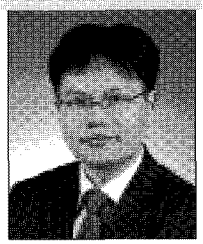
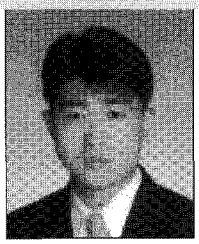
표면 부착형 압전소자를 이용한 판 구조물의 무기저 손상진단에서의 전산구조해석

Computational Structural Analysis for the Reference-Free Damage Diagnosis of a Plate using Surface-Bonded Piezoelectric Transducers





박 현 우* 김 은 진**

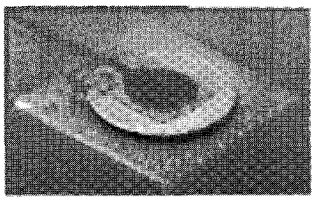
*동아대학교 토목공학과 조교수
**동아대학교 토목공학과 박사과정

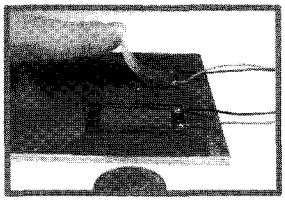
1. 머리말

구조물 건전성 감시(structural health monitoring)에서는 실시간/준실시간으로 측정된 동적 응답에 대해 신호처리를 수행하고 적절한 손상진단 기법을 적용하여 구조물의 이상 유무를 판단하게 된다.[1] 구조물 건전성 감시의 핵심은 구조물에 이상이 발생했을 때 빠른 시간 내에 적절한 조치를 취할 수 있도록 이상 유무를 조기에 감지해 내는 것이다. 구조물 건전성 감시에서 널리 사용되어 온 변형률계, 변위계, 가속도계와 같은 센서들은 외부 상시진동에 의해 발생된 구조물의 동적응답을 측정하는 수동형 센서 (passive sensor) 들이다. 기존의 수동형 센서들은 구조물의 저주파수 대역의 거시적 동적 거동을 측정하는 것에는 적합하지만 구조물의 조기 손상에 의해 파생된 고주파수 영역의 동적 응답을 측정하는 것에는 한계가 있다.

최근 그림 1과 같이 압전소자 (pizeoelectric transducer)를 이용하여 가진(actuation)과 탐지(sensing)를 동시에 수행할 수 있는 능동형 센서 기술이 비약적으로 발전함에 따라 구조물 건전성 감시부문에서도 능동형 센서 기술의 적용을 위한 활발한 연구가 진행되고 있다.[1)~3)]

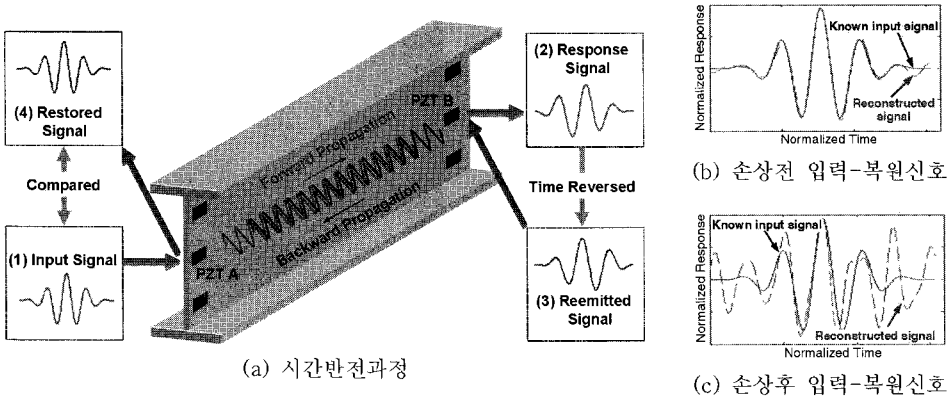
일반적으로 능동형 센서는 수동형 센서에 비해 다음과 같은 장점들을 가진다. 첫째, 압전소자를 이용하여 제작되므로 하나의 센서를 이용하여 가진과 탐지를 동시에 수행할 수 있으므로 대상 구조물의 실시간 계측에 적합한 센서의 설계가 가능하다. 둘째, 사용자가 원하는 임의의 가진 신호를 구조물에 자유롭게 입사시킬 수 있다. 따라서 대상 구조물과 탐지하고자 하는 손상의 유형에 적합한 가진 신호를 적절하게 선택할 수 있다. 셋째, 수백 kHz에서 수 MHz에 이르는 고주파 영역에서 가진과 탐지가 가능하므로 균열과 같은 조기 손상에 의해 발생된 동적 변화를 측정할 수 있다. 전체 크기에 비해 두께가 상대적으로 얇은 판형 부재를 사용하는 항공 구조물의 건전성 감시 분야에서 능동형 센서 네트워크를 이용한 고주파수 대역의 가진과 탐지를 이용한 많은 연구 성과들이 보고된 바 있다.[1)]





(c) Lead zirconate titanate (PZT) 센서 (b) Macro fiber composite (MFC) 센서

그림 1 압전소자를 이용한 능동형 센서



(a) 시간반전과정

(b) 손상전 입력-복원신호

(c) 손상후 입력-복원신호

그림 2 구조물 손상진단을 위한 시간반전과정의 적용 개념도:
(a) 시간반전과정의 개념도
(b) 손상전의 원입력신호(실선)와 복원신호(파선)의 비교
(c) 손상후의 원입력신호(실선)와 복원신호(파선)의 비교

동탄성학적으로 판형 구조물에서 능동형 센서에 의해 가진되고 탐지되는 고주파수 대역의 동적응답은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 시간영역에서의 동적 천이 상태 응답인 램파(Lamb wave)이고, 다른 하나는 정상 상태 응답을 주파수 영역에서 표현한 전기역학적 임피던스(또는 이의 역수인 어드미턴스)이다.[2)-3)] 이들 두 가지 동적응답은 구조물에 부착된 능동형 센서와 구조물간의 전기 역학적 상호작용에 의해 가진되고 탐지된다. 기존의 능동형 센서를 이용한 고주파수 대역에서의 구조물 건전성 감시 기법은 이 두 가지 동적응답을 이용한 방법들로 분류할 수 있다.

대부분의 구조물 건전성 감시기법은 과거 손상이 없는 상태에서 측정된 기저(baseline) 동적응답과 현재 측정된 동적응답의 차이를 비교하여 대상 구조물의 손상여부를 판단한다. 통상적으로 구조물의 동적응답은 온도 또는 상시 진동 등에 영향을 받는다. 따라서 이에 대한 고려없이 측정된 동적 응답을 기저 데이터와 단순 비교하여 손상탐지를 수행하게 되면 손상이 없는 구조물을 손상이 있는 것으로 진단 또는 그의 역으로 진단하는 오류가 발생한다.[4)]

온도와 상시 진동과 같은 환경적 요인이 구조물 건전성 감시에 미치는 영향을 배제하기 위한 연구들이 진행되어 왔는데, 그 중 대표적인 연구가 기저 데이터에 의존하지 않는 무기저 (Reference-free) 손상진단 기법이다. 판 구조물에서의 무기저 손상진단에는 램파의 시간반전과정을 이용하는 방법[5)]과 병치된 압전소자의 극성을 이용하는 방법[6)]이 제안되었다. 이 학술기사에서는 부착형 압전소자에 의해 발생되는 램파의 시간반전과정과 손상에 의해 유발된 전기 역학적 신호(어드미턴스)의 전산구조해석에 대해 소개한다.

2. 램파의 시간반전과정 전산구조해석

램파는 윗면과 아랫면을 자유경계면으로 갖는 평면변형 상태의 판에 발생하는 유도파(Guided wave)의 일종이다.[7)] 주파수 성분과 무관하게 항상 일정한 속도로 전달되는 체적파와 달리 램파는 각 주파수 성분들이 서로 다른 속도로 진행함에 따라 초기의 입력파형이 파의 진행에 따라 달라지는 분산특성을 가지고 있다. 이러한 램파의 분산성 때문에 램파가 손상발생지점을 경유하여 파형이 변화했다고 하더라도 실제 파의 변화가 손상에 의한 것인지 분산성에 의한 것인지 판단하기 어렵다.

이러한 손상진단에서 램파의 분산효과를 효과적으로 분리하기 위해 다양한 연구들이 수행되어 왔다. 그 중 현대 시간반전음향학 (time reversal acoustics; TRA)에 기반을 둔 램파의 시간반전과정에 대한 연구가 주목할 만하다.[8)-9)] 그림 2(a)에서는 시간반전과정을 이용한 구조물 손상탐지의 개념을 나타내고 있다. 먼저, 구조물의 한 지점의 능동센서(PZT A)에서 기지의 특정 입력파를 생성시켜서 구조물에 가해 주면, 다른 지점의 센서(PZT B)에서 응답신호를 측정하게 된다. 만일 구조물에 손상이 없는 경우, PZT B에서 측정된 응답신호를 측정된 시간순서의 역순으로 뒤집어서 다시 PZT A로 돌려보내게 되면 파의 시간반전성에 의해서 그림 2(b)와 같이 원래의 입력신호와 시간반전과정을 통해 복원된 신호가 정확하게 일치하게 된다. 만약 구조물에 균열과 같은 손상이 있는 경우 같은 과정을 반복하게 되면 파의 시간반전성이 깨지면서 그림 2(c)와 같이 입력신호와 복원신호가 달라진다. 이것은 균열과 같은 손상에 의해 파전달문제가 비선형 문제로 바뀌면서 공간적 상반성이 위배

되기 때문에 발생하는 현상이다. 따라서 기지의 입력신호와 시간반전과정을 통해 복원된 신호를 직접 비교함으로써 과거의 기지 데이터를 참조하지 않고 구조물의 손상을 추정할 수 있다.[9]

2.1 유한요소법을 이용한 램파 전달의 모사

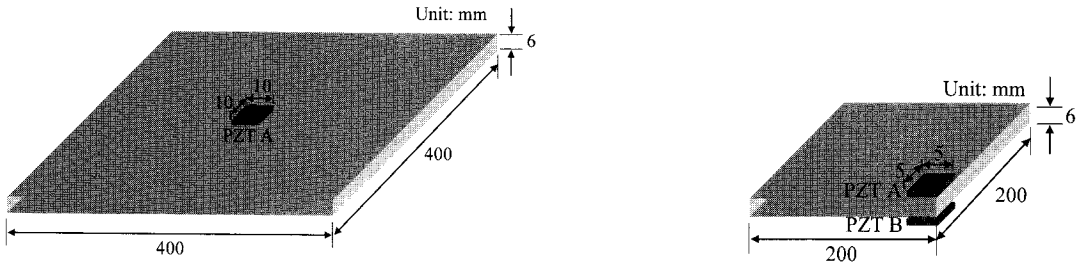
표면 부착형 압전소자를 이용한 시간반전 램파의 수치모사실험에는 대규모 파전달 해석이 필요하다. 표면 부착형 압전소자가 램파를 발생시키는 주파수 대역이 수십 kHz에서 수백 kHz에 이르기 때문에 유한요소법을 이용할 경우 정확한 해석을 위해 시간과 공간에 대한 조밀한 이산화과정이 필요하다. 유감스럽게도 3차원 판구조물에서 유한요소법을 이용하는 경우 막대한 연산비용을 수반하게 된다. 예를 들어 그림 3과 같은 3차원 판 모델의 파 전달 해석시 KISTI 수퍼컴퓨팅센터 hp595의 ABAQUS 6.7-4/Explicit를 이용하는 경우 꼬박 하루가 걸린다. 판의 크기는 그림 3(b)와 같이 가로와 세로 각각 20cm에 두께는 6mm이고, 파 전달 시간은 0.5ms에 불과하지만 사용된 총 요소의 수는 192만개에 시간증분은 10ns이다. 따라서 램파의 시간반전과정에서 짧게는 수 ms에서 길게는 수십 ms에 대한 수치해석을 수행하는 경우 유한요소해석의 시간은 급격히 증가하게 된다.

유한요소법을 이용한 해석은 해의 정확성은 우수하지만 연산비용 측면에서는 매우 불리하다. 만약 그림 3과 같이 판 모델의 형상이 직사각형인 경우 가상 탐지자 모델과 램파의 분산방정식만을 이용하여 시간반전과정을 효과적으로 모사할 수 있다.[10]

2.2 직사각형 판 구조물에서 가상 탐지자 배열을 이용한 시간반전과정 모사

그림 5는 가상 탐지자 모델을 이용하여 파 반사가 있는 시간반전과정 모사를 개념적으로 도식화 하였다. 그림 2와 같이 램파의 시간반전과정은 PZT A에서 가진하여 PZT B에서 수신하는 순방향 전달과 수신된 램파 신호를 시간영역에서 반전시킨 후 PZT B에 재입사시켜서 PZT A로 돌려보내는 역방향 전달로 진행된다.

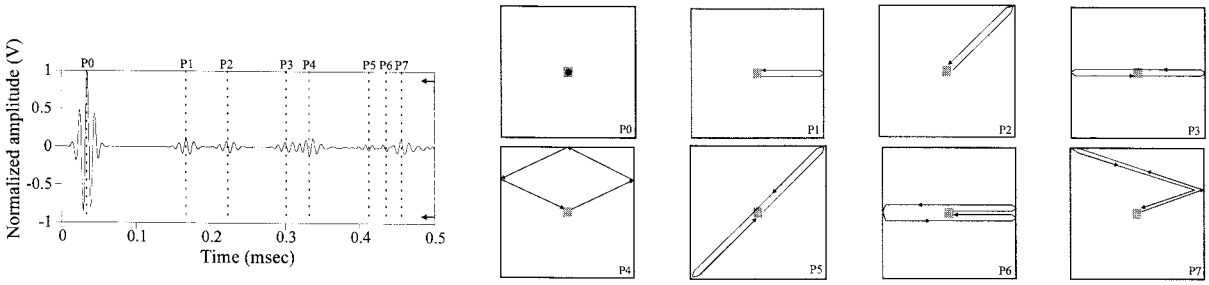
파 반사가 존재하는 경우 시간반전과정에서 순방향(forward) 및 역방향(backward) 전달 과정에서 무한히 많은 전달경로가 존재한다. 그림 5(a)에서 그 조합들 중 간단한 경우의 시간반



(a) 판 모델
(판 중앙부 상·하면에 동일한 크기의 PZT가 부착되어 있음)

(b) 그림 (a)에 대한 1/4 모델

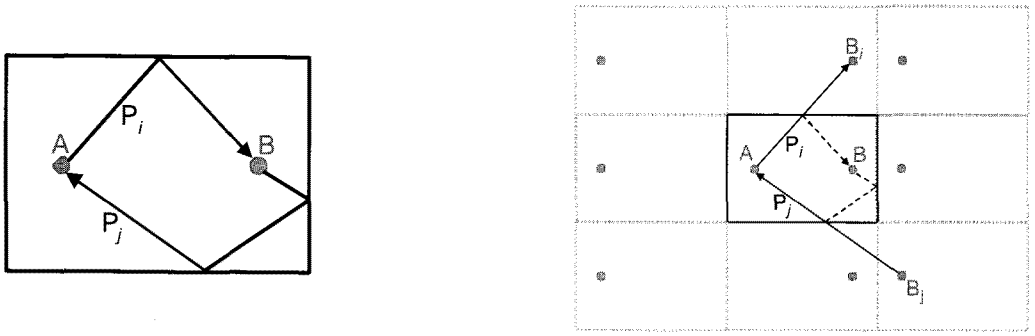
그림 3 자가 탐지(self-sensing)를 이용한 램파의 시간반전과정 모사를 위한 3차원 알루미늄 판 모델



(a) 순방향 응답신호

(b) 그림 (a)의 각 파군에 대응하는 반사파 경로

그림 4 그림 3의 판 모델에서 순방향 (forward) 해석에서 PZT A와 B에서 수신된 램파 신호와 각 파군에 대응하는 파 반사 경로
(입력신호는 100kHz 톤 버스트이고 PZT A와 B의 극성을 이용하여 A0모드만 가진)



(a) 램파의 시간반전과정에서 파 반사 (b) 그림 (a)의 시간반전과정을 위한 등가의 가상 센서 배열 모델

그림 5 램파의 시간반전과정에서 파 반사를 고려한 가상 센서 배열 모델[10]

전과정을 예로 도시하였다. 여기서, 순방향 전달은 P_i로 역방향 전달은 P_j으로 나타냈다.

그림 5(b)에서는 가상 탐지자 배열을 이용하여 그림 5(a)와 등가관계를 이루도록 시간반전과정을 모사하였다. 순방향 전달은 PZT A에서 순방향 전달에 대응하는 가상 탐지자 PZT B_i로 직접 전달되는 경로로 표시할 수 있다. 역방향 전달은 PZT B_i에서 수신된 램파 신호를 시간반전시킨 후 역방향 전달에 대응하는 가상탐지자 PZT B_j에 재입사 시킨 후 PZT A로 직접 돌려 보내는 경로로 표시할 수 있다.

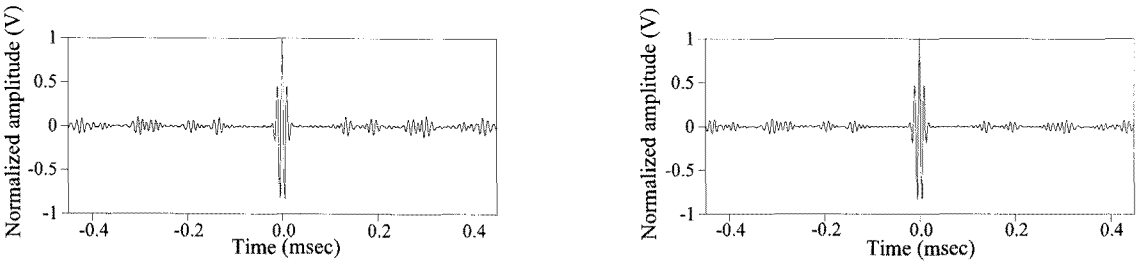
시간반전과정에서 모든 파 반사 경로를 고려할 때 PZT A에 복원되는 입력신호는 PZT A와 가상 탐지자 배열간의 시간반전과정에서 복원된 입력신호들의 중첩이 된다. 단일 램파 모드만을 고려하면 이러한 일련의 과정을 PZT A와 가상 탐지자 배열 간의 시간반전연산자를 이용하여 나타낼 수 있다.

그림 6은 유한요소법과 가상탐지자 배열 모델을 이용한 방법에서 각각 계산된 시간반전 램파 신호를 비교한 것이다. 그림 6에 제시된 것과 같이 가상탐지자 배열 모델을 이용하는 경우 매우 적은 시간비용으로 램파의 시간반전과정을 효과적으로 모사할 수 있다.

시간반전과정에서 파 반사는 램파의 탐지범위를 확장시켜 실제 사용된 센서의 개수보다 많은 수의 센서를 사용한 것과 같은 가상 수신자(virtual receptor) 효과를 유발한다. 가상 수신자 효과를 이용한다면 소수의 가진/탐지자를 통해 손상탐지 범위를 판 내부 전체로 확장할 수 있기 때문에 비용 측면에서 구조물 손상탐지를 위해 유용하게 활용할 수 있다.

3. 손상에 의해 유발된 전기역학적 신호 전산구조해석

램파의 시간반전과정이 판 구조물의 천이 상태 응답을 이용한 방법이라면 여기서 소개할 압전소자의 극성을 이용한 전기역학적 신호 분해법은 미세손상이 구조물의 정상상태 응답에 주는 변화를 압전소자를 이용해 탐지하는 방법이다. 이 때, 구조물의 정상상태 응답은 주파수 영역에서 압전소자의 전기역학적(Electro-mechanical; 이하 EM라고 칭함) 신호인 어드미턴스 또는 그의 역수인 임피던스를 통해 계측할 수 있다.



(a) 유한요소법 (소요시간: 167,554초)* (b) 가상탐지자 배열 모델 (소요시간: 0.23초)**

그림 6 그림 3의 판 모델에서 시간반전 램파 해석 결과 비교[10]

* ABAQUS 6.7-4/Explicit (KISTI 슈퍼컴퓨팅 센터 hp595)
** Matlab 2009b (Intel Core 2 Quad 6600 & Windows XP 64bit)

그림 7과 같이 판의 상·하면에 동일한 기하형상과 EM 물성치를 갖는 압전소자 PZT A와 B를 병치시킨 후 PZT A와 B를 번갈아 가면서 조화 가진시키고 동시에 판에 발생한 정상상태 응답을 측정하면 균열과 같은 손상에 의해 발생한 EM 신호를 기저 데이터없이 추출할 수 있다. 이는 판 구조물의 중립면을 기준으로 발생하는 대칭 모드인 S파 모드와 역대칭 모드인 A파 모드의 변위장 특성과 병치된 압전소자의 극성을 이용하여 가능하다.[6]

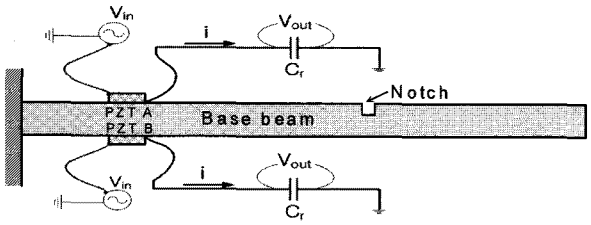


그림 7 손상에 의해 유발된 전기역학적(EM) 신호를 추출하기 위해 판 상·하면에 병치된 압전소자

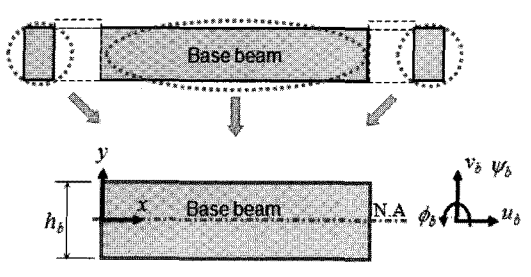
3.1. 구조물과 압전소자간의 상호작용을 고려한 스펙트럼 요소법

구조물에 부착된 압전소자의 EM 신호를 손상탐지에 활용하는 경우 기존 연구들은 주로 압전소자를 중심으로 대상 구조물은 단순화시킨 Liang 모델에 기반을 두고 있다.[3] Liang 모델을 이용하는 경우 손상이 없는 구조물의 EM신호를 기저신호로 미리 설정하고 같은 구조물에서 추후 측정된 EM신호가 기저신호와 얼마만큼 달라졌는가를 정량화하여 손상유무를 판단하게 된다. 이 때, 단순화된 해석모델의 한계 때문에 미세손상이 압전소자의 EM 신호에 주는 영향을 정량적으로 분석하기 어렵다. 따라서 구조물과 압전소자의 EM상호작용을 적절히 고려할 수 있는 해석 모델이 필요하다.

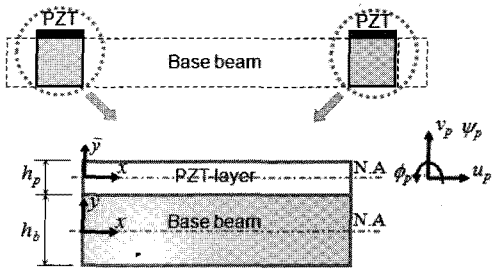
고주파 대역에서 구조물과 압전소자의 EM 상호작용 해석 시 많은 계산비용이 소요되는 유한요소법의 한계를 극복하기 위한 기법 중 하나로 스펙트럼 요소법(Spectral element method ; 이하 SEM)이 있다. SEM에서는 주파수 영역으로 변환된 지배방정식에서 구한 균일해를 변위장을 위한 형상함수로 사용한다. 따라서, 적은 수의 요소를 사용하더라도 고주파 영역에서 구조물의 정확한 질량 관성효과를 계산할 수 있기 때문에 정확한 해석 결과를 얻을 수 있다.

고주파 대역에서 압전소자와 보의 EM상호작용을 고려하기 위한 스펙트럼 요소 모델은 그림 8과 같다.

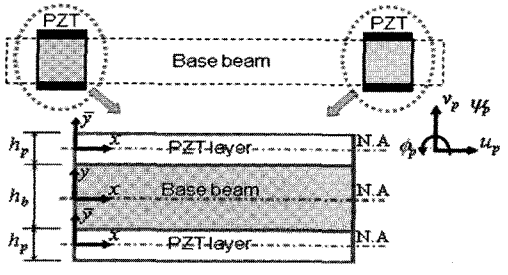
그림 8(a)의 기저보(Base beam)에 발생하는 축방향 변형모드와 휨 변형모드는 각각 민들린-허만 (Mindlin-Herrmann)과 티모센코(Timoshenko)보 이론으로 근사하였다. 그림 8(b)와 (c)에서 판에 부착된 압전소자층은 기저보에 강접합 된 것으로 가정하며, 두께가 상대적으로 얇은 것을 고려하여 압전소자층의 전기역학적 특성은 오일러-베르누이(Euler-Bernoulli)보 이론과 1차원 선형 압전 이론을 사용하여 모사하였다. 특



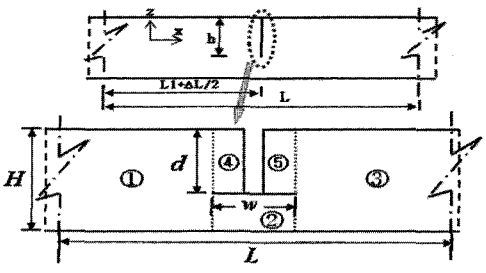
(a) 단일보 모델



(b) 단일 압전소자를 이용한 복층보 모델



(c) 병치 압전소자를 이용한 삼층보 모델



(d) 손상해석시 적용하는 균열요소 모델

그림 8 미세손상에 의해 유발된 EM 신호를 모사하기 위한 스펙트럼 요소 모델

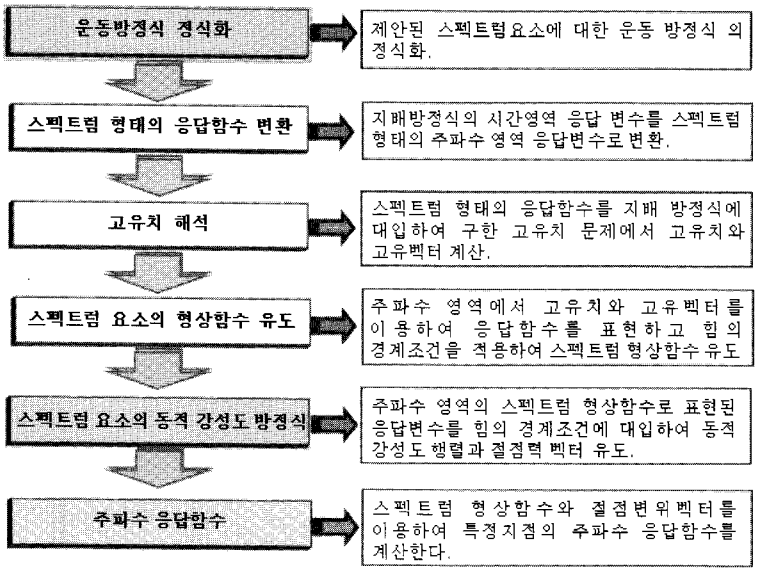


그림 9 스펙트럼 요소 정식화 과정

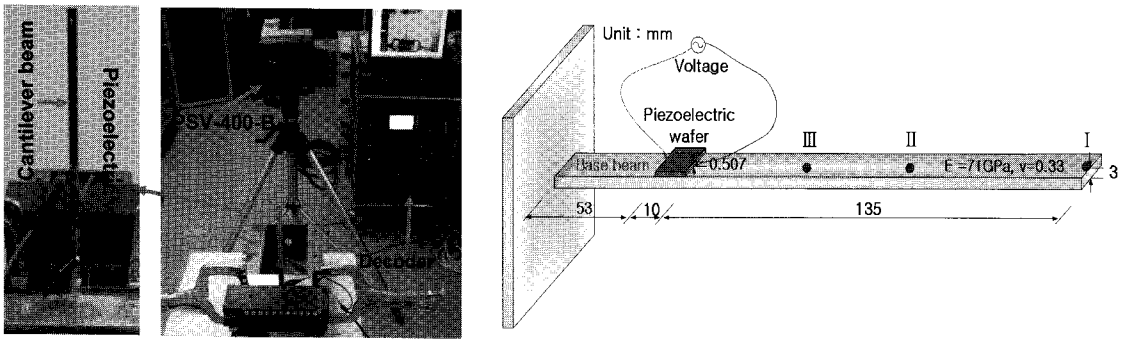
히, 그림 8(c)의 병치 압전소자모델의 경우는 그림 8(b)의 단일 압전소자 모델과 달리 중립축을 기준으로 전기역학적인 대칭이 성립하므로 운동방정식 유도시 축방향모드와 휨모드의 커플링이 발생하지 않는다. 압전소자와 기저보에 대한 운동에너지, 변형에너지, 포텐셜 에너지를 구한 뒤 해밀턴 정리를 이용하면 복층보에 대한 운동방정식과 힘의 경계조건을 유도할 수 있다.[11]

그림 9는 스펙트럼 요소 정식화 과정을 간략히 요약하여 정리한 것이다. 그림 9의 과정을 거쳐 최종적으로 복층보 스펙트럼 요소는 기저보의 중립축 양끝단에서 정의되는 수평변위, 수축(contraction), 수직변위, 회전에 대한 강성도 요소행렬과 이에 대응되는 절점력 벡터를 구성할 수 있다.

3.2. 스펙트럼 요소 해석의 실험적 검증

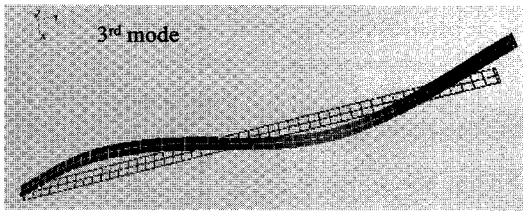
그림 10은 스펙트럼 요소 해석의 타당성을 실험적으로 검증하기 위해 사용된 고주파 영역에서의 동적 응답을 계측하기 위한 장비인 레이저 스캐닝 바이브로미터인 PSV-400-B 및 수치해석 모델을 보여준다. 실험모델은 압전소자가 부착된 캔틸레버 보다. 그림 10(a)에서 사용된 기저보[198mm(L)×10mm(W)×3mm(H)]는 알루미늄(E=70GPa, n=0.33)으로 이루어져 있고, 구조감쇠비 0.5%를 가정하였다. 기저보에 부착된 압전소자[10mm(L)×10mm(W)×0.507mm(H)]는 Piezo사의 PSI-5A4E재질을 사용하였다.

이 실험에서는 PSV-400-B가 지원하는 주파수 범위인 0~20kHz에서 3.125Hz의 주파수 분해능으로 측정하였다. 측정한 구조물의 동적응답은 11차 모드까지 공진주파수, 전체 모드 형상 및 목표점(그림 10(b)의 I지점)에서의 주파수응답함수이다. 스펙트럼 요소 해석에서 2절점 기저보 요소 2개와 2절점 복층보 요소 1개를 사용하였다. 3차원 유한요소해석의 경우 2차 입방형 고체요소 5940개와 2차 입방형 압전요소 100개를 사용하였다.

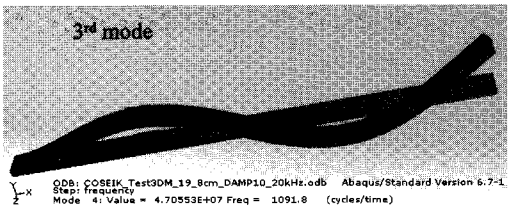


(a) 실험장비 (b) 수치해석 모델

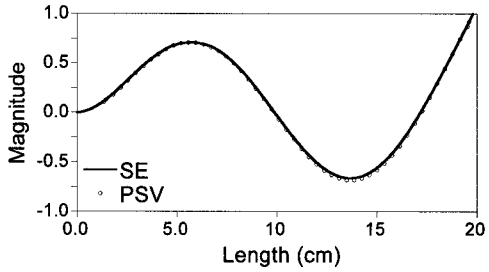
그림 10 주파수 응답함수를 구하기 위한 실험장치 및 수치모델[12]



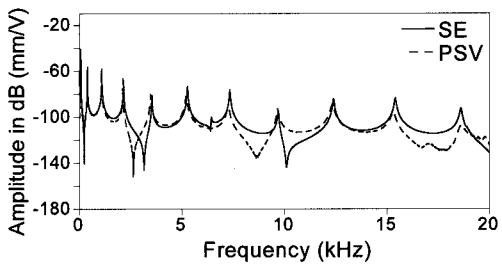
(a) PSV 모드형상



(b) 3-D FEM 모드형상.



(c) 스펙트럼요소 해석과 PSV 모드형상의 정량적 비교



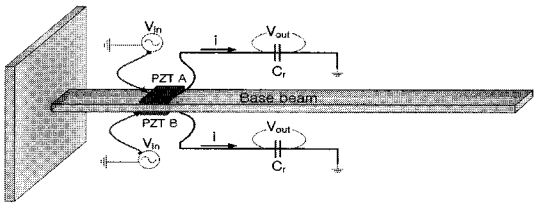
(d) 스펙트럼 요소(SE) 해석과 PSV의 I지점 주파수 응답함수.

그림 11 모드형상과 주파수 응답함수를 통한 압전소자가 부착된 캔틸레버보의 동적거동 실험및 해석결과 비교

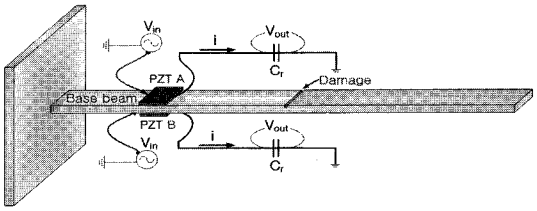
지면관계상 그림 11(a)에서는 PSV에서 20kHz까지 측정된 총 11개의 휨변형 지배 모드 중 3번째 휨 변형 지배 모드에 대한 결과를 나타냈다. 그림 11(b)와 (c)는 3차원 유한요소해석 및 스펙트럼 요소 해석 결과와 PSV를 비교한 것으로 전체적인 모드 형상이 잘 일치함을 알 수 있다. 나머지 10개의 모드들에 대한 결과도 동일하게 비교한 결과 1차 모드에서 6차 모드까지는 수치해석 결과와 실험결과가 매우 잘 일치하였고, 7차 모드부터 고정단 부근부터 다소간의 차이를 보이고 있지만 전체적으로 고차 모드 형상을 잘 나타냈다.

3.3. 판 구조물에 발생한 손상에 의해 유발된 EM 신호의 모사

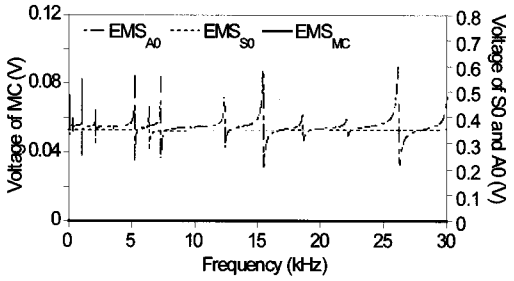
균열과 같은 손상이 발생한 경우는 스펙트럼 요소 해석 시 손상 부근에 그림 8(d)와 같은 1개의 균열 요소가 추가로 발생하게 되며, 이 요소는 세부적으로 5개의 2절점 스펙트럼 요소로 나뉘게 된다. 요소①과②, 요소①과④인 좌측과 요소②과③, 요소⑤과③의 우측인 2절점 스펙트럼 요소를 중립축에서의 절점 변위와 절점력에 관한 평형 방정



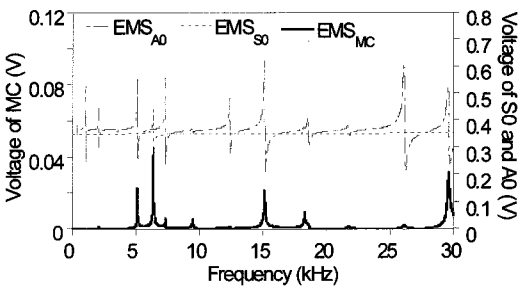
(a) 손상이 없는 모델



(b) 손상이 있는 모델



(c) 손상이 없는 모델에서 계산된 EM신호



(d) 손상이 있는 모델에서 계산된 EM신호

그림 12 판에 부착된 병치형 압전소자를 통해 추출된 EM 신호의 스펙트럼 요소 해석결과

식을 구성하여 손상에 관한 스펙트럼 동적 강성도 방정식을 유도할 수 있다.

판 구조물의 손상에 의해 유발된 EM신호 모사를 위해 사용된 수치해석 모델은 그림 10(b)의 수치모델에 적용된 동일한 기하형상과 물성치를 가지는 기저보와 압전소자를 사용한다. 그림 12(a)는 손상이 없는 상태를 나타내고, 그림 12(b)는 고정단으로부터 100mm 떨어진 지점에 손상(길이와 높이가 각각 1mm인 노치로 모사)이 발생한 것으로 가정한다. 그림 12(c)와 (d)는 각각 그림 12(a)와 (b)에 대응하는 EM 신호의 해석결과를 전압단위로 나타냈다. 여기서 EMS_{MC}는 손상에 의해 유발된 모드 변환 신호인데 손상이 없는 모델에서는 발생하지 않는 반면 손상이 있는 모델에서는 공진주파수 부근에서 뚜렷하게 관찰됨을 알 수 있다. 따라서 EMS_{MC} 신호의 유무를 통해 과거 기저 데이터와 비교하지 않고도 손상여부를 판단할 수 있다.

4. 맺음말

부착형 압전소자를 이용한 판 구조물 건전성 감시에서 손상의 정량화를 위해 압전소자, 구조물 그리고 손상간의 상호작용에 대한 해석이 필요하다. 기존의 연구들은 전산구조해석을 통한 전체 시스템의 정량적 해석 대신 Liang 모델을 이용한 압전소자 중심의 정성적인 해석에 주로 의존해왔다. 이러한 정성적인 방법은 손상의 유무를 파악하는데 적용될 수 있지만 손상 위치, 정도 그리고 유형 추정에 적용되기에는 한계가 있다. 뿐만 아니라 고주파수 대역의 압전소자-구조물-손상간 상호작용에 대한 전산구조 해석은 손상 유무를 판단하는데 가장 중요한 손상특성(damage feature)를 추출하는 과정에서 큰 도움을 줄 수 있다. 이러한 맥락에서 능동 센싱을 이용한 구조물 건전성 감시 분야에서 실험 연구자들과 전산구조해석 연구자들의 유기적인 협업이 매우 중요하다. 향후 이 분야에 대해 관심을 가지고 있는 전산구조해석 연구자들의 활약을 기대해 본다.

참 고 문 헌

1. Sohn, H., Farrar, C.R., Hemez, F.M., Czarnecki, J.J., Shunk, D.D., Stinemates, D.W. and Nadler, B.R., "A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996-2001", Los Alamos National Laboratory Report, LA-13976-MS, 2004.
2. Giurgiutiu, V., Zagrai, A.N. and Bao, J., "Piezoelectric Wafer Embedded Active Sensors for Aging Aircraft Structural Health Monitoring", An International Journal of Structural Health Monitoring, Vol.1, No.1, 2002, pp.41-61.
3 Park G, Sohn H, Farrar CR, Inman DJ., "Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward.", The Shock and Vibration Digest 35, 451-463 (2003).
4. Sohn, H., "Effects of Environmental and Operational Variability on Structural Health Monitoring", Philosophical Transactions of the Royal Society A 365(1851), 539-560 (2007).
5. Sohn, H., Park, H.W., Law, K.H., and Farrar, C.R., 2007, "Combination of a Time Reversal Process and a Consecutive Outlier Analysis for Baseline-Free Damage Diagnosis", Journal of Intelligent Materials and Smart Structures, Vol. 18, No. 4, pp. 335-346.
6. Kim, S.B. and Sohn, H., 2007, "Instantaneous Reference-Free Crack Detection Based on Polarization Characteristics of Piezoelectric Materials", Smart Materials and Structures, Vol. 16, No. 6, pp. 2375-2387.
7. Rose, J.L., 1999, "Ultrasonic Waves in Solid Media", Cambridge University Press.
8. Park, H.W., Sohn, H., Law, K.H., and Farrar, C.R., 2007, "Time Reversal Active Sensing for Health Monitoring of a Composite Plate", Journal of Sound and Vibration, Vol.302, No.1-2, pp. 50-66.
9. Sohn, H., Park, H.W., Law, K.H., and Farrar, C.R., 2007, "Damage Detection in Composite Plates by Using an Enhanced Time Reversal Method", Journal of Aerospace Engineering, ASCE, Vol. 20, No. 7, pp. 141-151.
10. 박현우, "가상 탐지자 배열을 이용한 직사각형 판에서 A0 램파 모드 시간반전과정 모사", 한국소음진동공학회 논문집 제20권 제5호, pp.460-469 (2010).
11. Park, H.W., Lim, K. L., Kim, E.J., and Sohn, H. "Spectral element formulation for dynamic analysis of a coupled piezoelectric wafer and beam system", Computers & Structures, Vol. 88, Iss. 9-10, 567-580, 2010.
12. 김은진, 손훈, 박현우, "압전소자가 부착된 보의 고주파수 동적응답에 대한 스펙트럼 요소 해석의 실험적 검증," 한국소음진동공학회 논문집 제19권 제12호, pp 1347-1355 (2009).

[담당 : 유은종, 편집위원]