Lamb파의 시간-반전과정 및 이미지기법을 이용한 손상탐지

Structural Damage Detection by Using the Time-Reversal Process of Lamb Waves and the Imaging Method

전용주¹ · 이우식[†]

Yongju Jun · Usik Lee

Abstract This paper proposes a baseline-free SHM technique in which the time-reversal process of Lamb waves and the imaging method are used. The proposed SHM technique has three distinct features when compared with the authors' previously proposed one: (1) It use the reconstructed signal for damage diagnosis, without need to extract the damage signal as the difference between reconstructed signal and initial input signal; (2) It use the imaging method based on the time-of-flight information from the reconstructed signal, instead of using a pattern comparison method; (3) In order to make the damage image more clear, the modified mathematical definition of damage image in a pixel is used. The proposed SHM technique is evaluated through the damage detection experiment for an aluminum plate with damage at different locations.

Keywords : Lamb wave, Time-reversal, Structural damage, Damage detection, Imaging method, Plate

초 록 본 연구에서는 Lamb파에 대한 시간-반전과정과 이미지기법을 기반으로 하여 기준 데이터를 사용하지 않는 구조물 건전성 모니터링(SHM) 기술을 제안하였다. 제안된 기술이 갖는 주요 세가지 특징은 다음과 같다: (1) 제안된 기술에서는 귀환신호를 직접 손상진단에 사용하기 때문에 귀환신호와 초기 입력신호의 차이로부터 손상신호를 구할 필요가 없다; (2) 기존의 기술에서 널리 사용되는 형상비교법을 사용하지 않고 귀환신호에서 얻는 비시간 정보를 활용하는 이미지기법을 사용하였다; (3) 손상 이미지를 보다 뚜렷하게 얻기 위하여 이미지에 대한 개선된 수학적 정의를 사용하였다. 본 연구에서 제안한 SHM기술은 손상을 평판의 몇몇 위치에 부가한 경우에 대한 손상탐지 실험을 수행함으로써 검증하였다.

주요어 : 램파, 시간-반전, 구조손상, 손상탐지, 이미지기법, 평판

1. 서 론

항공기, 자동차, 선박, 철도차량, 교량, 고층 건물, 기계 설비와 같은 구조물에 손상(damage)이 발생하여 그 정도가 심해지면 이들 구조물이 파괴되어 심각한 사고를 초래할 수 있다. 따라서, 구조물에 손상이 발생했는지를 조기에 진단하고 이에 따른 체계적인 보수 및 운영계획을 수립함으로써 불시의 사고를 사전에 예방하여 경제적 및 사회적 이익을 도모할 필요가 있다[1]. 이러한 노력의 일환으로 구조물의 건전성을 보다 효율적으로 모니터링하고 발생된 손상을 보다 정밀하게 탐지하기 위한 SHM(structural health monitoring)기술이 최근 많은 연구자들의 관심을 받고 있다.

기존에 소개된 대부분의 SHM기술의 특징을 살펴보면 구조물이 정상 상태일 때에 또는 새로운 손상이 발생하기 이전에 측정한 진동 또는 탄성과 데이터를 기준(baseline data)로서 구축해 놓고 있다가 현 시점에서 측정한 신호와 비교함으로써 얻은 신호 차이의 특성을 분석하여 손상의 발생여

부를 진단하고 발생 위치를 탐지하였다[2,3]. 그러나 이미 설치되어 있는 구조물의 경우 초기 측정데이터를 확보하기 어려운 경우가 많고, 주변환경의 변화에 따라 측정데이터가 민감하게 변화하는 경우에는 신뢰성 확보의 차원에서 이를 상시적으로 측정하고 통계 처리하여 기준데이터로 사용하기 위해 지속적으로 관리해야 한다는 점이 현실적인 측면에서 비효율적일 수 있다. 따라서, 가능하다면 기준데이터를 사용하지 않아도 되는 보다 현실적인 SHM기술의 개발이 많은 관심을 받고 있다.

최근 구조물에 대한 비파괴검사에 유도초음파(guided wave)를 활용하는 기술이 활발히 연구되고 있다. Lamb파는 평판과 같이 얇은 두께를 갖는 구조물에서 발생하는 유도초음파로써 금속재료의 경우 상당히 먼 거리까지 전파되어가기 때문에 평판 구조물의 비파괴검사 및 SHM에 응용되고 있다. 특히 Lamb파의 시간-반전(TR, time-reversal) 과정을 활용함으로써 기준데이터를 사용하지 않는 SHM기술이 최근 문헌[4-6]에 소개되고 있다.

Lamb파의 TR과정이란 Fig. 1에 보인 개념도와 같이 전진과정(forward process)과 후진과정(backward process)구성된다. 전진과정으로서 먼저 평판의 한 위치 I에 입력신호(input signal)를 입사한 후 다른 위치 J에서 그 곳으로 전파되어 오

[†]교신저자 : 인하대학교 공과대학 기계공학과
E-mail : ulee@inha.ac.kr

¹인하대학교 공과대학 기계공학과

Fig. 1 Standard time reversal process for Lamb waves

는 신호(response signal)을 수신한다. 위치 J에서 수신한 응답신호의 처음과 마지막을 시간 축에서 거꾸로 뒤집어 시간-반전된 응답신호를 얻는다. 후진과정으로서 시간-반전된 응답신호를 위치 J에 새로운 입력신호로서 입사하고 이때 위치 I로 전파되어 귀환되는 신호를 측정하고 이를 재생신호(reconstructed signal)라 부른다. 재생신호와 초기 입력신호가 동일한 경우 완벽한 TR특성을 갖는다고 말한다. 완벽한 TR특성은 이산특성(dispersive property)을 무시할 수 있는 음파(acoustic waves)에 한하여 비교적 성공적으로 구현되기 때문에 수중 음향탐사나 초음파를 이용한 결석제거 수술 등에 응용되고 있다[7], 그러나, Lamb파와 같은 유도초음파의 경우에는 이들이 갖는 고유한 특성인 이산특성과 다중모드(multi-modes)특성으로 인하여 완벽한 TR특성이 구현되지 않는다[8-10]. 따라서, 기존의 TR-기반 SHM기술[4-6]에서 일반적으로 사용하고 있는 방법으로 초기 입력신호와 재생신호(reconstructed signal)의 형상을 직접 비교하여 손상을 탐지하는 Fig. 1에 보인 형상비교법(pattern comparison method)은 신뢰성 차원에서 기본적인 문제점이 존재함을 알 수 있다. 또한 TR과정에서 소요되는 시간의 대부분이 위치 J에서 수신된 응답신호를 시간-반전시키고 이를 재송신하여 재생신호를 얻는 후진과정을 측정장비를 직접 사용하는 실측으로 수행하는데 소요되기 때문에 이러한 문제점을 해결하기 위한 연구가 요구되고 있다.

본 연구자는 이전 연구[11]에서 유도초음파 신호의 상호성 특성(reciprocal property)을 기반으로 하여 후진과정을 전달함수(transfer function)를 활용하는 전산과정으로 대체하는 새로운 TR과정을 소개하였다. 그리고, 재생신호에서 초기 입력신호에 해당하는 부위를 제거하여 소위 손상신호(damage signal)를 도출한 후 여기에 이미지기법(imaging method)을 적용하여 손상의 위치를 탐지하는 기법을 처음으로 소개하였다. 그러나, 재생신호에서 초기 입력신호에 해당하는 부위를 해석적으로 완벽하게 제거하는 것이 현실적으로 어려울 뿐만 아니라 번거롭기 때문에 이러한 과정을 수행하지 않고서도 이미지기법을 활용하여 손상의 위치를 탐지할 수 있는 개선된 SHM기술을 본 연구에서 소개하였다. 새로이 소개되는 개선된 SHM기술은 알루미늄 평판에 대한 손상검출 실험을 통해 평가하였다.

2. Lamb파의 시간-반전 과정

Lamb파는 다중모드 특성에 따라 다양한 모드로 구성되며

Fig. 2 Input and measured response signals in the forward process

이들은 평판의 중심면을 기준으로 대칭성을 갖는 대칭모드(symmetric modes)와 비대칭성을 갖는 비대칭모드(asymmetric modes)로 크게 구분된다. 대부분의 문헌에서 대칭모드와 비대칭모드를 각각 S_n 과 A_n ($n = 0, 1, 2, \dots$)으로 통상 표현한다. Lamb파는 각 모드가 주파수에 따라 다른 그룹속도(group velocity)로 전파하기 때문에 전파해가는 동안 파형이 변화하는 이산특성을 갖는다[9]. 이러한 이산특성은 이론 또는 실험으로 얻은 분산곡선(dispersion curve)을 활용하여 파악할 수 있다.

금속재료 평판의 경우 일반적으로 특정 가진주파수(excitation frequency) 이하에서는 두 개의 기본 모드(A_0 및 S_0 모드)만이 유도되고 그 이상의 가진주파수에서는 최소 3개 이상의 많은 모드가 동시에 유도된다. 따라서 Lamb파를 손상탐지에 성공적으로 활용하기 위해서는 손상탐지에 활용될 기본 모드를 제외한 다른 고차 모드의 유도를 억제할 필요가 있다. 이와 같이 함으로써 선택적으로 유도된 기본 모드의 이산화를 최소화하고 동시에 손상탐지에 필요한 신호처리의 효율성을 높일 수 있다[12]. 본 연구에서는 알루미늄 평판을 연구대상으로 하였다. 그러나 본 연구에서 제안된 SHM기술은 다른 금속재료에 동일하게 적용될 수 있다.

본 연구에서 사용할 Lamb파의 TR과정을 간략히 소개하기 위하여 Fig. 2에 보인 바와 같이 중심주파수(center frequency)가 200kHz이고 5개의 피크를 갖는 Morlet함수를 초기 입력신호로 사용하였다. PZT-액츄에이터를 이용하여 초기 입력신호 V_i 를 평판의 한 위치 I에 가하면 평판에 Lamb파의 기본 모드인 A_0 와 S_0 가 유도되어 전파된다. 그 결과 평판의 다른 위치 J에 부착된 PZT-센서에서 기본 모드 A_0 와 S_0 가 그곳으로 전파되어 응답신호 V_j 로서 측정되는 것을 확인할 수 있다. 이 과정이 TR과정을 구성하는 두 개의 과정 가운데 첫 번째 과정에 해당하는 전진과정이다. Fig. 2를 포함한 본 논문의 다른 모든 그림에서 A_0 와 S_0 신호를 편이상 A와 S로 간략히 표시하였으며 앞으로의 서술에서도 혼선이 발생하지 않는 한 이러한 표기법을 동일하게 사용하였다.

Fig. 2의 응답신호 V_j 에서 S와 A는 모두 위치 I와 위치 J를 연결하는 '직경선로'를 따라 전파된 신호를 나타내며 S의 그룹속도가 A에 비해 상대적으로 크기 때문에 위치 J에 먼저 도착했음을 알 수 있다. Fig. 2의 응답신호 V_j 에서 추가적으로 나타나는 신호 AA는 A가 위치 I를 출발하여 평판에 부가된 손상 D에 도달한 다음 그 곳에서 동일한 A모드의 형태로 반사하여 위치 J에서 측정된 '우회경로'를 거친 신호이다. 위치 I를 출발한 S도 우회경로를 거쳐서 위치 J에서 신호 SS로서 측정될 수 있다. 그러나 S의 크기를 A에

비하여 매우 작도록 가진 주파수를 충분히 조절할 수 있을 뿐만 아니라 손상 D에서의 반사율도 매우 낮기 때문에 SS의 크기가 AA에 비하여 무시될 정도로 작아 Fig. 2에 보인 바와 같이 그림상 식별이 어렵다. 위치 I를 출발한 A가 우회경로를 거치는 과정에서 손상 D에 의해 모드 변환(mode conversion)을 일으켜 S모드의 형태로 귀환할 수 있는데 이 신호 역시 AA에 비하여 무시될 만큼 작다. 이에 관한 보다 상세한 논의는 이전 연구[11]에서 참조할 수 있다. 본 연구에서는 A와 S의 그룹속도와 평판의 크기로부터 산출된 Lamb파의 TOF(time-of-flight)를 이용하여 평판의 경계에서 반사되어 오는 신호들을 응답신호에서 제거하였다.

Fig. 3은 TR과정의 두 번째 과정인 후진과정에서의 신호들을 나타낸다. 먼저 Fig. 3(a)는 전진과정에서 측정된 응답신호를 시간-반전시킨 응답신호를 나타낸다. 시간-반전시킨 신호는 주파수영역에서 원래 신호에 대한 켄레 복소수(complex conjugate), 즉 V_j^* 로 표현된다[8]. 후진과정에서는 위치 J에 부착된 PZT를 액츄에이터로 사용하여 시간-반전시킨 응답신호 V_j^* 를 입력신호로 가한다. 이로 인해 위치 I로 전파되어 귀환되어 오는 신호를 위치 I에 부착된 PZT를 이번에는 센서로 사용하여 측정하였다. 이와 같이 측정된 재생신호를 V_I^{TR} 로 나타내었다. 기존의 SHM기술에서는 후진과정을 모두 측정장비를 통한 실측으로 수행하였는데 이에 따른 문제점은 서론에서 언급한 바 있다. 따라서, 본 연구자는 이전 연구[11]에서 후진과정을 컴퓨터를 활용하는 전산과정으로 대체하는 새로운 TR과정을 소개하고, Fig. 3(b) 보인 바와 같이 기존의 실측과정으로 얻은 귀환신호와 전산과정으로 얻은 귀환신호를 서로 비교하여 큰 차이가 없음을 보임으로써 제안된 새로운 TR과정을 검증한 바 있다.

Fig. 3(b)의 귀환신호를 살펴보면 다음과 같은 특징이 있음을 확인할 수 있다. 먼저, Fig. 3(a)의 신호 A가 위치 J를 출발하여 직선경로를 통해 위치 I에 귀환한 신호 A/A가 항상 귀환신호의 중앙에 위치한다. 또한, 신호 AA가 위치 J를 출발하여 직선경로를 따라 위치 I에 귀환한 신호 AA/A와 신호 A가 동일한 위치 J를 출발하여 우회경로를 따라 위치 I에 귀환한 신호 A/AA는 언제나 신호 A/A의 좌우에 정확히 대칭을 이룬다. 이러한 대칭성은 Fig. 3(b)에 보인 바와 같이 실험 및 전산을 통해서 확인할 수 있다. 앞서 기술한 바와 같이 Fig. 3(a)의 신호 S는 신호 A에 비하여 크기를 매우 작게 조절할 수 있기 때문에 후진과정에서 이 작은 신

호 S에 의해 2차적으로 파생되는 신호들의 크기도 귀환신호에서 무시할 수 있을 정도로 매우 작다.

3. Lamb파의 TR-기반 SHM기술

문헌에 소개된 기존의 TR-기반 SHM기술은 대부분 재생신호와 초기 입력신호를 비교하여 차이가 존재한다면 이 차이는 대부분 손상에 의해 발생된 것이라는 가정을 바탕으로 하여 개발된 것이다. [4-6]. 즉, Fig. 2의 초기 입력신호 V_I 와 Fig. 3(b)의 재생신호에서 중앙에 위치한 A/A 신호를 비교하여 얻은 신호의 차이를 이용하여 손상을 탐지하는 형상비교법을 주로 사용하였다. 그러나 Lamb파의 고유특성인 다중모드특성과 이산특성으로 인하여 재생신호의 중심 부위 A/A가 더 이상 초기 입력신호 V_I 와 정확히 일치하지 않을 뿐만 아니라 초기 입력신호에는 없었던 신호들이 TR과정에서 파생되어 재생신호에 나타날 수도 있다. 따라서 단순한 형상비교법에 기반을 두고 있는 TR-기반 SHM기술은 상당한 손상탐지 오류를 발생할 가능성이 있다. 따라서, 본 저자는 기존 연구[11]에서 형상비교법을 대신하여 손상신호(damage signals)의 TOF 정보를 활용하여 손상의 위치를 이미지화하는 새로운 손상탐지 기법을 제안한 바 있다.

Fig. 4는 본 저자의 기존 연구[11]에서 소개한 손상신호를 도출하는 과정을 보인다. 손상신호는 귀환신호와 비교신호(comparison signal)의 차이로서 정의된다. 이때 사용되는 비교신호는 초기 입력신호로 사용한 Morlet함수의 피크의 크기, 함수의 폭, 함수의 주기를 결정하는 파라미터를 귀환신호의 중앙에 위치한 A/A 신호 부위와 일치하도록 결정하여 수식적으로 유도한다. 이렇게 유도한 비교신호를 귀환신호와 비교한 것을 Fig. 4(a)에 도시하였다. 또한 Fig. 4(b)는 귀환신호에서 비교신호를 빼서 손상신호를 구한 다음 손상신호의 상부 포락선(envelope)을 구하여 도시한 것이다. 손상신호에 대한 포락선을 구한 이유는 손상의 위치정보를 포함하고 있는 신호 부위에 대한 정확한 TOF, 즉 손상신호의 피크 위치를 정확하게 파악하기 위해서 Morlet함수 형태의 짧은 주기를 갖는 복잡한 손상신호를 직접 사용하는 것보다 포락선을 사용하는 것이 보다 효과적이기 때문이다[13]. 기존 연구[11]에서는 이와 같이 구한 손상신호의 포락선이 제공하는 TOF 정보를 기반으로 하는 이미지기법을 적용하여 손

Fig. 3 Time-reversed and reconstructed signals in the backward process

Fig. 4 Construction of damage signal[11]

상의 위치를 이미지로 나타냄으로써 손상을 탐지하였다. 그러나, 기존 연구[11]에서 제시한 방법에 따라 귀환신호의 중앙에 위치한 A/A 신호 부위를 완벽하게 제거하기 위해 필요로 하는 비교신호를 수식적으로 정확하게 유도하는 것이 쉽지 않다는 현실적인 문제점이 있다. 따라서 본 논문에서는 비교신호를 생성하여 손상신호를 도출하는 일련의 과정을 필요로 하지 않는 개선된 손상탐지 기법을 아래에 제안하였다.

Fig. 5는 평판상의 위치 I (PZT I), 위치 J (PZT J), 그리고 손상 D를 연결하는 Lamb파 전달 경로에 대한 직선 거리를 도시한 것이다. 또한 Fig. 6은 귀환신호에 포함된 신호 A/A, AA/A, A/AA의 TOF를 Fig. 5에 나타낸 각 경로의 직선 거리와 A모드의 그룹속도 V_A 의 함수로 나타낸 것이다. 앞에서 기술한 바와 같이 기존 연구[11]에서는 비교신호를 이용하여 귀환신호로부터 A/A 신호 부위를 제거하여 손상정보를 갖는 AA/A 및 A/AA 신호 부위만을 갖는 손상신호를 도출한 후 시간-반전시킨 응답신호에서 신호 A를 기준으로 하여 산출한 AA/A 및 A/AA 신호까지의 비시간을 이용하는 이미지기법을 사용하였다. 그러나, Fig. 6을 살펴보면 시간-반전시킨 응답신호에서 신호 A를 기준으로 하여 산출한 TOF를 사용하는 대신에 귀환신호의 중심에 위치한 신호 A/A를 기준으로 하여 산출한 AA/A 또는 A/AA 신호의 TOF를 직접 이용하여 손상의 위치를 이미지로 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 이는 Fig. 6에 도시한 TOF 값 t 에 손상의 위

치 (x, y)에 대한 정보가 아래 식과 같이 포함되어 있기 때문이다.

$$t = \frac{\Delta d}{V} = \frac{d_1 + d_2 - d_{IJ}}{V} \quad (1)$$

여기서

$$d_1 = \sqrt{(x_I - x)^2 + (y_I - y)^2} \quad (2)$$

$$d_2 = \sqrt{(x_J - x)^2 + (y_J - y)^2}$$

위 식에서 (x_I, y_I) 와 (x_J, y_J) 는 각각 평판상에서 PZT I와 PZT J의 좌표 값으로서 사전에 아는 값들이다.

식(1)로 주어지는 TOF를 사용하여 이미지기법을 적용하는 경우에 귀환신호의 중앙에 위치하는 신호 A/A의 중심에 손상정보를 갖는 AA/A 또는 A/AA 신호까지의 TOF를 산출하는데 필요한 시간의 원점을 두게 된다. 따라서 이미지화 과정에서 신호 A/A는 PZT J의 위치를 이미지로 나타내고 신호 A/AA 또는 AA/A는 손상의 위치를 이미지로 나타내는 결과가 된다. 따라서 이전 연구[11]와는 달리 Fig. 4에 보인 소위 비교신호를 생성하여 신호 A/A 부위를 제거하는 과정이 더 이상 필요 없게 된다. 단지, 신호 A/A의 크기가 신호 A/AA 또는 AA/A의 크기에 비하여 일반적으로 크기 때문에 손상 이미지가 PZT의 이미지에 비하여 상대적으로 약하게 표현될 수 있기 때문에 손상탐지 결과에 대한 판독에 오류를 가져올 수 있다. 이러한 경우에 대비하여 본 연구에서는 이미지기법의 적용 과정에서의 신호처리를 다음과 같이 개선하였다.

기존의 연구들[10,11,13]에서 사용된 이미지기법의 일반화된 절차에 따라 먼저 Fig. 7(a)에 보인 바와 같이 임의의 PZT-액츄에이터와 임의의 PZT-센서를 연결하는 경로(예로, 경로 I-J)에 대한 귀환신호를 구한다. 다음은 각 귀환신호에 대한 포락선을 구하여 Fig. 7(b)에 보인 바와 같이 시간에 대

Fig. 5 Distances of each signal paths

Fig. 6 Time-of-flights of each Lamb wave packets

Fig. 7 Modified envelope of the reconstructed signal

한 함수 $f_{IJ}(t)$ 로 나타낸다. 이러한 작업을 모든 경로에 대해 반복하여 수행한다. 기존의 연구에서는 이와 같이 구한 귀환신호의 포락선 함수를 이용하여 평판상 임의의 위치 (x, y)에 설정된 픽셀(pixel)에 대한 이미지 값 (또는 RGB 값)을 다음과 같이 정의하여 사용하였다.

$$\text{Image}(x, y) \sum_{I=1}^M \sum_{J=1}^M A_{IJ} f_{IJ}(t) \quad (3)$$

여기서 M 은 경로의 수를 나타내고 A_{IJ} 는 IJ -번째 경로에 대한 가중치로서 일반적으로 $A_{IJ}=1$ 을 사용하였다. 본 연구에서는 손상 이미지의 강화를 위하여 식(3)을 사용하는 대신에 다음과 같이 새로이 정의된 이미지 값을 사용하였다.

$$\text{Image}(x, y) \sum_{I=1}^M \sum_{J=1}^M A_{IJ} F_{IJ}(t) \quad (4)$$

여기서 $F_{IJ}(t)$ 는 포락선 함수 $f_{IJ}(t)$ 를 다음 식과 같이 변환한 것이다.

$$F_{IJ}(t) = n \sqrt{f_{IJ}(t)} \quad (5)$$

식(4)에서 n 의 값을 1 보다 큰 값으로 선택함으로써 Fig. 7(c)에 예시한 바와 같이 신호 A/A의 크기와 신호 A/AA 또는 AA/A의 크기의 상대적 차이를 줄여 손상 이미지를 보다 강화하는 효과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 $n=2$ 를 사용하였다.

위에서 기술한 SHM기술을 금속재료 평판과 같이 Lamb파의 그룹속도가 모든 전파 방향으로 동일한 경우에 적용할 수 있으나 복합재료 평판과 같이 Lamb파의 그룹속도가 전파 경로에 따라 변할 수 있는 경우에는 식(1)을 수정하여 적용할 수 있다. 본 연구에서는 제안된 SHM기술을 알루미늄 평판에 1차적으로 적용하고자 한다.

4. 손상탐지 실험 및 결과

4.1 실험장비 및 시편

Fig. 8은 손상탐지 실험에 사용한 실험장치를 보인다. 실험장치는 입력신호를 생성하기 위한 함수발생기(NI사 PXI-5412)와 신호증폭기 (FLC사 F20AD), 디지털타이저 (NI사 PXI-5412), 그리고 DAQ시스템 (NI사 Chassis PXI-1042Q)로 구성된다. Lamb파를 발생시키고 송수신하기 위한 액츄에이터와 센서로서 두 가지 기능을 모두 수행할 수 있는 4개의 PZT를 사용하였으며, 사용된 PZT는 모두 직경이 6mm이고 두께가 2mm인 디스크형 PZT이다.

손상탐지 실험은 알루미늄 평판(AL-6061 T6)을 대상으로 수행하였다. 실험에 사용된 평판은 정사각형으로써 한 변의 길이가 900mm이고 두께는 2mm이다. 하나의 손상이 Fig. 9에 보인 바와 같이 서로 다른 3개의 위치 D1, D2, D3에 발생된 경우에 대해 차례로 손상탐지 실험을 하였으며 2개의 손상이 (예로 D2와 D3) 동시에 발생된 경우에 대하여도 손상탐지 실험을 하였다. 손상은 다른 많은 연구자들[8,13-15]

Fig. 8 Experimental set-up

Fig. 9 Three damage locations

이 널리 사용해 온 간편한 방법으로써 손상이 발생한 곳으로 선택된 위치에 실린더 모양의 금속 추를 접착제로 부착하여 실제의 손상을 부가질량(added mass)로 모사하는 방법을 택하였다.

4.2 실험결과

Fig. 8 및 Fig. 9에 보인 바와 같이 평판의 네 곳에 액츄에이터 및 센서로 사용할 PZT 4개를 동일한 간격으로 부착하였다. 부착한 각 PZT의 전기-기계적 임피던스(electromechanical impedance)를 측정하여 PZT의 부착상태를 평가함으로써 부착상태의 불량으로 인한 신호의 불균일성을 먼저 점검하였다.

LabVIEW의 신호생성함수를 사용하여 중심주파수가 200kHz 이고 5개의 피크를 갖는 Morlet함수를 생성하고 함수발생기와 신호증폭기를 거쳐 $\pm 40V$ 로 증폭시킨 후 초기 입력신호로 사용하였다. 먼저 PZT A에 초기 입력신호를 가하고 나머지 세 곳의 PZT에서 응답신호를 측정하여 디지털타이저를 통해 컴퓨터에 저장하였다. PZT B, PZT C, PZT D의 순서로 바꾸어가면서 액츄에이터로 사용하여 동일한 전진과정 실험을 반복 수행하여 총 12개 경로에 대한 응답신호를 측정하였다. 상호성 특성(reciprocal property)에 따라 총 12개 경로에 대한 응답신호 가운데 A-B, A-C, A-D, B-C, B-D, C-D의 6개 경로에 대한 응답신호가 나머지 6개 경로에 대한 응답신호와 실제로 거의 일치하기 때문에 A-B, A-C, A-D, B-C, B-D, C-D의 6개 경로에 대한 응답신호만을 손상탐지에

사용하였다.

전진과정 실험에서 측정된 응답신호에는 EMI잡음, 초기 입력신호에 포함되지 않는 주파수 성분의 잡음, 경계 반사 신호 등이 다양하게 포함되어 있다. 따라서, 손쉽게 식별이 가능한 EMI잡음을 먼저 제거하고 주파수 필터링을 통해 초기 입력신호에 포함되지 않는 주파수 성분의 잡음을 제거하였다. 경계 반사신호는 평판의 경계로부터 이들이 반사되어 측정 위치까지 도달하기까지의 TOF를 예측한 후 이를 이용하여 경계 반사신호를 각 경로 별 응답신호에서 제거하였다.

귀환신호를 얻기 위한 후진과정을 수행하기 위하여 기존 연구[11]에서 제안된 절차를 사용하였다. 먼저 앞서 신호처리된 응답신호의 주파수 성분을 초기 입력신호의 주파수 성분으로 나누어 전달함수를 구하였다. 이와 같이 구한 전달함수에 시간-반전시킨 초기 입력신호를 곱하여 전산으로 귀환신호를 구하였다. 귀환신호의 신호-잡음비를 향상시키기 위하여 전산과정으로 구한 귀환신호에 웨이브렛 변환(wavelet transform)[16]을 적용한 후 그 결과에서 초기 입력신호의 중심주파수인 200kHz 성분만을 취하여 이를 최종 귀환신호로 사용하였다. Fig. 10는 손상이 Fig. 8에 보인 평판의 D1 및

D2의 위치에 있는 각각의 경우에 대해 6개 경로 A-B, A-C, A-D, B-C, B-D, C-D에 대해 구한 최종 귀환신호의 포락선을 도시한 것이며 이들 포락선은 식(5)에서 $f_{ij}(t)$ 로 사용된다.

Fig. 10(a)는 손상이 위치 D1에 있는 경우에 대한 귀환신호의 포락선을 나타낸다. 이 경우 손상이 4개 PZT의 가운데에 위치하고 있기 때문에 4개 경로 A-B, A-D, B-C, C-D에 대한 귀환신호의 포락선이 모두 거의 동일한 형태를 보임을 알 수 있으며, 대각선 경로인 A-C와 B-D에 대한 포락선도 서로 거의 동일함을 알 수 있다. 그러나, 손상이 4개 PZT의 가운데에서 한 쪽으로 벗어난 위치인 D2에 있는 경우에는 각 경로 별 귀환신호의 포락선이 대부분 서로 다른 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 위에 기술한 바와 같이 실측(전진과정)과 전산(후진과정)으로 구한 귀환신호의 포락선 $f_{ij}(t)$ 함수를 식(5)와 식(4)에 적용하는 개선된 이미지기법을 통해 얻은 손상탐지 결과를 나타낸다. 하나의 손상을 평판의 D1 또는 D2 위치에 부가한 경우에 매우 정확하게 탐지하고 있으며 네 개의 PZT가 이루는 경계 밖에 하나의 손상을 부가한 경우에도 성

Fig. 10 Envelopes of the reconstructed signals when a damage is located at D1 and D2

Fig. 11 Damage detection results when a single damage is located at D1, D2 or D3

Fig. 12 Damage detection result when two damages are located at D_2 and D_3

공적으로 탐지하고 있음을 알 수 있다. Fig. 12는 손상이 D_2 와 D_3 위치에 동시에 존재하는 경우에 대한 것으로서 탐지 결과가 성공적임을 알 수 있다. 그러나, 손상이 PZT가 이루는 경계에서 너무 먼 거리에 있는 경우 경계에서 반사되는 신호의 간섭으로 탐지 결과가 저하될 수 있다. 따라서 이러한 경우 경계신호를 효율적으로 제거 또는 처리하는 과정을 본 연구에서 제안하는 SHM기술과 병행하여 사용할 필요가 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 유도초음파인 Lamb파의 TR과정을 통해 얻은 귀환신호를 활용하여 기준데이터가 필요 없는 TR-기반 SHM기술을 제안하였다. 제안된 TR-기반 SHM기술은 기존의 TR-기반 SHM기술과 비교하여 다음과 같은 특징을 갖는다.

(1) 기존의 TR-기반 SHM기술에서는 귀환신호로부터 추출한 손상신호를 손상탐지에 사용하였으나 제안된 TR-기반 SHM기술에서는 귀환신호를 직접 사용하기 때문에 손상신호를 별도로 추출할 필요가 없다.

(2) 기존의 TR-기반 SHM 기술에서는 대부분 형상비교법을 사용하였으나 제안된 TR-기반 SHM 기술에서는 귀환신호에서 도출한 손상정보 신호 부위의 TOF 정보를 활용하는 이미지기법을 적용하였다.

(3) 이미지기법에서 손상 이미지를 강화하기 위하여 식(5)로 표현되는 새로운 포락선 함수를 사용하였다.

본 연구에서 제안된 TR-기반 SHM 기술을 검증하기 위하여 손상이 부가된 알루미늄 평판에 대해 손상탐지 실험을 수행하였다. 그 결과 제안된 TR-기반 SHM기술이 평판에 부가한 손상을 성공적으로 탐지할 수 있음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(과제번호 2010-0007741)임.

참고문헌

- [1] R.J. Hansen, D.L. Hall, S.K. Kurtz (1995) A new approach to the challenge of machinery prognostics, *Journal of Engineering Gas Turbines and Power*, 117, pp. 320-325.
- [2] D. Montalvao, N.M.M. Maia, A.M.R. Ribeiro (2006) A review of vibration-based structural health monitoring with special emphasis on composite materials, *The Shock and Vibration*, 38(4), pp. 295-324.
- [3] A. Raghavan, C.E.S. Cesnick (2007) Review of guided-wave structural health monitoring, *The Shock and Vibration*, 32(2), pp. 91-114.
- [4] H.W. Park, H. Sohn, K.H. Law, C.R. Farrar (2007) Time reversal active sensing for health monitoring of a composite plate, *Journal of Sound and Vibration*, 302, pp. 50-66.
- [5] H. Sohn, H.W. Park, K.H. Law, C.R. Farrar (2007) Damage detection in composite plates by using an enhanced time reversal method, *Journal of Aerospace Engineering*, 20(3), pp. 141-151.
- [6] H. Sohn, H.W. Park, K.H. Law, C.R. Farrar (2007) Combination of time reversal process and a consecutive outlier analysis for base-line free damage diagnosis, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 18(7), pp. 335-346.
- [7] M. Fink (1992) Time reversal of ultrasonic fields-part I: basic principles, *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 39(5), pp. 555-566.
- [8] C.H. Wang, J.T. Rose, F.K. Chang (1998) A synthetic time-reversal imaging method for structural health monitoring, *Smart Materials & Structures*, 13, pp. 415-423.
- [9] I.A. Viktorov (1967) *Rayleigh and lamb waves: physical theory and applications*, Plenum Press, NY.
- [10] H. Ko, U. Lee (2009) A guided wave-based structural damage detection method for structural health monitoring, *Journal of the Korean Society for Railway*, 12(3), pp. 412-419.
- [11] U. Lee, J. Choi (2010) Structural damage diagnosis method by using the time-reversal property of guided waves, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 27(6), pp. 64-74.
- [12] G.B. Santoni, L. Yu, B. Xu, V. Giurgiutiu (2007) Lamb wave-mode tuning of piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring, *Journal of Vibration and Acoustics*, 129, pp. 752-762.
- [13] J.B. Ihn, F.K. Chang (2008) Pitch-catch active sensing methods in structural health monitoring for aircraft structures, *Structural Health Monitoring*, 7(1), pp. 5-15.
- [14] S.R. Anton (2008) Baseline-free self-powered structural health monitoring, MS Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [15] H. Sohn, G. Park, J.R. Wait, N.P. Limback, C.R. Farrar (2004) Wavelet-based active sensing for delamination detection in composite structures, *Smart Materials and Structures*, 13, pp. 153-160.
- [16] G. Strang, T. Nguyen (1997) *Wavelets and filter banks*, Wellesley-Cambridge Press, Wellesley, MA.

접수일(2011년 3월 17일), 수정일(2011년 4월 26일),
게재확정일(2011년 5월 16일)