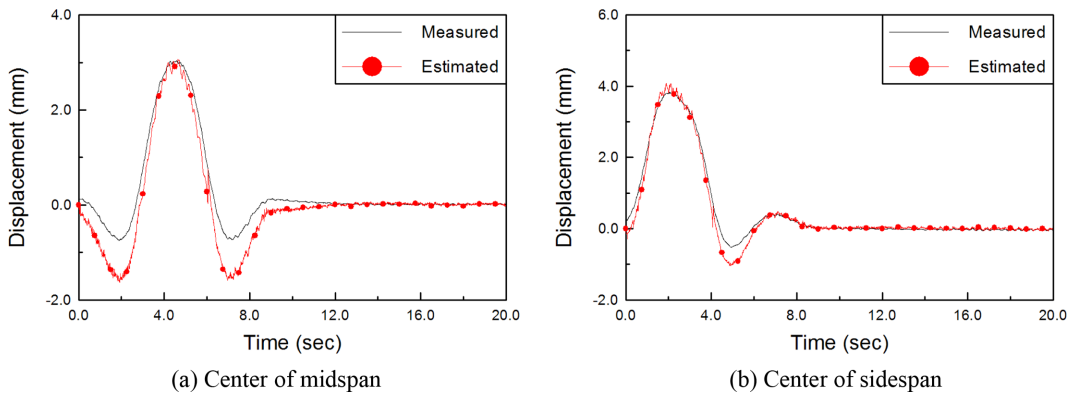


Fig. 11. Comparison of measured and estimated displacement time histories of 'B' bridge by dynamic field test (running speed 70km/h).

B교에 대한 동적해석 결과를 이용하여 산정한 계수 a 의 일례를 Fig. 10에 나타내었다. 구조해석에 의한 계수 a 는 해석 변형률에 대한 해석 변위의 비로 정의되므로 해석 변형률이 0이거나 0에 매우 가까운 경우에는 수치적인 오류가 발생할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 구조해석을 통해 얻어진 결과를 이용하여 제약조건을 설정하였다. 제약조건은 최대 변형률에 대한 최대 변위의 비와 최소 변형률에 대한 최소 변위의 비 중에서 큰 값이며, 하중위치별로 계산된 계수 a 가 설정된 제약조건을 초과하지 않도록 하였다.

Fig. 10을 살펴보면 연속교의 특성으로 인해 지점부 부근(그림 9(a)의 4.0sec와 8.5sec, 그림 9(b)의 5.7sec와 8.5sec)에서 급격한 불연속점이 존재하는 것을 알 수 있다. 이러한 불연속점은 재하차량에 의한 측정대상 위치의 응답이 거의 발생되지 않는 하중상태인 경우에 발생한다. Fig. 10에서 불연속성이 크게 나타나는 이유는 경량전철 교량의 특성상 재하차량의 길이가 상당히 길기 때문으로 판단된다.

동적해석에 의한 계수 a 및 실측 변형률 시간이력곡선으로부터 추정된 변위 이력곡선과 변위계에 의한 실측 이력곡선을 비교한 일례를 Fig. 11에 나타내었다. 또한, 주행속도별 추정 최대 변위와 실측 최대 변위를 Table 8에 정리하여 나타내었다. Fig. 11 및 Table 8의 주행속도별 변위 추정 결과를 살펴보면 재하차량에 의한 측정대상 위치의 응답이 거의 발생되지 않는 하중상태인 경우(Fig. 10의 불연속점에 해당)에 비정상적인 피크가 형성된다는 점과 재하차량이 측정대상 경간이 아닌 인접 경간에 위치할 때 응답이 다소 과대평가되는 점을 제외하면 추정결과는 실측결과와 유사하다고 판단된다. 비정상적인 피크가 형성되는

Table 8. Comparison of measured and estimated maximum displacements of 'B' bridge by dynamic field test.

Running speed		Measured maximum displ. (mm)	Estimated maximum displ. (mm)	Deviation (%)
50km/h	Midspan	3.02	3.06	1.32
	Sidespan	3.88	4.04	4.12
60km/h	Midspan	3.04	3.09	1.64
	Sidespan	3.85	4.02	4.42
70km/h	Midspan	3.04	3.07	0.99
	Sidespan	3.83	4.08	6.53

것은 재하차량의 길이가 상당히 길어서 나타나는 현상이므로 연속교의 특성이라기 보다는 경량전철 및 철도 교량의 특성으로 간주할 수 있으며, 재하차량이 측정대상 경간이 아닌 인접 경간에 위치할 때 응답이 과대평가되는 것은 1차적으로 구조해석과 관련된 것으로 판단되지만 향후 보다 많은 교량에 대한 현장재하실험을 통해 원인을 분석할 예정이다.

5. 결 론

이 연구에서는 변위 측정을 위해 고정점 설치가 어려운 환경에 위치한 교량의 정·동적 변위를 추정하는 방법의 현장적용성을 검토하기 위하여 3경간 연속 IPC 거더 도로교 및 강합성 박스거더 경량전철 교량을 대상으로 정·동적 현장재하실험을 실시하였다. 실측 정적 변형률을 이용하여 정적 변위를 추정한 결과, 변위계에 의한 실측 변위 대비 5% 미만의 평균 편차를 가지고 추정이 가능하였다. 또한, 동적 변형률 신호로부터 추정된 동적 최대 변위와 변위계에 의한 실측 동적 변위의 차이는 최대 약 7% 정도이며, 평균 편차는 약 3%로서 매우 양호한 결과가 도출되었다. 실험대상 교량의 수가 많지는 않지만 이 연구를 통해 변형률 신호를 이용한 변위 추정기법의 현장적용 가능성은 입증되었다고 판단된다. 향후 보다 많은 교량에 대한 현장실험을 통해 분석결과가 축적된다면 이 연구에서 제안한 변위 추정 기법은 교량 하부에 하천이나 도로가 존재하거나 다리밑 공간이 높아 일반적인 방법으로 변위 측정이 어려운 환경조건에 놓여 있는 교량구조물의 변위 측정에 널리 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 국토교통부에서 지원하는 국토교통기술사업화 지원사업(R&D/15TBIP-C074137-02)의 연구비로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

References

- [1] M. Bell, T.W. Ma, N.S. Xu (2015) Recovering bridge deflections from collocated acceleration and strain measurements, sensors and smart structures technologies for civil, mechanical, and aerospace systems 2015, *Proceedings of the International Society for Optics and Photonics*, 9435, pp.1-14.
- [2] S.H. Joh, J.C. Jeon, S.K. Hwang, H.H. Lee (2015) Experimental verification of displacement estimation algorithm using velocity time History, *Journal of the Korean Society of Safety*, 30(4), pp.99-105.
- [3] B.S. Jung, K.Y. Shin, C.M. Lee (2001) Estimation of displacement responses using acceleration data measured on bridge superstructure, *Journal of Civil Engineering*, 21(5-A), pp.677-686.
- [4] C.H. Park, D.G. Lee (1992) Correction of accelerogram in frequency domain, *Journal of Civil Engineering*, KSCE, 12(4), pp.71-79.
- [5] S. Shin, B.G. Yun, J.C. Kim (2009) estimation of dynamic displacements of a bridge using FBG sensors, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 13(3), pp.101-109.
- [6] K.T. Yang (1998) Problems of double integration of an acceleration to determine displacement characteristics of a structure under moving load, *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 11(4), pp.135-146.
- [7] Y.K. Yun, H.J. Ryu (2011) Calculation of deflection using the acceleration data for concrete bridges, *Journal of the Korea Institute for*

- Structural Maintenance and Inspection*, 15(5), pp.92-100.
- [8] I.H. Bae, J.S. Sim, G.H. Ha (2009) Structural health monitoring of the self-anchored suspension bridge using RTK GPS, *Proceedings of the Korean Society of Civil Engineers*, Hoengseong, Korea, pp.348-351.
- [9] J.S. Cho, Y. Huh (2011) Image processing technique for measuring the static displacement of bridge from general inspection photograph, *Journal of Civil Engineering*, 31(3A), pp.173-180.
- [10] S.W. Kim, N.S. Kim (2010) Verification of multi-point displacement response measurement algorithm using image processing technique, *Journal of Civil Engineering*, 30(3A), pp.297-307.
- [11] Korea University (2014) Structural Health Monitoring Based on Displacement, Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement.
- [12] J.C. Jeon, H.H. Lee (2016) A method estimating displacement using measured strain response of simply supported bridges, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 21(3), pp.18-24.
- [13] H.S. Park, K.T. Park, K.W. Lee (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*, 5(3), pp.173-180.
- [14] MIDAS IT (2012) *MIDAS Civil 2012 Analysis Reference*.
- [15] D.I. Chang, H.H. Lee (1992) Impact factors for simple span highway girder bridges, *Journal of Structural Engineering*, 120(3), pp.704-715.
- [16] H.H. Lee (1985) Impact factor of moving load due to surface roughness of girder bridge of variable span, *Master Thesis*, Asian Institute of Technology, Thailand, pp.11-22.
- [17] H.H. Lee, J.C. Jeon, K.S. Kyung (2012) Determination of a reasonable impact factor for fatigue investigation of simple steel plate girder railway bridges, *Engineering Structures*, 36, pp.316-324.

(Received 17 October 2016; Revised 3 November 2016; Accepted 8 November 2016)

Junchang Jeon : jcj@ctceng.co.kr

Construction Technology Consultants Co., Ltd., Hanrim Human Tower 605, 172, LS-ro, Gunpo-si, Gyeonggi-do, 435-824, Korea

Heehyun Lee : lhh@ctceng.co.kr

Construction Technology Consultants Co., Ltd., Hanrim Human Tower 605, 172, LS-ro, Gunpo-si, Gyeonggi-do, 435-824, Korea