대한기계학회 2001년도 추계학술대회논문집 A pp. 635~640 KSME 01F105

동적강성행렬을 이용한 구조물의 손상검출기법

신 진 호† · 이 우 식*

Structural Damage Identification by Using Dynamic Stiffness Matrix

Jinho Shin, Usik Lee

Key Words : Structural Damage(구조손상), Dynamic Stiffness(동적강성), Damage Identification(손상검출)

Abstract

This paper introduces a frequency-domain method of structural damage identification. It is formulated in a general form from the dynamic stiffness equation of motion for a structure and then applied to a beam structure. The appealing features of the present damage identification method are: (1) it requires only the frequency response functions experimentally measured from damaged structure as the input data, and (2) it can locate and quantify many local damages at the same time. The feasibility of the present damage identification method is tested through some numerically simulated damage identification analyses and then experimental verification is conducted for a cantilevered beam with damage caused by introducing three slots.

1. 서 론

구조물내의 손상은 진동응답, 고유진동수, 모우드형상(mode shapes) 및 모우드감쇠(modal damping)와 같은 구조의 동적특성의 변화를 유발한다. 이는 역으로 구조의 동적특성의 변화를 손상의 위치와 크기를 탐지하는데 사용할 수 있다. 그래서 많은 구조손상검출기법(SDIM)들이 문헌에 나와있다.

Banks 등[1]에 의하면 모우드 데이터를 근간으로 하는 구조손상검출기법은 모우드 데이터가 간접적으로 측정된 것이고 측정 오차와 모우드 적출 오차에 의해 영향을 받기 때문에 단점이 있으며, 모우드 데이터를 완벽하게 구성하기 위해서는 많은 수의 센서가 필요하기 때문에 공학적으로 합리적이지 않다. 또한, FEM(유한요소법)을 근간으로 하는 고유치문제를 이용한 구조손상검출기법이 있다. FEM 의 결점은 고주파 영역에서 만족할만한 동적해를 얻기 위해서는 매우 미세한 메시(mesh)를 사용해야 하기 때문에 자유도의 수가 엄청나게 증가한다는 것이다. 따라서 모우드 데이터와 유한요소모델의 사용으로 인한 결점을 극복할 손상검출기법을 개발할 필요가 있다.

모우드 데이터와 유한요소모델은 각각 FRF 데이터와 스펙트럴요소모델(spectral element model)로 대체할 수 있다. FRF 데이터는 구조로부터 직접 측정되어 모우드 적출 오차가 없기 때문에 모우드 데이터 보다 신뢰성이 있다. 또한 모우드 데이터와 비교하여 FRF 데이터의 큰 장점은 모우드 데이터는 공진 주위에 매우 한정된 FRF 데이터로부터 추출한 것이므로 FRF 데이터가 모우드 데이터 보다 원하는 주파수 영역에서 더 많은 손상정보를 제공하는 것이다[3]. 일반 FEM 과 비교하여 SEM(스펙트럴요소법)은 매우 정확한 동적해를 제공하기 때문에 엄밀한 해석기법에 해당한다[4,5]. SEM 에서 사용하는 스펙트럴요소행렬은 지배방정식과 경계조건을 모두 만족하는 형상함수를 사용하여 엄격하게 유도된 주파수의 함수인 동적요소강성행렬(dynamic element stiffness matrix)이다. 동적요소강성행렬은 전체 구조물에 대한 동적강성행렬(dynamic stiffness matrix)을 유도하기 위하여 일반 FEM 에서 사용하는 조합(assembly)기법에 따라 조합할 수 있다. 단지 일반 FEM 에서와의 차이점은 조합과

† 인하대학교 기계공학과 대학원
* 회원, 인하대학교 기계공학과
E-mail : ulee@inha.ac.kr
TEL : (032)860-7318 FAX : (032)866-1434

정이 모든 주파수 성분에서 반복적으로 수행된다는 것이다.

본 논문의 구조손상검출기법은 위의 FRF 의 장점과 SEM 의 정확성을 이용하여 동적강성행렬식으로 표현된 구조물의 운동방정식으로부터 유도하였고 이를 보구조물에 적용하여 그 결과를 고찰하였다

2. 손상검출 알고리즘

손상이 없는 구조물의 동력학은 다음과 같이 표현할 수 있다[5].

$$[\mathbf{S}(\omega)]\{\mathbf{U}(\omega)\}=\{\mathbf{P}(\omega)\} \tag{1}$$

여기서 [S]는 손상이 없는 구조물의 동적강성행렬이고 주파수의 함수이다. {U}는 손상이 없는 구조물의 절점자유도(nodal DOFs) 벡터의 스펙트럴 성분이고,벡터{P}는 외부에서 가해지는 절점력(nodal forces) 벡터의 스펙트럴 성분이다.

동일한 구조물에 손상이 있고, 식(1)에서와 같은 절점력이 작용한다고 가정할 때 손상된 구조물의 동력학은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[\overline{\mathbf{S}}(\omega)]\{\overline{\mathbf{U}}(\omega)\}=\{\mathbf{P}(\omega)\} \tag{2}$$

여기서 $[\overline{\mathbf{S}}]$는 손상된 구조물의 동적강성행렬이고 $\{\overline{\mathbf{U}}\}$는 손상된 구조물의 절점자유도 벡터이다.

손상이 없는 구조물의 구조모델을 나타내는 [S]는 실험으로 측정한 진동 데이터와 해석적으로 구한 진동데이터가 일치하도록 이미 개선되었다고 가정하면 식(1)의 행렬[S]는 이미 알고 있는값에 해당한다. 또한 절점자유도 벡터 $\{\overline{\mathbf{U}}\}$도 손상된 구조물로부터 직접 측정하였기 때문에 알고 있는 값이다. 그러나 손상 상태의 동적강성행렬 $[\overline{\mathbf{S}}]$는 현재의 손상 상태에 따라 결정되기 때문에 모르는 값에 해당한다. 행렬 $[\overline{\mathbf{S}}]$은 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$[\overline{\mathbf{S}}(\omega)]=[\mathbf{S}(\omega)]+[\Delta\mathbf{S}(\omega)] \tag{3}$$

여기서[ΔS]은 손상에 의해 발생된 섭동 동적강성행렬이다. 식(3)을 식(2)에 대입하면 다음과 같다.

$$\{\mathbf{P}(\omega)\}-[\mathbf{S}(\omega)]\{\overline{\mathbf{U}}(\omega)\}=[\Delta\mathbf{S}(\omega)]\{\overline{\mathbf{U}}(\omega)\} \tag{4}$$

절점력 벡터{P}는 다음과 같이 부벡터로 표현할 수 있다.

$$\{\mathbf{P}(\omega)\}=\begin{Bmatrix}\mathbf{P}_m(\omega)\\ \mathbf{P}_s(\omega)\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\mathbf{F}(\omega)\\ \mathbf{0}\end{Bmatrix} \tag{5}$$

여기서 {0}은 영벡터이다. 식(5)와 같은 방법으로 벡터 $\{\overline{\mathbf{U}}\}$는 계속 존속하는 주절점자유도(master nodal DOFs) $\{\overline{\mathbf{U}}_m\}$와 절점자유도의 수를 축소하기 위해 제거되는 부절점자유도(slave nodal DOFs) $\{\overline{\mathbf{U}}_s\}$로 분리하여 표현할 수 있다.

$$\{\overline{\mathbf{U}}(\omega)\}=\begin{Bmatrix}\overline{\mathbf{U}}_m(\omega)\\ \overline{\mathbf{U}}_s(\omega)\end{Bmatrix} \tag{6}$$

유사하게 행렬 [S]와 $[\overline{\mathbf{S}}]$도 부행렬로 표현할 수 있다.

식(5)와 식(6)을 식(2)에 대입하면 벡터 $\{\overline{\mathbf{U}}\}$와 벡터 $\{\overline{\mathbf{U}}_m\}$사이의 관계를 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\{\overline{\mathbf{U}}(\omega)\}=[\overline{\mathbf{T}}(\omega)]\{\overline{\mathbf{U}}_m(\omega)\} \tag{7}$$

여기서

$$[\overline{\mathbf{T}}(\omega)]=[\mathbf{T}(\omega)]+[\Delta\mathbf{T}(\omega)] \tag{8}$$

$$[\Delta\mathbf{T}(\omega)]=\begin{bmatrix}\mathbf{0}\\ \Delta\mathbf{t}(\omega)\end{bmatrix} \tag{9}$$

식(7)을 (4)에 대입하면 다음식을 얻을 수 있다.

$$\{\mathbf{F}(\omega)\}-[\mathbf{X}(\omega)]\{\overline{\mathbf{U}}_m(\omega)\}=[\mathbf{Y}(\omega)]\{\overline{\mathbf{U}}_m(\omega)\} \tag{10}$$

여기서

$$\begin{aligned}[\mathbf{X}(\omega)]&=[\mathbf{S}_{mm}]-[\mathbf{S}_{ms}][\mathbf{S}_{ss}]^{-1}[\mathbf{S}_{sm}]\\ [\mathbf{Y}(\omega)]&=[\mathbf{T}]^{\mathrm{T}}[\Delta\mathbf{S}][\mathbf{T}]\end{aligned} \tag{11}$$

손상의 효과는 섭동 동적강성행렬 [ΔS]에 의해 식(10)의 오른쪽 항에서 나타나고 식(10)을 이너턴스(inertance) FRF $\{\mathbf{A}_m\}$로 표현하면 다음과 같다.

$$\{\delta\}+\frac{1}{\omega^2}[\mathbf{X}(\omega)]\{\mathbf{A}_m(\omega)\}=-\frac{1}{\omega^2}[\mathbf{Y}(\omega)]\{\mathbf{A}_m(\omega)\} \tag{12}$$

여기서{δ}는 절점력 위치벡터이고 절점력이 작용하는 요소에서만 1의 값을 갖는다.

손상이 없는 구조물 전체에 대한 동적강성행렬은 다음과 같이 동적요소강성행렬을 조합하여 구성할 수 있다

$$[\mathbf{S}(\omega)]=\sum_{k=1}^{N}[\mathbf{L}_k]^{\mathrm{T}}[\mathbf{s}_k(\omega)][\mathbf{L}_k] \tag{13}$$

여기서 N은 유한요소의 갯수이고 $[\mathbf{s}_k]$는 k번째 요

소의 동적요소강성행렬이다. 행렬[$\mathbf{L}_k$]는 조합할때에 [$\mathbf{s}_k$]의 요소를 [S]에 위치시켜주는 행렬이다. 이와 마찬가지로 섭동 동적강성행렬[ΔS]도 식(13)과 같은 형태로 조합하여 구할 수 있다.

Fig 1 에서 볼 수 있듯이 비 균일한 손상을 내재한 작은 유한구조요소는 균일한 손상을 갖고 있는 유효(effective) 유한구조요소로 표현할 수 있다. 그리고 섭동 행렬[$\Delta\mathbf{s}_k$]은 다음과 같이 [$\mathbf{s}_k$]와 연관지어 근사화할 수 있다.

$$[\Delta\mathbf{s}_k(\omega)] \cong \mathrm{D}_k[\mathbf{s}_k(\omega=0)] = \mathrm{D}_k[\mathbf{k}_k] \qquad (14)$$

여기서 D_k 는 k 번째 요소에 균일하게 분포된 유효손상크기이고, [$\mathbf{k}_k$]는 k 번째 요소의 일반 FEM 에서의 강성행렬이다.

식(11b)와 식(14)를 이용하여, 식(12)의 오른쪽 항은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$-\frac{1}{\omega^2}[\mathbf{Y}(\omega)]\{\mathbf{A}_m(\omega)\} = [\boldsymbol{\Phi}(\omega)]\{\mathbf{D}\} \qquad (15)$$

여기서

$$[\boldsymbol{\Phi}(\omega)] = [\varphi_1(\omega)\varphi_2(\omega)..\varphi_N(\omega)]$$
$$\{\mathbf{D}\} = \{\mathrm{D}_1\mathrm{D}_2..\mathrm{D}_N\}^{\mathrm{T}}$$
$$\{\varphi_k(\omega)\}$$
$$= -\frac{1}{\omega^2}([\mathbf{L}_k][\mathbf{T}(\omega)])^{\mathrm{T}}[\mathbf{k}_k(\omega)]([\mathbf{L}_k][\mathbf{T}(\omega)])\{\mathbf{A}_m(\omega)\} \qquad (16)$$

식(15)의 오른쪽 항을 식(12)의 오른쪽 항에 대체하면 다음과 같이 N 개의 유효손상크기 D_k 를 미지수로 하는 선형대수방정식을 유도할 수 있다.

$$[\boldsymbol{\Phi}(\omega)]_{M\times N}\{\mathbf{D}\}_{N\times 1} = \{\mathbf{b}(\omega)\}_{M\times 1} \qquad (17)$$

$$\{\mathbf{b}(\omega)\} = \{\boldsymbol{\delta}(\omega)\} + \frac{1}{\omega^2}[\mathbf{X}(\omega)]\{\mathbf{A}_m(\omega)\} \qquad (18)$$

식(16)과 식(18)에서 [Φ]와 {$\mathbf{b}$}은 오직 손상이 없는 구조물의 동적강성행렬[S], 절점력 위치벡터 {$\boldsymbol{\delta}$} 및 측정된 이너턴스 FRF $\{\mathbf{A}_m\}$로부터 결정된다. 따라서 식(17)은 손상상태에서의 동적강성행렬을 필요로하지 않는다. 행렬 [Φ]의 차원은 $M\times N$ 이다. 여기서 M 은 주절점자유도 $\{\overline{\mathbf{U}}_m\}$의 갯수이고, N 은 미지의 손상크기 D_k를 조사하기 위한 유한요소의 개수이다. 따라서 절점력 위치벡터{$\boldsymbol{\delta}$}의 차원은 $M\times 1$ 이 된다.

일반적으로 미지 손상크기의 갯수는 측정된 절점자유도의 갯수(선형대수방정식의 갯수)보다 훨씬 많다. 즉 $N > M$ 이다. 따라서 올바른 손상탐지를 수행하기위해서 식(17)로부터 더 많은 선형대수방정식을 유도할 필요가 있다. 그렇지 않으면 적합한 최적해 기법이 필요하다. 손상크기 D_k 를 미지수로 하는 N 개의 선형대수방정식은 서로 다른 주파수 ω를 적당히 선택함으로써 $N = M$ 이 되도록 유도할 수 있다.

3. 보구조물에 적용

3.1 유효손상크기

Fig 1(a)에서 보듯이 국부손상이 유한 보요소에 내재되어 있다고 가정한다. 대부분의 실제적인 경우에는 손상의 위치, 기하학적 형상, 그리고 크기를 사전에 모르기 때문에 손상영역의 강성을 명확하게 표현할 수 없다. 그래서 그림 1(b)에서 보듯 간단하면서도 합리적인 방법의 하나로서 손상의 존재를 다음과 같이 영률(Young's modulus)의 감소로서 표현할 수 있다.

$$\overline{E} = E(1-D) \qquad (19)$$

여기서 E 와 $\overline{E}$ 는 각각 손상이 없는 상태와 손상된 상태의 영률이고, D 는 요소 전체에 균일하게 분포된 유효손상크기이다. D 가 0 인 경우는 손상이 없는 상태를 의미하고, D 가 1 인 경우는 손상에 의한 재료의 완전 파괴를 의미한다.

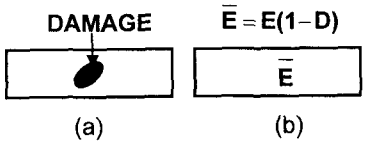

Fig. 1 A finite structure element with damage: (a) true damage state, and (b) its equivalent representation

3.2 동적요소강성행렬

손상이 없는 유한 베루누이-오일러 보요소의 동적요소강성행렬은 다음과 같다[4,5].

$$[\mathbf{s}(\omega)] = \frac{\kappa EI}{Ch\cdot c - 1}\begin{bmatrix}\mathbf{s}_1 & \mathbf{s}_2\\ \mathbf{s}_2^{\mathrm{T}} & \mathbf{s}_3\end{bmatrix} \qquad (20)$$

또한

$$[\mathbf{s}_1] = \begin{bmatrix}-\kappa^2(Ch\cdot s + Sh\cdot c) & -\kappa\cdot Sh\cdot s\\ -\kappa\cdot Sh\cdot s & -(Ch\cdot s - Sh\cdot c)\end{bmatrix}$$

$$[\mathbf{s}_2] = \begin{bmatrix}\kappa^2(Sh+s) - \kappa(Ch-c)\\ \kappa(Ch-c) \quad -(Sh-s)\end{bmatrix} \qquad (21)$$

$$[\mathbf{s}_3]=\begin{bmatrix} -\kappa^2(Ch\cdot s+Sh\cdot c) & \kappa\cdot Sh\cdot s \\ -\kappa\cdot Sh\cdot s & -(Ch\cdot s-Sh\cdot c) \end{bmatrix}$$

여기서 EI는 보의 굽힘강성(bending stiffness)이고 κ는 파수이다. 손상된 베루누이-오일러 보요소의 동적요소강성행렬은 식(20)의 E를 $\overline{E}=E(1-D)$로 교체하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\overline{\mathbf{s}}(\omega;D)]=[\mathbf{s}(\omega)]_{E=\overline{E}} \qquad (22)$$

$[\overline{\mathbf{S}}]$로부터 [s]를 빼면 엄밀한 섭동동적요소강성행렬을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\Delta\mathbf{s}(\omega)]_{exact}=[\overline{\mathbf{s}}(\omega)]-[\mathbf{s}(\omega)] \qquad (23)$$

$[\Delta\mathbf{s}]_{exact}$를 D에 관하여 테일러급수(Taylor series)로 전개하고 고차항을 소거하면 근사화된 섭동 동적요소강성행렬을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$[\Delta\mathbf{s}(\omega)]_{approx}\cong D[\mathbf{s}(\omega=0)]=D[\mathbf{k}] \qquad (24)$$

여기서 [k]는 베루누이-오일러 보에 대한 일반 유한요소강성행렬을 나타낸다.

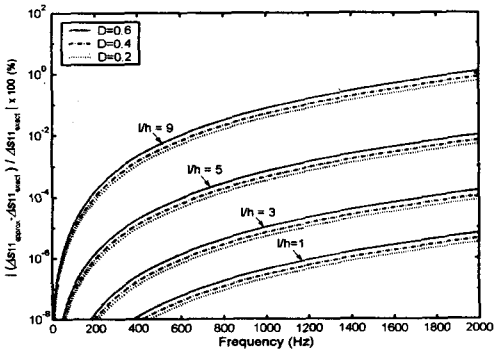

Fig 2. Percent errors of $\Delta\mathbf{s}11_{approx}$ with respect to $\Delta\mathbf{s}11_{exact}$ depending on the length to thickness ratio (l/h) and uniform damage magnitude (D)

Fig. 2는 여러가지 경우의 길이 대 두께비와 손상크기에 대한 $\Delta\mathbf{s}11_{approx}$의 백분율 오차를 나타내고 손상탐지에 사용한 이너턴스 FRF의 최대 주파수 범위가 결정되면, $[\Delta\mathbf{s}]_{approx}$의 정확도를 보요소의 길이 대 두께 비를 감소시키면서 향상시킬 수 있다는 것을 보여준다. 근사화된 섭동 동적강성행렬$[\Delta\mathbf{s}]_{approx}$는 유효균일손상크기 D에 대해서 선형이고 그 정확도는 보 요소의 길이 대 두께 비와 손상검출에 사용한 이너턴스 FRF의 최대 주파수 범위의 선택에 의해 향상 시킬 수 있기 때문에 $[\Delta\mathbf{s}]_{approx}$를 본 연구의 손상검출 알고리즘에 적용하였다.

4. 수치해석 및 실험검증

4.1 수치해석검증

실험검증을 수행하기 전에 우선 본 구조손상검출기법의 타당성을 몇 가지 수치해석 손상검출을 통하여 검증하였다. 타당성 검사를 위해 손상을 보에 미리 한정했고, 본 구조손상검출기법에 의해 역해석하였다. Fig. 3 은 타당성 검사를 위해 외팔보에 고려한 세 개의 구분된 균일손상 (D_1 = 0.4, D_2 = 0.5, D_3 = 0.3)의 위치 및 크기를 나타낸다. 빔의 길이 L 는 0.4m 이고, 보의 굽힘강성 EI 은 14.6N-m^2 이다. 그리고 길이 당 질량밀도 ρA 는 0.275kg/m 이다. 여기서 굽힘강성과 질량밀도는 실험으로 측정한 것이다. 수치해석 손상검출은 해석적으로 구한 FRF 를 사용하였고, 그것은 0.133m 에서 조화집중력(harmonic point force)이 작용하고 0.133m, 0.267m 및 0.356m 에서 계산한 값이다.

실제적인 경우, 식(17)에서 필요로 하는 이너턴스 FRF 는 손상구조로부터 직접 실험으로 측정한 것이므로 측정 오차에 의해 영향 받을 수 있다. 따라서, Thyagarajan 등 [3]에서와 마찬가지로, 해석적으로 구한 FRF 에 랜덤오차(random noise)를 첨가하여 해석적으로 손상검출을 하였다..

본 연구에서 실제 손상값에 대한 예상된 손상값의 정확성은 다음과 같이 정의한 손상 검출오차 (DIE, damage identification error)로써 평가한다.

$$\mathrm{DIE}\equiv\sqrt{\frac{1}{L}\sum_{j}^{N}l_j\left(D_j^{Pred}-D_j^{True}\right)^2} \qquad (25)$$

여기서 L 은 보의 총길이고, D_j 는 길이가 l_j 인 보요소의 유효손상크기이며 윗 첨자 '*True*'와 '*Pred*'는 각각 실제 손상과 예상 손상을 의미한다. 손상검출오차 DIE 값이 작을수록 예상된 손상이 실제 값에 가까워진다는 것을 나타낸다.

Fig. 4는 손상검출의 정확도가 FRF에 첨가된 랜덤오차의 영향을 받는 것을 보여주며, FRF에 첨가된 랜덤오차가 증가할수록 손상검출의 정확도는 감소됨을 보인다. 본 손상검출기법은 약 10%의 랜덤오차까지 세 개의 미리 한정한 손상을 비교적 정확히 검출하지만, 만약 FRF에 첨가된 랜덤오차가 12% 이상되면, 가장 작은 손상 (D_3 = 0.3)은 잘 검출할 수 없다. Fig. 4(d)와 4(e)에서 FRF에 5%이상의 랜덤오차가 첨가되면 0.1차이의 손상크기를 잘 판별할 수 없다는 것을 알 수 있다. 따라서 미세손상의 위치와 크기를 성공적으로 검출하기 위해서는 매우 정확한 실험으로 측정한 FRF가 필요하다.

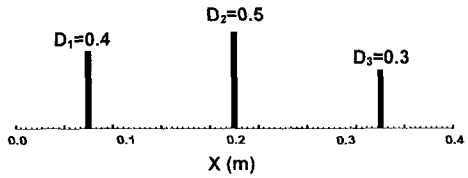

Fig. 3 A cantilevered beam with three piece-wise uniform damages considered for numerically simulated damage identification tests

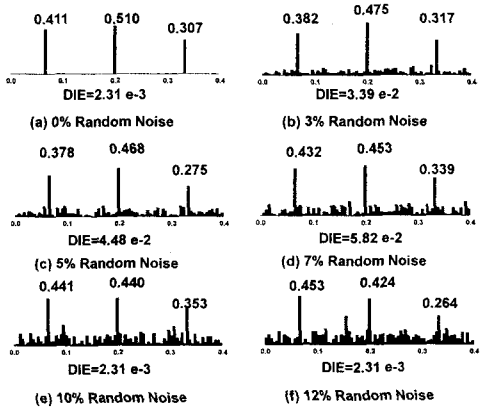

Fig. 4 Analytically predicted FRF-data based damage identification results depending on the level of random noises in FRFs

4.2 실험검증

Fig 5 는 실험에 사용한 외팔보 시편을 나타낸다. 보의 길이는 0.4*m* 이고, 폭은 0.02*m* 이고, 두께는 0.005*m* 이며, 실험에 의해 구한 손상이 없는 상태의 질량밀도 ρA 와 굽힘강성 EI 은 각각 0.275*kg/m* 이고 14.6*N-m*^{2} 이다. 손상은 손상이 없는 보에 폭 4.94*mm* 그리고 깊이가 각각 0.73, 1.03, 0.56*mm* 인 홈 A, B, C 로 부여했으며 홈의 깊이는 각각 유효손상크기 0.4, 0.5, 0.3 에 의해 결정된다. 또한, 보 시편의 진동응답은 가속도계로 측정한다.

Table 1은 손상 전후에 측정한 보 시편의 고유진동수를 비교한 것이고, 일반적으로 손상은 고유진동수를 감소시킴을 알 수 있다. Fig. 6은 손상된 보시편에 0.133*m* (가진점1)에 충격힘을 가하고 0.133*m* (측정점1), 0.267*m* (측정점2), 그리고 0.356*m* (측정점 3)에서 측정한 이너턴스 FRF을 나타낸 결과이다.

Fig. 7는실험으로 측정한 이너턴스 FRF를 이용한 손상검출 결과이다. 여기서 우리는 다음과 같은 사항을 관찰할 수 있다. 첫째, 실험으로 측정된 이너턴스 FRF를 사용하여 검출한 유효손상크기는 유한 요소의 갯수가 증가할수록 실제 값에 근접하며, 둘째, 실험결과는 손상이 없는 영역에서 약간의 부정확한 손상 크기를 예상하고, Fig. 7(c)의 결과는 7%의 랜덤오차를 고려한 수치해석 결과 (Fig. 4(d))와 비슷함을 알 수 있다. 셋째, 본 구조손상검출기법은 세 개의 작은 홈으로 부여한 손상의 위치와 크기를 비교적 잘 검출한다는 것을 알 수 있다.

Fig.8는 가진주파수의 영역이 손상검출 정확도에 미치는 영향을 나타내며, 6가지 경우의 주파수 영역에서 FRF 데이터를 이용한 결과이다. 주파수 영역은 저주파수 영역(0 <ω < 500 Hz), 중주파수 영역(500 <ω < 1,000 Hz), 고주파수 영역(1,000<ω <1,500 Hz)등으로 구분하였다. 여기서 관찰한 사항은 고주파수 영역에서 선택한 FRF를 손상검출에 사용하였을때 손상검출의 정확도가 떨어지지만, 저주파수와 중주파수 영역 모두에서 선택한 FRF를 사용하였을 때 가장 좋은 손상검출 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

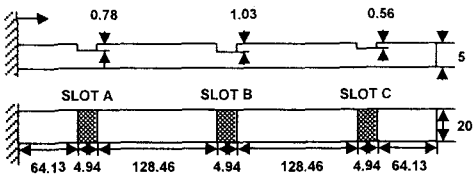

Fig. 5 Geometry of a cantilevered beam specimen with three slots (units: *mm*)

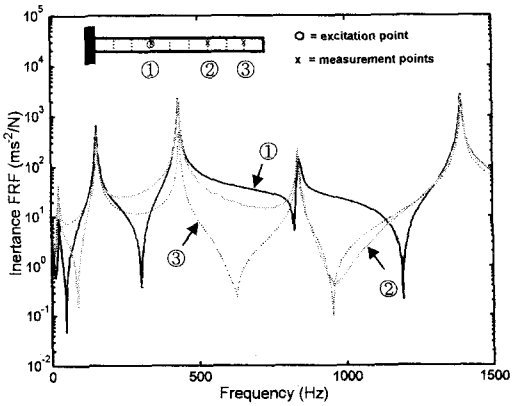

Fig. 6 The inertance FRFs measured at x = 0.133 *m* (point 1), 0.267 *m* (point 2), and 0.356 *m* (point 3) of the damaged beam by applying an impact load at x = 0.133 *m* (point 1)

Table 1 Experimentally measured natural frequencies of the beam with damage

Beams	Measured Natural Frequencies (Hz)							
	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th
Undamaged	25.75	156.9	438.7	859.3	1419	2117	2949	3915
Damaged	25.01	154.2	435.8	838.4	1397	2066	2931	3860
% Change	2.87	1.72	0.67	2.43	1.56	2.39	0.58	1.41

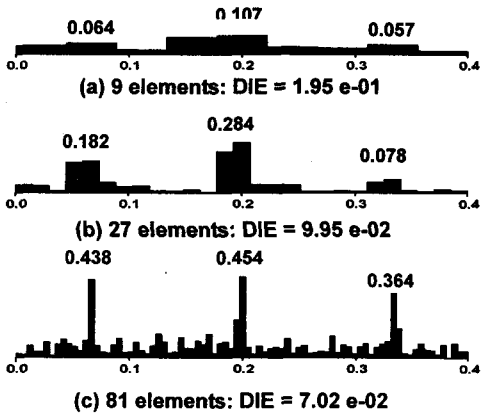

Fig. 7 Experimentally measured FRF-data based damage identification results

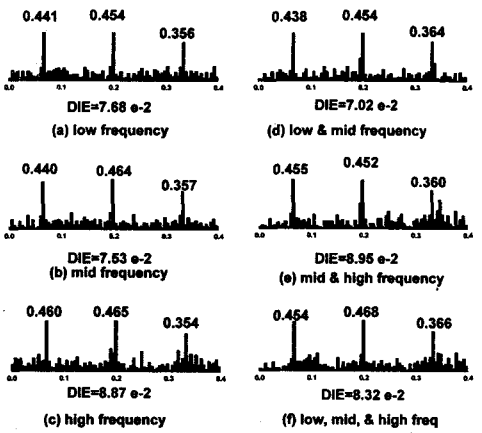

Fig. 8 Experimentally measured FRF-data based damage identification results depending on the frequency range of excitation

5. 결 론

FRF 와 엄밀한 동적강성행렬의 장점을 이용한 구조손상검출의 주파수 영역기법은 동적강성행렬식으로 표현된 구조물의 운동방정식으로부터 유도하였고, 이를 보구조물에 적용하였다. 본 손상검출기법의 타당성을 수치해석 손상검출을 통하여 평가하였으며 서로 다른 깊이의 홈을 내어 손상시킨 외팔보에 대한 실험을 통하여 증명하였다. 실험으로 측정한 FRF 를 사용하여 손상 (세 개의 작은 홈)의 위치와 크기가 비교적 잘 검출되고 있음을 확인하였다.

참고문헌

(1) S. K. Thyagarajan, M. J. Schulz and P. F. Pai 1998 *Journal of Sound and Vibration* 210(1), 162-170. Detecting structural damage using frequency response functions.

(2) H. T. Banks, D. J. Inman, D. J. Leo and Y. Wang 1996 *Journal of Sound and Vibration* 191(5), 859-880. An experimentally validated damage detection theory in smart structures,"

(3) Z. Wang, R. M. Lin and M. K. Lim 1997 *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 147, 187-197. Structural damage detection using measured FRF data.

(4) J. F. Doyle 1997 Wave Propagation in Structures: Spectral Analysis Using Fast Discrete Fourier Transforms. New York: Springer-Verlag.

(5) U. Lee, J. Kim and A.Y.T. Leung 2000 *The Shock and Vibration Digest* 32(6), 451-465. The spectral element method in structural dynamics.

(6) M. M. F. Yuen 1985 *Journal of Sound and Vibration* 103, 301-310. A numerical study of the eigenparameters of a damaged cantilever.

(7) H. Luo and S. Hanagud 1997 *International Journal of Solids and Structures* 34(35/36), 4557-4579. An integral equation for changes in the structural dynamics characteristics of damaged dtructures.