

광변위 계측과 주행하중시험기법에 의한 교량구조의 손상도 추정기법

이형진^{*}, 김종훈²

¹창원대학교 토목공학과, ²삼표이엔씨(주)

Damage Assessment Technique for Bridge Structures By Moving Load Tests and Optical Displacement Measurements

Hyeong-Jin Lee^{*}, Jong-Hoon Kim²

¹Department of Civil Engineering, Changwon National University,

²Sampyo E&C Co. Ltd

요약 본 논문에서는 교량 구조의 유지관리에서 계측정보 부족 문제를 극복하기 위하여 주행하중 시험법과 광변위 계측을 이용하는 손상도 추정기법에 대한 연구를 수행하였다. 이 방법을 통한 연속적 계측 변위는 손상 추정을 보다 간단하며 실제 적어도 할 수 있다. 제안된 기법에 의한 대형 사회기간시설물에 대한 보다 현실적인 손상 추정 방법으로서의 가능성과 이 방법의 효율성과 정확도를 보이기 위하여 수치모의실험과 실험적 연구가 수행되었다. 예제해석 결과는 실험적 방법에서도 구해진 손상도들이 충분한 정확도를 가지고 있고 특히 실제 손상위치에서는 정확한 값과 거의 같음을 나타내고 있다. 이는 제안된 방법이 손상위치 추정이나 손상정도 추정에 모두 유용하고 실제 현장에서 구현 가능한 실용성이 충분하다는 의미로 해석된다.

Abstract In this paper, a damage assessment technique using a moving load test and optical sensors was studied to overcome the deficiency of measurement information in bridge maintenance. Continuous displacements by applying the reciprocal theorem to the test can make the assessment simpler and more practical. Numerical and experimental studies were performed to show the efficiency and accuracy of the proposed technique as well as the possibility of a more realistic assessment for large infrastructure. The results showed that the assessed damage levels are quite accurate, and similar to the exact values in actual damage locations, even in the experiments. The proposed technique is useful and practical for both detecting damage locations and damage quantities.

Key Words : Bridge, Damage Assessment, Moving Load Test, Reciprocal Theorem, Optical Displacement measurement

1. 서론

1.1 사회기간시설물의 안전진단기법의 종류 및 문제점

일반적으로 도로, 교량, 댐, 터널 등의 사회기간시설물 (Infrastructures)은 사용기간 동안 설계하중을 초과하는

과대하중이나 자연재해, 환경적 요인으로 인한 다양한 종류의 외력에 의한 손상, 콘크리트 열화, 강재의 부식 등에 의해 지속적 손상이 발생한다. 따라서 사회기간 시설물들은 적절한 안전성 평가 및 건전성 확보를 위한 적절한 유지관리 방안이 요구 된다. 이를 위한 여러 가지 방법들이 연구, 개발되고 실제 구조에 적용되어 왔다[1]. 그

이 논문은 2013~2014년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음

*Corresponding Author : Hyeong-Jin Lee(Changwon National Univ.)

Tel: +82-55-213-3774 email: leehjn@changwon.ac.kr

Received August 25, 2014 Revised(1st November 3, 2014, 2nd November 17, 2014 3rd December 3) Accepted January 8, 2015

러나 이들 대형 구조물은 특성상 실제 계측의 어려움이 커 충분한 계측정보의 확보가 매우 어렵다. 따라서 정량적 평가 방법보다는 정성적 평가나 단순 경보체계 구축에 집중되는 등 한계가 있어 왔다.

구조 안전성 평가에는 통상 육안검사(Visual Inspection), 비파괴 검사(Nondestructive test) 등의 상태 조사 방법과 구조재하 시험법의 내하력 평가방법(Load capacity test)[2], 구조 건전성 모니터링(Structural health monitoring)[3-5]기법 등의 구조적 성능 평가방법이 활용되어 왔다. 구조재하 시험법에 의한 내하력 평가 방법은 비교적 간편하나 제한된 계측 정보의 활용이나 이론적 미비점 등으로 엄밀한 분석에는 한계가 있었다. 상시 건전성 평가를 위해 다수의 장기 계측센서를 통해 구조 안전성을 평가하는 구조 건전성 모니터링기법은 장시간 구조물 위험도를 경보할 수 있는 체계로서 큰 의의를 가지나 초기 설치비용이나 유지관리 비용이 상당하다는 점이나 여전히 계측 정보의 제약으로 인한 다양한 분석 기법이 아직도 부족하다는 단점이 있었다.

계측자료의 보다 효과적인 분석을 위해서 연구되고 있는 방법 중의 하나가 구조식별법(Structural identification)[6-8]이다. 구조식별법은 관련이론의 합리성과 명료함이 큰 장점으로 특히 구조 안전성 평가의 핵심인 손상도 추정(Damage assessment)에 적용하는 연구가 활발히 이루어 졌다. 하지만, 추정 알고리즘이 가지는 역해석 문제(Inverse problem)로서의 원천적 수치적 불안정성(Inherent numerical instability) 문제나 계측정보 부족이라는 제약이 극복되지 못한 점 등에 따라 실제 현장에서 적용 가능한 방법으로서의 구현에는 상당한 제약이 있어 왔다. 이들 방법들의 공통된 문제점이며 주된 원인은 설치되는 계측센서 수의 부족, 적절한 계측 물리량(변위 등)에 대한 계측의 어려움에 기인한 계측정보의 제약 문제가 무엇보다 큰 원인이라 할 수 있다. 즉, 적절하고 충분한 계측정보의 확보가 무엇보다 중요하다 할 수 있다.

1.2 주행하중시험과 광변위 계측을 이용한 구조식별법

본 논문의 연구는 구조식별법의 실용화를 위한 방법의 개발에 관한 연구로, 보다 실제적인 계측체계의 구축 및 계측점 수의 제한 등 계측정보 제약을 극복하는 방법으로 주행하중 시험법을 활용하는 방안과 더불어 효율적

인 변위 계측을 위해 영상기반 변위계(Vision based displacement sensor) 혹은 큰 범주로 광학변위계(Optical displacement sensor)[9-10]로 불리는 계측 시스템을 도입하는 방안을 연구하였다.

주행하중 시험법은 상반정리의 원리에 입각한다면 1점 계측만으로 다측점(주행하중 통과 선상)을 수행한 것과 동일한 결과를 줄 수 있다. 이는 계측정보의 양을 대폭 증가시킬 수 있을 방안이 될 수 있다.

또한, 광학변위계는 손상추정에 적합한 물리량인 변위 계측의 어려움을 해소시켜 줄 수 있는 편의성 및 경제성이 있는 계측방법이라 생각되었다.

위에서 제시한 두 가지의 방법을 결합하여 보다 실제적인 구조 안전성 평가 방법으로서의 손상도 추정기법을 제안하고자 한다.

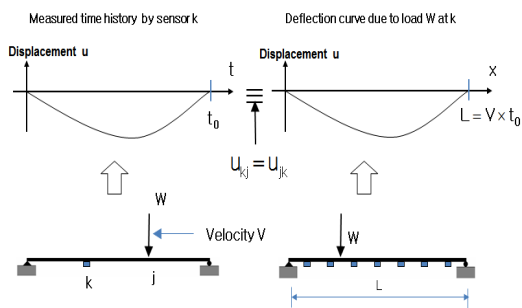
2. 본론

2.1 주행하중시험기법과 광학변위 계측에 의한 교량구조의 손상도 추정기법

2.1.1 주행하중시험기법

교량과 같은 사회기간시설물의 계측에서는 통상 설치 계측기 수의 제약, 계측기 설치의 어려움 등으로 충분한 수의 계측점 위치를 확보하는 것은 거의 불가능하다 할 수 있다. 그러나 장기간의 시험이 가능하고, 하중 재하가 편리한 경우에는, 제한된 계측 기의 수를 늘리는 대신 하중 위치를 옮겨가며 충분한 수의 하중 재하를 수행하고 상반정리(Reciprocal theorem)를 적용하여 하중 위치를 계측점과 같이 취급함으로써 다량의 계측기를 설치한 다측점 계측을 한 것과 동일한 효과를 얻을 수 있다. 이 방법은 모달시험 (Modal test)의 충격시험(Impact test)[11] 등에서 자주 사용되는 방법으로 일종의 스캐닝(Scanning) 방법이라 할 수 있다.

본 논문에서는, 교량 구조물은 장기간의 시험이나 하중재하가 편리한 경우는 아니지만 교량 하중의 주된 하중이 이동하는 주행하중(Moving load)이라 상반정리의 적용이 가능하고, 주행하중을 이용한 시험이 통상 내하력 시험 등에서 같이 수행되는 매우 익숙한 시험법이라는 점에 착안하였다.



[Fig. 1] The Concept of proposed technique

Fig. 1에서는 차량의 속도가 매우 낮아 준정적 상태(Quasi-Static)이며 1점 하중인 경우의 상반정리 결과를 보이고 있다. 자유도 j 에 대해 1개의 주행하중 작용하는 경우, k 점에서의 처짐 u_{kj} 는 상반정리에 따라 아래 식(1)과 같다.

$$u_{kj} = u_{jk} \quad (1)$$

이는 하중의 작용점과 계측점이 바뀌는 것으로, Fig. 1에서와 같이 원래의 계측점 k 에 하중 W 가 정지하중으로 가해졌을 경우 원래의 하중 작용점 j 에서의 처짐을 구한 것이 된다.

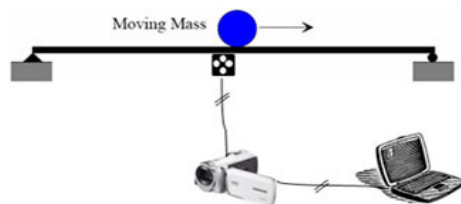
이 결과는 주행하중 실험에서는 한 점만의 계측을 수행해도 주행하중 경로상의 모든 자유도들의 변위들을 계측한 것으로 간주할 수 있다는 의미이다. 이를 통해 구조 손상도 추정의 큰 제약 중의 하나인 계측 위치의 수에 대한 한계를 극복할 수 있다. 이 방법은 고속 차량에 의한 동적응답의 경우나 다제하 하중의 경우에도 쉽게 확대 적용할 수 있다.

2.1.2 광학 변위계를 이용한 변위측정

제안된 방법에는 계측 물리량으로 가속도(Acceleration)나 변형률(Strain) 등도 사용 가능하나 이들 값을 사용했을 경우 국부적인 손상에 따른 계측 값의 변화가 지나치게 민감하여 오히려 노이즈나 오차 값이 증폭되는 경향이 있다. 따라서 일반적으로 전체 구조물을 대상으로 하는 손상 추정에서는 변위가 보다 유리하다 할 수 있다. 그러나 변위는 계측이 어렵다는 단점이 있다. 통상 변위계측에는 LVDT와 같은 접촉식 변위계가 사용되고 있으며 이는 지반이나 교각 등에 기준점을 설치해야 하고 많은 케이블 작업이 필요한 어려움이 있었

다. 이에 따라, 비접촉식 센서로서 광변위계의 일종인 레이저 변위계 등이 사용되기도 하였으나 장비가격이 비싸 사용에 어려움이 있다.

본 논문에서는 상용 캠코더와 이미지 처리 기법(Image processing algorithm)을 활용한 광학 변위를 채택하여 비접촉식의 장점과 경제성 확보가 동시에 가능하도록 하였다.



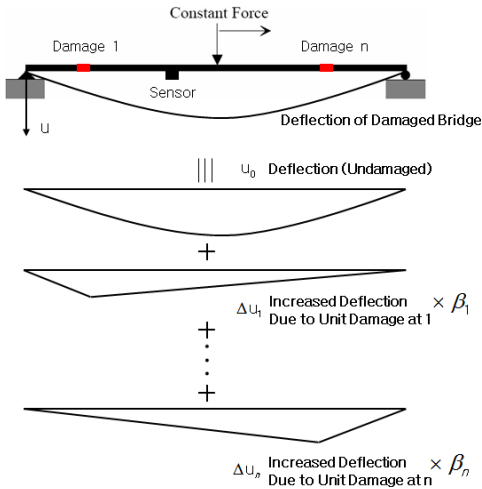
[Fig. 2] Setup of optical displacement measurement system

광변위 계측에서는 Fig. 2와 같이 설정된 이미지의 패턴을 가진 타겟을 설치하고 이의 움직임을 촬영하여 패턴의 이동을 픽셀(Pixel) 단위 수준에서 추적하여 이미지 처리기법(Image processing algorithm)을 이용하여 변위로 환산한다.[9-10]

따라서, 촬영된 영상이 충분한 픽셀 해상도를 가질 필요가 있다. 이와 더불어, Nyquist 원리에 따라[11], 계측 값의 샘플링 주파수(Sampling frequency)에 따라 볼 수 있는 신호의 주파수 대역(샘플링 주파수의 1/2 까지)이 결정되므로, 촬영된 동영상에는 고유 진동수 등의 유효 주파수 범위가 포함되도록 충분한 샘플링 주파수(캠코더의 경우는 FPS(Frames per second))가 확보되어야 한다. 이로 인해 충분한 주파수 대역을 확보하기 위해 초고속 촬영장치가 필요한 경우도 있으나 교량 등의 토목구조물은 50Hz 미만의 저 주파수 대역인 경우가 많아 상용 캠코더 중 다소 고사양의 장비로 가능하리라 판단되었다.

본 논문에서는 상용 캠코더 중에서 일반적 캠코더(30 FPS 이하, 이론적 유효 주파수 대역 15 Hz까지)보다 고속 촬영이 가능한 제품(삼성 HMX-F90 캠코더, 60 FPS)을 채택하였다. 촬영된 동영상을 변위로 변환하는 이미지 처리 기법은 문헌[9] 상의 기법을 준용하여 사용하였으나 실시간(Real-time)이나 온라인(On-line) 처리에는 처리 속도가 부족하여, 촬영 후 녹화 동영상을 변위로 전환하도록(Off-line) 하는 후 처리 방법을 사용하였다.

2.1.3 손상도 추정기법



[Fig. 3] Displacement decomposition of damaged bridge

계측된 변위는 교량 공간에 대한 거의 연속적 변위로 다양한 추정기법이 적용될 수 있다. 본 논문에서는 비교적 간단한 최소자승법(Least square method)을 적용하여 손상정도 및 손상위치 추정하였다.

손상된 구조물의 응답변위(u)는 무손상(Undamaged) 변위와 단위 손상에 의한 추가변위 및 미지수인 손상지수(Damage index)의 결합으로 Fig 3.과 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$u = u_0 + \sum_{e=1}^{N_e} \Delta u_e \beta_e \quad (2)$$

여기서 u 는 손상 교량에 대한 시험에서 구해지는 계측 변위 벡터, u_0 는 설계도면을 통한 구조해석을 통해 구해지거나 손상전 교량에서 미리 계측되어 이미 알고 있다고 가정된 손상 전 구조물의 변위로 기준이 되는 기저변위(Basis displacement) 벡터이다. 또한, Δu_e 는 손상전 교량의 e 요소에 단위 손상을 가하여 이에 따라 증가되는 변위 값으로 구조해석을 통해 구해진다. 이때 미지수 β_e 는 손상정도 즉, 유연도의 증가를 나타내는 손상지수이다. N_e 는 고려되는 손상(요소나 요소들의 집합)의 개수이며, n 은 총 계측 자유도의 수이다.

식 (2)는 간단히 아래의 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$B = A \begin{Bmatrix} \beta \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$n \times 1 \quad n \times N_e \quad N_e \times 1$

여기서, $B = u - u_0$

$$A = [\Delta u_1 \quad \Delta u_2 \quad \dots \quad \Delta u_{N_e}]$$

$\{\beta\} = \langle \beta_1 \quad \beta_2 \quad \dots \quad \beta_{N_e} \rangle^T$ 이다.

보통의 손상도 추정의 경우, 계측량의 부족으로 인해 미지수에 비해 계측 자유도 수가 부족하여($N_e \gg n$) 해를 구할 수 없으나, 본 논문에서 제안한 방식에서는 계측 자유도 수가 충분하므로($n > N_e$) 비교적 간단한 최소자승법을 적용한 방법으로도 가능하다. 최소자승법에 의해 손상지수 $\{\beta\}$ 는 간단히 아래의 식 (4)로 구해진다.

$$\{\beta\} = [A^T A]^{-1} A^T B \quad (4)$$

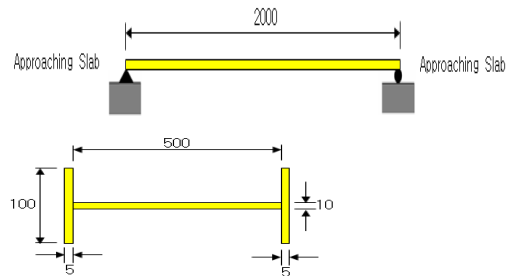
2.2 예제해석

2.2.1 모의실험(Simulation)을 통한 검증

제안된 손상추정 체계를 검증하기 위하여 교량을 대상으로 모의실험을 수행하였다.

모의실험에서는 실제 실험 대신 구조해석으로 실험을 대체함으로써 환경적 영향이나 구조해석 모형에 포함되기 힘든 비모형화 오차(Un-modelled errors)등의 통제가 어려운 변수의 영향을 배제할 수 있고, 정확한 손상도 값을 알고 이를 추정된 결과와 비교할 수 있으므로 손상추정법 알고리즘 자체의 특성 분석에 집중할 수 있다.

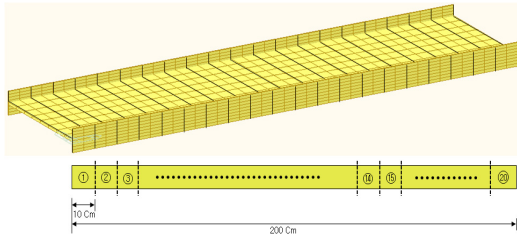
본 논문의 모의실험에서는 미리 설정한 기지의 손상을 가하여 구조해석을 통해 손상교량의 계측변위(u)를 구하여 계측변위로 취급하였다. 이 결과와 역시 구조해석을 통해 구해진 무손상 교량의 변위(u_0)와 단위손상에 따른 변위증가분들(Δu_e)을 식(4)에 적용하여 손상도를 추정하였다. 이렇게 추정된 손상도와 미리 설정된 정확한 손상도를 비교하여 손상추정법의 특성을 분석하였다.



[Fig. 4] Example bridge structure(Unit: mm)

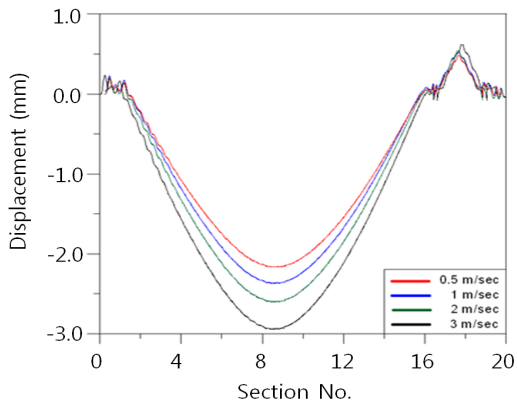
사용된 교량은 다음 절의 모형실험과 비교하기 위하여 동일한 모형과 하중에 대해 수행되었다. 교량 모형은 Fig 4.과 같이 축소된 형태의 단경간 교량이고, 하중은 4바퀴의 차량하중이 가해지는 것으로 하였으며, 차량의 총 중량은 23.53 kgf이다.

구조해석에서 모형은 Shell과 Solid 요소로 모델링 (Modelling)하였으며, 구조해석은 MIDAS 를 사용하였다.



[Fig. 5] Model of FEM and groups for damage indices

Fig 5.는 사용된 유한요소 모형과 영역을 보이고 있으며, 이때, 요소를 총 20개의 부분 영역(Group, Section)으로 묶어 영역 당 하나의 손상지수를 적용하였다. 즉, 20개의 손상지수로 교량의 손상을 표현한 것이라 할 수 있다.



[Fig. 6] Simulated time histories (no damage)

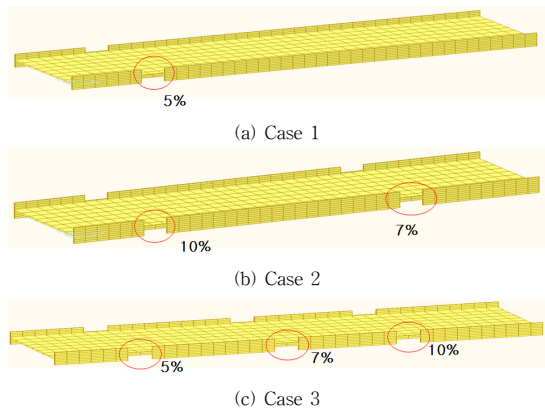
Fig 6.은 해석된 기저 변위(u_0)를 보인 것이다.

또한, Table 1은 모의실험에 사용된 여러 손상의 경우를 보이고 있다. 각 경우의 손상위치 및 정도는 Fig 7.에 정리하였다. 이때, 기준이 되는 단위 손상은 5%로 이때의 손상지수는 1이 된다. 이때, Case 1~2은 0, 5, 10, 15, 20%의 노이즈(noise)를 추가 하였으며 Case 3의 경우 노이즈는 0, 5, 10%에 대해서 수행하였다. 노이즈의 량은

원 신호에 대한 RMS(Root mean square) 비율이다.

[Table 1] Simulated damage cases

Cases	No. of Damages (Damage Level)	Damage Locations	Velocities (m/sec)
1	1 (5%)	4	0.5, 1, 2, 3
2	2(10, 7 %)	4, 15	0.5, 1, 2, 3
3	3(5, 7, 10 %)	4, 10, 15	0.5, 1, 2, 3



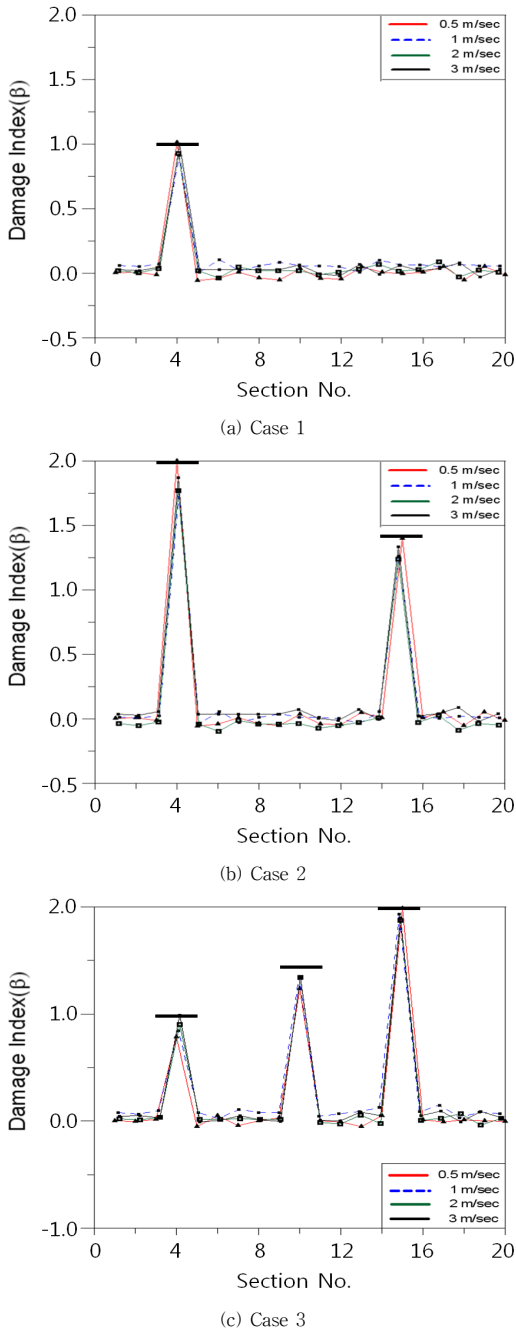
[Fig. 7] Damage locations and quantities

Fig 8.과 9는 각각 속도별, 노이즈 정도별 추정된 손상지수의 결과를 보이고 있다. 이 과정에서 손상교량의 변위는 노이즈 저감을 위해 신호처리(Signal processing) 기법으로 미리 처리하여 사용하였다. 사용된 신호처리 기법은 5 세트의 변위를 평균하는 방법(Averaging method)이 채택되었다.

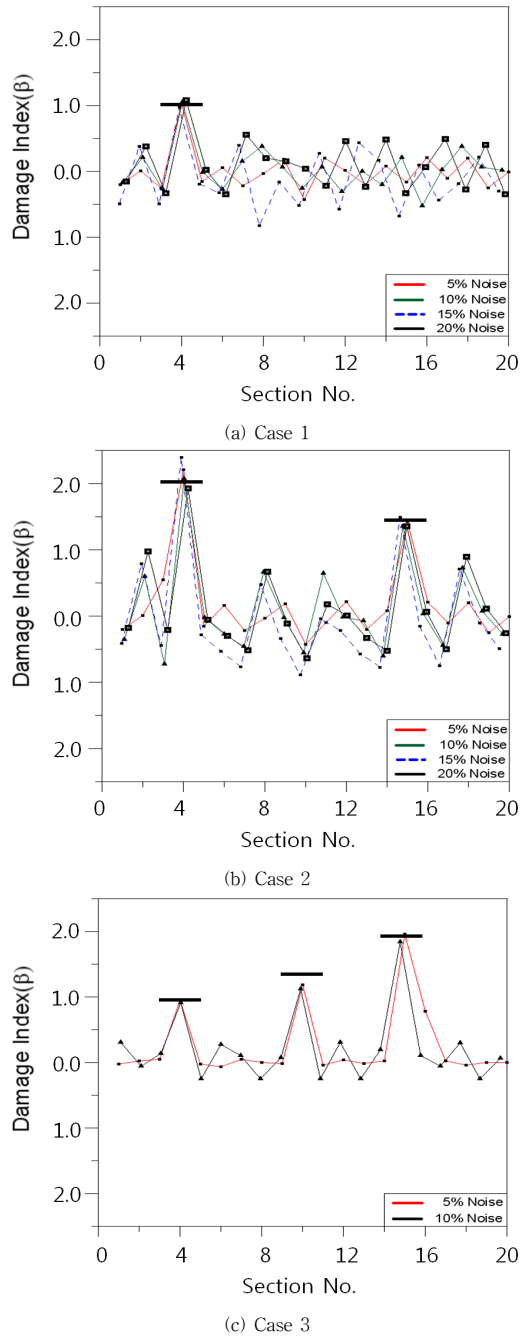
노이즈가 추가되지 않은 경우는 속도에 관계없이 손상위치 및 손상정도 모두 거의 정확한 결과를 보이고 있으며, 노이즈 추가의 경우에는 노이즈가 커짐에 따라 정확도가 다소 떨어지는 것을 볼 수 있다.

노이즈가 추가된 경우에도, 실제 손상이 존재하는 위치에서는 손상이 없는 위치의 추정 값에 비해 뚜렷하게 구별되고 추정된 손상 크기도 상당한 정확도를 보이나, 손상이 없는 위치에서는 노이즈가 없는 경우에 비해 많은 오차를 보이고 있다. 비록 적절한 수준 외에는 비손상으로 간주함으로써 해결할 수 있는 문제이나 손상도 추정이 가지는 계속오차에 대한 민감성은 여전히 보여준다고 할 수 있다는 점에서 주목할 필요가 있다. 즉, 계속정보의 확대로 손상도 추정 기법이 상당히 안정화되었으나 정확한 손상도 위치를 확정하기 위해서는 노이즈에

대한 민감도 문제도 해결해야 함을 뜻한다고 생각된다. 이를 위해 추후 계측, 신호처리 기법 및 손상도 추정 방법에서 보다 효과적인 노이즈 저감 기법의 연구가 이루어진다면 보다 정교한 손상 추정이 가능하리라 생각된다.



[Fig. 8] Estimated damage indices(no noise)

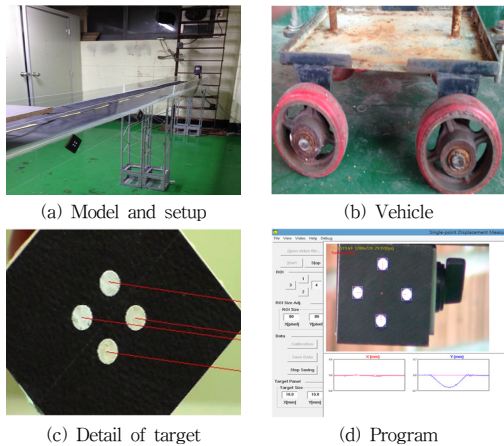


[Fig. 9] Estimated damage indices according to noise levels

2.2.2 모형실험(Model Test)을 통한 검증

모의실험을 통해 분석된 기법의 실제 구조물에 대한 적용성을 검토하고, 광학변위계의 유효성을 입증하기 위

하여 실제 모형실험을 수행하였다. 실험모형 차량 및 실험교량은 앞서 해석에 사용된 것과 동일하다. Fig 10.는 실험 교량 및 광변위를 위한 타겟, 계측된 동영상을 변위로 변환하는 프로그램을 보이고 있다.



[Fig. 10] Experimental set-up and image processing program

[Table 2] Experimental Damage Cases

Cases	No. of Damages (Damage Level)	Damage Locations	Actual Velocities (m/sec)
1	1 (5%)	4	0.51, 1.20, 2.0, 3.1
2	2(7, 7 %)	4, 15	0.5, 1.1, 2.08, 3.02
3	2(10,10 %)	4, 15	0.5, 1.0, 2.04, 3.01

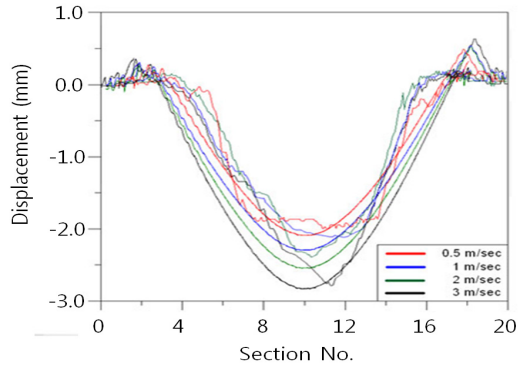
모의실험에서와 같이 모형실험에서도 Table 2와 같이 여러 손상의 경우에 대하여 모형실험을 수행하였다. 손상은 플랜지 부분을 일부 절단하여 부여하였다.

Fig 11.에서 보이듯이 손상 정도에 관계없이 해석에 의한 변위와 계측에 의한 변위는 상당한 차이를 보였다. 이는 실제 구조물과 이상적인 해석 모형과의 차이에 기인한 것으로 보인다. 이 오차로 인해 기저변위(u_0)로 해석 무손상 구조물의 변위를 사용한 경우의 손상 추정 결과는 매우 부정확한 결과를 보였다. 따라서 실제 무손상 모형에 대한 계측변위를 기저변위로 사용하였다.

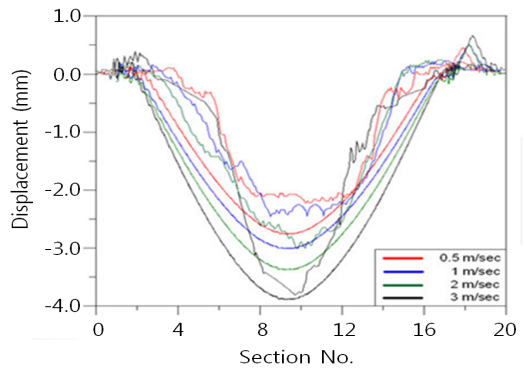
Fig 12.는 속도별 각 경우의 추정된 손상지수를 보이고 있다. 이 경우에도 모의실험에서와 같이 신호를 5회 평균하여 노이즈를 저감한 후 최소자승법을 적용하였다.

Fig 12.에서 보이듯이 추정된 손상도는 실제 손상위치에서 뚜렷이 구별되는 크기를 보이며 손상 정도도 상당

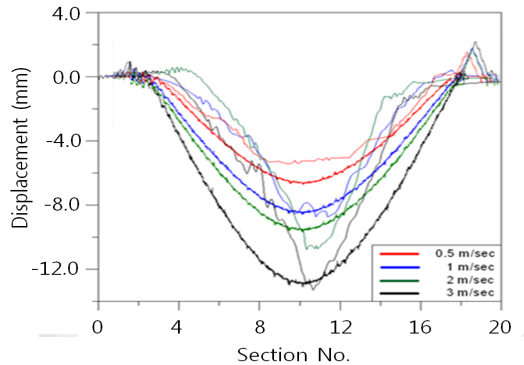
히 정확함을 알 수 있다. 이는 모의실험에서의 경향과 동일하다. 모의실험에서와 같이 손상이 없는 부위에서는 어느 정도의 오차를 보이고 있으나, 모의실험에서에 비해 오차가 많이 증폭되지는 않아 계측된 기저변형의 사용으로 비모형화 오차의 영향은 많이 줄어든 것으로 보인다.



(a) Case 1

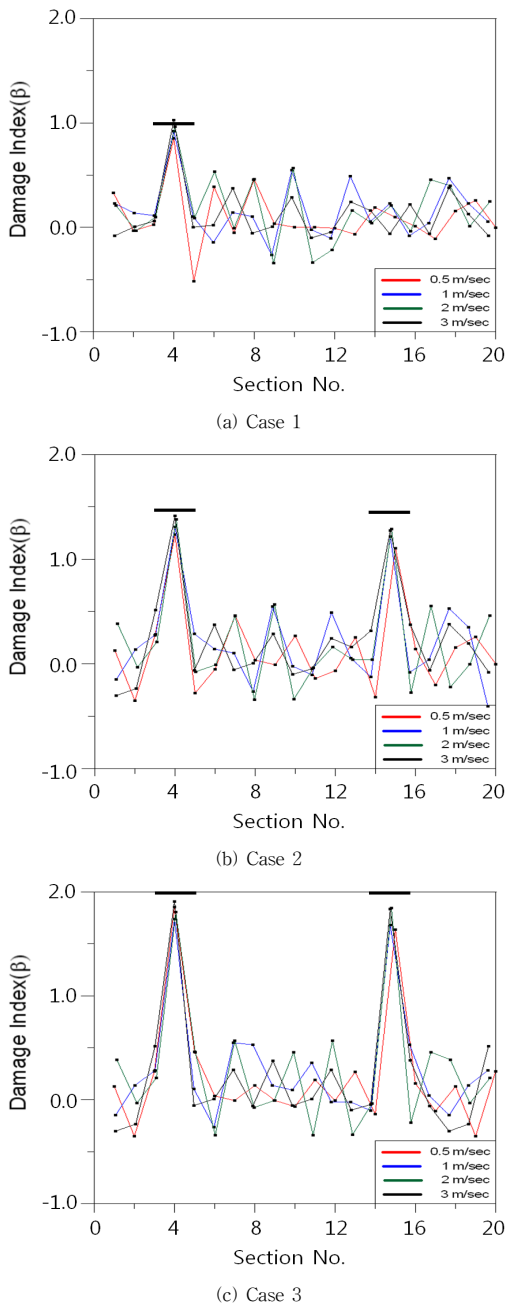


(b) Case 2



(c) Case 3

[Fig. 11] Comparisons between simulated and measured displacements



[Fig. 12] Comparison of estimated damage indices according to velocities

3. 결론

본 논문에서는 교량 구조에서 계측정보 제약 극복

하고 실 구조물에 대한 적용성을 높인 손상도 추정기법을 개발하였다. 이를 위해, 기존 주행하중 시험의 계측결과와 광변위 계측 기법을 적용하는 방안을 연구하였다. 결과를 요약하면 아래와 같다.

1. 상반정리에 의해 계측수의 제약을 극복함으로써 간단한 추정 알고리즘(최소자승법)으로도 모의실험과 실제 모형실험 모두에서 손상위치와 정도를 상당한 정확도로 구할 수 있음을 알 수 있어 보다 현실적인 손상 추정법의 구축에 충분히 활용될 수 있음을 볼 수 있었다.
2. 적절한 픽셀 해상도와 샘플링 주파수를 가진다면 상용 캠코드를 이용해서도 손상도 추정에 필요한 정확도의 변위를 계측할 수 있음을 볼 수 있었다.
3. 해석과 모형 사이의 비모형화 오차가 매우 커 실제 손상 추정에서는 이에 대한 고려가 반드시 필요함을 확인할 수 있었다.
4. 노이즈 저감을 위한 사전 신호처리 기법으로는 필터링 방법보다는 원 신호의 왜곡이 적은 평균법이 보다 효과적임을 확인할 수 있었다.
5. 예제해석의 손상추정 결과에서는 속도에 따른 동적 효과에 따른 차이는 미미했으나 실제 현장에서는 도로 포장의 조도(Roughness) 등에 따른 동적효과로 오차가 증폭될 수 있어 이에 대한 보완도 필요하리라 생각된다.

References

- [1] Kyung-Hoon Park, Sang-Yoon Lee, Yoon-Koog Hwang, Jung-Sik Kong, Jong-Kwon Lim, "Development of the Performance-Based Bridge Maintenance System to Generate Optimum Maintenance Strategy Considering Life-Cycle Cost", Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, KSMI, Vol. 11, No 4, pp. 109~120, 2007
- [2] Jae-In Shin, Chang-Ho Park, Sang-Sun Lee, Beyong-Ju Lee, "An Improvement for Evaluating Load Carrying Capacity by Passing Vehicles of PSC-BOX Bridge", Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, KSMI, Vol. 11, No 4, pp.147~151, 2007
- [3] Wenzel, H., Health Monitoring of Bridges, pp. 1-17, Wiley, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/9780470740170>

[4] Deraemaeker, A., Reynders, E., Roeck, G. De., and Kullaa, J. "Vibration-based structural health monitoring using output- only measurements under changing environment," Mechanical Systems and Signal Processing, Elsevier, Vol. 22, No. 1, pp. 34-56., 2008
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2007.07.004>

[5] Hyunsu Kim, Yuhee Kim, Jongchil Park, and Soobong Shin, "Data Analysis and Health Index for Health Monitoring of Seohae Bridge", J. of KSCE, KSCE, Vol. 33, No. 02, Page pp 387~395, 2013
DOI: <http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2013.33.2.387>

[6] G. C. Yao, K. C. Chang, and G. C. Lee, "Damage Diagnosis of Steel Frames Using Vibrational Signature Analysis", J. of Engrg Mech., ASCE, 118(9), pp. 1949 - 1961, 1992

[7] H.N. Cho, Y.N. Choi, S.C Lee., K.M. Lee, "Structural Damage Assessment Based on Model Updating and Neural Network," J. of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, KSMI, Vol. 7, No. 4, pp. 121-128., 2003

[8] J. Kullaa, "Damage Detection the Z24 Bridge Using Control Charts," Mechanical Systems and Signal Processing, Elsevier, Vol. 17, No. 1, pp. 163-170. 2003
DOI: <http://dx.doi.org/10.1006/mssp.2002.1555>

[9] Jong-Jae Lee, Hoai-Nam Ho, "A vision-based damage detection of cables in cable bridges", Proc. of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection 2011 Spring Conference, pp.9~13, KSMI, 2011

[10] Jin-Hak Yi, Jin-Ha-Kim, Weon-Mu-Jeong and Jang-Won Chae, "Vision-Based Dynamic Motion Measurement of a Floating Structure Using Multiple Targets under Wave Loadings", J. of KSCE, Vol. 32, No. 1A, pp. 19 ~ 30, 2012

[11] D. J. Ewins, Modal Testing: Theory, Practice and Application, 2nd Edition, pp. 86-188, Research Press Ltd, 2000

이 형 진(Hyeong-Jin Lee)

[정회원]



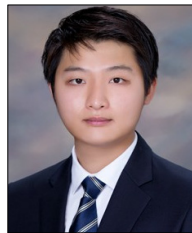
- 1989년 2월 : 서울대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 1992년 2월 : KAIST 토목공학과 (토목공학석사)
- 1997년 2월 : KAIST 토목공학과 (토목공학박사)
- 2003년 2월 ~ 2004년 1월 : 미국 Univ. of Cal. at Irvine, 방문연구원
- 1997년 9월 ~ 현재 : 창원대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

구조동역학, 구조물 건전성 모니터링, 구조물 계측, 손상도 추정

김 종 훈(Jong-Hoon Kim)

[정회원]



- 2012년 2월 : 창원대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 2014년 2월 : 창원대학교 토목공학과 (토목공학석사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 삼표이앤씨 PST개발팀

<관심분야>

구조동역학, 구조물 건전성 모니터링, 구조물 계측, 손상도 추정