

공액보 방법을 이용한 교량 손상도 평가기법

A Damage Assessment Technique for Bridges Using Conjugate Beam Theory

최 일 윤¹⁾ · 최 은 수²⁾ · 이 준 석³⁾ · 조 호 남⁴⁾

Choi, Il Yoon · Choi, Eunsoo · Lee, Jun Suk · Cho, Hyo Nam

요 약 : 본 논문에서는 공액보이론을 이용한 교량의 손상추정 기법을 제시하였다. 정적처짐과 강성과의 관계식으로부터 최적화기법을 도입하여 손상 위치 및 정도를 추정하였다. 제안된 기법의 타당성 검증에 위하여 수치모형을 통한 손상도 추정을 수행하였으며, 일반적으로 손상추정결과와 정확도를 감소시키는 노이즈의 영향을 분석하기 위하여 정적응답자료에 백색잡음을 추가하여 손상도 평가를 수행하였다. 또한, 개발된 기법의 현장적용성을 검토하기 위하여 실내실험을 실시하고, 실험데이터를 이용하여 손상도 추정을 수행하였다. 또한, 손상의 정도 및 손상 폭이 손상 추정결과에 미치는 영향을 검토하기 위하여 다양한 손상 폭을 갖는 경우에 대하여 손상을 추정하였으며, 이들 결과를 바탕으로 제시된 기법의 적용성과 한계에 대하여 기술하였다

ABSTRACT : A damage identification technique using static displacement data is developed to assess the structural integrity of bridge structures. As such, the relationship between static displacement and stiffness is derived, and the optimization technique utilized. Comparisons with numerical and experimental tests are performed to investigate the practical applicability of the proposed method. Various damage scenarios are considered by varying damage-width as well as damage-degree. The influence of noise in identifying the damage is also numerically investigated. Finally, the applicability and limitation of the proposed method are discussed.

핵심용어 : 손상도추정, 정적처짐, 최적화, 공액보, 손상 폭

KEYWORDS : damage assessment, system identification, static displacement, optimization, conjugate beam, damage width

1. 서 론

교량구조물이 적절한 기준에 따라 설계·시공된 경우에도, 열화와 손상은 발생할 수 있다. 이러한 손상은 반복하중, 환경적 위해요인, 과하중, 바람, 지진 등 여러 가지 요인에 의하여 발생한다. 사회간접자본인 교량과 같은 토목구조물에서 이러한 열화와 손상은 소중한 인명 피해 및 거대한 사회경제적 충격을 유발할 우려가 있다. 따라서, 교량구조물에 대한 적절하고 정밀한 점검 및 손상규명은 매우 중요하다. 교량의 성능조사 방법에는 육안조사, 비파괴검사법(NDE), 하중재하시험 등이 있으며, 구조물의 진동특성 등의 응답을 이용하여 강성, 질량 등의 구조계수를 규명하는 System Identification(SI)

기법은 1970년대 말에 토목분야에 도입되었다.(Aktan 등, 1997) 또한, 최근 계측기술의 발달과 비용의 감소로 SI기법에 대한 관심이 더욱 고조되었으며, 교량 Health monitoring과 관련하여 교량의 건전성평가기법에 대한 새로운 접근방법이 요구되고 있다.

SI 기법은 동적 특성의 변화를 주로 이용하고 있으며, 특히 주파수영역에서 모드특성을 이용하여 손상을 추정하는 알고리즘에 대한 개발이 주로 이루어져 왔다.(Doebbling 등, 1996)

Cawley 등(1979) 이후, 고유진동수를 이용한 손상도 추정 기법(Hassiotis, 1993; Fabrizio 등, 2000; Lee 등, 2003)에 대한 연구가 활발히 수행되었으나, 고유진동수의 변화는 손상에 대해 민감하지 않은 단점이 있다(Choi, 2002).

1) 정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원, 공학박사
(Tel:031-460-0347, Fax:031-461-8374, E-mail: iychoi@krii.re.kr)

2) 정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원, 공학박사(eunsoochoi@krii.re.kr)

3) 정회원, 한국철도기술연구원 책임연구원, 공학박사(jslee@krii.re.kr)

4) 정회원, 한양대학교 토목환경공학과 교수(ryfid@hanyang.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2004년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회담을 게재하겠습니다.

한편, 손상추정결과의 정확성을 향상시키기 위하여 비교적 손상에 대한 민감도가 높은 것으로 알려진 모드형상을 이용한 손상추정기법에 대한 연구가 수행되었다. 손상전후의 모달변형에너지(Modal strain energy)에 기초한 손상지수법(Damage index method)이 제시되었으며(Stubbs 등, 1996; Kim 등, 1995), 모달모멘트(Modal moment)는 손상에 의해 영향을 받지 않는다는 가정에 기초하여 Khaled (2000)는 MMI (Modal Moment Index)라는 지표를 도입하여 손상을 추정하였다. 이러한 모드형상을 이용한 손상추정기법의 경우, 모드형상이 비교적 손상에 민감하고 가속도 측정이 용이한 장점 때문에 많은 연구들이 이 분야로 접근하고 있으나, 아직 실무에 적용하기에는 다소의 개선의 여지가 있는 것으로 판단된다. 즉, 일반적으로, 교량의 경우 일부 저차모드의 모드 기여도계수가 지배적이므로 고차모드에 의한 거동은 거의 나타나지 않게 되어 손상에 대한 많은 정보를 갖고 있는 고차모드의 거동에 관한 정확한 정보의 획득에 많은 어려움이 있다.

한편, 컴퓨터 기술의 발달로 많은 데이터의 처리가 가능하게 됨에 따라 측정데이터를 주파수영역으로 변환하지 않고 시간영역에서 손상추정을 추정하기 위한 연구(Yun 등, 1980; Wang, 1995; Cho 등, 1999; Choi 등, 2001)가 수행되었다. 그러나, 실제 교량에서 정확한 계측데이터 획득 문제와 노이즈 영향에 대한 처리문제 등에 대한 개선이 요구된다. 한편, Hjelmstad 등(1997)과 Choi(2002) 등은 정적처짐을 이용한 손상추정기법에 대한 연구를 수행하였으나, 정적처짐데이터를 이용한 손상추정기법에 대한 연구사례는 많지 않은 실정이다. 현재, 정밀안전진단 수행시에 교량의 내하력평가를 위하여 처짐을 계측하고 있으며, 특수교량이나 중요 교량 등을 중심으로 수행되고 있는 계측시스템에서 처짐을 계측하고 있으나, 이러한 처짐데이터의 활용은 극히 제한적인 상황이다.

따라서, 본 논문에서는 정적처짐데이터를 활용하여 손상추정을 수행하고자 공액보 이론에 기초하여 손상과 강성과의 관계식을 정립하고, 최적화 기법을 도입한 손상 추정 기법을 제시하였다. 또한, 손상의 정도 뿐만 아니라 손상 폭의 효과를 고려하기 위하여 손상 폭을 다양하게 변화시켜 수치예제 및 실험예제에 적용하고, 제시된 기법을 이용하여 손상을 추정함으로써 개발기법의 적용성과 한계에 대하여 검토하였다.

2. 정식화

탄성하중이론에 따르면, 실제보에서의 처짐은 공액보상에서의 탄성하중에 의한 모멘트와 같고, 그림 1과 같이 임의의 탄성하중(M/EI)을 보다 세분화하면, j 번째 요소의 탄성하중에 의한 i 점에서의 처짐(y_{ij})은 식(1)과 같이 나타낼

수 있다.

$$y_{ij} = \pm_{ij} P_j \quad (1)$$

여기서, y_{ij} : j 번째 요소의 탄성하중(P_j)에 의한 i 점에서의 처짐

\pm_i : j 번째 요소에 작용한 단위하중에 의한 i 점에서의 처짐

그림 1에서 임의의 위치 i 점에서의 처짐(y_i)은 중첩의 원리를 이용하여, 다음 식(2)에 의하여 구할 수 있다.

$$y_i = \sum_{j=1}^{n_l} \pm_{ij} P_j \quad (2)$$

여기서, n_l 은 부재의 수를 의미한다.

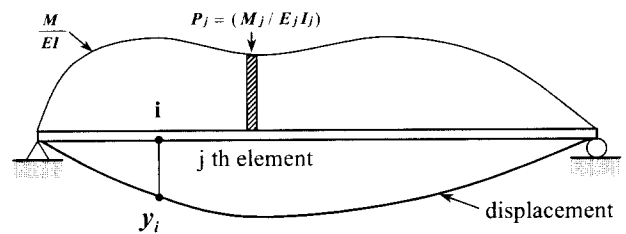


그림 1. 공액보에서의 탄성하중과 처짐과의 관계

만약, 구조부재의 손상을 휨강성의 감소로 정의하면, 탄성하중은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} P_j &= \frac{M_j}{E_j I_j} \\ &= \frac{1}{\gamma_j} \frac{M_j}{E_{j0} I_{j0}} \\ &= \frac{1}{\gamma_j} P_{j0} \\ &= \textcircled{\gamma}_j P_{j0} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $E_j I_j = \gamma_j E_{j0} I_{j0}$

γ_j : 유효강성비 또는 health index

E_{j0}, I_{j0} : 무손상 상태의 탄성계수와 관성모멘트

$\textcircled{\gamma}_j$: j 번째 요소의 손상지수 ($1/\gamma_j$)

$$P_{j0} : M_j / E_{j0} I_{j0}$$

유효강성비는 요소내에서 일정한 값을 갖는 것으로 가정하며, 따라서 요소의 대표 값을 의미한다.

결국, 처짐과 손상과의 관계를 행렬식으로 표현하면, 다음과 같다.

$$Y = P \textcircled{R} \quad (4)$$

여기서, Y : 처짐 벡터 ($ns \times 1$)

\textcircled{R} : 손상지수 벡터 ($nl \times 1$)

P : P_{ij} 행렬 ($P_{ij} = \pm_{ij} P_{j0}$)

식 (4)의 해를 구하는 방안으로 최적화 기법을 도입하여 구조부재의 손상도를 추정하였다. 최적화의 해를 구하기 위하여 ADS 프로그램(Vanderplaats, 1985)을 사용하였으며, 무제약 최적화 문제를 풀기 위하여 BFGS(Broydon - Fletcher - Goldfarb - Shanno)와 Golden Section 기법을 이용하였다. 최적화문제에 있어서, 구조변수는 다음 식으로 표현되었다.

$$\bar{X} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{nl}) \quad (5)$$

그리고, 목적함수는 다음 식에 나타내었다.

$$F(X) = \prod_{i=1}^{nc} \frac{Y_i^M}{Y_i^C} - 1 \quad (6)$$

여기서, Y_i^M 와 Y_i^C 는 각각 계측처짐과 계산처짐을 의미한다.

또한, 초기강성 가정의 불확실성을 고려하여 다음 식과 같이 20% 증가하여 구속조건을 설정하였다.

$$0 \leq \bar{x}_i \leq 1.2 \quad i=1, 2, \dots, nl \quad (7)$$

3. 수치예제 적용 결과

제시된 기법의 적용성을 검증하기 위하여 그림 2와 같은 H-Beam의 모델 보를 고려하였다. 단면 제원은 표 1에 상세히 나타내었다. 표 2와 같이 손상부재의 강성을 감소시켜 손상을 도입하였으며, 표 3과 같이 다양한 손상 폭을 고려함으로써 손상 폭이 손상추정결과에 미치는 영향을 검토하였다. 즉, Model 1은 손상이 해당 부재 전체에 분포되어 있으며,

이때의 손상 폭은 905mm로써 그림 2에서의 부재길이와 같다. 한편, Model 6의 경우, 손상 폭이 3.987mm로써 해당 부재 중앙의 일부분에만 손상이 발생한 것을 의미한다. 이상과 같이 본 연구의 수치예제에서 고려된 손상도입시나리오를 그림 3에 도해적으로 나타내었다.

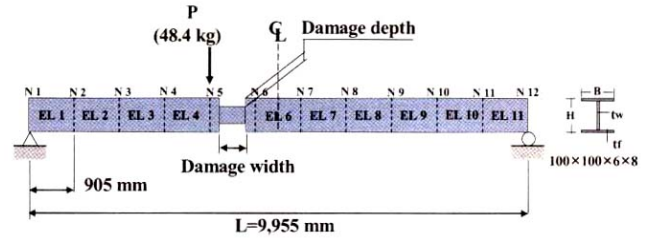


그림 2. 모델 보

그림 3의 손상시나리오에 따라 손상을 도입한 후, 그림 2의 절점 5에 정적하중(48.4kgf)을 재하하여 각 절점에서의 처짐을 수치해석에 의하여 구하고, 각각의 처짐값을 이용하여 손상을 추정하였다.

표 1. 단면제원

Type	H×B (mm)	t ₁ (mm)	t ₂ (mm)	Span (mm)	Area (mm ²)	Weight (kg/m)	Moment of Inertia (mm ⁴)
H-Beam	100×100	6	8	9,955	2,190	17.2	3,830,000

표 2. 손상시나리오

Damage Case	Damage Ele. No.	Degree of Damage	Health index
DC I	6	20%	0.80
DC II	6	35%	0.65
DC III	6	50%	0.50
DC IV	5	20%	0.80
DC V	5	35%	0.65
DC M	5	50%	0.50

표 3. 손상 폭

	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6
Damage Width (mm)	905	452.5	100.56	39.35	12.067	3.987

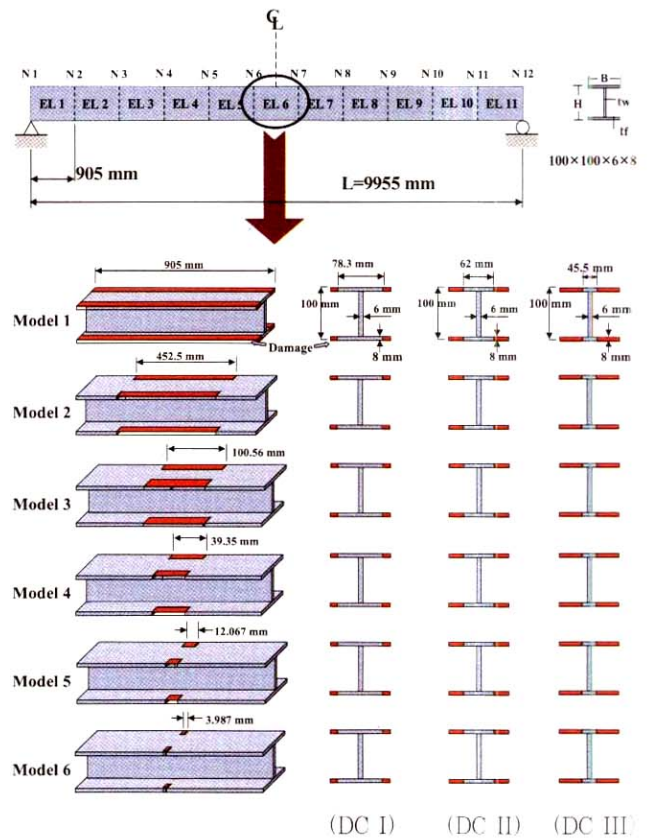
제안된 기법을 이용한 손상추정결과를 표 4와 그림 4에 나타내었다. 그림 4(a), (b), (c)는 그림 2에서 중앙부재인 6번 부재의 강성이 각각 20%, 35%, 50% 저감된 경우에 대한

손상추정결과이고, 그림 4(d), (e), (f)는 5번 부재에 손상이 발생한 경우에 대한 손상추정결과이다.

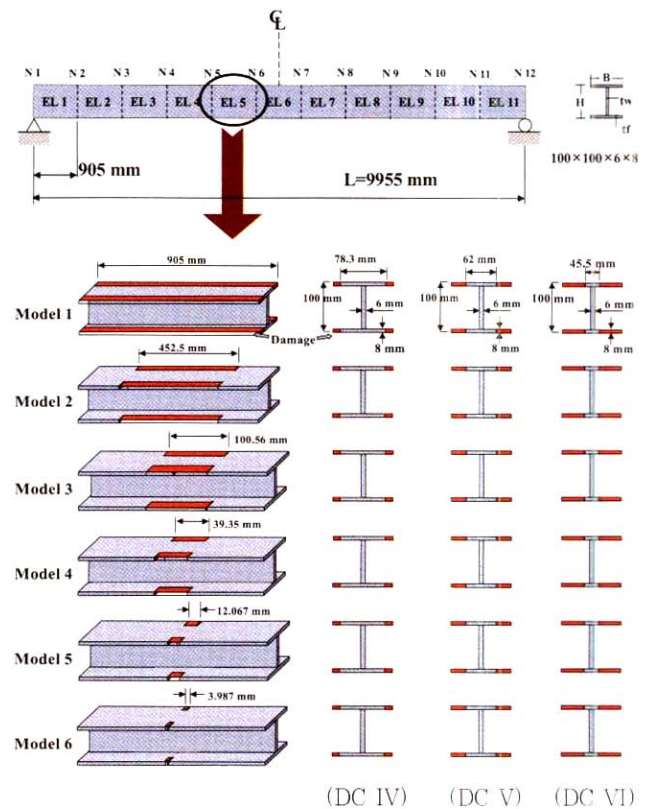
그림 4와 표 4에서 알 수 있는 바와 같이 제시된 기법을 이용하여 손상을 추정할 결과, 손상의 정도를 실제값 보다 작게 추정하고 있음을 알 수 있다. 즉, 부재전체에 걸쳐 손상이 발생하였다고 가정한 Model 1의 손상추정결과를 살펴보면, 다음과 같다. 20%가 손상된 그림 4(a)와 (d)의 경우, 추정된 Health Index의 값은 약 0.9로써 강성이 약 10%정도 저감된 것으로 추정하고 있으며, 35%가 손상된 그림 4(b)와 (e)의 경우에는 약 20% 강성이 저감된 것으로 추정하고 있다. 또한, 50% 강성이 저감된 그림 4(c)와 (f)의 경우에는 약 30% 손상이 발생한 것으로 추정되었다. 또한, 손상부재 근처에서 손상이 발생하지 않은 인접부재에서도 손상이 발생한 것으로 평가하고 있다. 그러나, 비록 손상정도의 추정에 있어서 다소의 오차가 발생하고 있으나, 그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 손상발생 부재에서 추정된 Health Index의 값이 가장 작게 평가되고 있으므로 손상의 위치는 개략적으로 규명이 가능함을 알 수 있다.

한편, 손상 폭의 영향을 살펴보면, 그림 4와 표 4에서 동일한 손상의 정도를 갖더라도 손상 폭이 작을수록 추정된 손상의 정도를 감소함을 알 수 있다. 즉, 미소한 손상 폭을 갖는 Model 7의 경우, 손상부재에서 손상이 거의 발생하지 않는 것으로 추정하고 있다. 손상 폭이 작은 경우에 추정된 Health Index의 값이 작게 추정되는 것은 손상은 해당 부재의 중앙부에서 국부적으로 손상이 발생하였지만, 추정하고자 하는 Health Index의 값은 해당 부재전체에 걸친 등가강성의 의미를 갖고 있기 때문으로 판단된다. 따라서, 손상의 폭이 아주 작은 손상을 규명하기 위해서는 해당 부재를 더욱 세분화할수록 보다 정확한 값을 얻을 수 있을 것으로 판단되나, 이는 실제 현장 적용시에 보다 많은 처짐 센서를 부착하여야 하는 문제점을 수반한다. 실제 현장계측의 여건을 고려한다면, 계측센서의 수량을 증가시키는 것보다 하중재하 경로의 수를 증가시키는 것이 비용 및 시간 측면에서 훨씬 유리하다.

따라서, 본 연구에서는 부재를 보다 세분화하여 손상을 추정하기 위하여, 처짐의 값을 알고 있는 절점의 수는 일정하다고 가정하고 하중재하경로의 수를 증가시켜서 손상추정을 수행하였다. 즉, 부재를 보다 세분화하여 손상추정을 하는 경우에는 추정 부재의 Health Index의 수, 즉 미지수의 값이 증가하게 되는데 이때, 측정위치를 증가시키는 대신에 하중재하경로의 수를 증가시켜서 식(4)를 재구성하였다. 그림 2에서 2번 절점(N2)과 11번 절점(N11) 사이에 각각 하중을 재하하여 총 10개의 하중재하경로의 수에 대한 각 절점에서의 처짐값을 이용하였다. 하중재하의 종류는 실험에서 사용된 표 6과 동일하다.



(a) 6번 부재 손상의 경우



(b) 5번 부재 손상의 경우

그림 3. 손상도입시나리오

표 4. 손상추정결과(%)

부재번호		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
DC I	Model 1	0.997	0.997	0.995	0.970	0.928	0.904	0.928	0.970	0.995	0.997	0.997
	Model 2	0.995	0.989	0.988	0.979	0.961	0.950	0.961	0.979	0.988	0.989	0.995
	Model 3	0.999	0.995	0.990	0.986	0.983	0.982	0.983	0.986	0.990	0.995	0.999
	Model 4	0.999	0.996	0.992	0.988	0.986	0.986	0.986	0.988	0.992	0.996	0.999
	Model 5	0.999	0.996	0.992	0.990	0.988	0.987	0.988	0.990	0.992	0.996	0.999
	Model 6	0.999	0.996	0.993	0.990	0.989	0.988	0.989	0.990	0.993	0.996	0.999
DC II	Model 1	1.000	1.012	1.008	0.950	0.861	0.817	0.861	0.950	1.008	1.012	1.000
	Model 2	0.997	0.997	0.997	0.970	0.923	0.897	0.923	0.969	0.997	0.998	0.997
	Model 3	0.998	0.992	0.986	0.981	0.977	0.976	0.977	0.981	0.986	0.992	0.998
	Model 4	0.999	0.995	0.990	0.986	0.984	0.983	0.984	0.986	0.990	0.995	0.999
	Model 5	0.999	0.996	0.992	0.989	0.987	0.987	0.987	0.989	0.992	0.996	0.999
	Model 6	0.999	0.996	0.993	0.990	0.988	0.988	0.988	0.990	0.993	0.996	0.999
DC III	Model 1	1.004	1.037	1.029	0.922	0.773	0.706	0.773	0.923	1.029	1.038	1.004
	Model 2	1.000	1.011	1.007	0.952	0.869	0.828	0.869	0.952	1.007	1.011	1.000
	Model 3	0.996	0.989	0.987	0.979	0.965	0.956	0.965	0.979	0.987	0.989	0.996
	Model 4	0.999	0.993	0.988	0.983	0.980	0.979	0.980	0.983	0.988	0.993	0.999
	Model 5	0.999	0.995	0.991	0.988	0.986	0.985	0.986	0.988	0.991	0.995	0.999
	Model 6	0.999	0.996	0.992	0.990	0.988	0.987	0.988	0.990	0.992	0.996	0.999
DC IV	Model 1	0.998	0.991	0.966	0.926	0.903	0.929	0.974	1.000	0.998	0.983	0.992
	Model 2	0.996	0.985	0.972	0.957	0.950	0.963	0.981	0.991	0.992	0.988	0.995
	Model 3	0.999	0.993	0.989	0.985	0.984	0.984	0.985	0.987	0.991	0.995	0.999
	Model 4	0.999	0.995	0.991	0.989	0.987	0.986	0.987	0.989	0.992	0.995	0.999
	Model 5	0.999	0.996	0.992	0.990	0.988	0.988	0.988	0.990	0.993	0.996	0.999
	Model 6	0.999	0.996	0.993	0.990	0.989	0.988	0.989	0.990	0.993	0.996	0.999
DC V	Model 1	1.005	1.010	0.954	0.859	0.811	0.859	0.957	1.017	1.010	0.979	0.987
	Model 2	0.999	0.993	0.965	0.921	0.897	0.924	0.973	1.001	0.999	0.983	0.991
	Model 3	0.996	0.986	0.979	0.973	0.972	0.979	0.986	0.990	0.989	0.988	0.996
	Model 4	0.999	0.994	0.989	0.986	0.984	0.984	0.985	0.988	0.991	0.995	0.999
	Model 5	0.999	0.996	0.992	0.989	0.987	0.987	0.987	0.989	0.992	0.996	0.999
	Model 6	0.999	0.996	0.993	0.990	0.988	0.988	0.988	0.990	0.993	0.996	0.999
DC VI	Model 1	1.013	1.039	0.936	0.771	0.698	0.771	0.932	1.039	1.030	0.976	0.983
	Model 2	1.004	1.008	0.955	0.867	0.823	0.868	0.959	1.015	1.010	0.979	0.988
	Model 3	0.995	0.985	0.973	0.961	0.955	0.967	0.982	0.991	0.991	0.988	0.996
	Model 4	0.998	0.989	0.982	0.979	0.979	0.982	0.985	0.988	0.991	0.993	0.998
	Model 5	0.999	0.995	0.991	0.988	0.986	0.986	0.987	0.989	0.992	0.995	0.999
	Model 6	0.999	0.996	0.992	0.990	0.988	0.987	0.988	0.990	0.992	0.996	0.999

이들 값을 이용한 손상추정결과를 그림 5에 나타내었다. 그림 5(a)는 그림 2의 모델 보를 총 22개로 분할하여 손상추정한 결과로써, 총 10개의 하중재하경로 중 3개 이상의 하중재하경로를 동시에 이용한 결과를 나타낸다. 총 10개의 하중경로 중 3개 이상을 갖는 조합인 총 968의 경우에 대한 손상추정을 각각 수행한 후 평균값을 취하여 나타낸 것이 그림 5(a)에 해당한다. 그림 5(b)는 모델 보를 총 44개의 요소로 분할한 경우로써, 5개 이상의 하중재하경로를 갖는 조합인 총 638개의 경우에 대한 손상추정결과에 대한 평균치를 나타낸다. 그림 5(c)는 55개 요소로써 386개의 하중조합의 수, 그리고 그림 5(d)는 88개 요소로 분할된 경우로써 9개 이상의 하중재하경로를 고려한 하중조합수 11개에 대한 손상추정결과

의 평균치를 나타낸다.

그림 5를 살펴보면, 부재를 보다 세분화한 경우에도 미소한 손상 폭을 갖는 손상은 정확하게 추정하지 못하였다. 그러나, 부재를 세분화할수록 Model 1과 Model 2의 경우를 보면 그림 4의 결과와 비교하여 손상 정도의 추정결과가 보다 개선되고, 손상위치의 추정결과가 비교적 정확해지고 있음을 알 수 있다.

일반적으로 계측데이터에는 계측과정에서 불가피하게 노이즈가 포함되며, 이러한 노이즈는 SI에 있어서 손상추정결과에 부정확성을 유발한다. 따라서, 본 연구에서는 개발된 기법의 노이즈의 영향을 검토하기 위하여 각각 최대 처짐값의 1%, 5%, 10%의 표준편차를 갖고 평균이 '0'인 백색잡음을 만들어

처짐값에 대하여 손상추정을 수행하였다. 그림 6은 DC VI에 대하여 44개 요소로 분할한 경우에 대한 노이즈의 영향분석 결과이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 제시된 기법은 노이즈의 영향이 상당히 작음을 알 수 있다.

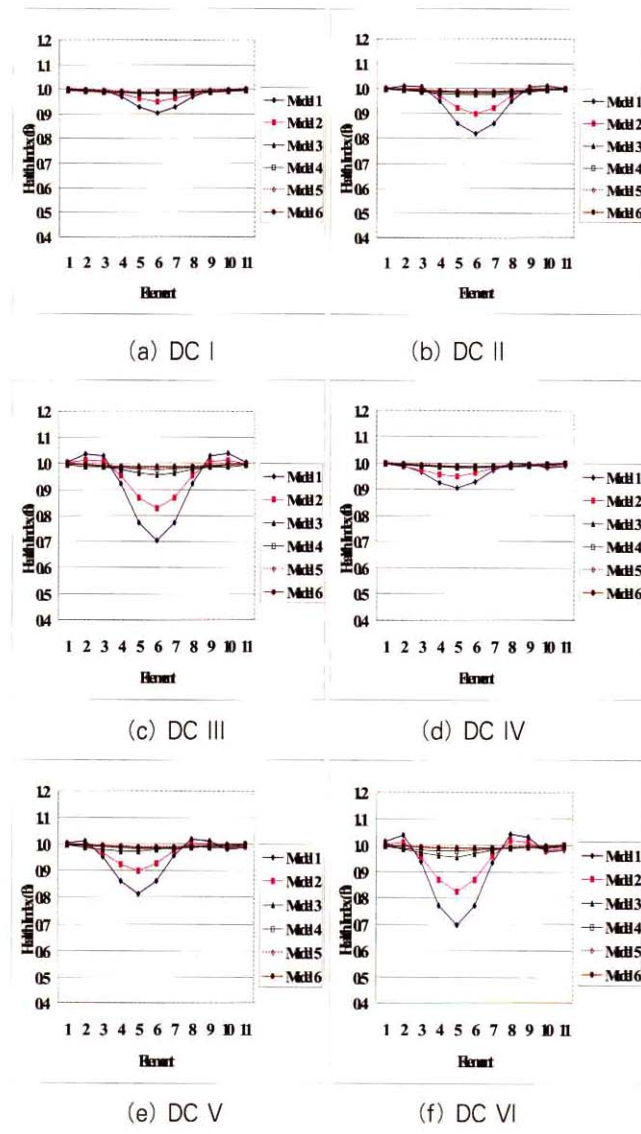
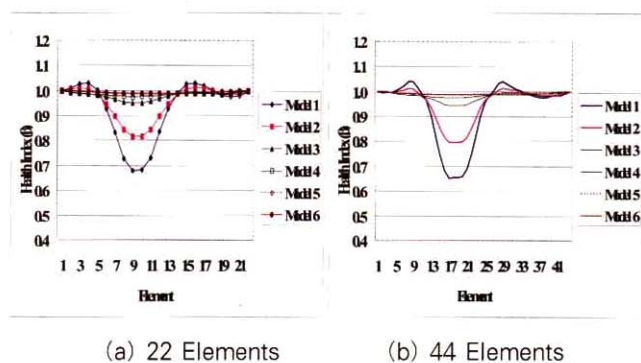
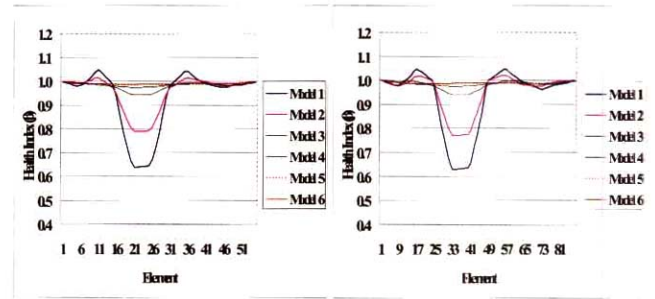


그림 4. 손상추정결과

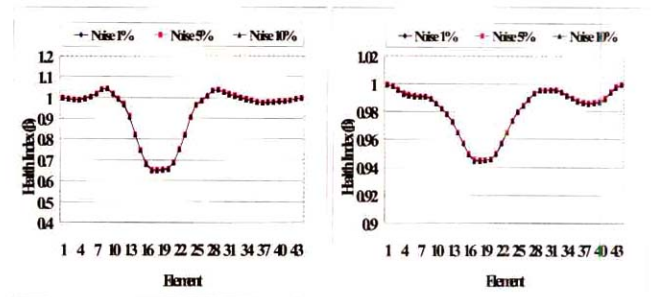


(a) 22 Elements (b) 44 Elements



(c) 55 Elements (d) 88 Elements

그림 5. 손상추정결과(DC VI)



(a) Model 1 (b) Model 3

그림 6. 노이즈의 영향 (DC VI, 44개 요소분할시)

4. 실내실험 적용 결과

제시된 기법의 적용성을 검증하기 위하여 앞서 언급한 수치 예제와 동일한 단면제원을 갖는 H-Beam에 대하여 실내실험을 실시하였다. 수치예제와 마찬가지로 손상의 정도 뿐 만 아니라 손상의 폭을 변화시켜 손상을 도입하고, 표 6과 같이 하중을 재 하하여 그림 8의 2번 절점에서 11번 절점까지 총 10개의 절점에서 정적처짐을 계측하였다. 손상은 표 5에 나타난 바와 같이 H-Beam의 상부플랜지를 그라인더로 잘라내어 손상을 도입하였으며, 손상도입시나리오는 그림 8에 상세히 나타내었다.

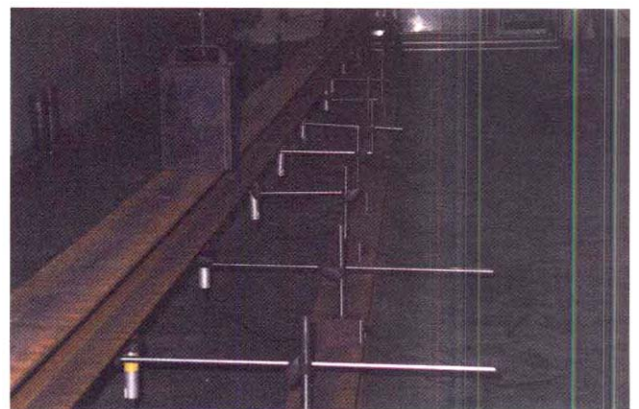


그림 7. 실험전경

표 5. 손상의 정도 및 폭

(단위 : mm)

Damage Case	ELE. No.	Damage (%)	손상도입위치 및 크기			
			upper-left		upper-right	
			depth	width	depth	width
DC 1	5	35	30	4	30	4
DC 2	5	50	40	12	40	12
DC 3	5	50	40	42	40	41
DC 4	5	50	40	102	40	102
DC 5	5	50	40	162	40	162
DC 6	5	50	40	522	40	522
DC 7	5	50	40	880	40	880

표 6. 하중(48.4kgf) 재하 위치

Load Case	LC_1	LC_2	LC_3	LC_4	LC_5	LC_6	LC_7	LC_8	LC_9	LC_10
재하 위치	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11

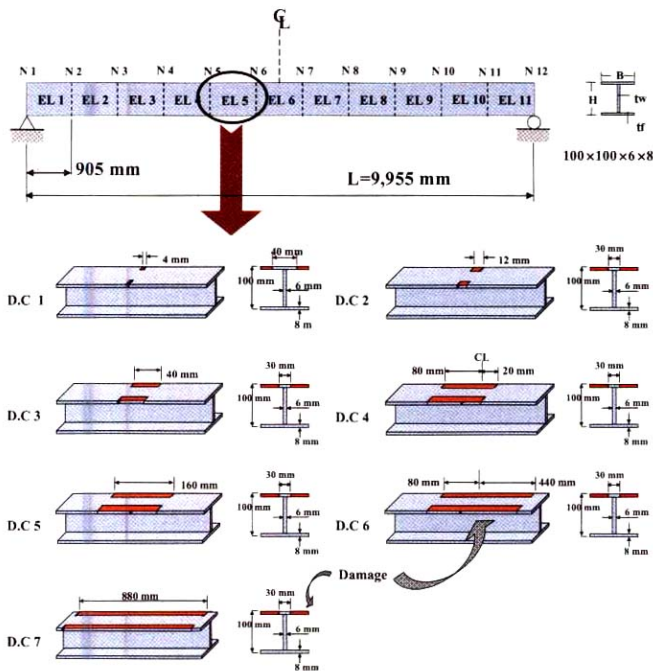
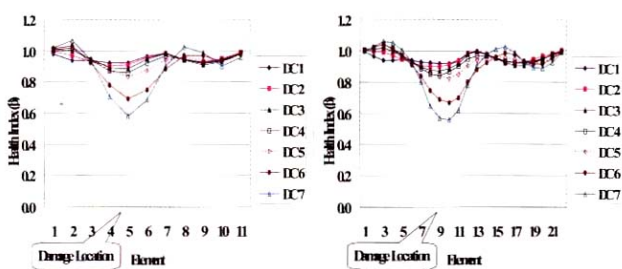
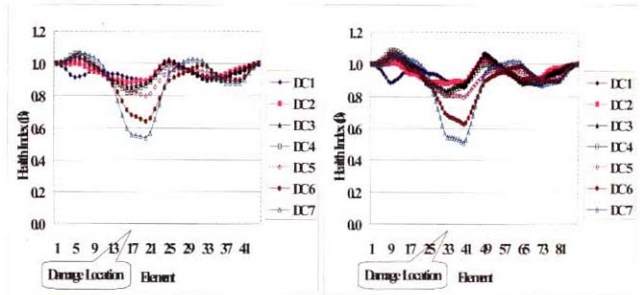


그림 8. 손상도입 시나리오



(a) 11개 부재 사용시

(b) 22개 부재 사용시



(c) 44개 부재 사용시

(d) 88개 부재 사용시

그림 9. 손상추정결과

앞서 기술한 수치예제와 동일한 방법으로 계측된 처짐값을 이용하여 손상평가를 수행하였으며, 그 결과를 그림 9에 나타내었다. 그림 9의 결과는 그림 5와 마찬가지로 여러 하중조합을 고려하여 각각 손상을 추정한 후, 이들 값에 대한 평균을 취한 것이다.

제시된 기법의 실험데이터에의 적용결과는 그림 9에 나타난 바와 같이 수치해석의 경우와 유사하였다. 부재를 보다 세분화하여 손상을 추정할 경우에 손상 정도 및 손상위치 추정결과가 보다 양호함을 알 수 있었다. 즉, 그림 9에서 DC 7의 경우를 살펴보면, 실제 도입된 손상의 정도는 50%로써 11개의 요소를 사용한 경우에는 손상부재의 Health Index 값은 약 0.6으로 추정되었다. 그러나, 실험에 사용된 H-Beam을 88개의 부재로 세분화하여 손상평가를 수행한 경우에는 손상부재의 Health Index 값이 실제 손상부재의 Health Index 값인 0.5에 접근하였다.

한편, 손상위치 추정결과를 살펴보면, 손상 폭이 102mm 이상인 DC 4~DC 7 경우에는 손상위치 추정결과는 비교적 양호하였다. 즉, 손상 폭이 비교적 큰 경우에는 손상부재에서의 Health Index의 값이 최소가 되므로 제시된 기법을 이용하여 손상 위치를 개략적으로 규명할 수 있음을 실험결과를 통하여 알 수 있었다. 그러나, 손상 폭이 작은 DC 1~DC 3의 경우에는 손상위치 및 손상 정도의 추정결과가 만족스럽지 못하였다. 이는 제시된 기법이 균열 등의 미소한 손상 폭을 갖는 손상의 규명에는 한계가 있음을 의미한다.

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 정적처짐 데이터를 이용하여 최적화기법을 도입한 손상평가기법을 제시하였다. 제시된 기법의 적용성과 한계를 조사하기 위하여 수치예제와 실내실험을 실시하고 그 적용결과를 고찰하였다. 특히, 개발된 기법이 규명할 수 있는 손상 폭의 한계를 보이기 위하여 다양한 손상 폭을 갖는 손상을 고려하였다. 수치예제와 실내실험결과를 바탕으로 제시된

기법의 적용성과 한계를 기술하면 다음과 같다.

비교적 손상 폭이 큰 경우에는 제시된 기법을 이용하여 손상의 위치를 비교적 정확하게 규명할 수 있었으나, 손상의 정도는 손상의 폭에 영향을 받고 있음을 알 수 있었다. 또한, 부재를 보다 세분화할수록 손상추정결과는 다소 개선됨을 알 수 있었다.

그러나, 도입된 손상 폭이 아주 작은 경우에는 추정된 손상의 정도뿐만 아니라, 손상위치 추정결과는 만족스럽지 못하였다. 즉, 균열과 같은 미소한 손상 폭을 갖는 손상의 규명은 계측기술의 발달에 따라 계측의 정확도의 향상이 수반되어야 할 것으로 판단된다.

따라서, 제시된 기법은 부식에 의한 강성저하 등 손상 폭이 비교적 크게 분포되어 있는 손상을 규명하거나 처짐데이터를 이용하여 부재의 등가 강성을 개략적으로 평가하는 목적으로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

한편, 본 연구에서는 단순보를 이용하여 개발 기법의 검증 하였으나, 부정정구조물에 적용시에는 모멘트가 강성의 변화에 따라 영향을 받는 점을 감안하여 적용하도록 하여야 한다.

마지막으로, SI기법 연구에 있어서 균열 등 미소한 손상 폭을 갖는 손상을 규명하고자 하는 경우에는 손상 폭의 영향에 대한 검토와 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

Aktan, A. E., D. N. Farhey, A. J. Helmicki, D. L. Brown, V. J. Hunt, K. L. Lee, and A. Levi (1997) Structural identification for condition assessment : Experimental arts. *J. of Structural Eng.*, ASCE 123(12), pp.1674-1684

Cawley P. and Adams R.D. (1979) The location of defects in structures from measurements of natural frequencies, *J. of Strain Analysis*, Vol 14, No 2, 49-57

Cho, H.N. and Choi, Y.M. (1999) Structural Damage Identification with unknown input and Limited Observation, APSSRA99, pp.184-193

Choi, I.Y., Lee, J.S., Moon, D.Y, Cho, H.N. (2001) A Study on the Estimation of Global Stiffness and Damping Matrices in the Time Domain, *J. of KSCE*, Vol. 21, No. 5-A

Choi, I.Y. (2002) Damage identification techniques for bridges using static response, Ph.D.

Dissertation, Hanyang University

Doebbling, S.W., Farrar, C.R., Prime, M.B. and Shevitz, D.W. (1996) *Damage Identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review*, Los Alamos National Laboratory

Fabrizio V. and Danilo C. (2000) Damage detection in beam structures based on frequency measurements, *J. of Engineering Mechanics*, Vol 126, 7, 761-768

Hassiotis S. (1993) Identification of structural damage from natural frequency measurements, Ph.D. Dissertation, Purdue University

Jun S Lee, Il-Yoon Choi and Hyo-Nam Cho (2003) Modeling and detection of damage using smeared crack model, *Engineering Structures*, in print

K.D. Hjelmstad and S. Shin (1997) Damage detection and assessment of structures from static response, *J. of Engineering Mechanics*, Vol. 123, 6, 568-576

Khaled A.A.N. (2000) New method for structural damage identification using experimental modal analysis, Ph.D Dissertation, Univ. of Central Florida, Florida

Kim, J.T. and Stubbs, N. (1995) Damage detection in offshore jacket structures from limited modal information, *International J. Offshore and Polar Engineering*, 5(1), 58-66

Stubbs and Kim (1996) Damage localization in structures without baseline modal parameters, *AIAA J.*, 34(8), 1644-1649

Vanderplaats, G. N. (1985), *ADS : A FORTRAN Program for Automated Design Synthesis, Engineering Design Optimization*, Inc., Santa Barbara, California.

Wang, D. (1995) Element level time domain system identification technique with unknown input information, Ph.D. Dissertation, Univ. of Arizona

Yun, C-B and Shinozuka, M. (1980) Identification of nonlinear structural dynamic systems, *J. of Struct. Mech.*, Vol.8, No.2, 187-203

(접수일자 : 2003. 9. 15 / 심사일 2003. 9. 24 / 심사완료일 2003. 12. 3)