

결함이 있는 판형교의 진동기초 손상검색을 위한 구조식별모델의 성능향상

Performance Enhancement of System Identification Model for Vibration-Based Damage Detection in Flawed Plate-Girder Bridges

백 중 훈* 김 정 태** 류 연 선**

ABSTRACT

System identification techniques can be used to build a baseline modal model for a flawed structure that has no modal information on its as-built state. The accuracy of a system identification proposed by Stubbs and Kim is analyzed for plate-girder bridges and its impact on the accuracy of damage detection in those structures is also analyzed. A laboratory-scale model plate-girder is experimentally tested and the initial four bending modes are examined for certain damage scenarios. The performance of individual baseline modal models is assessed by detecting damage in the model structure.

1. 서 론

국·내외에서 구조물의 동특성의 변화를 감지하여 손상을 추정하는 기법들에 대한 연구가 활발하며 일부 교량을 대상으로한 적용성 검증 사례가 보고되고 있다. 공용중인 대형 구조물들에서는 제한된 수의 저차 진동모드들이 계측이 가능하며, 이들 대형 구조물의 손상이 발생하기 전인 초기상태에서 진동모드 특성치가 계측되어있지 않다는 점으로 인하여 손상검색 및 안전도를 모니터링 하기 어려운 문제가 있다. 따라서 교량 등의 대형구조물에서는 제한된 수의 저차 진동모드만이 계측된 조건에서 적용할 수 있는 손상검색법이 필요하며 또한 초기상태의 진동모드가 측정되지 않은 구조물의 경우 손상평가를 수행할 수 있도록 구조식별(Structural Identification)기법이 적용되어야 한다. 또한, 위의 이론과 기술로써 적절한 손상검색 프로그램을 사용하여 구조물의 손상위치와 손상크기를 검색하고 평가할 수 있어야 하겠다.

본 논문에서는 초기의 진동모드 특성치가 계측되지 않은 강 판형 모형 구조물의 손상발생 후 계측된 제한된 수의 저차 진동모드 특성치만을 사용하여 구조물의 손상을 식별하는 방법을 제시하였다. 먼저, 구조물 손상발생 후 계측된 소수의 진동모드로 손상을 검색할 수 있는 진동기초 손상검색 체계가 선정되었다. 다음으로, 임의 위치에 손상이 존재하는 모형 강판형교를 대상으로 진동 계측 실험을 수행하여 진동모드 특성치를 추출하였다. 손상된 모형 강판형교의 진동 특성자료들을 토대로 구조식별 기법을 통하여 모형 강판형교의 손상 전 진동모드 특성치를 정량화하였다. 마지막으로 진동특성치의 변화를 분석하여 대상 구조물의 손상을 검색하였다.

* 부경대학교 해양공학과 석사수료

** 정회원 · 부경대학교 해양공학과 교수

2. SID 손상검색 체계

본 연구에서 사용하고 있는 진동기초 손상검색체계는 Fig. 1에 도시되었다. 손상검색체계는 크게 5단계로 구성되었다. “진동모드실험”은 실제 구조물을 대상으로 실험계측을 수행하여 구조물의 진동모드를 추출하는 단계이고, “구조식별 모델링”은 계측된 진동모드 특성치를 토대로 구조물의 시스템을 유한요소 모델을 통하여 추정하는 것이다. “손상 후의 진동모드 특성치”는 실험에 의하여 계측된 손상된 실제 구조물의 진동모드 특성치를 사용하며 “손상 전의 진동모드 특성치”는 구조식별 모델링을 통하여 최종적으로 수립된 유한요소 모델의 진동모드 특성치를 사용한다. “손상 위치검색 알고리즘”과 “손상크기평가 알고리즘”은 Stubbs와 Kim (1996)이 제안한 손상지수법을 사용하였다.

구조식별은 계측된 진동모드 특성치를 토대로 시스템의 해석적 또는 물리적 모형을 추정하는 것으로 현재 구조물의 거동, 상태 등을 가장 근접하게 나타낼 수 있는 수학적 모델을 만드는 것이다. Fig. 2는 본 논문에서 사용된 SID기법으로서 주요 목적은 손상 전 상태의 모드 특성치가 주어지지 않은 조건에서 손상 전 상태에 해당하는 기본모델(baseline-model)을 구하여 초기의 진동모드 특성치를 정량화 하는데 있다. SID기법은 구조계의 강성변화에 대한 고유치의 민감도 분석으로, 반복연산을 통하여 해를 구하는 것이다. M 개의 고유치를 알고있는 NE 개의 구조요소로 구성된 어떤 선형 구조물에서 미지의 j 번째 부재의 강성을 k_j^* 라 하고, 이에 대응된 유한요소 모델을 구성하여 j 번째 부재의 강성을 이미 알고 있는 값을 k_j 라 하면 미지 구조계의 강성과 기지 구조계의 강성의 관계는 식 (1)와 같다.

$$k_j^* = k_j(1 + \alpha_j) \quad (1)$$

NE 개 부재의 분수적 강성 변화는 다음 식에서 얻을 수 있다.

$$\alpha = F^{-1}Z \quad (2)$$

여기서, α 는 유한요소 모델과 실제 구조물간의 분수적 강성변화를 포함하는 $NE \times 1$ 행렬, Z 는 두 시스템의 분수적 고유치 변화를 나타내는 $M \times 1$ 행렬, F 는 분수적 고유치 변화에 대한 분수적 강성변화에 관계되는 $M \times NE$ 강성민감도행렬이다. 이와 같은 이론적 배경을 바탕으로 다음과 같은 알고리즘을 이용하여 실제 구조물의 구조계를 추정 할 수 있다.

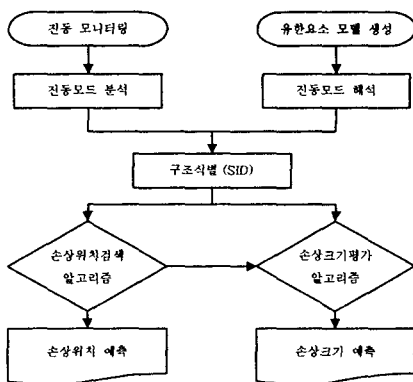


Fig. 1. Vibration-Based Damage Detection System

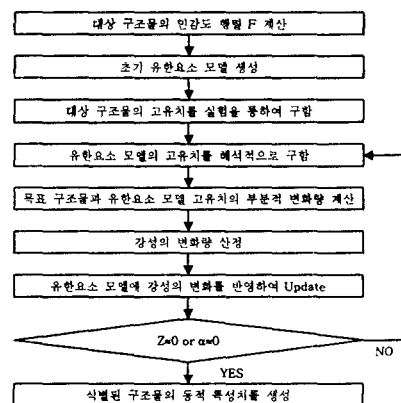


Fig. 2. System Identification Method

선형 구조계의 진동모드 민감도 이론에 근거하여, N 개의 절점을 가지고 NM 개의 모드를 사용한 j 번째 손상위치지수 β_j 는 식 (3)과 같다[Stubbs & Kim, 1996].

$$\beta_j = \frac{\sum_{i=1}^{NM} \left\{ \left(\Phi_i^{*T} C_{j0} \Phi_i^* + \sum_{k=1}^{NM} \Phi_i^{*T} C_{k0} \Phi_i^* \right) K_i \right\}}{\sum_{i=1}^{NM} \left\{ \left(\Phi_i^T C_{j0} \Phi_i + \sum_{k=1}^{NM} \Phi_i^T C_{k0} \Phi_i \right) K_i \right\}} \quad (3)$$

여기서, Φ_i 는 i 번째 모드의 모드벡터, Φ_i^* 는 i 번째 모드강성이고, C_{j0} 는 기하학적 양만을 포함하는 강성행렬이다. 그리고 손상된 구조물을 별표(*)로 표시한다. 다음으로, 손상위치를 판별하기 위해 통계적 기준을 설정한다. 주어진 모드에서 손상의 위치는 통계적 가설검증(Testing of Statistical Hypothesis)에 의해 결정될 수 있다. 우선, β_j 를 랜덤변수로서 취급하면 β_j 의 집합은 모집단을 이루며, 정규화된 손상위치지수는 다음과 같다.

$$Z_j = (\beta_j - \bar{\beta}) / \sigma_{\beta} \quad (4)$$

식 (4)의 $\bar{\beta}$ 와 σ_{β} 는 각각 β_j 들의 평균과 표준편차이다. 여기에 사용된 판정법칙은 그 위치에서 손상이 발생했을 가능성에 의존한다. 귀무가설(Null Hypothesis)은 구조물의 j 번째 부재에서 손상이 발생하지 않았다(H_0)는 것이다. H_0 가 참이라 하면, 손상위치지수들의 분포를 $f_{\beta}(\beta/H_0)$ 으로 추정한다. 대립가설(Alternative Hypothesis)은 구조물의 j 번째 부재에서 손상이 발생 하였다(H_1)는 것이다. 주어진 손상위치지수 β_j 에서 H_1 이 참일 때, j 번째 부재에서 손상이 발생하지 않았을 가능성은 식 (5)과 같으며, 손상이 발생한 위치에서의 신뢰도는 $1 - P_j$ 이다. 손상크기는 j 번째 부재강성의 분수적 변화를 α_j ($\alpha_j \geq -1$)로 놓으면 손상크기 α_j 를 식 (6)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_j = 1 - \int_0^{\beta_j} f_{\beta} \frac{\beta}{H_0} d\beta \quad (5)$$

$$\alpha_j = \frac{\left[\frac{\Phi_i^T C_{j0} \Phi_i}{\Phi_i^{*T} C_{j0} \Phi_i^*} \right] \frac{K_i^*}{K_i} - 1 \quad (6)$$

3. 모형 강판형교의 진동 계측

모형 강판형교의 형상은 Fig. 3과 같으며, 메인 거더에 횡브레이싱이 연결되어 있고 횡브레이싱 위에 스트링거가 지지되어 있는 일반적인 형태이며, 재질은 Stainless-Steel이다. Fig. 4의 단면형상으로 제작되었으며, 또한 횡브레이싱과 스트링거도 굽힘이나 전단력에 저항하기 위해 폭에 비해 높이가 더 길게 제작되었다. 횡브레이싱 위에 위치한 스트링거는 연속보의 형식으로 설치되었다.

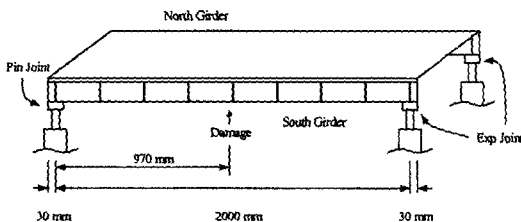


Fig. 3. Elevation View of Steel Plate-Girder Bridge

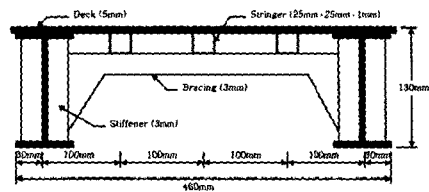
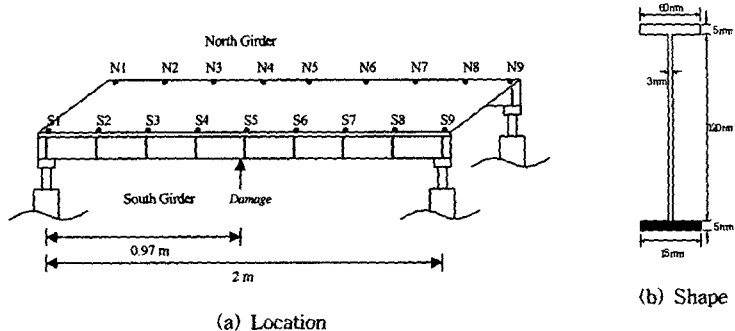


Fig. 4. Cross-Section of Steel Plate-Girder Bridge

지점부의 힌지지점은 횡축방향에 대한 회전만 허용하고, 로울러지점은 횡축방향에 대한 회전과 종축방향의 변위를 허용하도록 되어있다. 강판형교 모형을 대형 프레임 위에 설치하여 하부구조 효과를 내도록 하였다. 모형 강판형교에 실제로 적용된 손상은 남쪽 거더 하부 플랜지에 쇠톱 절단을 통해 만들었다. Fig. 5는 모형 강판형교에 도입된 손상의 위치와 형상의 한 경우이다.



(a) Location
 Fig. 5. Inflicted Damage

모형 강판형교의 진동특성을 측정하기 위하여 본 연구에서는 신호분석기로서 8채널 FFT Analyzer SA390을 사용하였으며 모드분석 프로그램으로는 STAR-Modal을 사용하였다. 압전형 가속도계가 사용되며, 충격해머가 기준점으로 사용되었다. 가속도계는 정육각형의 알루미늄에 부착되어서 플레이트 거더의 중간 스패를 따라서 25 cm 간격으로 설치되었다.

구조물에 동적하중을 재하 하는 방법으로 충격해머(impact hammer)에 의한 가진 방법으로 실험을 수행하였다. 해머가진법은 부가질량의 효과를 피할 수 있고, 다른 가진법 보다 사용하기 용이한 방법이다. 해머에 내장되어있는 팁의 종류에 따라 민감도가 변화하기 때문에 사용할 시에는 적절히 보정하여 사용한다. Fig. 6은 본 연구에서 사용한 진동실험체계이다. 해머가진에 의한 계측에서는 능동센서를 임의의 계측점에 고정시키고 기준센서가 부착된 해머를 계측점에 따라 이동시키며 가진을 가하는 트랜지언트 실험방법을 채택하였다. 응답센서의 고정위치를 Fig. 6의 3번 계측점으로 고정하고 충격해머를 계측점에 따라 이동시키며 가진하였다. 18개의 계측점을 설정하여 강판형 모형을 모델링하였다. 자유도는 모형교량의 길이방향으로 두고 측정형태는 주파수응답으로 설정한 후 실험을 수행하였다. 모형 강판형교 실험의 초기 4개 모드의 고유진동수는 Table 1 과 같으며, Fig. 9의 좌측 그림은 각각 1차 휨 모드, 1차 비틀림 모드, 2차 휨 모드 와 2차 비틀림 모드이다.

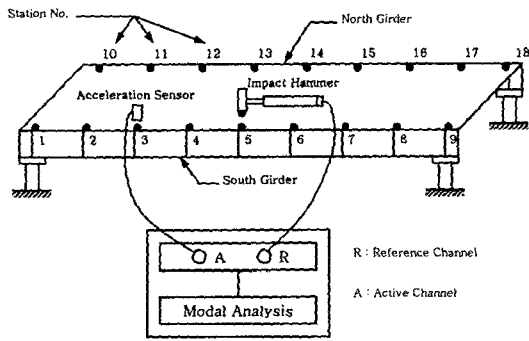


Fig. 6. Scheme of Roving Hammer Test

Table 1. Natural Frequencies of Model Plate-Girder

Mode	Freq.(Hz)
1st Bending	67.62
1st Torsional	93.70
2nd Bending	194.00
2nd Torsional	280.50

4. 모형 강판형교의 구조식별

유한요소 해석 프로그램으로 범용 구조해석 프로그램인 ANSYS 버전5.5를 사용하였다. Fig. 7 과 같이 Girder, Deck, Stringer, Bracing은 4절점 3차원 쉘 요소를 사용하여 모델링 하였으며, 지점부분은 Fig. 8과 같이 3차원 Solid 요소와 지점에 수직방향 즉, z축 방향으로 축 방향 스프링 요소를 설치하여 모델링 하였다. 다. 모드해석에 있어 교량의 지점조건을 최대한 실제와 유사하게 모사 하는 것이 매우 중요하다. 모형 강판형교는 탄성받침에 의해 지지되어 있으므로 초기 유한요소 모델의 재료 물성치는 실제 구조물과 같이 지점 부분의 스프링요소를 제외한 요소들의 탄성계수는 210 GPa으로 산정 하였으며, 스프링요소의 초기 강성은 지점부분의 크기를 고려하여 10 MN/m로 설정하였다. 초기 유한요소 해석 결과로부터 Fig. 9의 우측 그림과 같이 1차 휨 모드, 21차 비틀림 모드, 2차 휨 모드와 2차 비틀림 모드를 구하였다.

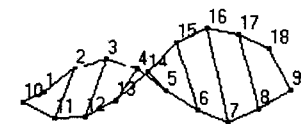
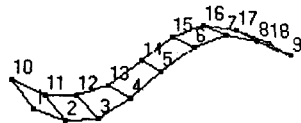
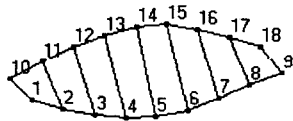
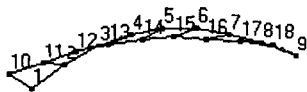
초기 유한요소 모델의 해석 결과와 실제 손상된 모형 강판형교 구조물의 각 모드별 고유주파수를 Table 2에 비교하였다. 모드 1, 2, 3, 4는 각각 1st Bending, 1st Torsional, 2nd Bending, 2nd Torsional 모드이며, 초기 유한요소 모델과 모형 강판형교 고유주파수 간의 오차는 모드 1, 3(휨모드)이 모드 2, 4(비틀림 모드)에 비해서 상대적으로 작게 나타났다.



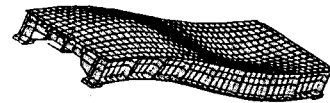
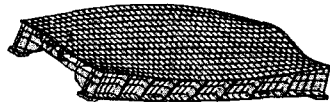
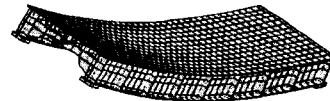
Fig. 7. Elevation View of FE Model



Fig. 8. Support of FE Model



(a) Experiment



(b) FE Model

Fig. 9. Comparison of Experimental and FEM Mode Shape

구조식별(SID)을 수행하기 위해서는 유한요소 모델을 이루고 있는 요소들은 각 모드에 미치는 민감도가 유사한 그룹으로 나눈다. 먼저 초기 유한요소 모델을 구성하고 있는 각 요소들의 강성 민감도 행렬을 구하였다. 구조식별을 위한 그룹으로 Group 1은 Flange와 Web, Group 2는 Deck과 Support, Group 3는 Stiffener와 Spring, Group 4는 Bracing과 Stringer로 할당하였다. Group 1, 2, 3, 4에 대한 각 모드의 민감도는 Table 3과 같다. 구조식별 결과를 Table 4에 정리하였으며, 유한요소 모델의 수렴추이를 Fig. 10에 도시하였다. Table 4는 Group 1, 2, 3, 4에 대한 재료 물성치의 변화이다. 3번의 반복연산 결과 1, 2, 3, 4번 모드 모두 수렴하였다.

Table 2. Experiment Vs Initial FEM Natural Frequency

Mode	Experiment (Hz)	Initial FEM (Hz)	Error (%)
1	67.62	70.89	4.83
2	93.70	99.25	5.92
3	194.00	200.08	3.13
4	280.50	295.12	5.21

Table 3. Stiffness Sensitivity Matrix

Mode	Sensitivity			
	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4
1	0.7383	0.1347	0.1439	0.0203
2	0.5508	0.2813	0.0682	0.1296
3	0.4838	0.1007	0.3988	0.0898
4	0.4800	0.2458	0.0947	0.2009

Table 3. System Identification Process

Mode	Natural Frequency (Hz)					Error (%)	
	Iteration Number				Target	Initial	Final
	Initial	1	2	3 (Final)			
1	70.89	67.62	67.62	67.62	67.62	4.83	0.00
2	99.25	93.70	93.70	93.70	93.70	5.92	0.00
3	200.08	193.83	193.98	193.99	194.00	3.13	0.01
4	295.12	280.37	280.49	280.49	280.50	5.21	0.00

Table 4. Changes of Material Properties

Group		Elastic Moduli (GPa)			
		Iteration Number			
		Initial	1	2	3
1	Flange, Web	210.00	192.07	192.06	192.09
2	Deck, Support	210.00	165.87	164.96	164.76
3	Stiffener	210.00	212.59	213.37	213.44
	Spring (MN/m)	10.00	10.12	10.16	10.16
4	Bracing, Stringer	210.00	204.60	206.60	206.87

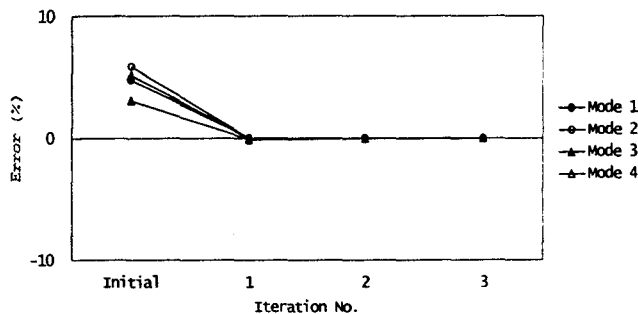
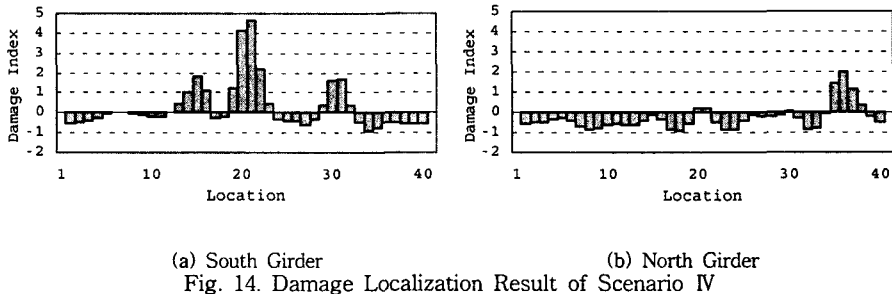
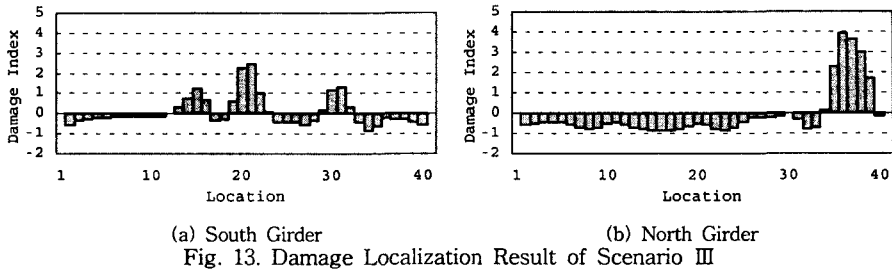
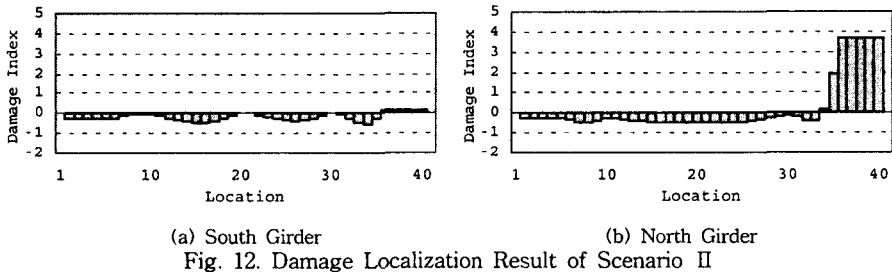
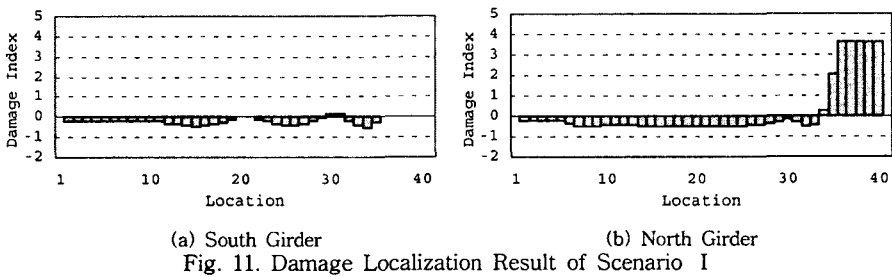


Fig. 10. Frequency Change in SID Process

5. 진동기초 손상검색

모형 강관형교를 대상으로 구조식별과 진동기초 손상검색을 수행하였다. 앞서 설명된 구조식별 기법과 SID 손상검색체계를 적용하였다. 각 측정 센서 사이는 보간하여 총 80개의 요소를 구성하였다. Fig. 3의 남쪽 거더에 1개의 손상위치 (Element SE19)가 선정되었으며, $\Delta EI/EI = 0.586$ 이다. 손상검색은 사용된 모드에 따라 4개 손상검색 시나리오로 분류되었다. Scenario 1은 모드 1만이 사용된 경우, Scenario 2는 모드 1과 2가 사용된 경우, Scenario 3은 모드 1-3이 사용된 경우, Scenario 4는 모드 1-4가 모두 사용된 경우이다. 구조식별과 손상검색 결과 정규화된 손상지수 값들을 막대그래프로 도시하였다. 각 요소별로 계산된 손상지수들의 분포를 정규분포로 가정하여 손상지수 중 99% 신뢰도를 통과하는 요소를 손상위치로 예측하였다.



각 손상시나리오별 손상검색 결과의 정확도를 Table 5에 요약하였다. Table 5에서 fp는 false alarm (손상이 없음에도 손상이 있는 것으로 검색되는 경우)을 의미하며, fn은 false negative (손상이 존재하는 곳이 검색이 되지 않는 경우)를 의미한다.

Table 5 Accuracy of Damage Detection

Case	Inflicted Damage		Predicted Damage		Prediction Accuracy	
	Location (Element No.)	Severity ($\Delta EI/EI$)	Location (Element No.)	Severity ($\Delta EI/EI$)	Location Error(%)	Severity Error(%)
I	SE19	0.586	-	-	fn	fn
			NE36 ~ NE40	0.521	fp	fp
II	SE19	0.586	-	-	fn	fn
			NE36 ~ NE40	0.515	fp	fp
III	SE19	0.586	-	-	fn	fn
			NE36, NE37	0.494	fp	fp
IV	SE19	0.586	SE20 ~ SE21	0.464, 0.470	2.5 ~ 5.0	19.7 ~ 20.8

6. 결 론

초기의 진동모드 특성치가 계속되지 않은 강 판형 모형 구조물의 손상발생 후 계속된 제한된 수의 저차 진동모드 특성들만을 사용하여 구조물의 손상을 식별하는 방법을 제시하였다. 먼저, 구조물 손상발생 후 계속된 소수의 진동모드로 손상을 검색할 수 있는 진동기초 손상검색 체계가 선정되었다. 다음으로, 임의 위치에 손상이 존재하는 모형 강판형교를 대상으로 진동 계속 실험을 수행하여 진동모드 특성치를 추출하였다. 손상된 모형 강판형교의 진동 특성자료들을 토대로 구조 식별 기법을 통하여 모형 강판형교의 손상 전 진동모드 특성치를 정량화하였다. 마지막으로 진동 특성치의 변화를 분석하여 대상 구조물의 손상을 검색하였다. 초기 4개 진동모드를 사용하여 구조 식별 모델이 손상검색의 정확도에 미치는 영향을 분석하였다. 구조식별 및 손상검색에 사용된 모드 수가 4개인 경우에는 손상검색의 정확도가 높았으며, 그 외의 경우들은 손상검색의 정확도가 낮았다.

후 기

이 논문은 2002년도 스마트 사회기반기술 연구센터의 지원에 의하여 연구되었습니다.

참 고 문 헌

1. Stubbs, N and Kim, J.T. (1996). "Damage Localization in Structures Without Baseline Modal Parameters", AIAA Journal, Vol. 34, No. 8, pp. 1644-1649
2. Kim, J.T. and Stubbs, N. (2002). "Improved Damage Identification Method Based on Modal Information," Journal of Sound and Vibration, Vol. 252, No. 2, pp. 223-238
3. 이영규, 김제현, 김정태, 류연선, "통합손상검색 시스템의 개발", 한국전산구조공학회 Vol. 13, No. 2, 2000.
4. Ewin, D.J. (1986). Modal Testing: Theory and Practice, Research Studies Press Ltd., England.