

외팔보에 대한 가진력수준제어를 통한 피로균열규명기법의 실험적 검증

김도균* · 이순복†

(2004년 1월 19일 접수, 2004년 8월 5일 심사완료)

Experimental Verifications of Fatigue Crack Identification Method Using Excitation Force Level Control for a Cantilever Beam

Do-Gyoon Kim and Soon-Bok Lee

Key Words : Fatigue Crack Identification(피로균열규명), Excitation Force Level Control(가진력수준 제어), Cantilever Beam(외팔보), The 2nd Spatial Derivatives of Frequency Response Functions(주파수응답함수의 공간 2차 미분)

Abstract

In this study, a new damage identification method for beam-like structures with a fatigue crack is proposed, which does not require comparative measurement on an intact structure but require several measurements at different level of excitation forces on the cracked structure. The idea comes from the fact that dynamic behavior of a structure with a fatigue crack changes with the level of the excitation force. The 2nd spatial derivatives of frequency response functions along the longitudinal direction of a beam are used as the sensitive indicator of crack existence. Then, weighting function is employed in the averaging process in frequency domain to account for the modal participation of the differences between the dynamic behavior of a beam with a fatigue crack at the low excitation and one at the high excitation. Subsequently, a damage index is defined such that the location and level of the crack may be identified. It is shown from the analysis of vibration measurements in this study that comparison of frequency response characteristics of a beam with a single fatigue crack at different level of excitation forces enables an effective detection of the crack.

1. 서론

항공기, 석유시추선, 교량 및 건물 등과 같은 복합시스템에 대한 적절한 수준의 안전성과 성능을 항상 유지하기 위하여서는 손상규명을 통한 구조물 건전성 감시(structural health monitoring)나 평가가 필요하다. 이런 목적으로 산업 현장에서는 X-선과 육안탐사와 같은 비파괴검사법이 지금까지 대중적으로 사용되고 있다. 그러나, 대부분의 이러한 방법은 기본적으로 국부적인 탐지 기술로서,

복잡하고 거대한 구조물, 특히 접근하기 힘든 영역을 갖는 경우에는 실용적이지 못할 수 있다. 이에 반하여, 진동신호를 사용하는 기법은 구조물의 전반적인 손상상태를 평가할 수 있다는 장점이 있다. 따라서, 후자의 방법은 복합시스템의 초기균열 탐지라는 목적으로 여러 해 동안 대중성을 얻게 되었고, 특히 최근에 와서는 이 분야에서 상당한 진보를 보여왔다.

구조물 손상규명에 관한 초기 연구에서는 슬롯(slot)을 갖는 구조물에 대한 모델링과 실험이 그 상대적인 편의성으로 인하여 주로 수행되었다. 이때 슬롯은 인접한 두 슬롯 면간의 간격이 충분히 커서 진동시 이들 간의 간섭이 발생하지 않기 때문에, 하중에 따라서 2가지의 진동 상태 - 상시 열림, 열림과 닫힘 반복 - 만을 가질 수 있다. 그

* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : sblee@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3029 FAX : (042)869-3210

러나, 피로균열(fatigue crack)의 경우는 균열닫힘(crack closure) 현상에 의하여 3가지의 진동상태 - 상시 닫힘, 일부 열림닫힘 반복, 완전 열림닫힘 반복 - 를 가진다.⁽¹⁾ 따라서, 슬롯을 갖는 구조물은 피로균열을 갖는 구조물의 거동을 정확하게 나타낼 수가 없다.

최근에는 실제 피로균열을 갖는 구조물에 대한 연구들이 많은 문헌들에서 소개되고 있다. 진동신호에서 변환될 수 있는 다양한 데이터 형태 중에 주파수응답함수⁽²⁻⁴⁾(FRF)와 주파수응답함수의 공간 2차 미분⁽⁵⁻⁷⁾(the 2nd spatial derivatives of FRFs)을 활용한 방법 등이 기존의 모드 데이터를 사용하는 방법에서 수반되는 2차 가공 오차가 배제되며, 보다 광범위한 주파수영역에서의 훨씬 많은 손상정보를 제공할 수 있다는 장점으로 인하여 최근에 손상규명의 진보된 방법으로 시도되어오고 있다.

앞서 언급한 바와 같이, 대부분의 이전 연구들은 손상이 없는 건전 구조물의 모드 매개변수를 포함한 동적 특성과 슬롯을 갖는 구조물의 특성을 비교하는 데에 집중하였다. 최근에는 비교 대상인 건전구조물을 고려하지 않는 새로운 접근법이 몇몇 문헌에서 소개되었다.^(1,8) 그러나, 균열을 갖는 구조물만을 고려하는 근래의 방법들은 지금까지는 단지 균열의 존재 여부와 상대적인 크기에 대한 정성적인 평가에 그쳐온 실정이다.

본 연구에서는 균열을 갖는 비선형 시스템에 대하여 서로 다른 동적 특성을 갖는 진동 상태를 구현하기 위한 저진폭수준과 고진폭수준으로 구분되는 가진력수준제어의 개념을 도입하였다. 그리고 피로균열을 갖는 보만의 진동신호를 이용하기 위하여 모서리 균열을 갖는 외팔보를 대상으로 균열의 위치와 상대 크기를 유추하는 구조물손상규명법을 제안하고자 한다.

2. 가진력수준제어를 통한 손상규명

2.1 가진력수준제어(excitation force level control)

전파되는 균열의 후면에서 형성되는 소성변형, 균열 내부에서의 점성 유체에 의한 썩기 작용, 균열면의 거칠기, 응력에 기인한 마르텐사이트(martensite) 변태와 균열면 내부의 산화 및 부식으로 인한 부산물 등은 균열닫힘(crack closure) 거동을 이루는 요인들이다. 즉, 균열을 갖는 보(beam)는 작용 하중이 균열면이 닫힘 상태에서 열림 상태로 변화할 때의 경계 하중인 균열닫힘하중(crack closure load) 이상으로 충분히 클 때까지는 마치 균열이 없는 보와 같은 거동을 보일 것이다.

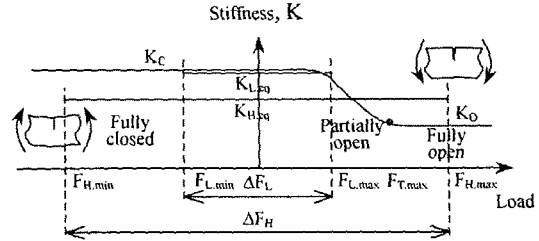


Fig. 1 Dependence of stiffness on load

Fig. 1은 균열을 갖는 구조물의 외부 작용 하중과 강성 사이의 관계를 나타낸다. 여기서, K_C 와 K_O 는 각각 균열을 갖는 구조물의 완전 닫힘 상태 및 완전 열림 상태의 강성이고, ΔF_L 와 ΔF_H 는 각각 고진폭 및 저진폭 조화 가진력의 진폭이다. 또한, $F_{H,max}$ 와 $F_{H,min}$ 는 각각 고진폭 조화 가진력의 최대치와 최소치이며, $F_{L,max}$ 와 $F_{L,min}$ 는 각각 저진폭 조화 가진력의 최대치와 최소치이다. 그리고, $F_{T,max}$ 는 균열면의 개폐 상태를 일부 열림과 완전 열림 상태로 구분하는 이상적인 경계 하중이며, $K_{H,eq}$ 와 $K_{L,eq}$ 는 각각 고진폭 및 저진폭 가진 상태에서의 구조물의 등가 강성이다.

Fig. 1로부터, 균열면의 개폐 상태는 균열닫힘 거동으로 인하여 하중 수준에 따라서 크게 3가지 - 완전 닫힘, 일부 열림, 완전 열림 - 로 구분할 수 있다. 또한, 균열의 열림이 보와 같은 구조물의 굽힘강성(bending stiffness)을 감소시키는 역할을 한다는 점으로부터 K_C 가 K_O 보다 크다는 것을 유추할 수 있다. 그리고, 하중이 균열닫힘하중을 중심으로 증가함에 따라서, 균열면은 일부 열림의 상태를 가지며 강성은 K_C 에서 K_O 로 연속적으로 감소하게 된다. 여기서, 앞서 언급한 K_O 의 값과 균열닫힘하중은 균열길이와 단면치수의 상대적인 비에 의존하여 변화한다.

한편, $F_{T,max}$ 는 다음에 상술할 가진력수준제어 개념을 통하여 서로 다른 모드 특성을 갖는 시스템으로 구분하는 천이(transition) 하중의 역할을 한다. 즉, 균열을 갖는 구조물의 강성이 하중 크기에 의존한다는 특성을 이용하면, 경계하중 $F_{T,max}$ 보다 작은 범위 내에서 선정된 $F_{L,max}$ 를 갖는 조화 하중 진폭 ΔF_L 조건에서의 등가 강성치 $K_{L,eq}$ 는 $F_{T,max}$ 보다 큰 범위 내에서 선정된 $F_{H,max}$ 를 갖는 조화 하중 진폭 ΔF_H 조건에서 등가 강성치 $K_{H,eq}$ 보다 크다는 것을 Fig. 1에서 판단할 수 있다. 가진력수준 제어의 측면에서 상시 완전 닫힘 또는 일부 열림 닫힘 반복 상태에 해당하는 전자는 저진폭가진(low excitation)이라고 명명할 수 있고, 완전 열림

단함 반복 상태에 해당하는 후자는 고진폭가진 (high excitation)이라고 명명할 수 있다.

따라서 시스템의 고유진동수는 강성에 비례한 특성을 가지므로, 균열을 갖는 구조물은 가진력수준에 따라 서로 다른 수준의 강성을 보유하고 이에 따라 서로 다른 모드 매개변수를 취하게 되는데, 이러한 특성을 이용하면 구조물 내 균열의 존재 여부, 발생 위치 및 크기에 대한 평가가 가능할 것으로 판단된다.

2.2 손상지수(damage index)

손상규명은 다음과 같이 각각의 위치에서 저진폭가진력과 고진폭가진력에서의 주파수응답함수의 공간 2차 미분을 서로 비교함으로써 수행되어질 수 있다.⁽⁵⁾

$$D(i) = \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^W J(\omega_k) \cdot |\alpha''_{L,ij}(\omega_k) - \alpha''_{H,ij}(\omega_k)| \quad (1)$$

여기서, $D(i)$ 는 손상지수를 나타내며, $J(\omega)$ 는 가중함수(weighting function)을 의미한다. 또한, $\alpha''_{L,ij}(\omega)$ 와 $\alpha''_{H,ij}(\omega)$ 는 저진폭 및 고진폭가진력이 독립적으로 j 의 위치에서 입력되고, 응답이 i 의 위치에서 측정되는 조건에서의 주파수응답함수의 공간 2차 미분을 각각 나타낸다. L 과 W 는 각각 가진하는 하중의 위치 수와 고려하는 주파수를 의미한다. 식 (1)은 보의 길이에 따른 주파수응답함수의 공간 2차 미분이 효율적으로 균열을 규명할 목적으로 채택되었다. 식 (1)은 구조물내의 손상이 손상지수, $D(i)$ 가 가장 현저한 값을 갖는 측정 위치에서 존재한다는 것을 전제하고 있다.

저진폭 및 고진폭가진력에서 측정된 주파수응답함수의 공간 2차 미분은 인접하는 응답 위치에서의 주파수응답함수를 이용한 중심차분법(central difference method)을 통하여 근사적으로 계산할 수 있다.

손상규명을 위한 가중함수, $J(\omega)$ 는 다음의 개념들로부터 합리적으로 정의될 수 있다. 첫째, 주파수에 따른 경향의 측면에서 살펴보면, 측정오차의 관점에서 고유진동수에서 데이터의 정보는 이웃하는 주파수 영역의 정보보다 더욱 강조되는 것이 타당하다. 둘째, 형상의 측면에서 볼 때, 저진폭 및 고진폭가진력에서의 동일 모드에서 두 고유진동수들의 인접한 피크치들을 주파수영역에서 동시에 고려할 필요가 있다. 마지막으로, 척도인자(scale factor)의 측면에서 보면, 저진폭과 고진폭 가진력 사이의 고유진동수간 차이가 상대적으로 더 큰 모드는 그렇지 못한 다른 모드들에 비하여 고유진동수 민감도의 관점에서 더욱 강조되어야 바람직할 것이다.

위의 마지막 개념은 구조손상이 노드점에 인접

하지 않은 고차 모드를 강조하는 역할을 한다. 결과적으로, 가중함수, $J(\omega)$ 는 다음과 같이 정의될 수 있다.⁽⁴⁾

$$J(\omega) = \sum_{n=1}^M \frac{|\Delta\omega_{C,n}|}{\text{Max}|\Delta\omega_{C,n}|} \exp\left(-\frac{(\omega - \omega_{C,n})^2}{2\Delta\omega_{C,n}^2}\right) \quad (2)$$

여기서, 저진폭 및 고진폭 가진력에 종속되는 균열을 갖는 구조물의 n 번째 등가 고유진동수, $\omega_{C,n}$ 와 n 번째 고유진동수간의 차이, $\Delta\omega_{C,n}$ 는 다음과 같이 정의되어 진다.

$$\omega_{C,n} = \frac{\omega_{CL,n} + \omega_{CH,n}}{2} \quad (3)$$

$$\Delta\omega_{C,n} = \omega_{CL,n} - \omega_{CH,n} \quad (4)$$

여기서, $\omega_{CL,n}$ 과 $\omega_{CH,n}$ 은 각각 저진폭 및 고진폭가진력에 종속되는 균열을 갖는 구조물의 n 번째 고유진동수를 나타낸다.

3. 실험적 검증

3.1 균열시편과 실험장치

실험적 검증을 위하여 폭 10 mm × 높이 20 mm의 직사각형 단면과 길이 610 mm를 갖는 보가 6061 T6 알루미늄 합금판을 기계 가공하여 만들어 졌다. 균열을 발생키 위하여 2 mm 높이의 균열 유도용 노치(crack-starter notch)를 지정된 균열 위치에 생성하였다.

피로균열은 100 kN-용량의 Instron™ 서보-유압식 동적 재료시험기를 이용하여 0.1의 응력비(최소응력과 최대응력의 비)와 5 Hz의 주파수로 하중제어 방식을 통하여 종 방향의 조화 인장하중을 반복함으로써 생성시켰다. 균열과의 비교를 위하여, 서로 다른 보 상에 틈을 이용한 절단을 통하여 슬롯도 함께 생성하였다. 따라서, 시험 시편은 균열이 없는 정상 보, 균열 또는 슬롯을 갖는 보로 구성되어지며, 이때 균열수준과 슬롯수준(균열 높이 또는 슬롯 높이와 단면 높이의 비)은 10, 20, 40, 60%로 설정하였다. 통계학적인 접근을 위하여 각각의 균열수준 당 2개의 균열을 갖는 보를 사용하였다.

실험은 각각의 균열수준과 슬롯수준을 갖는 보 시편에 대하여, 일단 고정(clamping)을 위하여 바이스(vise)를 사용하였고, 랜덤 하중을 부과하기 위한 가진기(exciter)와 적용 하중을 측정하기 위한 힘변환기(force transducer)를 사용하였으며, 그때의 응답을 측정하기 위한 15개의 가속도계를 사용하여 Fig. 2와 같이 수행되었다.

외팔보의 길이는 고정부의 길이 100 mm를 제

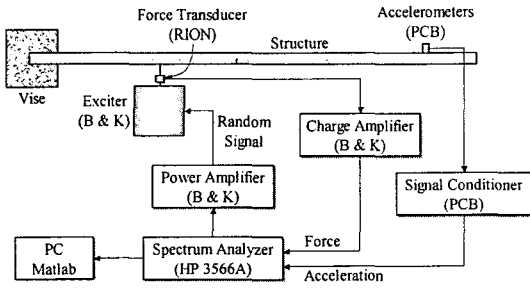


Fig. 2 Experimental set-up

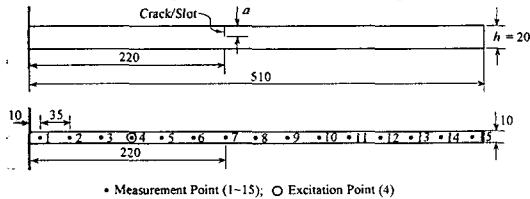


Fig. 3 Geometric properties and sensor locations of a damaged beam

의한 510 mm이며, 이때 균열과 슬롯은 고정단으로부터 7번째 가속도계의 위치에 해당하는 220 mm의 길이에 생성되었다. Fig. 3은 균열 또는 슬롯을 갖는 외팔보의 기하학적 치수와 가진 및 응답 지점 센서의 위치를 나타내고 있다. 이때 균열은 지면과 수평방향이 되도록 설치하여 중력에 의한 균열의 강제 개폐 현상을 무시할 수 있게 하였다. 주파수응답함수에 대한 주파수 해상도(resolution)와 양상블 평균수는 각각 1 Hz와 100회로 설정하였다. 또한 가진력과 응답가속도간의 주파수응답함수인 이너턴스(inertia)의 공간 2차 미분을 통한 손상지수를 계산하기 위하여 5개의 모드가 고려되었다.

3.2 저진폭가진력의 선정

Fig. 4는 $a/h = 60\%$ 의 경우에 대한 각각의 모드와 랜덤 가진 하중간의 관계를 묘사하고 있다. 여기서 a/h 는 Fig. 3에서 표시된 바와 같이 균열길이, a 와 단면 높이, h 간의 비로서 정의되는 균열수준(crack level)을 나타낸다. F_{L1} 과 F_{L2} 는 균열의 일부 열림닫힘 반복상태에 해당하는 하중 영역에서 극한치 조건의 비교를 위하여 선택된 저진폭가진력의 하한치와 상한치를 각각 나타낸다. F_{L1} 은 저진폭가진의 하한치가 가진이 없을 때 힘변환기에서 측정되는 소음신호와 같은 차수(order)를 갖는다는 조건으로부터 선정될 수 있고, 따라서 소음 신호의 10배보다 작은 수준에서 선택되었다. 또한 F_{L2} 는 저진폭가진의 상한치가 F_T 보다 충분한 여유를 가지고 작아야 한다는 조건에서 선정 가능하고, 따라서 F_T 의 대략적으로 50% 수준에서 채택하였

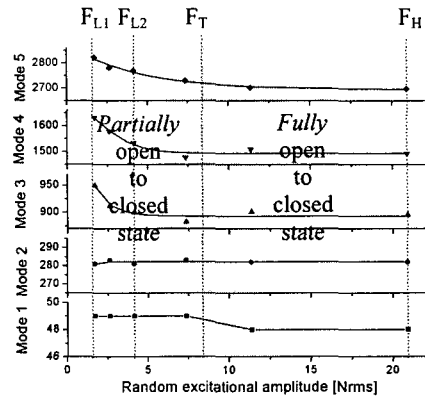


Fig. 4 Relation between modes and random excitation forces at $a/h = 60\%$

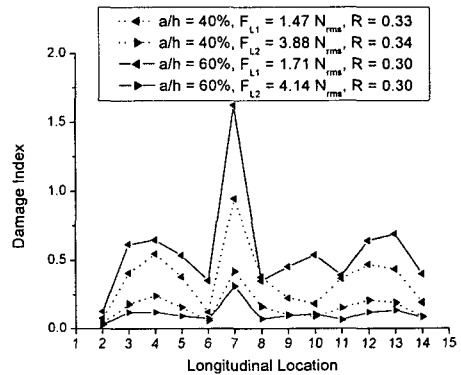


Fig. 5 Effects of F_{L1} and F_{L2} on R via damage index

다. 여기서, F_T 는 균열의 일부 열림닫힘 반복상태로부터 완전 열림닫힘 반복상태로의 천이를 상징하고, 이에 따라 저진폭가진과 고진폭가진을 경계 짓는 천이가진력(transition excitation force)을 의미하며, 우선적으로 선정되어야 할 대상이다. 실제적으로 F_T 는 Boltzmann의 S자형 함수를 사용하여 모드 대 하중간의 관계를 곡선적합(curve fitting)한 그래프와 이 그래프의 점근적 최소치로부터 0.5% 큰 값을 통과하는 수평선과의 교점에서의 하중치로부터 선정하였다. F_H 는 균열의 완전 열림닫힘 반복상태에 해당하는 하중영역상에서 채택된 고진폭가진력을 의미하며, 실제로 F_T 보다 큰 하중 상태에서 선정하였다. 하중치의 정량적인 비교를 위하여 랜덤가진력의 3가지 종류 모두를 제곱평균제곱근(root mean square)의 차원으로 Fig. 4에 표시하였다.

Fig. 4에서 제시되는 바와 같이 저진폭가진에서 서로 다른 수준을 이용한 경우 그때의 손상지수 결과가 특히 균열수준이 40%와 60%일 때에 대하여 Fig. 5에서 도식적으로 비교하고 있다.

각각의 경우에 대한 손상지수의 보 길이방향 분포상태로부터 Fig. 3의 실험 장치와 같이 단일 균열이 7번 위치에 존재함을 판단할 수 있다. 손상 크기비(damage severity ratio), R 은 최대 손상지수를 제외한 평균 손상지수와 최대 손상지수의 비율로 정의되며, 손상간의 상대적 크기를 정량적으로 평가할 목적으로 사용되어진다. R 의 정의로부터 낮은 R 값을 가질수록 손상의 상대적인 크기는 더 커진다는 것을 예상할 수 있다.

Fig. 5의 데이터로부터 한가지 흥미롭고도 중요한 점은 서로 다른 수준의 저진폭 가진력에 상관없이 동일한 균열수준에 대하여서는 R 값이 상당히 유사하다는 점을 들 수 있다. 따라서, R 을 통한 손상의 상대적인 크기를 평가할 목적에서는 저진폭가진력을 F_{L1} 과 F_{L2} 사이의 가진하중 범위내에서 임의로 선택해도 무방하다는 것을 의미한다. 즉, 저진폭가진력으로서 F_{L1} 을 채택하는 경우에는 손상크기비 뿐만 아니라 균열지수가 최대치를 갖는 균열의 위치에서 상대적인 균열지수 값의 크기를 상호 비교함으로써 손상의 상대적인 크기를 평가하는 것이 용의하다. 이에 반하여, F_{L2} 를 저진폭 가진력으로 사용하는 경우는 서로 다른 균열 수준을 평가하기 위하여 단지 손상크기비만이 유효하다는 것을 Fig. 5에서 판단할 수 있다.

3.3 고유치와 주파수응답함수 특성

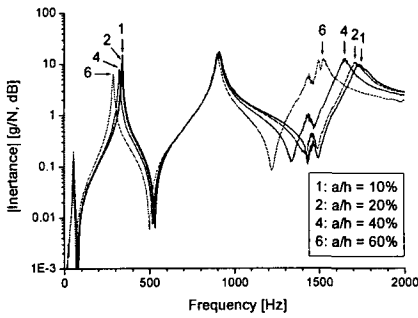
Table 1은 균열수준에 따른 균열이 없는 정상적인 보, 균열 및 슬롯을 갖는 보의 저진폭과 고진폭가진력에서의 1~5차 고유진동수와 고유진동수의 차이를 정리하고 있다. 이 표에서 굽힘강성이 균열의 열림에 따른 경향과 마찬가지로 균열수준의 증가에 따라 감소하는 특성으로 인하여 슬롯을 갖는 보와 고진폭 가진력에 종속되는 균열을 갖는 보의 고유진동수가 균열수준 또는 슬롯수준이 증가함에 따라 점차적으로 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 고진폭가진에 종속되는 균열을 갖는 보의 고유진동수가 균열수준과 모드에 상관없이 슬롯을 갖는 보와 저진폭가진, F_{L2} 에 종속되는 균열을 갖는 보의 고유진동수들간의 사이에 대체적으로 존재함을 주목할 필요가 있다.

고유진동수의 차이의 측면에서 보면, 모드의 차수가 증가할수록 일반적으로 균열수준에 상관없이 그 차이가 증가함을 판단할 수 있으며, 이 현상은 균열이 보의 노드점에 인접한 특정 모드를 제외하고는 일반적인 특징으로 알려져 있다. 그리고, 저진폭 가진력으로 F_{L2} 를 사용한 경우에는 균열수준의 증가에 따라 동일 모드별 고유진동수의 차이가 그 증감의 경향을 판단하기 힘들다는 것도 알 수가 있다.

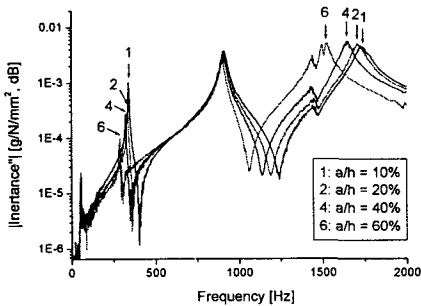
Table 1 Variation of natural frequencies and natural frequency differences according to crack level

I,C,S ^a	a/h	L,H ^b	Natural frequency					Natural frequency difference				
			ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	$\Delta\omega_1$	$\Delta\omega_2$	$\Delta\omega_3$	$\Delta\omega_4$	$\Delta\omega_5$
I	0	H	57	340	923	1723	3067					
C	10	L	55	342	928	1785	2942	1.0	1.0	17.0	44.5	62.5
		H	54	341	911	1740	2880					
S		H	56	335	912	1724	-					
C	20	L	55	341	952	1780	2923	-0.5	2.0	35.5	45.5	49.5
		H	56	339	916	1734	2874					
S		H	55	329	908	1696	-					
C	40	L	54	315	932	1680	2803	-0.5	0.5	26.5	42.0	8.0
		H	54	315	905	1638	2795					
S		H	54	307	886	1585	-					
C	60	L	51	299	916	1567	2794	0.0	0.0	20.0	37.0	14.0
		H	51	299	896	1530	2780					
S		H	50	299	886	1555	-					

- Superscript "a": the Intact, Cracked and Slotted beam
 - Superscript "b": Low(F_{L2}) and High excitation force



(a) Inertances



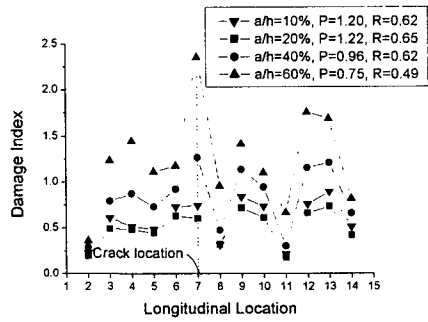
(b) The 2nd spatial derivatives of Inertances

Fig. 6 Measured point FRFs and the 2nd spatial derivatives of FRFs at high excitation force

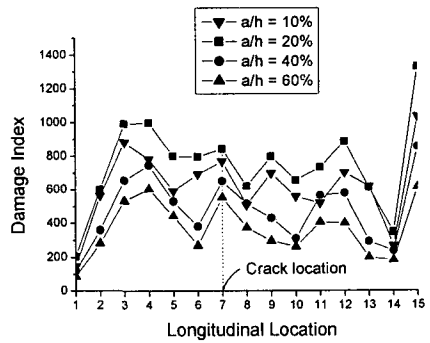
Fig. 6(a)는 균열수준에 따른 고진폭 가진력에 종속되는 균열을 갖는 보의 Fig. 3에서 표시된 4번 지점에서의 점 이너턴스(point inertances)를 상대적으로 비교한 것이며, Fig. 6(b)는 동일한 조건에서의 점 이너턴스의 공간 2차 미분을 각각 나타내고 있다. Fig. 6(a)로부터 균열수준이 증가함에 따라 동일 모드에서 고유진동수가 감소하고 그 감소하는 경향은 고차 모드로 갈수록 일반적으로 두드러짐을 보여주고 있다. Fig. 6(b)는 Fig. 6(a)와 유사한 경향을 나타내며, 고유진동수에 해당하는 주파수 지점에서 역시 최대 피크치를 가짐을 알 수 있다.

3.4 실험적 손상지수의 결과

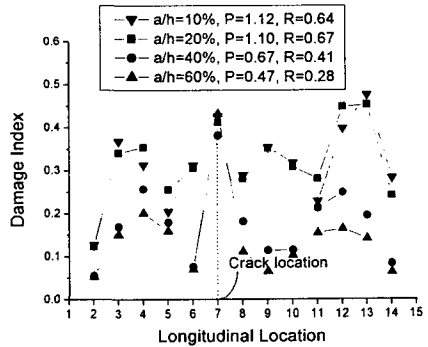
본 연구에서 제안하는 구조물 손상규명법의 타당성을 검토하기 위하여 식 (1)의 방법 외에 2가지를 추가로 채택하여 Fig. 7에서 함께 비교하여 보았다. 그것들은 각각 고진폭 가진력에 종속되는 균열보에 대한 이너턴스의 공간 2차 미분과 비교하기 위하여 기준대상인 저진폭가진에 종속되는 균열보의 공간 2차 미분을 이용하는 대신에 기준에 사용하던 방식에 준한 균열이 없는 정상보의



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 Comparison of damage indices using: (a) the 2nd spatial derivatives of inertances of the intact beam and the cracked beam subject to high excitation; (b) inertances of the cracked beam at different level of excitation forces; (c) the 2nd spatial derivatives of inertances of the cracked beam at different level of excitation forces as proposed in this research

공간 2차 미분을 사용하는 방식(a), 이너턴스의 공간 2차 미분 대신에 이너턴스 자체를 사용하는 방식(b), 본 연구에서 제안하는 식 (1)의 방식(c)로 구분할 수 있다. 여기서 비교하는 3가지의 방식들

은 저진폭가진력으로 F_{L2} 을 사용하였다.

측정 센서의 위치에 따른 제안된 손상지수의 분포 경향을 손상규명의 측면에서 보다 체계적으로 분석하기 위하여, 앞서 제안한 손상크기비, R 에 추가하여, 손상탐지능비(damage detectability ratio), P 를 채용하고자 한다. 손상탐지능비는 균열지점을 제외한 최대손상지수에 대한 균열지점에서의 손상지수의 비율로써 정의되며, 최대 손상지수를 갖는 측정위치가 실제 균열위치인지 아닌지를 정량적으로 평가할 목적으로 사용된다. 즉, 만약 P 가 1보다 작으면, 실제 균열위치는 최대 손상지수를 갖는 센서위치와 일치함을 의미한다. 반면에, 만약 P 가 1보다 크다면, 균열위치는 지배적인 손상지수를 갖는 몇몇 센서위치중의 하나가 될 수 있다는 것을 나타낸다.

Fig. 7(c)로부터, 균열수준이 40% 이상일 때는 P 가 1이하임으로 최대 손상지수를 나타내는 센서위치가 정확하게 실제 균열위치를 예측하고 있다는 것을 알 수 있다. 이 영역의 균열수준에서는, 균열수준이 증가함에 따라서 R 은 감소하고 있기 때문에 R 을 통하여 균열보 간의 상대적인 균열크기의 관계를 정확하게 예측할 수 있음을 판단할 수 있다. 이에 반하여, 균열수준이 20% 이하일 경우에는 P 가 1 이상의 값을 갖고, 실제 균열위치 외에도 또 다른 센서위치에서 지배적인 손상지수가 존재함을 확인할 수 있다.

Fig. 7(a)는 기존의 많은 구조물 손상규명 관련 문헌에서 제안해온 개념인 피로균열이 없는 정상보에 대한 진동 신호의 비교 측정을 요구하는 방식인 손상 유무 구조물간 비교를 통한 손상규명법이라고 할 수 있다. 이 방법은 손상규명의 효율성 제고를 위하여 필요한 균열보와 동일한 기하학적 형상, 재료 물성치를 갖는 정상보의 확보와 이들 간의 동일한 실험조건의 구비라는 제한이 수반되는 단점으로 인하여 손상규명의 측면에서 볼 때 (a)의 방법이 (c)의 방법보다 좀더 신뢰적이라고 단언하기에는 한계가 있다고 사료된다. 실제 실험 결과에서도 Fig. 7(a)의 손상지수는 Fig. 7(c)와 균열수준에 따른 손상탐지능비 P 와 손상크기비 R 의 값에서 유사한 경향을 확인할 수 있다.

그러나, Fig. 7(b)의 손상지수 분포 경향은 균열탐지의 측면에서 센서위치에 따른 어떠한 두드러진 특징도 보여주지 못하고 있다. 이것은 서로 다른 수준의 진폭가진력에서 균열보의 실제 균열위치를 포함한 보 길이방향 센서위치를 따르는 고유진동수의 차이가 모든 지점에서 거의 동일하므로 생긴 결과로서 추론할 수 있다.

마지막으로 Fig. 7(c)의 결과로부터, 효율적으로

선택된 센서수와 세밀한 주파수 해상도의 조건에서 본 연구에서 제안된 방법은 40% 이상의 보통 이상의 균열수준에서는 균열위치를 정확히 탐지하고 서로 상이한 균열수준을 갖는 균열보간의 상대적인 균열수준을 평가하는데 성공적인 반면, 20% 이하의 낮은 균열수준에서는 균열위치의 예상지점들을 추정하는 역할을 한다는 것을 연구결과에서 얻었다.

4. 결론

본 연구에서는 피로균열을 갖는 구조물의 손상규명을 하는데 있어서 최근에 선호하는 방법인 손상된 구조물만을 분석하는 방법들에 내제된 편향된 손상 규명 - 손상의 존재 여부, 손상 위치, 손상 크기 - 의 한계점을 극복하여 손상규명의 전 과정에 대한 체계적이고 정량적인 평가를 시도하였다. 즉, 단일 모서리 균열을 갖는 외팔보를 대상으로 하여 균열을 갖는 비선형 시스템에 대하여 서로 다른 동적 특성을 갖는 진동 상태를 구현하기 위한 저진폭수준과 고진폭수준으로 구분되는 가진력수준제어의 개념을 도입함으로써 균열의 위치와 균열간의 상대적인 크기를 진단하는 구조물 손상규명기법을 제안하고 실험적인 검증을 수행하였다.

실험 결과, 40% 이상 균열수준에서는 균열 위치와 크기의 진단이 성공적이었으나, 20% 이하의 상대적으로 낮은 균열수준에서는 탐지한계가 생김을 확인하였다. 또한, 본 논문에서 제안하는 구조물 손상규명법은 기존 대상으로 저진폭 가진력에 중속되는 균열보의 진동 신호 대신에 균열이 없는 정상보의 진동 신호를 사용하는 일반적인 방식보다는 정상보를 요구하지 않는다는 측면을 고려하면 보다 효율적이라고 할 수 있고, 저진폭가진력과 고진폭가진력에서 주파수응답함수의 공간 2차 미분 대신에 주파수응답함수 자체만을 채용하는 방식보다는 보다 정밀하다고 판단된다.

참고문헌

- (1) Leonard, F., Lanteigne, J., Lelonde, S. and Turcotte, Y., 2001, "Free-Vibration Behavior of a Cracked Cantilever Beam and Crack Detection," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 15, No. 3, pp. 529~548.
- (2) Cho, K. L., Shin, J. H. and Lee, U. S., 2002, "Experimental Verification of the Structural Damage Identification Method Developed for Beam Structures," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 26, No. 12, pp. 2574~2580.
- (3) Lee, U. S. and Shin, J. H., 2002, "A Structural

- Damage Identification Method for Plate Structures,” *Engineering Structures*, Vol. 24, pp. 1177~1188.
- (4) Park, N. G. and Park, Y. S., 2003, “Damage Detection Using Spatially Incomplete Frequency Response Functions,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 17, No. 3, pp. 519~532.
- (5) Sampaio, R. P. C., Maia, N. M. M. and Silva, J. M. M., 1999, “Damage Detection Using the Frequency-Response-Function Curvature Method,” *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 226, No. 5, pp. 1029~1042.
- (6) Sampaio, R. P. C., Maia, N. M. M., Silva, J. M. M. and Almas, E. A. M., 2003, “Damage Detection in Structures : From Mode Shape to Frequency Response Function Methods,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 17, No. 3, pp. 489~498.
- (7) Palacz, M. and Krawczuk, M., 2002, “Vibration Parameters for Damage Detection in Structures,” *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 249, No. 5, pp. 999~1010.
- (8) Tsyfansky, S. L. and Beresnevich, V. I., 2000, “Non-Linear Vibration Method for Detection of Fatigue Cracks in Aircraft Wings,” *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 236, No. 1, pp. 49~60.