

# 트러스의 구조손상추정을 위한 진동모드민감도의 패턴인식

김정태 · 류연선 · 정성오 · 추상훈  
부경대학교 해양공학과

## Pattern Recognition of Modal Sensitivity for Structural Damage Identification of Truss Structure

JEONG-TAE KIM, YEON-SUN RYU, SUNG-OH JUNG AND SANG-HUN CHOO  
Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

**KEY WORDS:** Modal parameters 모드 특성치, System identification 구조식별, Truss structure 트러스 구조, Damage detection 손상 발견, Pattern recognition 패턴 인식

**ABSTRACT:** Despite many combined research efforts, outstanding needs exist to develop robust safety-estimation methods for large complex structures. This paper presents a practical damage identification scheme which can be applied to truss structures using only limited modal responses. Firstly, a theory of pattern recognition (PR) is described. Secondly, existing damage-detection algorithms are outlined and a newly-derived algorithm for truss structures is proposed. Thirdly, PR detectors for damage detection are formulated by integrating the PR theory and the existing damage-detection algorithms for truss structures. Finally, the feasibility of the proposed scheme is evaluated using numerical examples of plane truss structures.

### 1. 서 론

산업사회로 발전하는 과정에서 건설된 대형 구조물과 시설물들은 설계 및 시공과정에서의 결함 또는 설계 당시에 고려하지 못하였던 각종 요인으로 인하여 구조손상이 발생되며, 이러한 구조물들의 사용기간이 경과함에 따라 노후화 되어서 그 안전성이 크게 위협을 받고 있다. 심각한 정도의 구조손상이 발생한 구조물의 경우에는 설계 당시에 계획되었던 설계 사용년한에 크게 못 비칠 정도로 사용년한의 단축을 초래하는 경우도 빈번히 발생하고 있다. 따라서 구조물의 장기적인 안정성 및 작동성을 확보하기 위한 노력이 절실히 요구되고 있다. 특히 건물, 교량, 댐, 해양 구조물, 원자력 발전소등과 같은 대형 구조물은 각종 운영하중, 외부 물체에 의한 충격, 지진, 풍하중, 파랑하중, 부식 등에 지속적으로 노출되어 있어서, 이로부터 구조물의 안전을 확보하는 문제는 경제, 사회적으로 지대한 관심의 현안이 되었다(Stubbs *et al.*, 1990; Idichandy, 1990; Shahrivar and Bouwkamp, 1986; Stephens and Yao, 1987).

국내에서 대형 구조물의 안전진단은 구조물의 정적변위 및 변형도를 측정하여 이를 유한요소모델의 거동과 비교하는 방법으로 수행되어 왔다. 그러나, 구조계가 대형화되고 복잡해지고, 구조손상의 형태 또한 복잡화 되고 있음을 보여주는 구조물 붕괴사고 이후 종래의 안전진단기술에 대한 개선의 필요성이 인식되고 있다. 구조식별과 진동계측기술을 활용하는 연구는, 구조계의 손상을 구조강성행렬값의 변화로 모델화하여 선형계로 처리하는 기법이 주로 이용되고 있으며, 구조손상에 관련된 미지계수 추정방법으로는 최소자승오차법, 비선형최적

화기법, 순차예측오차법 등이 주로 사용되고 있다. 손상도 추정법으로는 모드섭동법, 민감도행렬법, 모드에너지법 등이 사용되고 있다.

국외에서는 지진에 대한 구조물의 안전성 확보와 사용성 검증에 대한 중요성의 증대로 구조식별기법의 활용이 널리 확대되고 있다. 선형 구조계에 대한 안전진단을 위한 손상추정의 연구로는, 1980년대 이후 구조물에 존재하는 구조손상을 비파괴적으로 발견하려는 노력의 일환으로 구조물의 진동특성치(고유진동수, 진동형상, 감쇄계수)를 이용하는 연구들이 활발히 진행되어 왔다. 초기의 연구는 크게 두가지 방향에서 시작되었는데, 그중에 하나는 구조부재의 균열등의 기하학적 특성의 변화를 고유진동수의 변화와 관련짓는 연구이었다. 또 다른 하나는 구조부재의 진동특성치의 변화를 이용하여 부재에 발생된 균열 등의 기하학적 변화를 발견하려는 연구였다(김과 김 1996). 최근 들어, 구조진동특성을 사용한 이같은 비파괴적 손상발견 분야의 연구는 더욱 가속화 되고 있다. 예를들어, Biswas 등과 Fletch 등은 진동특성치의 변화를 감지하여 교량구조물의 안전도를 모니터 하는 시도를 하였으며, Chen 등 그리고 Stubbs 등은 항공우주구조물의 손상발견에 진동특성치의 변화를 사용할 수 있는지의 적용성을 조사하였고, Idichandy 등과 Kenley 등 및 Bouwkamp 등은 진동특성치의 변화로부터 해양지켓플랫폼의 결함발생 여부를 예측하는 연구를 수행하였다. 특히 Stephens과 Yao, Mazurek와 Dewolf 및 Stubbs 등은 교량구조물의 진동형상의 변화를 측정하고 이 변화를 유한요소모델에 적용하여 손상을 발견하려는 연구를 수행하였다.

그 동안의 활발한 연구노력에도 불구하고 본 연구분야의 기

솔직 취약점은 다음과 같다. 먼저, 복합적으로 여러 기능의 구조부재를 포함하는 구조물에는 기존의 진동모드실험과 SID(system Identification)기법에 의한 손상추정방법을 적용하기 어렵다. 이는 이들 구조물들의 주요 부재요소에서 SID기법의 적용에 필수적인 진동거동을 모니터링하기 어렵다는 점에 기인하다. 다음으로, 극소수의 진동특성치가 측정된 구조물이나 초기상태(손상이 존재하지 않는 상태)의 진동특성치가 측정되지 않는 구조물에서는 기존의 SID기법이 잘 적용되지 않는다. 현재 사용중인 구조물의 대다수가 이 경우에 해당된다. 마지막으로, 진동반응추정 및 데이터처리상의 오류 그리고 구조물의 부정확한 모델링의 오류에 기인한 구조물 손상추정의 부정확성의 문제를 해결하기 위한 시도로서 피지이론, 패턴인식, 통계처리기법 등에 대한 연구들이 활발하다(Kim, 1997; Schalkoff, 1992).

본 논문에서는 트러스 구조와 같이 다수의 복합거동이 발생하는 구조물의 손상위치 및 손상도를 소수의 진동모드 특성치와 패턴인식체계를 통하여 추정하는 패턴인식 손상추정방법을 제시하였다. 이 방법은 진동모드실험 및 구조해석에 기초한 진동모드민감도와 패턴인식이론을 응용하여 개발되었으며, 수치모델을 대상으로 그 적합성과 적용성이 검증되었다. 세부 연구는 세 단계로 수행되었다. 첫 번째 단계에서는 패턴인식체계를 이론적으로 고찰하였다. 패턴인식개념을 고찰하고 손상검색을 위한 패턴인식모델의 설계 조건이 검토되었다. 두 번째 단계에서는 트러스 구조 손상추정을 위한 패턴인식체계를 설계하였다. 진동모드 민감도 이론, SID 구조손상검색 알고리즘, 패턴인식 개념 및 통계적 손상분류 알고리즘의 이론적 배경을 요약하였다. 기존의 발표된 손상지수법을 요약하고 새로이 유도된 손상지수법을 제시하였다. 유도된 마지막 단계로, 평면 트러스 수치실험을 통하여 최적의 구조손상 패턴인식 알고리즘을 선정하였다.

## 2. 패턴인식체계의 이론적 배경

일련의 부류(class)에 속한 객체(object)들의 집합과 이 객체들의 측정치(measurement)가 주어진 경우, 패턴인식의 문제는 이들 측정치에 대한 해석으로부터 객체들의 부류소속(class membership)을 인식하는 것으로 정의할 수 있다(Schalkoff, 1992; Kosko, 1992). Fig. 1은 패턴의 생성과 분류 및 인식 체계를 도시한 것이다. 첫 번째 단계는 측정공간(measurement space)에서 측정치  $m_i$ 를 추출하는 단계이다. 다음으로, 측정치  $m_i$ 는 패턴 유사성을 근거로 패턴공간(pattern space)내의 특정 패턴모델에 사상(mapping)된다. 마지막으로, 각 객체소속(object membership)으로 인식된 측정치는 패턴인식디텍터(pattern recognition detector)를 통과하여 임의의 부류로 판정된다.

패턴인식개념을 진동기초 손상검색이론과 접목하여 Fig. 2와 같은 손상검색용 패턴인식체계를 구성하였다. 첫 번째 단계인 "Modal Test & Analysis(모드실험과 해석)"에서는 대상 구조물로부터 모드특성치를 실험 계속하고 해석모델로부터 수치모드 해석을 수행한다. 이 단계에서 계속되고 분석된 모드 데이터는

패턴인식체계의 초기 입력자료가 된다. 두 번째 단계인 "Modal Sensitivity Model(모드민감도 모델)"에서는 진동모드 특성치의 완전성과 구조 거동의 대표성에 좌우되는 모드민감도가 계산된다. 이 모드민감도는 패턴인식체계상의 측정치  $m_i$ 에 해당한다.

세 번째 단계인 "System Identification Algorithms(시스템 식별 알고리즘)"은 대상구조물의 모드변형에너지의 변화를 감지하는 알고리즘이다. 이 단계는 패턴인식체계상의 "Feature Extraction Algorithm(특징추출알고리즘)"에 해당한다. 기본 모델로부터 손상발생 전과 후의 모드민감도가 계산되어 입력되면 이 시스템 식별 알고리즘에서 "Damage Indices(손상지수)"가 계산된다. 이 손상지수는 Fig. 2의 패턴인식체계상의 "Feature Vector(특징벡터)"에 해당한다. 네 번째 단계인 "Decision Algorithm(판정 알고리즘)"에서는 특징벡터인 손상지수를 손상 또는 비 손상부류로 분류한다. 본 연구에서는 통계적 분류알고리즘을 사용하였다. 손상지수의 확률통계분포를 결정하고 손상 부류 및 비손상 부류 판정기준을 설정한 후에 이 판정기준을 확률통계분포에 적용하여 손상 및 비손상 부류를 판정한다.

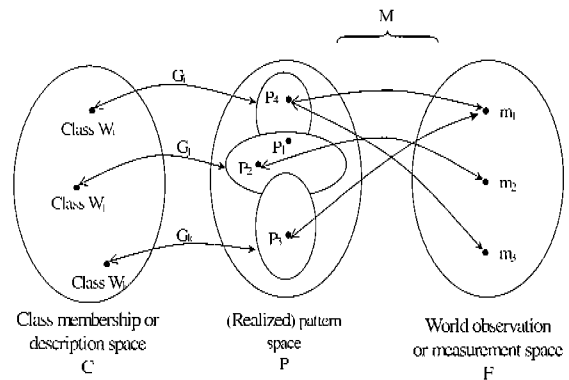


Fig. 1 Pattern generation, classification and recognition

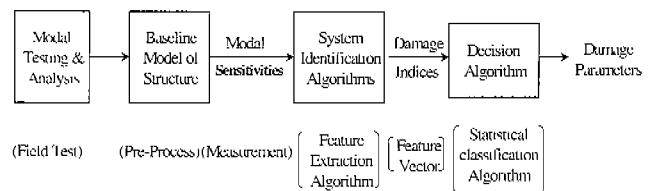


Fig. 2 Pattern recognition for damage identification

## 3. 손상검색 알고리즘

### 3.1 기본모델의 모드민감도

선형구조계의 진동모드 민감도의 추정이론은 Stubbs의 연구에 기초한다(Stubbs의 2인, 1990). 손상되지 않은 NE부재와 N절점의 선형구조계에 대해, i 모드의 모드강성도  $K_i$  및 i 모드의 모드강성도에 대한 j 부재의 기여도  $K_{ij}$ 는 다음과 같다.

$$K_i = \Phi_i^T C \Phi_i \quad (1)$$

$$K_{ij} = \Phi_i^T C_j \Phi_i \quad (2)$$

여기서,  $C_j$  는 시스템 강성도 행렬  $C$  에 대한  $j$  부재의 기여도이다. 다음으로, 임의의 시간 경과한 후에 구조물에 손상이 발생한 경우를 고려해 보자. (이 경우는 별표 \* 는 손상상태를 표시함). 손상 구조계의  $i$  모드 모드강성도  $K_i^*$  및  $i$  모드 모드강성도에 대한  $j$  부재의 기여도  $K_{ij}^*$  는 다음과 같다.

$$K_i^* = \Phi_i^{*T} C^* \Phi_i^* \quad (3)$$

$$K_{ij}^* = \Phi_i^{*T} C_j^* \Phi_i^* \quad (4)$$

또한,  $i$  모드의 모드강성도에 대한  $j$  부재의 모드민감도(즉, 부재  $j$  가 모드  $i$  의 모드 변형에너지에서 차지하는 몫)는 다음과 같이 정의 된다. 비손상 구조계와 손상구조계의  $i$  모드와  $j$  부재에 대한 모드민감도는 각각 다음과 같다.

$$F_{ij} = K_{ij} / K_i \quad (5)$$

$$F_{ij}^* = K_{ij}^* / K_i^* \quad (6)$$

### 3.2 SID 특징추출 알고리즘

#### 3.2.1 손상지수법 A

Stubbs과 Kim 등은 모드  $i$  와 부재  $j$  의 비손상 모드민감도  $F_{ij}$  와 손상 모드민감도  $F_{ij}^*$  가 동일하다고 가정하여, 진동모드민감도의 상대적 변화로부터 부재 강성도의 상대적 변화를 감지하는 방법을 제시하였다(Stubbs et al., 1992). 식(5)과 식(6)으로부터 다음의 관계가 유도된다.

$$\frac{F_{ij}^*}{F_{ij}} = \frac{K_{ij}^*}{K_{ij}} \frac{K_i}{K_i^*} = 1 \quad (7)$$

여기서,  $K_{ij} = r_{ij} E_j$ 이며  $K_{ij}^* = K_{ij} + d K_{ij} = r_{ij}^* E_j^*$ 이다. 식(7)에 식(1)과 식(2) 및 식(3)과 식(4)을 각각 대입하고 다시 정리하면, 모드  $i$  와 부재  $j$  의 손상지수  $\beta_{ij}$  는 다음과 같이 유도된다.

$$\beta_{ij} = \frac{E_j}{E_j^*} = \frac{r_{ij}^* K_i}{r_{ij} K_i^*} \quad (8)$$

여기서,  $r_{ij} = \Phi_i^T C_{jo} \Phi_i$  이고  $r_{ij}^* = \Phi_i^{*T} C_{jo} \Phi_i^*$ 이며,

$\beta_{ij} > 1$ 인 위치에서 손상이 지시된다.

다음으로, 모드  $i$  와 부재  $j$  의 강성도 변화율을 계산하여 손상크기 지수  $\alpha_{ij}$  을 유도하였다.

$$E_j^* = E_j \left[ 1 + \frac{dE_j}{E_j} \right] = E_j (1 + \alpha_{ij}) \quad (9)$$

$$\alpha_{ij} = \frac{r_{ij} K_i^*}{r_{ij}^* K_i} - 1, \quad \alpha_{ij} \geq 1 \quad (10)$$

여기서, 부재  $j$  의 강도 감소는  $-1 \leq \alpha_{ij} < 0$  인 범위에서

지시된다.

식(8)과 식(10)의 손상지수들은 단일 진동모드에 대하여 수치적으로 불안정한 약조건 문제를 야기할 수 있다. 이는 임의의 모드에서 비 손상 모드민감도가 영에 가까운 위치에 인접한 부재에서 발생한다. 이 같은 문제는 수치적으로 강건한 형태의 손상지수를 구성함으로써 극복될 수 있다. 비 손상 모드민감도와 손상 모드민감도를 계측된  $nm$  복수 모드에 대하여 각각 대수 합하고 이들의 상대적 변화를 계산하여 구조계의  $j$  위치의 손상위치지수  $\beta_j$  를 유도하였다.

$$\beta_j = \frac{\sum_{i=1}^{nm} Num}{\sum_{i=1}^{nm} Den} \quad (11)$$

일단  $i$  위치가 손상부재로 예측되면,  $j$  위치의 손상도인  $\alpha_j$  는 식(8)과 식(11)의 관계로부터 유도된다.

$$\alpha_j = dE_j / E_j = 1/\beta_j - 1, \quad \alpha_j \geq -1 \quad (12)$$

#### 3.2.2 손상지수법 B

전술한 손상지수들은 구조계의 임의의 요소 크기가 매우 작을 때와 그 요소가 진동모드의 절점에 위치할 때에는 분모가 영"0"이 되는 약조건이 발생하여 해를 도출할 수 없다. 이 약조건을 극복하기 위하여 식(16)의 모드민감도의 좌표변화를 가정하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있었다(Stubbs et al., 1996).

$$\frac{F_{ij}^* + 1}{F_{ij} + 1} = \frac{(K_{ij}^* + K_i^*)}{(K_{ij} + K_i)} \cdot \frac{K_i}{K_i^*} = 1 \quad (13)$$

이 식으로부터 모드  $i$  와 부재  $j$  의 손상지수들인  $\beta_{ij}$  와  $\alpha_{ij}$  는 다음과 같이 유도된다.

$$\beta_{ij} = \frac{E_j}{E_j^*} = \frac{\left[ r_{ij}^* + \sum_{k=1}^{nc} r_{ik}^* \right] K_i}{\left[ r_{ij} + \sum_{k=1}^{nc} r_{ik} \right] K_i^*} \quad (14)$$

$$\alpha_{ij}^* = \frac{\left[ r_{ij} + \sum_{k=1}^{nc} r_{ik} \right] K_i^*}{\left[ r_{ij}^* + \sum_{k=1}^{nc} r_{ik}^* \right] K_i} - 1, \quad \alpha_{ij} \geq -1 \quad (15)$$

계측된  $nm$ 개 진동모드에 대하여,  $j$  위치의 손상지수  $\beta_j$  와  $\alpha_j$  는 다음과 같이 유도된다.

$$\beta_j = \frac{\sum_{i=1}^{nm} Num}{\sum_{i=1}^{nm} Den} \quad (16)$$

$$\alpha_j = dE_j / E_j = 1/\beta_j - 1, \quad \alpha_j \geq -1 \quad (17)$$

#### 3.2.3 손상지수법 C

전술된 손상지수법인 손상지수법 A와 손상지수법 B에서는 모드민감도 관계인 식(16)으로부터 미지 부재의 강도감소를 해로서 도출하기 위하여 두 개의 가정을 사용하였으며, 이들은 (1) 구조 부재의 손상전후 모드민감도의 변화는 무시할 만하다는 것과 (2) 손상전후의 모드민감도는 각각 좌표변환된 모드민감도들과 동일하다는 것이었다. 이 두 가정을 극복하기 위해

여 새로운 손상지수법을 다음과 같이 유도하였다.

모드  $i$  와 위치  $j$  에 대하여, 비 손상 모드변감도  $F_v$  와 손상 모드변감도  $F_v^*$  의 관계인 식(6)은 다음과 같이 일차 근사식으로 표현될 수 있다.

$$F_v^* = F_{ij} + dF_{ij} \quad (18)$$

여기서,  $dF_{ij}$  는 모드  $i$  와 위치  $j$  에서 모드변형에너지의 변화를 대표한다. 식(5)와 식(6)을 식(18)에 대입하여 미분하면  $dF_{ij}$  를 구할수 있다.

$$dF_{ij} = \frac{K_{ij}}{K_i} \left[ \frac{dK_{ij}}{K_v} - \frac{dK_i}{K_i} \right] \quad (19)$$

여기서  $dK_{ij}$ 는  $K_v$ 의 변화량을 의미한다. 모드강성도  $K_i$ 가 요소  $j$ 에 대한  $K_v$ 보다 매우 크다는 사실로부터, 식(19)은 다음과 같이 유도된다.

$$dF_{ij} \approx \frac{dK_{ij}}{K_i} \quad (20)$$

한편 기존의 연구결과를 사용하여 식(20)을 모드특성치의 변화와 연관시키면 다음과 같다(Stubbs *et al.*, 1990).

$$\begin{aligned} \frac{dK_{ij}}{K_i} &\cong g_i(\lambda, \Phi) \\ &= \frac{d\lambda_i}{\lambda_i} + \frac{dM_i}{M_i} \left[ 1 + \frac{d\lambda_i}{\lambda_i} \right] \end{aligned} \quad (21)$$

여기서,  $g_i(\lambda, \Phi)$ 는 손상으로 인한 모드  $i$ 의 모드특성치의 변화를 반영하는 무차원 계수이다. 다음으로, 구조물의 단일 위치에 손상이 발생하였다고 가정하면  $K_v$ 의 변화는  $E_j$ 의 함수이며,  $dK_{ij}$ 의 일차 근사식은 다음과 같다.

$$\frac{dK_{ij}}{K_i} = \left[ \frac{\partial K_{ij}}{\partial E_j} + \frac{\partial K_{ij}}{K_i} \frac{\partial r_{ij}}{\partial E_j} \right] \frac{dE_j}{K_i} \quad (22)$$

여기서,  $\partial K_{ij} / \partial E_j = r_{ij}$  이며  $\partial K_{ij} / \partial r_{ij} = E_j$ 이다. 식(21)을 식(22)에 대입하여 정리하면 모드  $i$  와 위치  $j$  에 대한 새로운 손상위치지수  $\beta_{ij}$  가 유도된다.

$$\beta_{ij} = \frac{E_j}{E_j^*} = \frac{r_{ij}^*}{r_i g_i(\lambda, \Phi) + r_{ij}} = \frac{Num}{Den} \quad (23)$$

모드  $i$  와 부재  $j$  의 강성도 변화율을 산정하여 손상크기 지수  $a_{ij}$  를 다음과 같이 유도하였다.

$$a_{ij} = \frac{1}{r_{ij}^*} (r_i g_i(\lambda, \Phi) + r_{ij}) - 1 \quad (24)$$

계측된  $nm$ 개 진동모드에 대하여, 위치  $j$  의 손상지수  $\beta_j$  와  $a_j$ 는 다음과 같다.

$$\beta_j = \sum_{i=1}^{nm} Num / \sum_{i=1}^{nm} Den \quad (25)$$

$$a_j = dE_j / E_j = 1 / \beta_j - 1, \quad a_j \geq -1 \quad (26)$$

### 3.3 손상 판정 알고리즘

전술된 손상지수법들에서 제안된 손상위치지수와 손상크기 지수를 특징벡터(feature vector)로 정의하고, 이들을 통계적 패턴인식기법을 통하여 정량적으로 해석하는 손상 판정 알고리즘을 선정하였다. Fig. 3은 손상지수의 확률적 통계분포 및 손상 부류와 비 손상 부류의 관계를 보여 준다. 정규손상지수  $Z$  가 비 손상 부류  $D_u$  와 손상 부류  $D_d$  중 어느 부류에 속하는 지를 판정한다. 먼저, 정규손상지수  $Z$  의 확률분포를 결정하고, 판정기준치로서 확률분포상의 신뢰도  $Z_0$  를 설정한다. 다음으로, 정규손상지수  $Z$  가 확률분포상에서 판정기준치  $Z_0$  를 초과하는 지의 여부로부터  $Z$  는 손상부류  $D_u$  또는 비 손상부류  $D_d$  로 결정된다(Schalkoff, 1992; Kosko, 1992).

손상지수법 각각의 경우에 대한 손상지수(특징벡터) 형태들을 Table 1에 정리하였다. 정규손상지수  $Z$ 는 Table 1의 손상위치지수  $\beta_{ij}$  와  $\beta_j$  및 손상크기 지수  $a_{ij}$  와  $a_j$  를 정규화 하여 구하였다. 먼저, 손상위치지수  $\beta_j$  는 샘플범위 ( $j=1, 2, \dots, NE$ )인 랜덤변수(정규분포로 가정)인 경우 다음과 같은 정규손상지수로 정의된다.

$$Z_j = (\beta_j - \bar{\beta}) / \sigma_\beta \quad (27)$$

여기서  $\bar{\beta}$  와  $\sigma_\beta$  는  $\beta_j$  의 평균 및 표준편차이다. 다음으로, 손상위치지수  $\beta_{ij}$ 는  $i$ 번째 모드와 샘플범위 ( $j=1, 2, \dots, NE$ )에 대하여 다음과 같은 정규손상지수로 정의된다.

$$Z_{ij} = (\beta_{ij} - \bar{\beta}_i) / \sigma_{\beta_i} \quad (28)$$

여기서,  $\bar{\beta}_i$  와  $\sigma_{\beta_i}$ 는  $\beta_{ij}$ 의  $i$ 번째 모드의 평균 및 표준편차이다. 다음으로, 손상크기 지수  $a_j$  의 경우, 정규손상지수는 위와 유사하게 정의된다.

$$Y_j = (\bar{a} - a_j) / \sigma_a \quad (29)$$

여기서,  $\bar{a}$  와  $\sigma_a$ 는  $a_j$ 의 평균 및 표준편차이다. 마지막으로, 손상크기 지수  $a_{ij}$ 로부터 다음의 정규손상지수를 얻는다.

$$Y_{ij} = (\bar{a}_i - a_{ij}) / \sigma_{a_i} \quad (30)$$

여기서,  $\bar{a}_i$  와  $\sigma_{a_i}$  는  $a_{ij}$  의  $i$  번째 모드의 평균 및 표준편차이다.

Table 1의 특징벡터들을 Fig. 3의 판정기준에 적용하여 손상 판정 알고리즘을 선정되었다. 손상 판정 알고리즘의 필요조건은 특징벡터의 진동모드별 독립성과 특징벡터의 해의 안정성 확보이다. 이들 조건에 근거하여 Table 2에 요약된 것과 같은 전체 6개의 손상 판정 알고리즘을 선정하였으며, PR-1~PR-6

으로 표기하였다. Table 2의  $K$  와  $K_i$  (첨자  $i$  는 모드  $i$  를 의미)는 Hypothesis Test의 신뢰도이며 Fig. 3의 확률분포상의 판정기준에 해당한다. 손상판정알고리즘 PR-1을 예로 들어 설명하면,  $Z_i \geq K$  일 때  $J \in D_d$  로 판정하며, 그 외의 범위에 있을 때에는  $J \in D_u$  으로 판정한다.

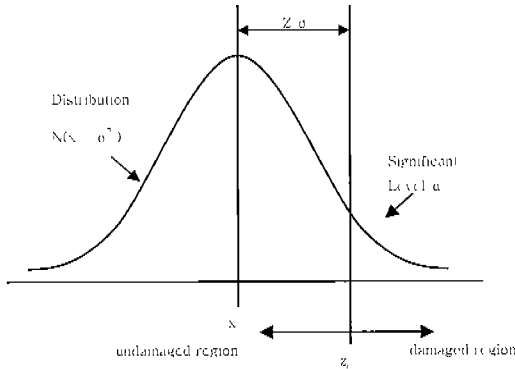


Fig. 3 Distribution and decision criterion for damage index

Table 1 Feature extraction algorithms and feature vectors

특징추출 알고리즘	특징벡터 형태			
	$\beta_{ij}$	$\beta_j$	$\alpha_{ij}$	$\alpha_j$
손상지수법 A	식(8)	식(11)	식(10)	식(12)
손상지수법 B	식(14)	식(16)	식(15)	식(17)
손상지수법 C	식(23)	식(25)	식(24)	식(26)

### 4. 수치 실험 및 패턴인식 알고리즘의 선정

#### 4.1 실험구조물

실험구조물은 Fig. 4와 같은 평면트러스 구조물이며, 격점 20개와 트러스 부재 40개로 구성되었다. 질점 17, 18, 19 및 20은 고정지점이며, 각 부재는 강관형 단면으로 단면치수는 Fig. 4에 기입되었다. 예로서, 부재 1은 외경 500mm 이고 두께 18.75mm 강관 단면이다. 모드해석은 유한요소 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 수행되었으며, 결과로서 초기 2개의 진동 모드의 고유진동수와 모드형상이 해석되었다.

평면트러스에 도입된 손상시나리오와 각 손상시나리오별 고유진동수 해석치가 Table 3에 요약되었다. 또한 초기트러스의 최초 2개 모드의 모드형상이 Fig. 5에 도시되었다. 전체 11개 손상시나리오가 선정되었으며, 손상시나리오는 모드진동에 상대적으로 덜 민감한 부재 (예, 부재2)와 다소 민감한 부재, 그리고 많이 민감한 부재들을 선정하였다. 또한 단일 부재에 손상이 발생한 경우와 복수 부재들에 손상이 발생한 경우를 포함하였다. 특히 부재 2의 경우에는, 손상도의 크기가 세 가지로 다른 경우를 검토하였다.

Table 2 Damage detection algorithm

PR 디텍터	손상 판정 알고리즘
PR-1	$(J \in D_d \text{ if } Z_i \geq K) \text{ OR } (J \in D_u \text{ if otherwise})$
PR-2	$(J \in D_d \text{ if } Y_i \geq K) \text{ OR } (J \in D_u \text{ if otherwise})$
PR-3	$(J \in D_d \text{ if } \bigcup (Z_i \geq K_i)) \text{ OR } (J \in D_u \text{ if otherwise})$
PR-4	$(J \in D_d \text{ if } \bigcap (Z_i \geq K_i)) \text{ OR } (J \in D_u \text{ if otherwise})$
PR-5	$(J \in D_d \text{ if } \bigcup (Y_i \geq K_i)) \text{ OR } (J \in D_u \text{ if otherwise})$
PR-6	$(J \in D_d \text{ if } \bigcap (Y_i \geq K_i)) \text{ OR } (J \in D_u \text{ if otherwise})$

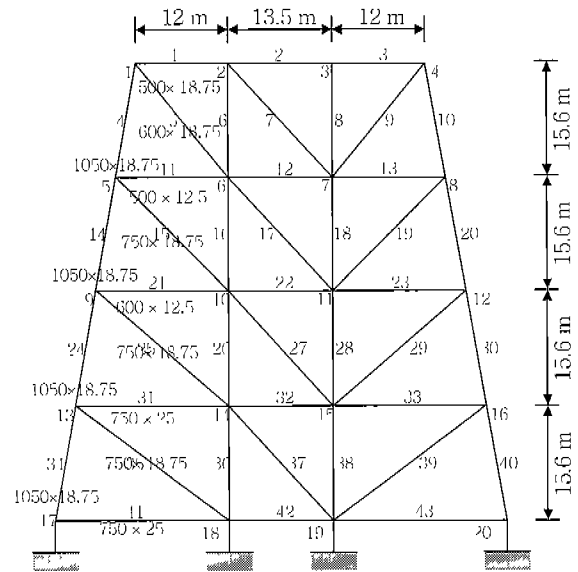


Fig. 4 Plane truss

#### 4.2 패턴인식체계 적용과정

패턴인식체계 적용실험은 손상지수법 A, B 및 C의 각각의 경우에 대하여 수행되었다. 각 손상지수법에 대한 패턴인식체계의 적용과정을 요약하면 다음과 같다. 첫 번째 단계로, 식(5)와 식(6)으로부터 손상발생 전후의 트러스 모델의 모드민감도가 계산되었다. 민감도 계산을 위해 필요한 강성도 행렬은 Fig. 4의 기하학적 특성과 재료적 특성으로부터 구할 수 있으며, Table 3의 고유진동수와 Fig. 5와 같은 손상 전후 초기 2개 모드형상이 입력되었다. 두 번째 단계로 손상지수를 계산하였다. Table 1의 손상지수들( $\beta_u, \beta_p, \alpha_u$  및  $\alpha_j$ ) 각각을 대상으로 계산을 수행하였다. 계산된 손상지수들은 식(27)-식(30)를 통해 정규손상지수로 변환되었다. 마지막 단계로, Table 2의 PR 디텍터들(PR-1~PR-6)을 계산하여 손상 부재와 비손상 부재로 분

류 판정하였다. 판정 기준치는  $K_1 = K_2 = K = 2.0$ (아래 첨자는 모드번호를 의미)였으며 모두 일정하게 신뢰도 한계 98.7%로 설정되었다.

4.3 수치실험 결과 및 분석

평면트러스에 대한 전체 11개 손상시나리오를 대상으로 손상이 추정되었다. 손상지수법 A, B 및 C 각각의 경우에 6개의 판정알고리즘(PR-1~PR-6)을 사용하여 손상추정결과를 얻었다. Table 4는 손상지수법 A의 경우, Table 5는 손상지수법 B의 경우, Table 6은 손상지수법 C의 경우이다. 손상 예측의 정확도는 Type I 오류와 Type II 오류 개념을 통해 산정 하였다. 여기서, Type I 오류는 존재하는 손상 위치를 예측하지 못한 오류이며, Type II 오류는 예측 위치가 실제 손상위치와 일치하지 않는 오류이다. 손상추정정확도 측정식으로 Detection Missing Error(DME)와 False Alarm Error (FAE)를 사용하였다(Kim, 1997; Stubbs *et al.*, 1992). 먼저, DME는 다음과 같다.

$$DME = \frac{1}{NT} \sum_{i=0}^N P_i \tag{31}$$

여기서, NT는 전체 손상위치 수,  $P_i$  는 Type I 오류의 수이다. 다음으로, FAE는 다음과 같다.

$$FAE = \frac{1}{NF} \sum_{i=0}^N Q_i \tag{32}$$

여기서, NF는 예측된 부재 수,  $Q_i$ 는 Type II 오류 수이다. 전체 11개 손상시나리오에 대한 Type I 오류 및 Type II 오류는 손상지수법과 PR-Detector별로 집계하여 Table 3-5에 정리하였다. 이상의 식(31)과 식(32)를 사용하여 Table 3-5의 손상예측 결과들의 정확도를 산정 하였으며 그 결과는 Table 7과 같다.

손상지수법 A의 결과는 다음과 같다. 손상판정알고리즘 PR-1과 PR-2의 경우에 손상추정의 정확도가 상대적으로 높았다. 모든 판정알고리즘에서 Type I 오류가 발생하였으며, 특히 PR-4와 PR-6에서 오류가 크게 나타났다. 이는 손상지수법 A의 사용을 통해서서는 발견할 수 없는 트러스 부재가 있음을 의미한다. 또한, PR-3과 PR-5의 경우에 Type II 오류가 상대적으로 매우 높았다. 손상지수법 B의 결과는 다음과 같다. 모든 손상판정알고리즘 (PR-1 ~ PR-6)에서 손상추정 정확도가 낮았으며, 특이할 점은 전반적으로 Type I 오류가 크게 예측되었다.

손상지수법 C의 결과는 다음과 같이 분석된다. 전체적으로 손상추정의 정확도가 매우 높게 나타났다. PR-1과 PR-2의 경우, Type I 오류는 없고 작은 Type II 오류를 보였다. 이는 손상지수법 C의 사용을 통해 모든 트러스 부재의 손상위치를 예측할 수 있음을 의미한다. PR-3과 PR-5의 경우에도 Type I 오류가 발생하지 않았으며 비교적 작은 Type II 오류를 보였다. PR-4와 PR-6의 경우에는 Type I 오류가 발생하였는데, 이를 통해 PR-4와 PR-6는 어떤 손상지수법의 경우에도 오류 발생이 큰 손상판정알고리즘임이 밝혀졌다. 이상의 결과를 근거로, 손상지수법 C와 PR-1 및 PR-2를 최적의 손상판정알고리즘으로 선정하였다.

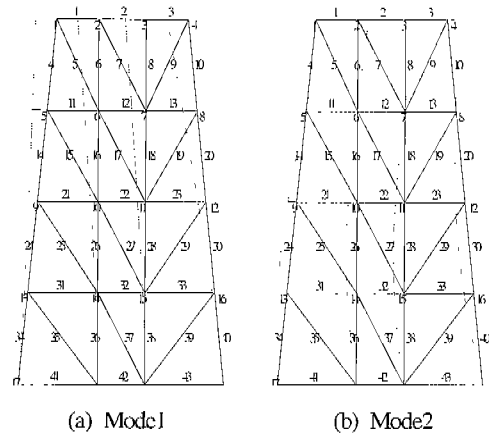


Fig. 5 In-Plane Mode Shapes of Truss

Table 3 Damage scenario and natural frequency of plane truss

Damage Case	Damage Scenario		Natural Frequency (Hz)	
	Elcment (Nodes)	$\Delta E / E$	Mode 1	Mode 2
Reference	-	-	5.1910	13.7072
1	2 (2-3)	-0.01	5.1910	13.7072
2	2 (2-3)	-0.1	5.1908	13.7070
3	2 (2-3)	-0.5	5.1895	13.7054
4	10 (4-8)	-0.1	5.1902	13.6911
5	22 (10-11)	-0.1	5.1971	13.7033
6	26 (10-14)	-0.1	5.1879	13.7045
7	27 (10-15)	-0.1	5.1763	13.7072
8	34 (13-17)	-0.1	5.1561	13.7049
9	10 (4-8)	-0.1	5.1801	13.6784
	25 (9-14)	-0.1		
	2 (2-3)	-0.1		
10	12 (6-7)	-0.1	5.1857	13.6955
	22 (10-11)	-0.1		
	10 (4-8)	-0.1		
11	27 (10-15)	-0.1	5.1408	13.6887
	34 (13-17)	-0.1		

5. 요약 및 결론

본 논문에서는 트러스 구조와 같이 다수의 복합거동이 발생하는 구조물의 손상위치 및 손상도를 소수의 진동모드 특성치와 패턴인식체계를 통하여 추정하는 패턴인식 손상추정방법을 제시하였다. 이 방법은 진동모드실험 및 구조해석에 기초한 진동모드민감도와 패턴인식이론을 응용하여 개발되었으며, 수치

**Table 4.** Damage prediction results for damage index a

Damage Case	Correct Location	PR-Detector Type VS Damage Prediction Results					
		PR -1	PR -2	PR -3	PR -4	PR -5	PR -6
1	2	2	2	2,3,28	2	2,3,28	2
2	2	2	2	2	-	2	-
3	2	2	2	2,3	2	2,3	2
4	10	10	10	2,10,21,27	-	2,10,21,27	-
5	22	22	22	22,27	22	22,27	22
6	26	26	26	26,28	26	26,28	-
7	27	16,27	16,27	27	-	27	-
8	34	34	34	34	34	34	34
9	10,25	10,25	10,25	10,25,27	-	10,25	-
10	2,12,22	2,12,22	2,12,22	2,-,-	-,-,-	2,-,21,22	-,-,-
11	10,27,34	10,-,34	10,-,34	2,10,16,-,34	10,-,-	2,10,-,34	-,-,-
Type I Errors		1	1	3	10	2	12
Type II Errors		1	1	13	0	11	0

**Table 5** Damage prediction results for damage index b

Damage Case	Correct Location	PR-Detector Type VS Damage Prediction Results					
		PR -1	PR -2	PR -3	PR -4	PR -5	PR -6
1	2	-,17,40	-,17,40	-,40	-	-,40	-
2	2	2	2	2,40	-	2,40	-
3	2	2	2	2	-	2	-
4	10	10	10	10	10	10	10
5	22	22	22	22	22	22	22
6	26	26,38	26,38	26,38	-	26,38	-
7	27	27	27	27	-	27	-
8	34	34	34	34,38	-	34,38	-
9	10,25	10,25	10,25	10,25	-,25	10,25	-,25
10	2,12,22	-,12,22	-,12,22	-,12,22	-,-,22	-,12,22	-,-,22
11	10,27,34	-,-,34	-,-,34	10,-,34,38	-,-,34	10,-,34,38	-,-,-
Type I Errors		4	4	3	11	3	12
Type II Errors		3	3	5	0	5	0

**Table 6** Damage prediction results for damage index c

Damage Case	Correct Location	PR-Detector Type VS Damage Prediction Results					
		PR -1	PR -2	PR -3	PR -4	PR -5	PR -6
1	2	2	2	2,3,28	2	2,3,28	2
2	2	2	2	2,3	2	2,3	2
3	2	2	2	2	2	2	2
4	10	10	10	2,10	10	2,10	10
5	22	22	22	21,22	22	21,22	22
6	26	26	26	26,28,34	26	26,28,34	26
7	27	16,27	16,27	27	27	27	27
8	34	34	34	34	34	34	34
9	10,25	10,25	10,25	10,25,27	10,25	10,25,27	10,25
10	2,12,22	2,12,22	2,12,22	2,12,22	2,12,22	2,12,22	2,12,22
11	10,27,34	10,27,34	10,27,34	10,27,34	-,-,34	10,27,34	-,-,34
Type I Errors		0	0	0	2	0	2
Type II Errors		1	1	8	0	8	0

**Table 7** Damage prediction accuracy

PR-Detector Type	Method A		Method B		Method C	
	DME	FAE	DME	FAE	DME	FAE
PR-1	0.0625	0.0625	0.25	0.2	0	0.059
PR-2	0.0625	0.0625	0.25	0.2	0	0.059
PR-3	0.1875	0.52	0.1875	0.277	0	0.333
PR-4	0.625	0	0.6875	0	0.125	0
PR-5	0.125	0.44	0.1875	0.277	0	0.333
PR-6	0.75	0	0.75	0	0.125	0

모델을 대상으로 그 적합성과 적용성이 검증되었다. 세부 연구는 세 단계로 수행되었다. 첫 번째 단계에서는 패턴인식체계를 이론적으로 고찰하였다. 패턴인식개념과 손상검색을 위한 패턴인식모델의 설계 조건이 검토되었다. 두 번째 단계에서는 트러스 구조 손상추정을 위한 패턴인식체계를 설계하였다. 먼저, 진동모드민감도 이론과 SID 구조손상검색 알고리즘 및 통계적 손상분류 알고리즘의 이론적 배경을 요약하였다. 다음으로, 기존의 발표된 손상지수법들과 새로이 유도된 손상지수법을 제

시하였다. 마지막으로, 손상분류 알고리즘을 손상지수법들에 적용하여 손상판정 알고리즘을 설계하였다. 마지막 단계로, 평면트러스의 수치실험을 통하여 제시된 패턴인식체계의 적합성이 검토되었으며, 동시에 최적의 손상지수법과 손상판정 알고리즘을 선정하였다.

평면트러스에 대한 전체 11개 손상시나리오에 대하여 손상 추정 실험을 수행하였다. 손상지수법 A, B 및 C 각각의 경우에 6개의 판정알고리즘이 사용되었다. 실험 결과는 아래와 같다.

(1) 손상지수법 A의 경우, 손상판정알고리즘들의 손상추정 정확도가 비교적 높았다. 하지만, 모든 판정알고리즘에서 Type I 오류(존재하는 손상 위치를 예측하지 못한 오류)가 발생하였으며 Type II 오류(예측 위치가 실제 손상위치와 일치하지 않는 오류)가 상대적으로 크게 발생하였다.

(2) 손상지수법 B의 경우, 손상판정알고리즘들의 손상추정 정확도가 비교적 낮았으며, 특이할 점은 전반적으로 Type I 오류가 크게 예측되었다.

(3) 손상지수법 C의 경우, 손상판정알고리즘들의 손상추정의 정확도가 매우 높게 나타났다. PR1-1과 PR1-2의 경우, Type I 오류는 없고 작은 Type II 오류를 보였다.

(4) 전체 6개의 판정알고리즘들에서 PR-1과 PR-2는 최고의 손상예측 정확도를 보였다.

이상의 결과를 근거로, 손상지수법 C와 판정알고리즘 PR-1 또는 PR-2를 사용하는 경우 최적의 패턴인식 손상추정체계를 구성할 수 있다고 분석되었다.

## 감사의 글

이 논문은 (1997년) 한국학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었습니다.

## 참 고 문 헌

- 김정태, 김태경(1996). "모드특성치에 의한 트러스 구조의 시스템동일화", 한국해양공학회논문집, 제10권, 제4호, pp 17~27.
- Idichandy, V. G. and Ganapathy, C.(1990). "Modal Parameters for Structural Integrity Monitoring of Fixed Offshore Platforms", *Experimental Mechanics*, Vol. 30, pp 382~391
- Kim, J. T.(1997). "Pattern Recognition of Modal Sensitivity for Damage Detection in Bridges," *Proc. of Smart Structures and Materials 1997*, SPIE, Vol. 4553, pp 217~226.
- Kosko, B.(1992). "Neural Networks for Signal Processing", Prentice-Hall International, USA.
- Schalkoff, R.(1992). "Pattern Recognition - Statistical, Structural and Neural Approaches", John Wiley & Sons, USA.
- Shahriver, F. and Bouwkamp, J. G.(1986). "Damage Detection in Offshore Platforms Using Vibration Information", *J. of Energy Resources Technology*, Vol. 108, pp 97~106.
- Stephens, J. E. and Yao, J. T. P.(1987). "Damage Assessment Using Response Measurements", *J. of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 113, No. 4, pp 787~801.
- Stubbs, N. and Kim, J. T.(1996). "Damage Localization in Structures Without Baseline Modal Parameters", *AIAA Journal*, Vol. 34, No. 8, pp 1644~1649.
- Stubbs, N. Broome, T. H. and Osegueda, R.(1990). "Nondestructive Construction Error Detection in Large Space Structures", *AIAA Journal*, Vol. 28, No. 1, pp 146~152.
- Stubbs, N., Kim, J. T. and Topole, K.(1992). "An Efficient and Robust Algorithm for Damage Localization in Offshore Platforms", *ASCE Tenth Structures Congress '92*, San Antonio, Texas, pp 543~546.

2000년 1월 12일 원고 접수

2000년 2월 8일 수정본 채택