

신경망을 이용한 구조물 접합부의 손상도 추정 Structural Joint Damage Assessment using Neural Networks

방은영* 이진학** 윤정방***
Bahng, Eun Young Yi, Jin Hak Yun, Chung Bang

ABSTRACT

Structural damage is used to be modeled through reductions in the stiffness of structural elements for the purpose of damage estimation of structural system. In this study, the concept of joint damage is employed for more realistic damage assessment of a steel structure. The joint damage is estimated damage based on the mode shape informations using neural networks. The beam-to-column connection in a steel frame structure is represented by a rotational spring at the fixed end of a beam element. The severity of joint damage is defined as the reduction ratio of the connection stiffness with respect to the value of the intact joint. The concept of the substructural identification is used for the localized damage assessment in a large structure. The feasibility of the proposed method is examined using an example with simulated data. It has been found that the joint damages can be reasonably estimated for the case with the measurements of the mode vectors subjected to noise.

1. 서론

고층빌딩, 교량, 해양구조물 등과 같은 토목구조물은 공용기간 내내 지진, 태풍, 교통, 파랑 등의 외부하중에 노출되어 있어, 시간이 경과함에 따라 노후화와 손상이 진행될 수 있다. 그러한 손상은 인명피해와 함께 재산상의 손실을 수반하는 구조물의 붕괴를 초래하기도 한다. 따라서, 적절한 수준의 유지, 보수 및 보강에 대한 정보를 수집하기 위하여 정기적인 구조안전검사가 필요하다.

안전검사와 관련하여 구조계 추정기법(System Identification)에 근거한 전역적 손상도추정법이 관심을 받고 있으며¹⁾, 최근의 계측 및 데이터 처리분야의 발전과 함께 적용분야가 확대되고 있다. 그러나, 육안조사, 방사선법 등의 국부검사가 하중이 크게 작용하는 접합부 등 취약부위를 그 대상으로 하는 것에 비하여 구조계 추정기법에 근거한 손상도추정은 주로 부재단위로 이루어지고 있어 실제 문제에 대한 적용에 어려움이 있을 수 있다. 이러한 이유로 인하여 본 연구에서 다루고자 하는 접합부에 대한 손상도추정이 요구된다고 할 수 있다. 본 논문에서는 반강결접합모델을 이용한 접합부에서의 손상모델을 제시하고, 이에 따른 접합부손상도를 신경망기법을 이용하여 추정하는 방법에 관하여 전개하고자 한다.

2. 보-기둥 접합부의 해석모델

일반적인 구조해석에서 철골구조물의 접합부는 강결접합과 핀접합으로 모델링되지만, 실제 접합부의 거동은 이러한 양극단의 사이에 위치한다. 즉, 일반규준에서 강결접합으로 정의된 접합부라

* Univ. of California, Irvine 박사후연구원과정

** 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

*** 한국과학기술원 토목공학과 교수, 정회원

할지라도 주위 부재에 작용하는 모멘트를 완전하게 전달할 수 없고, 전단력만을 전달하는 것으로 정의된 핀접합부도 모멘트의 일부를 전달하게 된다. 이와 같은 접합부는 완전한 강결접합도, 완전한 핀접합도 아닌 반강결접합(semi-rigid connection)상태이다. 철골구조물 접합부의 보-기둥 접합부는 그림 1과 같이 다양한 종류가 있다. 접합부의 변형은 크게 휨변형과 전단변형, 축방향변형의 세 가지로 나눌 수 있다. 이러한 세 가지 변형 중에서도 특히 휨변형은 철골구조물의 해석 및 설계시에 큰 영향을 줄 수 있다(그림 2). 보와 기둥을 연결하는 접합부의 유형에 따라 휨강성의 크기도 그림 3과 같이 각기 다르다. 철골구조물의 손상은 접합부에서 빈번하게 발생하고 그 손상은 접합부 휨강성의 저하로 나타나므로, 접합부 손상은 접합부의 휨강성 감소로 정의할 수 있을 것이다. 이와 같은 목적으로 접합부의 휨강성을 포함한 프레임의 모델을 제시하고, 그 모델에 적합하게 손상도를 정의하는 과정을 전개하였다.

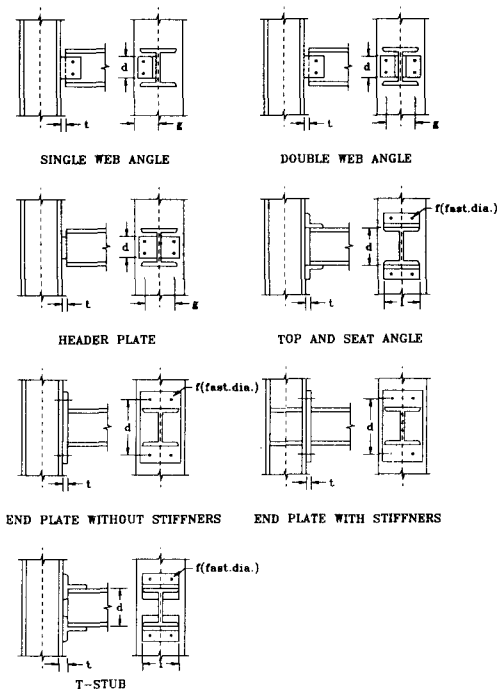


그림 1. 철골구조물에 사용되는 접합부 형태

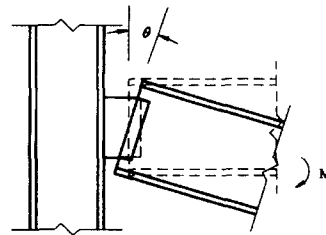


그림 2. 접합부의 휨변형

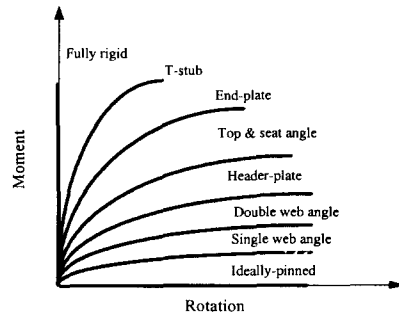


그림 3. 접합부 종류에 따른 모멘트-휨거동

2.1 접합부강성을 고려한 요소모형화

그림 4와 같이 보요소의 양단에 각각 휨강성 k_{r1} 과 k_{r2} 인 회전스프링을 도입하여 접합부를 모형화하였다. 손상모델의 모형화에서 사용된 프레임에 대한 가정은 다음과 같다.

첫째, 변형 전에 중립축에 대하여 직교하는 단면은 변형 후에도 중립축에 대하여 직교한다고 가정한다. 둘째, 와핑, 국부좌굴, 단면형상의 변화 등은 무시한다. 셋째, 접합부 요소의 길이는 0으로 가정한다. 접합부의 휨강성 k_r 는 다음과 같이 모멘트와 회전변위사이의 관계로 나타낼 수 있다.

$$k_r = \frac{\partial M_i}{\partial \phi_i} \quad (1)$$

여기서, M_i 은 접합부에 작용하는 모멘트이고, ϕ_i 는 접합부 양쪽 부재의 회전변위의 차로써 다음과 같다.

$$\phi_i = \theta_i^* - \bar{\theta}_i \quad (2)$$

여기서, $\bar{\theta}_i$ 은 보의 양끝을 잇는 국부좌표계에 대한 보요소의 절점회전변위이고, θ_i^* 는 국부좌표계에 대한 접합부 요소의 절점회전변위이다(그림 4).

한편, 접합부에 작용하는 모멘트와 회전변위사이의 평형관계로부터 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} M_i^* \\ \bar{M}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{r_i} & -k_{r_i} \\ -k_{r_i} & k_{r_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_i^* \\ \bar{\theta}_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

접합부를 제외한 보의 모멘트-회전변형 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\begin{bmatrix} \bar{M}_1 \\ \bar{M}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4EI/L & 2EI/L \\ 2EI/L & 4EI/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\theta}_1 \\ \bar{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

식 (3)과 (4)를 이용하여, 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} M_1^* \\ \bar{M}_1 \\ \bar{M}_2 \\ M_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{r_1} & -k_{r_1} & 0 & 0 \\ -k_{r_1} & k_{r_1} + 4EI/L & 2EI/L & 0 \\ 0 & 2EI/L & k_{r_2} + 4EI/L & -k_{r_2} \\ 0 & 0 & -k_{r_2} & k_{r_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1^* \\ \bar{\theta}_1 \\ \bar{\theta}_2 \\ \theta_2^* \end{bmatrix} \quad (5)$$

내부자유도 $\bar{\theta}_i$ 와 외부자유도 θ_i^* 를 분리하여 위의 식에서 내부자유도 ($\bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2$)를 제거하고, $\bar{M}_1 = \bar{M}_2 = 0$ 의 조건을 이용하면, 위의 식 (5)는 다음과 같이 모멘트와 회전변위의 관계로 정리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} M_1^* \\ M_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1^* \\ \theta_2^* \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서, 모멘트-회전변위 사이의 강성행렬은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{r_1} & 0 \\ 0 & k_{r_2} \end{bmatrix} - \frac{\begin{bmatrix} k_{r_1} & 0 \\ 0 & k_{r_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{r_2} + 4EI/L & 2EI/L \\ 2EI/L & k_{r_1} + 4EI/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{r_1} & 0 \\ 0 & k_{r_2} \end{bmatrix}}{\left(k_{r_1} + \frac{4EI}{L}\right)\left(k_{r_2} + \frac{4EI}{L}\right) - 4\left(\frac{EI}{L}\right)^2} \quad (7)$$

한편, 위의 식으로부터 힘의 평형관계와 적합관계를 이용하여 다음과 같이 전단력 Q_i 와 전단 변형 v_i 를 함께 고려할 수 있게 된다.

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ Q_1 \\ M_2 \\ Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/L & 1/L \\ 0 & 1 \\ -1/L & -1/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{L} & 0 & -\frac{1}{L} \\ 0 & \frac{1}{L} & 1 & -\frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ v_1 \\ \theta_2 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

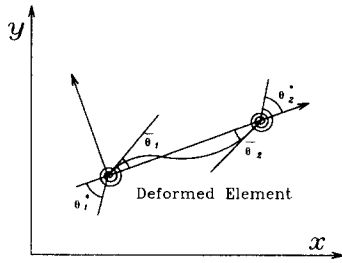


그림 4. 반강결접합 프레임의 절점부 휨변형

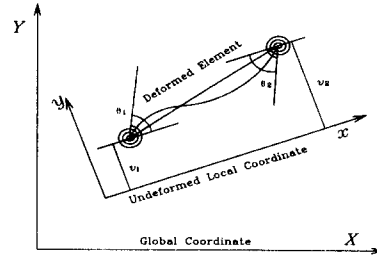


그림 5. 모멘트와 전단력이 작용하는 보의 경우

2.2 접합부 손상도의 정의

접합부 손상을 정의하기 위해서는 우선 손상 전의 각 접합부 강성(접합부의 기준강성 k_r^0)을 알고 있어야 한다. 기존의 여러 시험결과를 바탕으로 접합부의 기하학적 치수가 주어지면 해당 접합부에 대한 휨강성이나 초기 접선강성을 구할 수 있고, 이를 접합부의 기준강성으로 사용할 수 있다²⁾. 본 연구에서는 이들 연구 중 다항식으로 회귀곡선을 정리한 Frye and Morris의 결과를 이용하여 접합부의 기준강성을 산정하였다. 표 1에서는 몇 가지 대표적인 볼트접합부에 대한 Frye and Morris의 제안식을 예로 들었다.

앞서 언급되었듯이, 접합부 손상은 접합부 강성의 감소로 정량화할 수 있다. 접합부 손상도 a_j 는 기준접합부강성(k_r^0)과 손상된 접합부강성(k_r)의 비로부터 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$a_j = 1 - \frac{k_r}{k_r^0}, \quad 0 \leq a_j \leq 1.0 \quad (9)$$

표 1 접합부의 모멘트-회전변형 관계식²⁾

접합부형태	표준 모멘트-회전함수	표준화 상수
End plate connection without column stiffeners	$\theta = 1.83(KM) \times 10^{-3} - 1.04(KM)^3 \times 10^{-4} + 6.38(KM)^5 \times 10^{-8}$	$K = d^{-2.4} t^{-0.4} f^{1.1}$
End plate connection with column stiffeners	$\theta = 1.79(KM) \times 10^{-3} + 1.76(KM)^3 \times 10^{-4} + 2.04(KM)^5 \times 10^{-4}$	$K = d^{-2.4} t^{-0.6}$
T-Stub connection	$\theta = 2.1(KM) \times 10^{-4} + 6.2(KM)^3 \times 10^{-6} - 7.6(KM)^5 \times 10^{-9}$	$K = d^{-1.5} t^{-0.5} f^{-1.1} l^{-0.7}$

3. 신경망기법과 부분구조법에 의한 국부구조손상도 추정

본 논문에서는 정적 신경망 모델인 다층퍼셉트론(multi-layer perceptron) 신경망을 이용하여 접합부에 대한 구조손상도를 추정하는 방법을 제시하였다. 다층퍼셉트론 신경망의 기본적인 구조와 학습 알고리즘은 여러 참고문헌에서 자세히 다루고 있으므로 여기서는 연구에서 사용된 신경망의 구조 및 학습방법에 대하여 설명하고자 한다. 신경망의 학습에는 일반적으로 역전파학습알고리즘(back-propagation learning algorithm)이 가장 많이 사용되며, 본 논문에서도 이 기본적인 알고리즘을 사용하였다. 접합부에 대한 손상도추정을 위한 신경망 구조는 자유진동수 및 진동모드벡터 등의 예측자료를 입력층으로 하고, 이 때 대응하는 구조물의 손상도를 출력층으로 사용하였다. 신경망의 탁월한 학습기능으로 인하여 기존의 방법으로 쉽게 해결할 수 없는 역해석문제(back analysis

problem)를 효과적으로 취급할 수 있다^{3),4)}.

한편, 많은 미지 계수를 포함한 구조계를 추정하기 위해, 한번에 모든 계수를 추정하는 것은 계산시간이 많이 소요될 뿐만 아니라, 경우에 따라서는 추정 자체가 불가능할지도 모른다. 이점을 극복하기 위해, 추정할 영역을 구조물의 일부분의 구조계수로 축소하여 해결하는 것이 바람직하다. 특히 이러한 시도는 실제 구조물의 손상은 전영역에 걸쳐 발생하는 것이 아니라 일부 취약 부분에서 일어난다는 사실에 의해 그 정당성을 부여할 수 있고, 국부 구조계 추정법이 해당 알고리즘의 수렴성과 추정의 정확도의 관점에서 효율적이라는 것이 확인되었다⁵⁾.

4. 예제해석

4.1 예제구조물

제안된 방법을 검증하기 위해 그림 6의 프레임구조를 예제로 사용하였다. 본 예제는 실제구조물에 대한 계측을 수행한 것은 아니며 수치시뮬레이션으로 수행하였다. 구조물의 기하/재료 특성치를 표 2에 정리하였다. 내부 부분구조는 그림 6에서 진하게 표시된 영역이며, 6개의 보요소 양끝단의 접합부 손상도를 추정하는 것을 목적으로 한다. 손상이 없는 상태에 대한 자유진동특성치는 그림 6과 같다. 그림 7에 표시된 부분구조내부의 15개의 병진 자유도에 해당하는 저차 2개 모드벡터 성분을 계측할 수 있다고 가정한다.

본 예제에서는 접합부의 형태를 일반적으로 많이 이용되는 단부평판접합부(End Plate Connection with Column Stiffener)로 고려하였으며, 접합부 기준강성을 $3.0 \times 10^8 N \cdot m / rad$ 으로 가정하였다.

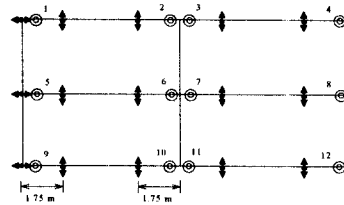
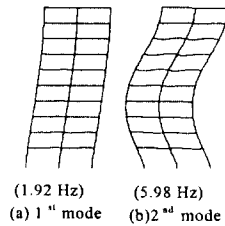
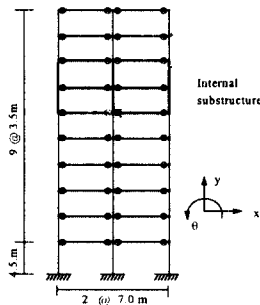


그림 6. 프레임 예제구조물 및 저차 2개 모드형상

그림 7. 센서 위치와 접합부의 번호

표 2 구조물의 기하/재료 특성치

	단면종류	단면적 m^2	$I (m^4)$	밀도 (kg/m^3)
보	W24×55	1.04×10^{-2}	5.62×10^{-4}	7850
기둥	W14×145	2.78×10^{-2}	7.12×10^{-4}	7850

(I:단면2차모멘트, 탄성계수=E=210GPa)

4.2 신경망의 구조

신경망의 입력층에서 사용되는 물리량은 계측 가능한 병진자유도에 대한 모드벡터값과 고유주파수로써, 첫 번째 모드의 경우 접합부강성에 대한 영향이 거의 없으므로, 두 번째 모드에 대한 고유주파수와 15개의 모드벡터값을 사용하였다. 출력은 식 (8)에서 정의된 접합부의 손상도로써, 12개 접합부의 손상도를 사용하였다. 1000개의 훈련패턴과 100개의 시험패턴을 효율적으로 준비하기 위하여 확률적인 샘플링기법인 Latin Hypercube Sampling(LHS) 기법을 사용하였다⁶⁾. 각 경우의

패턴을 만들기 위하여 모드 및 고유주파수를 분할모드합성법(Component Mode Synthesis)을 사용하여 계산하였다⁷⁾.

분할모드합성법으로 모드벡터를 구하면, 유한요소 절점의 성분만 구할 수 있는데 이로부터 그림 9에 표시된 계측점에 대한 모드성분을 효율적으로 구하기 위해, Cubic Hermitian function을 형상함수로 사용하여 근사적으로 구할 수 있다. 요소 내의 임의 위치(x)에서의 변형(모드성분)은 아래와 같이 표현될 수 있다. 요소 양끝의 경계조건을 대입하고, 양 절점의 전역적 회전자유도 (θ_1^* , θ_2^*), 병진자유도 (y_1 , y_2), 접합부 휨강성 (k_{r_1} , k_{r_2})을 사용하여 정리하면 다음과 같다⁸⁾.

$$y = (\rho_1^2 \rho_2 L - \rho_1 \rho_2^2 L) \begin{bmatrix} 4EI/L + k_{r_1} & 2EI/L \\ 2EI/L & 4EI/L + k_{r_2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} k_{r_1} & 0 \\ 0 & k_{r_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/L & 1 & -1/L & 0 \\ 1/L & 0 & -1/L & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_1 \\ \theta_1^* \\ y_2 \\ \theta_2^* \end{Bmatrix} + \rho_1 y_1 + \rho_2 y_2 \quad (10)$$

여기서, $\rho_1 = (1-x/L)$, $\rho_2 = x/L$ 이다.

신경망의 구조는 여러 번의 시행오차 결과, 그림 8과 같은 2개의 은닉층을 가지는 구조로 결정되었다. 입력노드의 수는 16, 나머지 두개의 은닉층과 출력층의 노드의 수는 모두 12이다. 훈련패턴의 수 1000개는 VC차원 이론에 근거하여 연결강도의 수의 약 두배로 결정된 것이다⁹⁾.

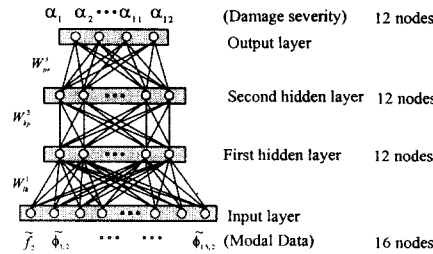


그림 8. 접합부 손상도추정을 위한 다층퍼셉트론 구조

4.3 접합부 손상도의 추정

표 4에서는 모드벡터의 계측오차의 영향과 노이즈 첨가학습(Noise-injection learning)¹⁰⁾의 효과를 보였다. 노이즈첨가 학습이 아닌 경우의 0% 노이즈를 가진 훈련패턴집합의 평균오차는 0.051이지만, 3%의 노이즈를 첨가한 시험패턴집합에 대한 시험오차는 평균 0.104로 증가한다. 그러나, 3%의 노이즈를 첨가한 훈련패턴을 사용하여 학습한 후, 3%의 노이즈를 첨가한 시험패턴집합에 대한 시험오차는 평균 0.061로 감소함을 알 수 있다. 이것은 노이즈레벨이 5%의 경우에도 유사하다. 이를 통하여 계측오차의 영향을 노이즈 첨가학습으로 어느 정도 억제할 수 있음을 확인할 수 있다.

그림 9는 가정된 손상 시나리오에 대한 시험결과이다. 가정된 손상시나리오는 접합부 5번과 6번의 손상도가 각각 0.4, 0.6인 경우이다. 손상이 없는 경우, 구조물의 두 번째 모드의 고유주파수는 5.98Hz였으며, 손상시의 고유주파수는 5.94Hz로 고유주파수의 변화는 거의 없는 경우이다. 하지만, 모드형상을 비교하면 비손상시 계측점에서의 모드벡터는 $\{-0.743, -0.059, 0.632, 0.036, -0.072, 0.072, -0.036, 0.050, -0.079, 0.079, -0.050, 0.046, -0.071, 0.071, -0.046\}$ 이고, 손상시의 모드벡터는 $\{-0.743, -0.067, 0.633, 0.036, -0.070, 0.071, -0.036, 0.051, -0.077, 0.078, -0.051, 0.029, -0.084, 0.040, -0.064\}$ 으로써 15개 성분중 마지막 네 성분에서 비교적 확실한 변화가 있으며, 이러한 변화에 의하여 손상도를 추정할 수 있음을 알 수 있다.

표 5는 훈련패턴과 시험패턴에 같은 노이즈 레벨에 대한 학습 후 시험결과이다. 접합부 2, 3, 6, 7, 10의 추정오차가 다른 접합부 보다 약간 크게 나타나는 데, 그 이유는 이러한 접합부에서 연결되는 부재의 수가 4개로써 3개의 부재가 만나는 다른 경우보다 복잡하기 때문으로 판단된다.

본 논문에서는 기하 및 재료특성치의 측정오차에 기인한 모델링오차를 고려하여, 그들의 영향을 알아보았다. 우선, 훈련패턴과 시험패턴을 구하는 과정에서 보와 기둥의 휨강성과 부재의 밀도에 무작위 오차를 포함시켰다. 표 6은 이러한 모델링오차에 대한 조사 결과이다. 휨강성에 RMS단위로 10%의 섭동을 가하였을 때의 평균절대시험오차는 모델링오차를 고려하지 않았을 때보다 27.9%가 증가하였고, RMS단위로 20%의 섭동을 가하였을 때는 50.8%가 증가하였다. 그러나 그 경우 오차도 절대오차의 관점에서 볼 때 0.092 정도로 여전히 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있었다. 한편, 밀도에 대한 섭동에는 거의 영향을 받지 않았다.

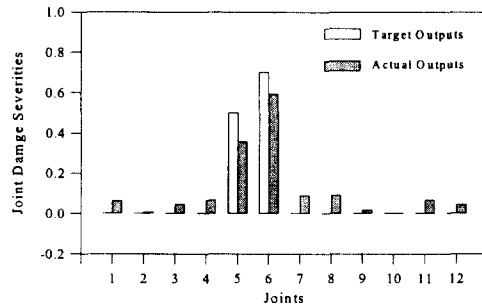


그림 9. 손상시나리오에 대한 손상도 추정결과 (평균절대오차 =0.066)

표 3. 여러 노이즈 레벨에 따른 각 접합부의 평균시험오차

노이즈 레벨 (RMS)	시험패턴			
	0%	3%	5%	
훈련패턴	0%	0.051 (0.061)	0.055 (0.061)	0.057 (0.069)
	3%	0.104 (0.092)	0.061 (0.064)	0.062 (0.072)
	5%	0.155 (0.142)	0.075 (0.072)	0.068 (0.072)

(참고: 괄호내의 값은 시험오차의 표준편차이다.)

표 4. 100개의 시험패턴에 대한 절대시험오차의 평균

접합부	평균절대오차		
	노이즈 레벨		
	0%	3%	5%
1	0.044	0.057	0.054
2	0.065	0.078	0.073
3	0.061	0.071	0.089
4	0.043	0.049	0.071
5	0.036	0.055	0.073
6	0.058	0.074	0.088
7	0.066	0.071	0.066
8	0.039	0.054	0.056
9	0.055	0.057	0.070
10	0.057	0.071	0.071
11	0.045	0.048	0.048
12	0.041	0.048	0.059
평균	0.051	0.061	0.068

표 5. 모델 불확실성에 따른 평균 시험 오차

섭동된 파라미터	섭동레벨 (RMS)	평균 절대시험오차	증가된 오차
	0 %	0.061	
각 부재의 휨강성(EI)	10 %	0.078	28 %
	20 %	0.092	51 %
각 부재의 밀도	10 %	0.062	2 %
	20 %	0.063	3 %

5. 결론

모드벡터를 이용하여 철골구조물의 접합부 강성 및 손상도를 추정하기 위한 신경망 기법을 제안하였다. 접합부 강성은 보요소의 양끝에 회전스프링을 첨가하여 모델링하였다.

예제해석으로 평면 철골구조물을 사용하였으며, 보와 기둥의 접합부 주위에서 보쪽의 접합부에만 휨 유연성이 존재한다고 가정하였다. 손상도추정 결과의 평균 절대시험오차는 0.068이었다. 신경망 출력패턴의 범위가 0.0 ~ 1.0인 것을 고려할 때, 매우 정확한 추정결과임을 알 수 있다. 또한 부재간 연결이 단순한 접합부의 추정결과가 상대적으로 좋은 결과를 주고 있다. 모델링오차의 영향을 조사하기 위해, 패턴을 계산하는 과정에서, 모든 부재의 휨강성과 질량(밀도)에 무작위 섭동을 가하였다. 조사 결과 20%의 휨강성의 오차에 의해 50.8%의 시험오차 증가가 있었으나 이 경우의 시험오차는 0.092정도로써 아직도 유효한 수준의 추정오차임을 확인할 수 있었다. 한편 밀도의 오차에는 추정오차의 증가가 거의 나타나지 않아 무시해도 무방할 것으로 판단된다. 결론적으로 신경망기법으로 철골구조물의 접합부 손상도를 비교적 정확하게 추정할 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것으로, 연구비를 지원해 준 한국과학재단에 감사드립니다.

참고문헌

1. Ghanem, R., and Shinozuka, M. (1995), "Structural-system identification I: theory," J Engrg. Mech., ASCE, Vol.121, No.2, pp.255-26.
2. Frye, J.M., and Morris, G.A. (1975), "Analysis of flexibly connected steel frames," Canadian Journal of Civil Engineering, vol.2, pp.280-291.
3. Wu, X., Ghaboussi, J., and Garrett J. H., Jr, (1992). "Use of neural networks in detection of structural damage," Comput. & Struct., Vol.42, No.4, pp.649-659.
4. Yun, C.B., and Bahng, E.Y., (1996). "Substructural identification of structures using neural networks," Proc., NSF Workshop on Structural Reliability in Bridge Engineering, Boulder, CO, USA, pp.322-327.
5. Koh, C.G., See, L.M., and Balendra, T. (1991), "Estimation of structural parameters in the time domain: a substructure approach," Earthquake Engrg. and Struct. Dynamics, Vol.20, pp.787-801.
6. Press, W., Teukolsky, S.A., Vetterling, W. T., and Flannery, B. P. (1992), "Numerical Recipes in C-The Art of Scientific Computing," Cambridge university press, New York, pp.315.
7. Craig, R. R., Jr, and Bampton, M.C.C. (1968), "Coupling of substructures for dynamic analysis," AIAA J, Vol.6, No.7, 1313-1319.
8. Chan, S.L., and Ho, G.W.M. (1994), "Nonlinear vibration analysis of steel frames with semirigid connections.," J. Struct. Engrg., ASCE, Vol.120, No.4, pp.1075-1087.
9. Vapnik, V.N., and Chervonenkis, A.Ya.,(1971), "On the uniform convergence of relative frequencies of events to their probabilities, Theory of probability and its applications," Vol.16, No.2,pp.264-280.
10. Matsuoka, K. (1992). "Noise injection into inputs in back-propagation learning," IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Vol.22, No.3, pp.436-440.