

정적 및 동적 응답을 이용한 교량의 손상도 추정 기법

박 우 진

서일대학 토목과

(2005. 5. 6. 접수 / 2005. 6. 15. 채택)

Damage Identification Technique for Bridges Using Static and Dynamic Response

Woo-Jin Park

Department of Civil Engineering, Seoil College

(Received May 6, 2005 / Accepted June 15, 2005)

Abstract : Load bearing structural members in a wide variety of applications accumulate damage over their service life. From a standpoint of both safety and performance, it is desirable to monitor the occurrence, location, and extent of such damage. Structures require complicated element models with a number of degrees of freedom in structural analysis. During experiment much effort and cost is needed for measuring structural parameters. The sparseness and errors of measured data have to be considered during the parameter estimation of structures.

In this paper we introduces damage identification algorithm by a system identification(S.I) using static and dynamic response. To study the behaviour of the estimators in noisy environment Using Monte Carlo simulation, and a data measured perturbation scheme is adopted to investigate the influence of measurement errors on identification results. The assessment result by static and dynamic response were compared, and the efficiency and applicabilities of the proposed algorithm are demonstrated through simulated static and dynamic responses of a truss bridge. The assessment results by each method were compared and we could observe that the S.I method is superior to the other conventional methods.

Key Words : damage identification, system identification, monte carlo simulation, perturbation scheme

1. 서 론

최근 들어 토목 구조물과 같은 규모가 큰 장대교량이나 댐 구조물의 안전이 문제가 되면서 건설 구조물의 안정성 평가 방법에 대한 논의가 활발히 진행되고 있다. 그래서 노후 구조물의 급증에 따라 대형 기설 구조물에 대한 새로운 형태의 손상 추정 방법의 개발과 필요성은 더욱 증가하고 있는 실정이다. 구조적 실험을 통한 구조물의 손상은 전체적인 구조물의 거동인 변위, 고유진동수, 진동 모드 등을 계측하여 구조물의 전체적인 구조 성능을 직접적으로 조사하는 것이다. 그러나 이들 시험방법들은 수학적모델이나 추정 오차의 불확실성에 대한 사전 정보를 정확히 알 수 없으며, 구조물의 세부적인 국

부검사는 가능할지는 모르지만 토목 구조물과 같이 측정이 어려운 대형 구조물의 손상 부위와 손상 정도를 진단하기 위해서는 많은 비용과 노동력, 시간이 들고 접근이 불가능한 장소에서는 진단을 내리기 어렵다는 매우 큰 단점을 가지고 있다.

이러한 측면에서 볼 때 System Identification(S.I) 기법은 부족한 양의 측정 자료로부터 구조물의 매개변수를 결정짓는 역해석 방법으로 구조물의 현재 상태(손상 정도)를 예측할 수 있는 효과적인 비파괴 검사 방법이다.^{1,2)}

일반적으로 구조물의 수학적 모델은 구조물의 매개변수 추정에 자주 사용되는데, 이때 S.I 기법은 구조물의 모델링^{4,5)}, 지진 후 건물에서의 구조적 변화의 평가^{1,6)}, 건물의 지진에 대한 취약성 검토¹⁾, 그리고 구조물의 정밀한 붕괴 절차의 확인^{2,5)} 등에 사용되었다. S.I 기법은 공학의 변형 역학 시스템의

거동을 예상하거나 모의실험을 하기 위한 도구로서 전기 공학, 제어 공학, 기계 공학 등 다른 분야에서는 이미 오래 전부터 사용되었지만, 토목 분야에서는 최근에 와서야 그 연구가 진행되었다^{3,6,7)}. 특히, 토목 구조물과 같은 건설 분야에서의 S.I 기법의 응용은 매우 미미한 실정이지만, 구조물이 장대화되고 거대화되고 있는 추세로 미루어 볼 때, 대형 구조물의 유지관리 측면에서 그 필요성은 증가하고 있다.

2. System Identification

S.I 기법의 과정은 구조물의 수학적모델 형태를 결정하고 실제 구조물의 정적 및 동적 응답을 측정하기 위한 실험의 계획 정리 단계와 주어진 수학적 모델과 측정된 응답을 사용하여 수학적모델에서 구조물의 손상도를 대변할 수 있는 미지의 매개변수를 분리하는 단계, 수학적모델과 매개변수의 값들이 실제 구조물의 손상도에 얼마나 근접하고 신뢰성이 있으며 사용 가능한지를 판단하는 수학적 모델의 확인, 수정 작업 등의 3단계로 이루어져 있으며¹⁾, 이를 Fig. 1에 나타내었다.

2.1. 목적함수의 구성

일반적인 정적 평형 방정식과 동적 평형 방정식으로부터 구조물의 손상도를 대변할 수 있는 매개변수 x 를 구하기 위해서는 비선형 제약 최적화 방법이 사용된다. 하중 경우의 수 nlc 와 측정된 진동 모드 수 nmd 는 측정 자료의 집합이라 볼 수 있는데, 이 경우 정적 측정 자료의 경우에는 하중 재하 경우가 되고, 동적 모드 해석에서는 측정 모드의 수가 된다. 수학적모델의 미지의 강성도는 구조물의 손상도를 나타내주며, 이 값은 목적 함수 J 를 최소화함으로써 얻을 수 있다. 이 때, 각 강성도는 범위가 구속되어 있으며, 오차함수는 모델과 실제 구조물이 얼마나 일치하는지를 나타내고 있다.

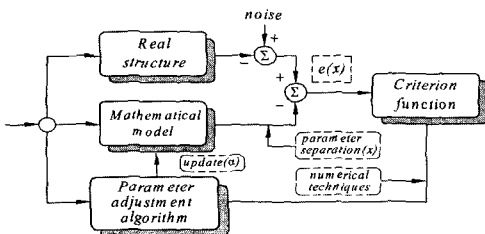


Fig. 1. General process of System Identification

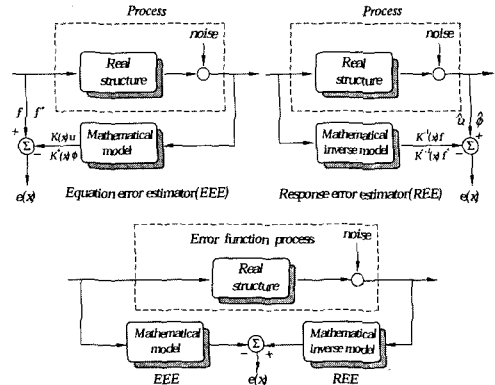


Fig. 2. Error function for the EEE & REE

미지 강성도의 추정문제에서 오차함수(error function) e 는 수학적모델에 의해 추정된 구조물의 응답과 실제 구조물에서 얻어진 응답과의 차를 나타내며, 방정식 오차함수(equation error estimator : EEE)와 응답 오차함수(response error estimator : REE)를 이용하여 구성되는데, 이를 도식적으로 표현하면 Fig. 2와 같다.

비선형 제약 최적화를 통하여 식 (1)과 같이 최소 자승법(least square method)에 기초하여 오차함수 e 를 가지는 목적함수가 구성된다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } & \mathcal{J}(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \alpha_i e_i(x)^2 \\ \text{subject to } & c(x) \leq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서 N 은 정적 자료의 경우에는 하중 경우의 수 nlc 가 되고, 동적 자료인 경우에는 측정된 진동 모드 수 nmd 가 된다. 목적 함수 J 는 각각의 하중 재하 경우와 측정 모드의 오차함수 e (EEE, REE)의 가중된 합이고, α_i 는 i 번째 하중조건과 진동 모드에 대한 가중치(weighting factor)이다.

2.2. 오차를 고려한 구조물 응답

S.I 기법을 통해 구조물의 손상을 진단하기 위한 최선의 방법은 기존 구조물의 모델링을 단순화 시키지 않은 상태에서 신뢰할 만한 오차의 수준을 고려해야 한다. 그리고 실제 구조물의 응답을 대변할 수 있는 측정 자료를 생성하고, 이 자료를 이용하여 구조물의 손상을 진단해 나가는 것이다.

실제 구조물의 응답을 측정하지 않고, 수학적모델에서 계산된 응답을 가지고 실측치를 만들기 위

해서는 시뮬레이션 자료에 비례오차(proportional error)나 절대오차(absolute error)의 전형적인 형태로 더해질 수 있다. 즉, 정적 자료의 경우 주어진 구조해석모델의 계산된 변위에 오차 벡터를 추가함으로써 일반화시킬 수 있고, 동적 자료의 경우에도 마찬가지로 주어진 구조해석모델의 계산된 진동 모드에 오차 벡터를 추가함으로써 나타낼 수 있다.

비례오차는 대상 자료에 원하는 만큼의 오차를 가할 수 있으며, 식 (2), (3)과 같은 형태로 변위와 진동 모드에 더해진다.

$$u_i^t = u_{0i}(1 + \lambda \xi_i^t) \quad i = 1, \dots, \hat{n}_d, \quad t = 1, \dots, T \quad (2)$$

$$\phi_i^t = \phi_{0i}(1 + \lambda \xi_i^t) \quad i = 1, \dots, \hat{n}_d, \quad t = 1, \dots, T \quad (3)$$

절대오차는 그 양에 상관없이 모의 측정치에 더해지며, 식 (4), (5)와 같은 형태로 변위와 진동 모드에 더해진다.

$$u_i^t = u_{0i} + \lambda \xi_i^t \quad i = 1, \dots, \hat{n}_d, \quad t = 1, \dots, T \quad (4)$$

$$\phi_i^t = \phi_{0i} + \lambda \xi_i^t \quad i = 1, \dots, \hat{n}_d, \quad t = 1, \dots, T \quad (5)$$

여기서, \hat{n}_d 는 서로 다른 하중 조건에 대하여 측정된 자유도 수이고, t 는 시뮬레이션에 대한 반복 횟수이다. λ 는 오차의 진폭(amplitude)이고, ξ 는 i 번째 하중 또는 모드수에 대한 perturbation된 자료를 만드는 random noise 벡터로 Fig. 3과 같이 정규분포(normal distribution)의 형태를 가지는 난수(random number)이다.

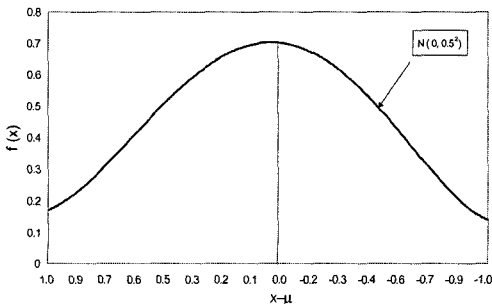


Fig. 3. Random number of normal distribution shape

2.3. 오차를 고려한 목적함수의 구성

정적 자료를 이용한 경우 방정식 오차함수에 비례오차와 절대오차를 고려한 목적함수는 식 (6), (7)과 같이 구할 수 있다.

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_{lc}} \alpha_i \sum_{j=1}^{\hat{n}_d} (F_j^i + \lambda \sum_{k=1}^{\hat{n}_d} K_{jk} \xi_k^i u_k^i)^2 \quad (6)$$

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_{lc}} \alpha_i \sum_{j=1}^{\hat{n}_d} (F_j^i + \lambda \sum_{k=1}^{\hat{n}_d} K_{jk} \xi_k^i)^2 \quad (7)$$

정적 자료를 이용한 경우 응답오차함수에 비례오차와 절대오차를 고려한 목적함수는 식 (8), (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_{lc}} \alpha_i \sum_{j=1}^{\hat{n}_d} (\Delta_j^i - \lambda \xi_j^i u_j^i)^2 \quad (8)$$

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_{lc}} \alpha_i \sum_{j=1}^{\hat{n}_d} (\Delta_j^i - \lambda \xi_j^i)^2 \quad (9)$$

동적 자료를 이용한 경우 방정식 오차함수에 비례오차와 절대오차를 고려한 목적함수는 다음과 같이 재구성된다.

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_{md}} \alpha_i \sum_{j=1}^{\hat{n}_d} (F_j^{*i} + \lambda \sum_{k=1}^{\hat{n}_d} K_{jk}^* \xi_k^i \phi_k^i)^2 \quad (10)$$

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_{md}} \alpha_i \sum_{j=1}^{\hat{n}_d} (F_j^{*i} + \lambda \sum_{k=1}^{\hat{n}_d} K_{jk}^* \xi_k^i)^2 \quad (11)$$

동적 자료를 이용한 경우 응답 오차함수에 비례오차와 절대오차를 고려한 목적함수는 식 (12), (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_{md}} \alpha_i \sum_{j=1}^{\hat{n}_d} (\Delta_j^{*i} - \lambda \xi_j^i \phi_j^i)^2 \quad (12)$$

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_{md}} \alpha_i \sum_{j=1}^{\hat{n}_d} (\Delta_j^{*i} - \lambda \xi_j^i)^2 \quad (13)$$

2.4. 구조물 응답의 시뮬레이션

실제 측정치 없이 매개변수 추정을 위해서는 실

험 구조물의 실제 거동을 모방할 수 있는 시뮬레이션(simulation)환경을 만들 필요가 있는데, 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation)은 이러한 문제들에 있어 매우 유용한 방법 중 하나이다.

시뮬레이션에서는 매개변수 추정치들에 충분한 통계적 의미가 부여될 때까지 몬테카를로 시뮬레이션 과정과 추정치 perturbation 과정이 반복 수행된다. 이 과정이 끝나면 각각의 부재의 매개변수에 대한 평균오차와 표준편차가 구해질 수 있고, 이 값들은 구조물의 손상을 결정하기 위해 사용된다. 이를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 5는 추정치 perturbation에 의한 응답값의 변화를 살펴기 위해 구조해석의 응답을 100이라 가정할 때, 100의 값에 10%의 임의오차를 준 자료를 추정 자료로 가정하고 그 자료에 비례오차와 절대오차를 고려한 500번의 추정치 perturbation을 수행하여 그 거동 특성을 살펴본 것이다.

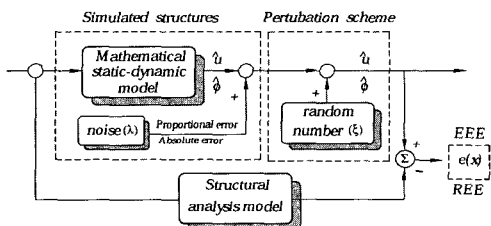


Fig. 4. Simulation of actual response of the structure

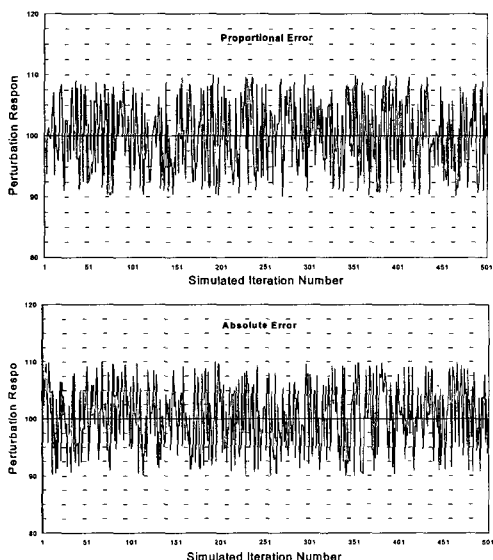


Fig. 5. Variance of response by perturbation scheme

2.5. 구조물 손상의 분석

매개변수의 민감도(sensitivity)는 구조적인 문제가 아니라 하중 조건과 측정 위치에 종속적이며 특정 조건에서 비민감한 부재도 손상되었을 수도 있다. 따라서, 이런 매개변수들의 손상도 어느 정도 판단할 수 있는 기준이 필요한데, 이런 기준이 되는 지수로는 식 (14)의 손상지수와 식 (15)의 변동지수를 사용하였다.

$$DME(x) = \frac{\{ \overline{x_m} \} - \{ x_i \}}{\{ x_i \}} \quad (14)$$

$$FLE(x) = \frac{\{ \overline{x_m} \} - \{ x_i \}}{\sigma_m} \quad (15)$$

여기서, $\overline{x_m}$ 는 몬테카를로 시뮬레이션에 따른 부재 매개변수의 평균값, x_i 는 기준값, σ_m 은 몬테카를로 시뮬레이션에 따른 표준편차이다.

3. 수치해석

3.1. 대상 구조물

손상 평가에 사용된 구조물은 다음과 같은 형상을 가지고 있는 연속보 형식의 트러스 교량이다.

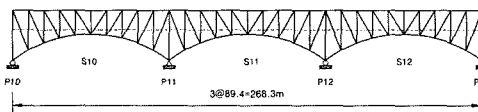


Fig. 6. Geometric configuration of continuous truss

손상도 추정에 이용된 연속보형 트러스는 제1설계의 당산철교로 19개 경간의 강관형교 및 9개 경간의 트러스교 구성되어 있으며, 교량 전체 길이는 약 1480m에 달한다. 이 트러스 구조물은 3경간의 2차원 모델이며, 62개의 절점과 121개의 부재, 237개의 자유도로 구성되어 있다. 각 트러스 부재는 1개의 강성에 관한 매개변수를 가지고 있으므로 최대 매개변수의 수는 121이며, 원 설계는 61개의 서로 다른 단면 형상을 가지고 있다.

손상 평가에 사용된 트러스의 단면적과 상현재, 하현재, 수직재, 사재의 기준값은 Table 1과 같다.

트러스 부재의 손상 부위를 추정하기 위해 설계에 사용된 공칭값을 기준값으로 정하고, 기준값에

는 오차가 없는 것으로 가정하였다. 손상의 형태는 편 연결부 부재의 균열로 인한 단면적 감소를 부재 손상으로 고려하였으며, 손상의 위치는 당산철교 재가설전 실제 손상이 발생하였던 부분으로 설정하였다.

Table 1. Sectional area of truss models

Elem Id.	Area (cm ²)	Elem Id.	Area (cm ²)	Elem Id.	Area (cm ²)	Elem Id.	Area (cm ²)	
1	376.00	31	280.80	61	165.60	91	280.80	
2	323.16	32	248.00	62	117.62	92	248.00	
3	194.40	33	396.00	63	258.40	93	308.64	
4	248.00	34	353.40	64	248.00	94	323.16	
5	308.64	35	475.20	65	193.20	95	258.40	
6	277.48	36	248.00	66	196.26	96	475.20	
7	258.40	37	396.00	67	301.60	97	237.12	
8	366.40	38	353.40	68	248.00	98	231.64	
9	237.12	39	670.40	69	193.20	99	368.00	
10	231.64	40	415.20	70	262.20	100	627.20	
11	301.60	41	624.00	71	368.00	101	165.60	
12	518.40	42	262.20	72	248.00	102	211.12	
13	193.20	43	670.40	73	237.12	103	518.40	
14	129.20	44	436.00	74	262.20	104	627.20	
15	432.00	45	308.64	75	528.80	105	193.20	
16	627.20	46	262.20	76	302.40	106	129.20	
17	193.20	47	528.80	77	308.64	107	432.00	
18	211.12	48	302.40	78	262.20	108	627.20	
19	518.40	49	237.12	79	670.40	109	193.20	
20	627.20	50	262.20	80	436.00	110	231.64	
21	165.00	51	368.00	81	624.00	111	301.60	
22	231.64	52	248.00	82	353.40	112	518.40	
23	368.00	53	193.20	83	670.40	113	237.12	
24	627.20	54	196.26	84	415.20	114	277.48	
25	237.12	55	301.60	85	396.00	115	258.40	
26	323.16	56	248.00	86	353.40	116	366.40	
27	258.40	57	193.20	87	475.20	117	308.64	
28	475.20	58	117.62	88	248.00	118	323.16	
29	308.64	59	258.40	89	396.00	119	194.40	
30	353.40	60	248.00	90	353.40	120	248.00	
대칭이 되는 부재의 단면적은 동일하게 설계							121	376.00

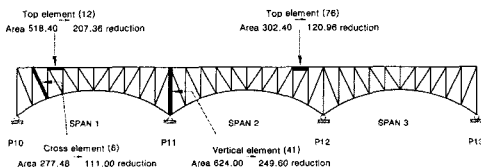


Fig. 7. Schematic of damage detection model

Fig. 7에 보이는 것과 같이 손상으로 가정된 부위는 실제로 부재의 절단과 균열로 인하여 보강이 이루어진 부분으로, 편 연결로 되어 있는 6번 부재에 60.0%, 12번 부재에 60.0%, 41번 부재에 60.0%, 76번 부재에 60.0%의 손상 등 총 4개 부재에 손상이 있는 것으로 가정하였다.

3.2. 시뮬레이션을 통한 반복 시행

시뮬레이션에서는 모의시행과 측정치 perturbation 과정에 필요한 반복 시행 횟수를 결정하여야 하므로 본 논문에서는 100의 값에 10% 범위의 비례오차와 절대오차를 고려하고 100, 200, 300, 400, 500번의 perturbation 반복을 시도하였다. 각 반복 횟수에 따른 평균값과 표준편차를 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Mean value & standard deviation by Iteration

Iteration No.	Proportional error		Absolute error	
	Mean value (μ)	Standard deviation (σ)	Mean value (μ)	Standard deviation (σ)
100	99.88	5.62	100.82	5.63
200	99.96	5.95	100.35	5.63
300	100.58	5.72	100.06	5.61
400	100.22	5.58	100.16	5.79
500	100.05	5.70	100.31	5.71

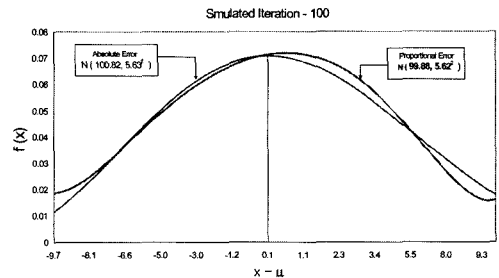


Fig. 8. Behavior of error by perturbation iteration (100)

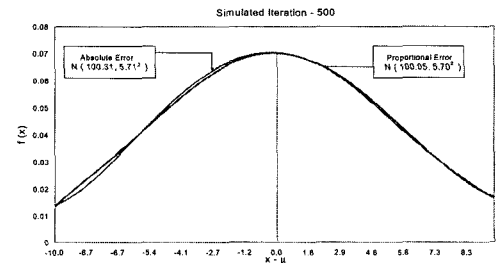


Fig. 9. Behavior of error by perturbation iteration (500)

Fig. 8과 Fig. 9는 100번, 500번의 perturbation 반복에 따른 정규분포를 나타낸 그림이다.

Fig. 8과 Fig. 9를 살펴보면 모의실험에서 측정치 perturbation에 필요한 오차는 대체적으로 100번의 반복 횟수를 통하면 정규분포의 양상을 나타내는 것을 관찰할 수 있다. 본 연구는 각 오차함수에 적용 가능한 오차의 형태를 결정하기 위한 시뮬레이션이므로 비례오차와 절대오차의 정규분포 형상과 표준편차가 비슷해지는 500번의 반복 횟수를 측정치 perturbation을 위하여 사용하였다. 현장 상태를 고려하면 500회 측정이란 실질적으로 불가능하지만 오차의 거동 특성을 파악하기 위한 시뮬레이션이므로 500회 측정치 perturbation 반복을 사용하였다.

3.3. 정적 응답을 이용한 손상 예측

대상 구조물의 실제 안전진단 실험에서 정적재하 하중은 정적 열차 상태에서 교량의 변형을 및 각종 구조요소에 발생하기 위한 응력을 고려하여 7개의 하중 경우를 사용하였기 때문에 본 연구에서도 실제 정적 재하실험에서 사용된 것과 동일하게 7개의 하중 경우의 수($n_l = 7$)와 하중 크기를 사용하였고, 이를 Fig. 10에 나타내었다.

Table 3은 정적 재하시험에 사용된 시험차량의 공차 중량이다.

트러스 구조물의 손상 추정을 위해 측정된 자유도수는 트러스 모델에서 측정 가능한 하현재 절점들로부터 30개의 자유도($n_d = 30$)를 선택하였다.

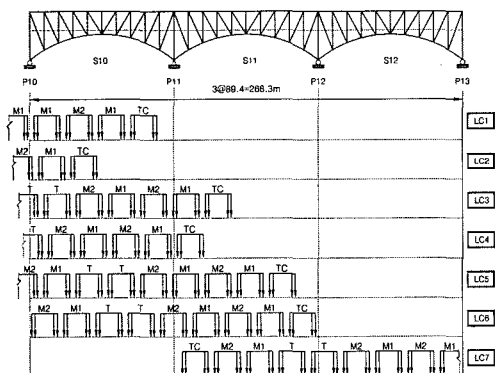


Fig. 10. Number of static load cases

Table 3. Loads of test vehicles

Vehicles symbol	M1	M2	T	TC
Load (KN)	4.408	4.265	3.235	3.367

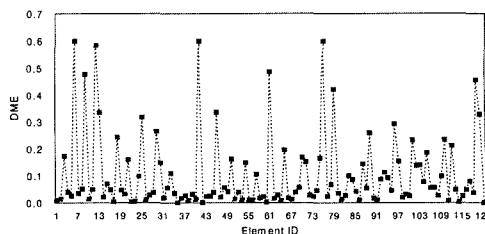


Fig. 11. Damage prediction results of bridge using DME(Static)

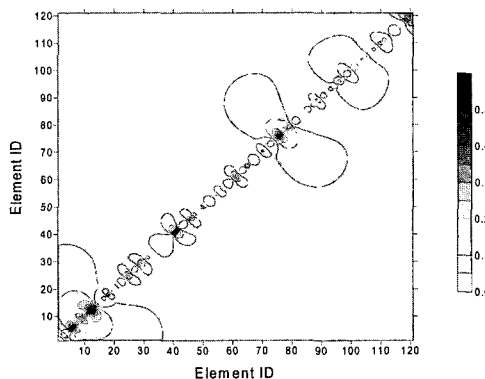


Fig. 12. Damage prediction results of bridge using DME(3D)

수치해석 모델인 연속보형 트러스를 대상으로 제안된 S.I 기법 중 응답 오차함수를 이용하여 손상이 발생한 부재의 위치와 손상 정도를 평가하였다. 이를 위하여 구조해석을 통하여 얻은 결과에 2%의 임의오차를 더한 값을 측정 자료로 설정하였고, 절대오차를 고려하여 500회의 측정치 perturbation 과정을 수행하였다.

몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 측정치 perturbation을 수행하면 추정 매개변수의 평균값과 표준편차를 이용하여 구조물의 손상을 표현할 수 있는 손상지수와 변동지수의 계산이 가능하다.

손상지수에 대한 결과는 Fig. 11, Fig 12에 나타내었고, 변동지수는 Fig. 13, Fig 14에 표현하였다.

대상 구조물의 손상을 추정하기 위해서는 각 트러스 부재의 강성에 대한 모든 매개변수를 추정하여야 하는데, 본 교량의 경우에는 모두 121개의 트러스 부재를 가지고 있으므로 수치해석을 통하여 추정하여야 할 매개변수 수는 모두 121개이다.

Fig. 11과 Fig. 12의 손상지수를 살펴보면 추정 매개변수가 무척 많음에도 불구하고 실제 손상을 입은 부재의 손상지수가 손상을 입지 않은 부재의 손상지수에 비해 매우 커서 손상 부재의 위치를 쉽게 예측할 수 있다. 그러나 손상을 입지 않은 다른

정적 및 동적 응답을 이용한 교량의 손상도 추정 기법

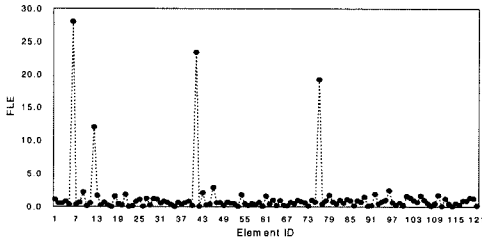


Fig. 13. Damage prediction results of bridge using FLE(Static)

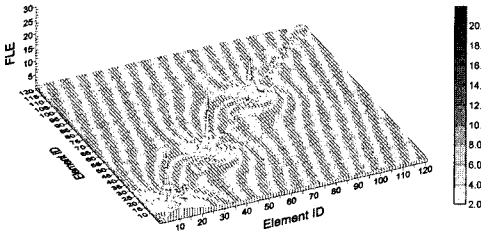


Fig. 14. Damage prediction results of bridge using FLE(3D)

부재의 손상지수가 크게 나타나 실질적으로 손상지수의 수치만으로는 부재의 손상을 진단하기에는 어려움이 있다는 것을 관찰할 수 있다.

그러나 Fig. 13과 Fig. 14의 손상 트러스의 변동지수를 살펴보면 손상을 입은 부재의 변동지수가 손상을 입지 않은 부재의 변동지수에 비해 그 값이 현저하게 커서 손상을 입은 6번, 12번, 41번, 76번 부재의 위치를 쉽게 진단해 낼 수 있음을 알 수 있다.

3.4. 동적 응답을 이용한 손상 예측

동적 자료를 이용한 트러스 구조물의 손상도 추정 결과를 앞의 경우와 비교하기 위해 응답 오차함수를 이용하여 손상이 발생된 부재의 위치와 손상을 평가하였다. 손상 부재의 기준값은 설계에 사용된 공칭값을 기준값으로 설정하고, 정적 자료와 동일하게 6번 부재에 60.0%, 12번 부재에 60.0%, 41번 부재에 60.0%, 76번 부재에 60.0%의 손상이 있는 것으로 가정하였다.

연속보형 트러스의 동적 자료를 이용한 손상 추정에서는 고차모드의 활성화된 정보를 이용하고 추정의 정확성을 기하기 위하여 1~10차까지의 진동 모드($n_{md} = 10$)를 사용하였고, 측정 자유도는 정적 자료와 동일하게 30개의 자유도($n_d = 30$)를 선택하였다.

Fig. 15는 손상 예측에 사용된 1~10차까지의 진동형상이고, Table 4는 각 진동형상에 따른 고유치이다.

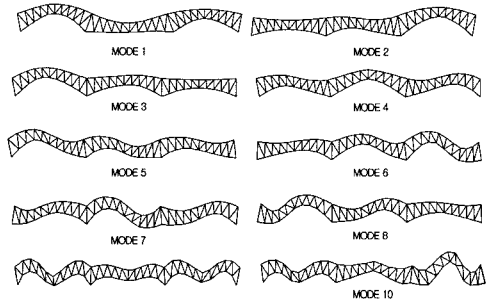


Fig. 15. Mode shapes of test bridge

Table 4. Eigen value of test bridge

Mode shape	Eigen value (rad/sec ²)	Mode shape	Eigen value (rad/sec ²)
1	2.27	6	34.46
2	5.06	7	39.23
3	7.87	8	41.35
4	16.24	9	74.95
5	22.73	10	76.94

측정치 Perturbation에 의한 추정 매개변수의 평균값과 표준편차를 이용한 손상지수는 Fig. 16, Fig. 17에 나타내었다.

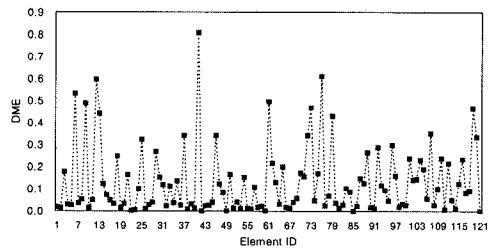


Fig. 16. Damage prediction results of bridge using DME (Dynamic)

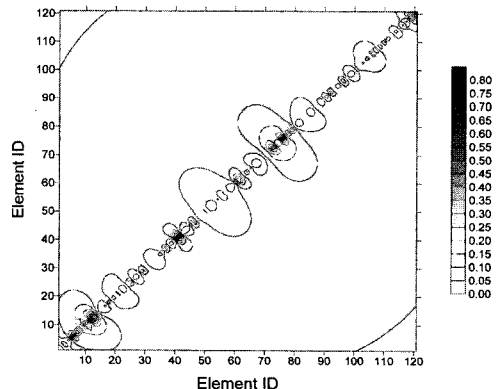


Fig. 17. Damage prediction results of bridge using DME(3D)

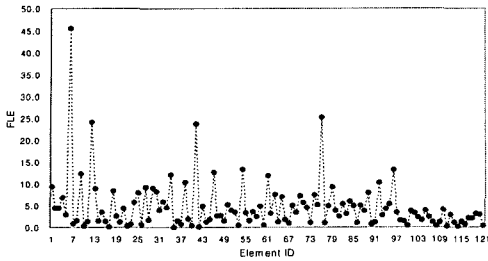


Fig. 18. Damage prediction results of bridge using FLE (Dynamic)

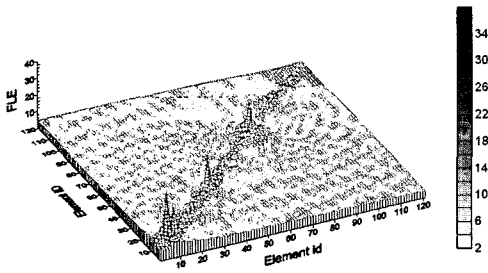


Fig. 19. Damage prediction results of bridge using FLE(3D)

그림 Fig. 16과 Fig. 17의 손상지수를 살펴보면 손상을 입은 부재의 손상지수가 손상을 입지 않은 부재의 손상지수에 비해 그 값이 비교적 크지만, 손상을 입은 부재에 인접한 부재의 손상지수도 상당히 큰 폭으로 증가해 손상지수만으로는 손상 부재의 위치와 정도를 판단하기가 쉽지 않음을 확인하였다. 이 같은 사실은 손상의 정보를 포함하고 있는 정보에 대한 민감도가 동적 자료에 비해 정적 자료가 보다 안정적이며 신뢰할 수 있는 자료임을 입증하는 것으로 판단된다.

Fig. 18과 Fig. 19는 측정치 perturbation에 의한 추정 매개변수의 평균값과 표준편차를 이용한 변동지수를 표시한 것이다.

손상지수에 비하여 Fig. 18과 Fig. 19의 변동지수를 살펴보면 손상을 입은 부재의 변동지수가 손상을 입지 않은 부재의 변동지수에 비해 그 값이 상당히 커서 손상지수를 이용한 추정정보보다 쉽고 신뢰성 있게 손상 부재의 위치를 예측할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 다양한 오차를 포함한 구조물의 정적 자료와 동적 자료를 가지고 S.I 기법에 기초한 오차함수를 이용하여 연속보 형식의 트러스 교량에 대하여 손상을 예측하였다. 이를 위해서 실제

구조물의 거동을 판단하고 구조물의 실제 손상 여부를 판단하기 위한 기준을 제시하기 위하여 몬테카를로 시뮬레이션과 측정치 perturbation을 수행하였고, 제안된 방법을 정적 자료와 동적 자료를 이용한 경우에 대하여 각각 비교, 검토하여 각 자료의 사용성과 효율성을 검증하였다. 연구 결과 트러스 구조물의 손상 추정에서 정, 동적 자료를 사용한 경우 모두 손상된 부재를 쉽게 찾아낼 수 있었고, 측정 오차가 손상의 결과를 좌우하는 것으로 판명되었으며, 이 같은 사실로부터 손상 부재가 많고, 측정치에 오차가 포함되어 있을 경우에는 손상의 정보를 포함하고 있는 정보의 신뢰성은 동적 자료보다 정적 자료가 합리적이고 효과적으로 적용될 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- 1) Banan M. R., and Hjelmstad K. D., Identification of structural systems from measured response, SRS report No. 579, Dept. of Civil Eng., Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, May, 1993.
- 2) Duan W., and Achintya Haldar., System identification with limited observations and without input, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 123, No. 5, May, pp. 504~511, 1997.
- 3) Lee, H. S., Kim, Y. H., Park C. J., and Park, H. W., A new spatial regularization scheme for the identification of the geometric shape of an inclusion in a finite body, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 43, pp. 973~992, 1999.
- 4) Li, Y. Y., Yam, L. H., Sensitivity analysis of sensor location for vibration control and damage detection of thin-plate systems, Journal of Sound and Vibration, Vol. 240, No. 4, pp. 623~636, 2001.
- 5) Loukas Papadopoulos and Ephraim Garcia., Structural damage identification: A Probabilistic Approach, AIAA Journal, Vol. 36, No. 11, November, pp. 2137~2145, 1998.
- 6) Shin, S. B., Comparison of input residual and output residual schemes in parameter estimation of structural system, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Illinois at Urban-champaign, 1991.
- 7) Yun, C. B., and Bahng E. Y., "Substructural identification using neural networks", Computers and Structures 77, pp. 41~52, 2000.