

유도초음파의 시간-역전 현상을 활용한 구조손상 진단기법

Structural Damage Diagnosis Method by Using the Time-Reversal Property of Guided Waves

이우식^{1,✉}, 최정식¹
Usik Lee^{1,✉} and Jungsik Choi¹

1 인하대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Inha Univ.)
✉ Corresponding author: ulee@inha.ac.kr, Tel: 032-860-7318

Manuscript received: 2010.3.12 / Revised: 2010.4.23 / Accepted: 2010.5.1

This paper proposes a new TR-based baseline-free SHM technique in which the time-reversal (TR) property of the guided Lamb waves is utilized. The new TR-based SHM technique has two distinct features when compared with the other TR-based SHM techniques: (1) The backward TR process commonly conducted by the measurement is replaced by the computation-based process; (2) In place of the comparison method, the TOF information of the damage signal extracted from the reconstructed signal is used for the damage diagnosis in conjunction with the imaging method which enables us to represent the damage as an image. The proposed TR-based SHM technique is then validated through the damage diagnosis experiment for an aluminum plate with a damage at different locations.

Key Words: Guided Wave (유도초음파), Time-Reversal (시간-역전), Structural Damage (구조손상), Diagnosis Method (진단기법), Lamb Wave (Lamb 파), Plate (평판)

1. 서론

산업, 설비 및 기계 구조물에 손상(damage)이 발생하여 그 정도가 심해지면 구조물이 파괴되면서 심각한 사고가 발생할 수 있다. 따라서 이러한 구조물에 발생한 손상을 조기에 진단하고 평가하여 보다 체계적인 보수관리 계획을 수립하여 운영함으로써 불시의 고장, 사고 및 재난을 예방하고 이로부터 엄청난 경제적 및 사회적 이익을 도모하기 위한 다양한 노력이 최근 전세계적으로 활발히 이루어지고 있다.^{1,2} 이와 관련하여 구조물의 건전성을 보다 효율적으로 모니터링하고 발생한 손상을 보다 정확하고 검출하기 위한 SHM(structural health monitoring) 기술에 대한 연구가 최근 많은 관심을 받고 있다.

기존의 SHM 기술은 대부분 손상 검출을 위해 기준데이터(baseline data)를 사용하였다. 즉, 구조물이 정상적일 때 측정된 진동 또는 탄성과 신호를 기준데이터로서 사전에 축적해 놓고 있다가 그 이후에 측정된 신호와 비교하여 발생된 차이를 분석하여 손상을 검출하였다.^{3,4} 그러나 현실적인 측면에서 방대한 기준데이터를 상시적으로 측정하여 축적하고 관리한다는 것은 비효율적이며, 기준데이터가 주변 환경의 변화에 따라 수시로 변화하는 대부분의 경우에 더욱 그러하다. 따라서, 주변환경의 변화에 민감하여 손상진단 결과에 오류를 가져올 수 있는 기준데이터를 사용하지 않는 보다 현실적인 SHM 기술의 개발이 중요시되고 있다.

최근에 유도초음파(guided wave)인 Lamb 파의

시간-역전(TR, time-reversal) 특성을 활용함으로써 기준데이터를 사용하지 않는 SHM 기술이 문헌⁵⁻⁸에 소개되고 있다. TR 특성이란 한 위치 A 에서 미리 정한 입력신호(input signal)를 송신하고 다른 위치 B 에서 응답신호(response signal)를 측정 한 후 시간 축에서 신호의 처음과 마지막을 거꾸로 뒤집어(시간-역전시켜) 위치 B 에서 새로운 입력신호로서 송신하면 초기 입력신호와 동일한 신호가 재생신호(reconstructed signal)로서 위치 A 에 귀환하는 특성을 말한다. 음파(acoustic waves)의 경우에 이러한 TR 특성이 거의 완벽하게 구현되는 것을 일찍이 발견하여 수중 음향탐사, 초음파를 이용한 결석 제거 수술 등에 성공적으로 응용되었으나,⁹ Lamb 파와 같은 유도초음파의 경우에는 고유한 이산특성(dispersive property)으로 인하여 아직까지 손상검출에는 만족스럽게 응용되지 못하고 있다.^{10,11}

기존의 대부분 TR-기반 SHM 기술⁵⁻⁸의 주요 특징으로서, 입력신호와 재생신호의 형상을 비교하여 얻은 차이를 이용하여 손상을 검출하는 형상비교(pattern comparison)법을 사용하고 있으며 모든 TR 과정을 실측으로 수행하고 있다. 입력신호와 재생신호 간의 형상차이는 손상에 의해 발생한 것 이외에도 Lamb 파의 고유한 이산특성과 감쇄특성에 의해서도 발생할 수 있다. 따라서 단순 형상비교법을 이용하여 얻은 손상검출 결과에는 상당한 오류가 있을 수 있다. 또한 TR 과정에서 소요되는 시간의 대부분이 응답신호를 시간-역전시키고 이를 재송신하여 재생신호를 얻는 후반부 과정을 실측으로 수행하는데 소요되는 시간이기 때문에 TR-기반 SHM 기술의 효율성 향상을 위해서도 새로운 대안이 요구되고 있다.

본 연구에서는 기존의 대부분 TR-기반 SHM 기술에서 사용한 단순 형상비교법을 대신하여 재생신호에서 추출한 손상신호(damage signal)의 TOF (time-of-flight) 정보를 이용하는 기법을 제안하였으며, 여기에 손상을 이미지로 나타냄으로써 손상을 보다 효율적으로 검출하는 이미징 기법(imaging method)을 적용하였다. 또한, TR 과정 가운데 실측한 응답신호를 시간-역전시킨 후 재송신하여 재생신호를 얻는 후반부 과정을 전산기법으로 대체함으로써 손상 검출의 효율성을 높였다. 본 연구에서는 알루미늄 평판을 이용하여 제안한 새로운 TR-기반 SHM 기술을 검증하기 위한 손상검출 실험을 수행하였다.

2. Lamb 파의 특성

Lamb 파는 평판과 같이 상하 표면을 경계면으로 갖는 얇은 두께의 구조물 내부를 전파해가는 유도초음파의 하나이다.¹² Lamb 파는 다양한 모드(mode)로 구성되며 평판의 중심 면을 기준으로 대칭성을 갖는 대칭모드(symmetric mode)와 비대칭성을 갖는 비대칭모드(asymmetric mode)로 구분된다. 대칭모드와 비대칭모드는 각각 S_n 과 A_n ($n = 0, 1, 2, \dots$)으로 나타내며 이들은 주파수에 따라 각기 다른 그룹속도(group velocity)를 전파속도로 갖는다. 따라서 Lamb 파의 파형은 일반적으로 전파해가면서 그 형상이 변화하는 이산특성을 갖는다.

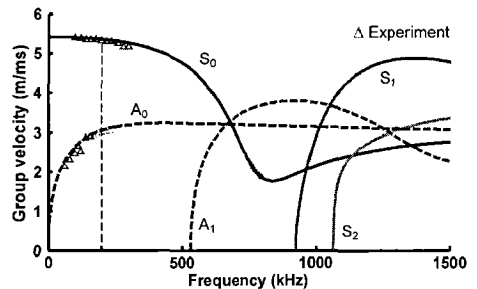


Fig. 1 Dispersion curves for a thin plate

Lamb 파가 다양한 모드를 가지며 이들이 주파수에 따라 서로 다른 전파속도를 갖는 것은 Fig. 1에 보인 분산곡선(dispersion curve)을 통해서 알 수 있다. 본 연구에서 다룬 알루미늄 평판의 경우, Fig. 1에 보인 바와 같이 약 500 kHz 이하의 주파수에서는 기본 모드인 A_0 모드와 S_0 모드만이 발생하고 그 이상의 주파수에서는 최소한 3개 이상의 많은 모드가 발생함을 있음을 알 수 있다. 따라서 Lamb 파를 손상검출에 활용하기 위해서는 손상검출에 사용하기 위해 선택한 모드를 제외한 다른 모드의 발생을 최대한 억제함으로써 선택한 모드의 이산화를 최소화할 뿐만 아니라 신호처리의 효율성을 높이는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서는 Fig. 2(a)에 보인 중심주파수가 200 kHz 이고 5개의 피크를 갖는 Morlet wavelet 함수를 입력신호로 사용하였으며, 그 결과 Fig. 2(b)에 보인 바와 같이 A_0 모드와 S_0 모드 신호만이 발생되었음을 알 수 있다. Morlet wavelet 함수는 다음과 파 같은 형태로 표현된다.¹³

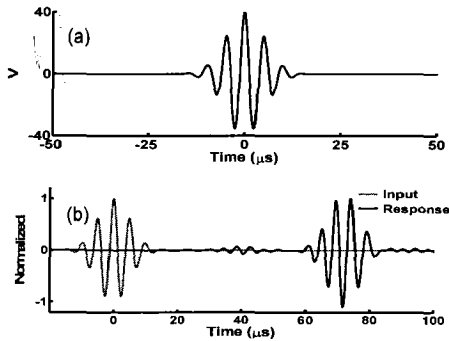


Fig. 2 Input and response signals

$$V(t) = V_0 e^{-t^2/2\sigma^2} \cos(2\pi ft) \quad (1)$$

여기서 σ 는 Morlet wavelet 함수의 파장과 관계되는 파라미터로서 Morlet wavelet 함수의 피크 수를 결정하며 f 는 Morlet wavelet 함수의 중심주파수를 나타낸다.

발생된 A_0 모드와 S_0 모드 신호의 상대적 크기는 중심주파수의 튜닝(tuning)을 통해서 조절할 수 있다.¹⁴ 중심주파수를 200 kHz에 튜닝한 경우 A_0 모드 신호가 S_0 모드 신호에 비해 최소한 10배 이상 크게 되어 A_0 모드를 손상 검출에 활용할 수 있다. Fig. 2(b)에 보인 바와 같이 본 논문에서 A_0 모드는 A로 S_0 모드는 S로 간략히 나타내었다.

3. Lamb 파의 시간-역전(TR) 과정

Lamb 파의 TR 과정은 Fig. 3에 보인 바와 같이 이루어진다. 즉, 구조물(평판)의 한 위치 I점에 입력신호를 가하여 Lamb 파를 발생시킨 다음 다른 위치 J점에서 전파되어 오는 Lamb 파 신호를 측정한다. 이 과정을 전진과정(forward process)이라 한다. J점에서 측정된 응답신호를 저장한 후 신호의 처음과 끝을 완전히 거꾸로 뒤집어서 새로운 신호를

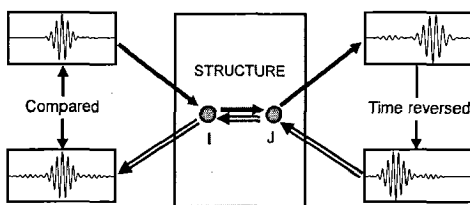


Fig. 3 Time reversal process for Lamb waves

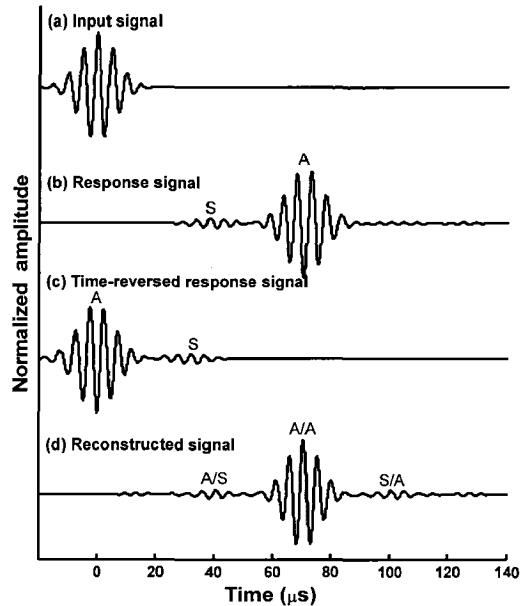


Fig. 4 Signals measured during the time reversal process

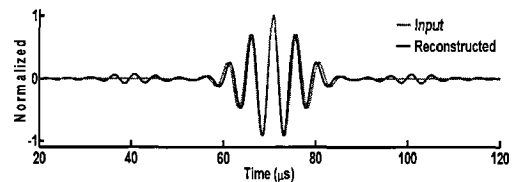


Fig. 5 Comparison of the input and reconstructed signals

만드는데 이를 시간-역전이라 한다.⁹ 시간-역전시킨 응답신호를 입력신호로 사용하여 J점에 가하면 새로운 Lamb 파가 발생하여 전파된다. 이때 초기 가진 점이었던 I점으로 전파되어 귀환하는 Lamb 파를 측정하여 저장하고 이를 재생신호라 한다. 이 마지막 과정을 후진과정(backward process)이라 한다.

Fig. 4는 TR 과정의 각 단계에서의 신호를 예로서 보여주고 있다. Fig. 4(b)의 재생신호에서 A/A는 전진과정의 A모드가 후진과정에서도 계속 A모드 형태로 전파된 신호를 나타낸다. A/S는 전진과정의 A모드가 후진과정에서 S모드로 모드 변환(mode conversion)되어 전파된 신호를 나타내고 S/A는 A/S와 반대의 경우에 해당한다. 재생신호에서 A/A가 가장 큰 신호로서 중심 부위를 이루며 A/A를 중심으로 A/S와 S/A가 서로 대칭을 이룬다.

Fig. 5는 Fig. 4(a)의 초기 입력신호와 Fig. 4(d)의 재생신호를 비교한 것이다. Lamb 파의 고유특성인 다중 모드(multi-mode) 특성과 이산특성으로 인하여 재생신호의 중심부위가 더 이상 초기 입력신호와 일치하지 않으며 초기 입력신호에는 없던 A/S 와 S/A 가 추가로 발생했음을 알 수 있다. Lamb 파의 TR 특성을 활용하는 기존의 대부분 SHM 기법⁵⁻⁸에서는 손상이 발생하면 재생신호의 중심부위가 변하여 초기 입력신호와 다르게 된다고 가정하고, 초기 입력신호와 재생신호의 중심부위를 비교하여 발생된 신호 차이를 이용하여 손상을 검출하는 형상 비교법을 이용하였다. 그러나, Fig. 5에 보인 바와 같이 초기 입력신호와 재생신호와의 차이는 손상에 의한 것 이외에도 Lamb 파 자체가 갖는 고유특성에 의해서도 발생되고 있기 때문에 기존의 TR-기반 SHM 기법에서 사용한 형상비교법은 상당한 손상검출 오류를 발생할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 형상비교법이 아닌 손상신호(damage signals)의 TOF(time-of-flight) 정보를 활용하여 손상을 이미지화하여 검출하는 새로운 손상 검출기법을 제안하였다.

4. Lamb 파의 TR-기반 손상 검출기법

4.1 TR 과정의 이론적 기술

평판에 하나의 손상이 발생했다고 가정하고 이를 검출하기 위하여 두 위치 I 점과 J 점 사이에서 입력신호를 송수신하는 TR 과정을 생각한다. Fig. 6(a)는 전진과정을 Fig. 6(b)는 후진과정을 나타낸다.

4.1.1 전진과정

I 점에 입력신호 V_I 를 가하면 기본모드 신호 A 와 S 가 발생하여 다른 두 개의 경로를 따라 전파되어 J 점에 도달하여 합성된다. 첫 번째 전파경로는 I 점과 J 점을 연결하는 직접경로(direct path)로서 신호 A 와 S 가 직접 J 점에 도달한다. 두 번째 경로는 I 점, 손상(D), J 점을 연결하는 우회경로(detour path)로서 신호 A 와 S 가 경로 I-D 를 따라 손상에 도달한 후 손상에서 반사되어 경로 D-J 를 따라 J 점에 도달한다. 손상에 도달한 신호 A 는 손상에서 원래의 모드 형태로 반사되거나 신호 S 로 모드 변환되어 반사되는데 이들을 각각 AA 와 AS 로 Fig. 6(a)에 나타내었다. 또한 손상에 도달한 신호 S 는 손상에서 원래의 모드로 반사되거나 신호 A 로 모드 변환되어 반사되는데 이들을 각각

SA 와 SS 로 나타내었다. 따라서 전진과정에서 J 점에서 측정되는 응답신호 V_J 는 모두 6개의 신호로 구성되며 주파수 영역에서 다음과 같이 표현할 수 있다.

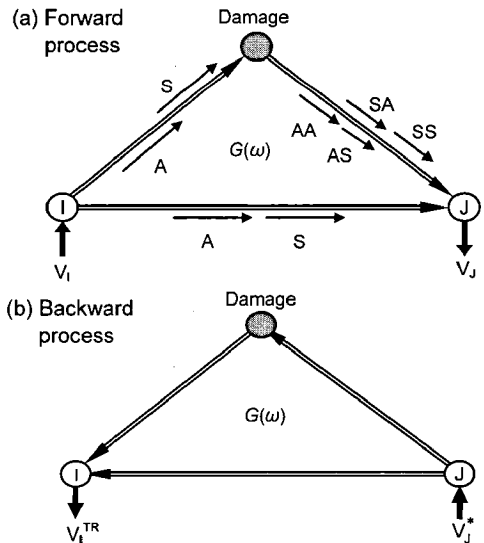


Fig. 6 Forward and backward processes for the TR of Lamb waves

$$V_J(\omega) = V_0(\omega) + V_D(\omega) \tag{2}$$

여기서

$$\begin{aligned} V_0(\omega) &= V_0^S(\omega) + V_0^A(\omega) \\ V_D(\omega) &= V_D^{SS}(\omega) + V_D^{SA}(\omega) + V_D^{AS}(\omega) + V_D^{AA}(\omega) \end{aligned} \tag{3}$$

V_0 와 V_D 는 각각 직접경로와 우회경로를 따라 전파된 신호를 나타내며 ω 는 주파수이다. 주파수 영역에서 응답신호 V_J 를 입력신호 V_I 로 나누면 I 점과 J 점 사이의 전달함수(transfer function) $G(\omega)$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$G(\omega) = \frac{V_J(\omega)}{V_I(\omega)} = G_0(\omega) + G_D(\omega) \tag{4}$$

여기서,

$$G_0(\omega) = G_0^S(\omega) + G_0^A(\omega)$$

$$G_D(\omega) = G_D^{SS}(\omega) + G_D^{SA}(\omega) + G_D^{AS}(\omega) + G_D^{AA}(\omega) \quad (5)$$

$$\cong G_D^{AA}(\omega)$$

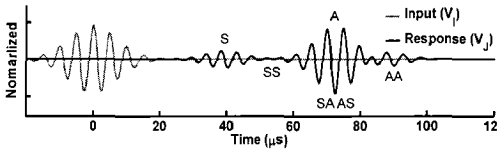


Fig. 7 Input and response signals in the forward process

Fig. 7은 I 점에 가한 입력신호와 J 점에서 측정된 응답신호를 보인다. 신호 A 가 신호 S 에 비하여 10배 이상 크도록 입력신호의 중심주파수를 튜닝하면 AA 도 SS, SA, AS 에 비하여 10배 이상 큰 것을 실험을 통해 확인할 수 있기 때문에 SS, SA, AS 는 근사적으로 무시할 수 있다.

4.1.2 후진과정

전진과정에서 측정된 응답신호 V_j 를 시간-역전시켜 얻은 신호는 수학적으로 응답신호 V_j 에 대한 켈레복소수(complex conjugate) V_j^* 에 해당한다. Fig. 6(b)에 보인 바와 같이 V_j^* 를 J 점에 새로운 입력신호로서 가했을 때 초기 가진점인 I 점에서 측정되는 재생신호 V_j^{TR} 는 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$V_j^{TR}(\omega) = G(\omega)V_j^* = G(\omega)G^*(\omega)V_i^*(\omega)$$

$$\cong G_0^{A^*}G_0^A + G_0^{S^*}G_0^S + G_0^{AA^*}G_0^{AA} + G_0^{SA^*}G_0^{SA} + G_0^{AS^*}G_0^{AS} + G_0^{AA^*}G_0^{AA} \quad (6)$$

$$+ G_D^{AA^*}G_0^A V_j^*(\omega)$$

$$= [G^{A/A} + G^{S/A} + G^{A/S} + G^{A/AA} + G^{AA/AA}] V_j^*(\omega)$$

식(6)에서 전달함수 $G(\omega)$ 가 상호성 특성(reciprocal property)을 만족한다고 가정하였으며 가정한 상호성특성이 실제로 성립함을 실험을 통해 확인하였다.

Fig. 8(a)은 시간-역전시킨 측정된 응답신호를 나타내고 Fig. 8(b)는 실측으로 구한 재생신호와 식(6)을 이용하여 전산으로 구한 재생신호를 함께 비교한 예를 보인다. AA/A 는 신호 A 가 전진과정에서 우회경로를 따라 J 점에 도달한 후 후진과정에서도 원래의 신호 형태를 유지한 채 직접경로를 따라 I 점에 도달한 신호를 나타내며 A/AA 는

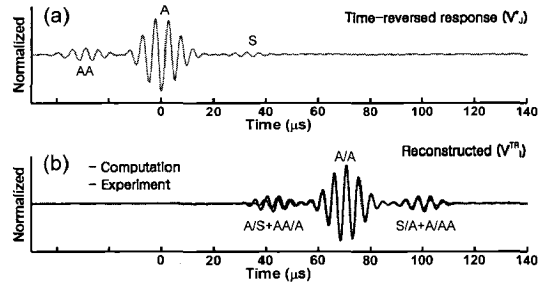


Fig. 8 Reconstructed signal by the backward process

AA/A 의 역방향으로 전파된 경우에 해당한다. AA/A 와 A/AA 는 A/A 를 중심으로 좌우에 동일한 시차를 두고 위치하며 A/S 와 S/A 도 역시 A/A 를 중심으로 좌우에 동일한 시차를 두고 위치하여 중첩됨으로써 재생신호가 A/A 를 중심으로 하여 대칭성을 갖게 되는 특성을 보인다. 신호 A 가 신호 S 에 비하여 10배 이상 크도록 튜닝하였기 때문에 Fig. 8(b)의 재생신호에서 신호 A/S 및 S/A 는 다른 신호 성분에 비하여 실제로 무시할 만큼 작다.

기존의 대부분 TR-기반 SHM 기술⁵⁻¹⁰에서는 재생신호를 얻기 위하여 후진과정을 액츄에이터와 센서를 직접 사용하여 실측으로 수행하였다. 그러나, Fig. 8에서 보인 바와 같이 후진과정을 실측으로 수행하여 구한 재생신호와 식(6)을 통해 전진과정에서 측정된 응답신호와 식(4)에서 구한 전달함수를 이용하여 전산과정으로 구한 재생신호가 거의 동일함을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 재생신호를 얻기 위해 실측으로 수행되어 온 후진과정을 전산과정으로 대체하였다. 이로 인하여 후진과정을 실측으로 수행하는 데 소요되는 시간을 크게 줄일 수 있다.

4.2 손상신호

기존의 SHM 기술에서는 초기 입력신호와 TR 과정을 통해 측정된 재생신호의 중심 부위를 비교하여 얻은 신호의 차이를 이용하여 손상을 검출하는 형상비교법을 사용하였다. 그러나, 재생신호의 중심 부위는 손상의 발생으로 인하여 변할 뿐만 아니라 Lamb 파의 분산특성과 감쇄특성에 의해서도 변할 수 있기 때문에 형상비교법은 손상 검출 결과에 오류를 초래할 수 있다.

Fig. 8에 예시한 재생신호에서 손상에 대한 정보를 갖고 있는 신호 부위는 전파 과정에서 우회 경로를 따라 손상에 도달한 후 그 곳에서 반사된

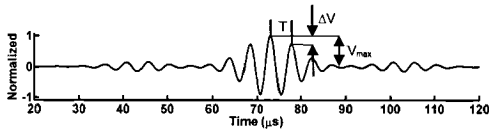


Fig. 9 Parameters of the A/A signal part of the reconstructed signal

적이 있는 AA/A 와 A/AA 이므로 이들을 손상신호 (damage signal)로서 추출하여 손상검출에 활용할 수 있다. 손상신호, 즉 AA/A 와 A/AA 만을 추출하기 위해서는 재생신호에서 A/A 부위를 제거해야 한다. 그러나, A/A 의 양쪽 부위가 주변의 손상신호와 중첩되어 있을 수 있으므로 A/A 의 정확한 분포 상황을 알 수 없고 이로 인하여 재생신호에서 A/A 만을 깔끔하게 제거하는 것이 용이하지 않다.

구조물에 손상이 없는 경우의 재생신호는 Lamb 파의 분산특성과 감쇄특성에 의한 A/A 의 변화 이외에 AA/A 및 A/AA 와 같은 손상신호는 발생하지 않는다. 따라서 손상신호가 포함되지 않은 초기 입력신호의 함수를 활용하여 손상신호 부위가 완벽하게 제거된 재생신호를 함수적으로 유도하여 이를 손상신호를 구하기 위한 비교신호(comparison signal)로서 사용한다. 즉, Fig. 8에 보인 손상이 발생한 경우의 재생신호에서 비교신호를 제거했을 때 남는 부위가 손상신호에 해당하며 이렇게 구한 손상신호가 손상검출에 사용된다.

초기 입력신호는 Morlet wavelet 함수로서 식(1)과 같이 표현된다. 재생신호에서 손상신호를 제거하고 남는 A/A 부위만을 비교신호로서 사용하기 위하여 이를 함수로 표현할 필요가 있다. 따라서 A/A 부위가 초기 입력신호와 마찬가지로 Morlet wavelet 함수의 형태를 갖는다고 가정하면 비교신호를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{ref}(t) = V_{max} e^{-t^2/2\sigma_{ref}^2} \cos(2\pi f_{ref} t) \quad (7)$$

여기서 $f_{ref} = 1/T$ 이다. Fig. 9에 보인 T , V_{max} 및 ΔV 는 A/A 부위의 형태를 결정하는 파라미터이며 관계식 $\Delta V = V_{max} - V_{ref}(T)$ 를 만족한다. 이 관계식에 식(7)을 적용하면 σ_{ref} 를 다음과 같이 구할 수 있다.

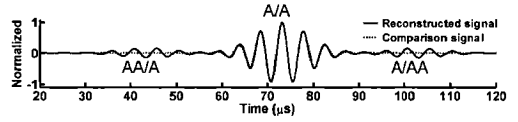


Fig. 10 Comparison of the reconstructed signal and the comparison signal

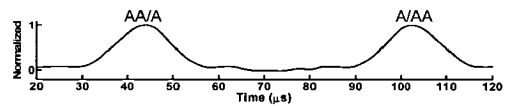


Fig. 11 Enveloped damage signal

$$\sigma_{ref} = \sqrt{\frac{0.5 T^2}{\ln V_{max} - \ln V_{ref}(T)}} \quad (8)$$

식(7)로 표현되는 기준신호와 Fig. 8에 보인 재생신호를 Fig. 10에 상호 비교하여 도시하였다. 기준신호와 재생신호에서 A/A 부위가 거의 일치함을 볼 수 있다. Fig. 11은 Fig. 10에 보인 비교신호와 재생신호의 차이인 손상신호의 포락선(envelope)을 도시한 것이다. 손상신호에 대한 정확한 TOF, 즉 손상신호의 피크점을 정확하게 파악하기 위해서 조화함수(harmonic function) 형태의 손상신호를 직접 사용하는 것보다 포락선을 사용하는 것이 보다 유리하다.¹⁵

4.3 이미징 기법을 이용한 손상 검출기법

Fig. 8에서 신호 A 가 후진과정에서 J 점을 출발하여 우회경로를 따라 전파되어 I 점에 A/AA 로서 도착하는데 소요된 시간은 우회경로의 총 거리 d 를 신호 A 의 전파속도인 그룹속도 c_g 로 나눈 값에 해당한다. 즉,

$$t = \frac{d}{c_g} = \frac{d_I + d_J}{c_g} \quad (9)$$

여기서 d_I 와 d_J 는 각각 손상에서 I 점과 J 점까지의 직선거리이고, 그룹속도 c_g 는 신호 A 가 I 점에서 J 점까지의 직선거리 d_{IJ} 를 전파해가는데 소요된 시간으로 나눈 값에 해당한다.

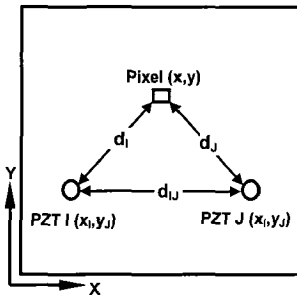


Fig. 12 Pixels for the imaging method

미지수인 손상의 위치를 좌표 (x, y) 로 나타내면 식(9)의 d_I 와 d_J 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$d_I = \sqrt{(x_I - x)^2 + (y_I - y)^2} \quad (10)$$

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

여기서 (x_i, y_i) 및 (x_j, y_j) 는 각각 I 점과 J 점의 좌표이다. 좌표 (x, y) 가 손상의 위치와 일치할 때 식(9)에서 계산되는 시간에서 Fig. 11에 보인 손상 신호가 피크 값을 가지며 다른 시간에서는 언제나 피크 값 보다 작은 값을 갖는다. 이러한 사실을 이용하여 손상의 위치를 이미지화 할 수 있다.¹⁰

Fig. 12에 보인 것처럼 평판을 충분한 수의 픽셀(pixel)로 나타내고, 각 픽셀에서의 이미지 값을 손상 신호에 대한 포락선 함수 $f_{IJ}(t)$ 를 이용하여 다음과 같이 정할 수 있다.

$$I(x, y) = \sum_{I=1}^N \sum_{J=1}^N f_{IJ}(t(x, y)) \quad (11)$$

여기서 N 은 PZT 액츄에이터와 센서의 총 개수이다. 임의의 한 액츄에이터-센서 짝에 대하여 이미지를 그리면 Fig. 13에 보인 바와 같이 해당 액츄에이터와 센서를 초점으로 하는 타원형 궤적을 그리게 되는데 손상을 정확하게 통과하는 타원형에서 가장 큰 이미지 값을 갖는다. 모든 액츄에이터-센서 짝에 대한 타원형 궤적을 중첩하여 그리면 손상의 위치에서 모든 타원형 궤적이 중첩되어 가장 큰 이미지 값을 가짐으로써 손상의 위치를 나타내게 된다.

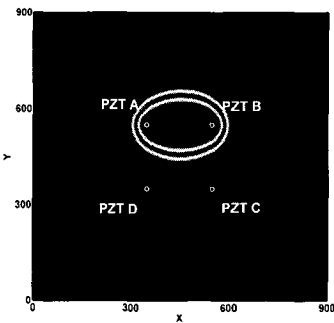


Fig. 13 Image drawn by using a damage signal for an actuator-sensor pair

5. 손상 검출실험 및 결과

5.1 시편 및 실험장비

손상 검출실험은 알루미늄 평판을 대상으로 수행하였다. 알루미늄 평판의 재료는 알루미늄합금 6061-T6이며 평판의 크기는 900 mm × 900 mm 이고 두께는 2 mm 이다. 평판에 한 개의 손상이 발생한 경우 손상의 위치를 Fig. 14에 보인 바와 같이 세 곳을 선택하여 차례로 실험하였다. 손상은 다른 연구자들^{10,15-17}에 의해서도 많이 사용해온 방법으로

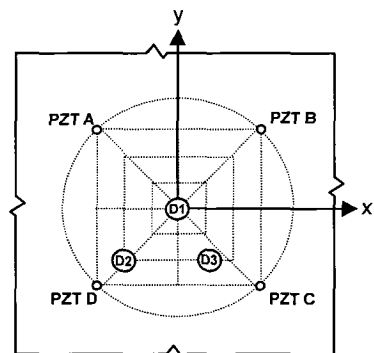


Fig. 14 Locations of an added mass damage

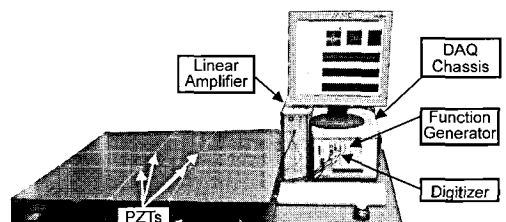


Fig. 15 Experimental set-up

써 평판에 지름이 12 mm 인 금속 추를 접착제로 부착하여 손상을 조사하는 방법을 택하였다.

Fig. 15는 손상 검출실험에 사용한 실험장치를 보인다. 실험장치는 입력신호를 생성하기 위한 함수발생기(NI 사 PXI-5412), 신호증폭기(FLC 사 F20AD), 디지털타이저(NI 사 PXI-5412) 및 DAQ 시스템(NI 사 Chassis PXI-1042Q)로 구성된다. Lamb 파를 발생시키고 송수신하기 위한 액츄에이터와 센서로서 두 가지 역할을 모두 수행할 수 있는 직경 6 mm, 두께 2 mm 인 디스크 형 PZT 를 사용하였다.

5.2 실험결과

먼저 Fig. 14 에 보인 바와 같이 4 곳의 위치에 액츄에이터 및 센서로 사용할 4 개의 PZT 를 부착하였다. PZT 의 부착상태에 따라 신호의 강도가 변하기 때문에 전기-기계적 임피던스(electro-mechanical impedance)의 측정을 통해 PZT 의 부착상태를 평가하여 신호의 강도가 양호하도록 하였다.

LabVIEW 의 신호생성 함수를 사용하여 중심주파수가 200 kHz 이고 5개의 피크를 갖는 Morlet wavelet 함수를 생성한 후 함수발생기를 통해 전기신호로 전환하고 신호증폭기로 증폭하여 입력신호로 사용하였다. Fig. 2는 ±40 V로 증폭된 입력신호를 보인다. 먼저 PZT A 를 액츄에이터로 사용하고 나머지 세 곳의 PZT 를 센서로 사용하였다. 즉, PZT A 에 입력신호를 가하고 나머지 세 곳의 PZT 에서는 응답신호를 측정하여 디지털타이저를 통해 컴퓨터에 저장하였다. 액츄에이터 PZT 를 순차적으로 바꾸어가면서 동일한 전진과정 실험을 반복하여 총 12개 경로에 대한 응답신호를 측정하였다.

전진과정 실험에서 측정된 응답신호에는 Fig. 16에 보인 것처럼 입력신호에 포함되지 않는 주파수 성분의 잡음, EMI 잡음, 경계 반사신호 등이 다양하게 포함되어 있다. 따라서, 주파수 필터링(frequency filtering)을 이용하여 입력신호에 포함되지 않는 주파수 성분의 잡음을 먼저 제거한 다음 식별이 가능한 EMI 잡음을 추가로 제거하고, 경계 반사신호는 평판의 사이즈와 Lamb 파의 전파속도를 이용하여 평판의 경계에서 반사되는 신호의 도달시간을 예측하여 제거하였다. Fig. 17은 손상이 D1의 위치에 있는 경우에 측정된 12개의 응답신호 가운데 PZT A 에 입력신호를 가하고 PZT B 와 C 에서 측정된 응답신호를 예로서 보이고 있다. Fig. 17에서 Path A-B 의 경우에, 손상 D1이 PZT A 와 PZT B 를 직선으로 연결한 직접경로상에서 벗어난

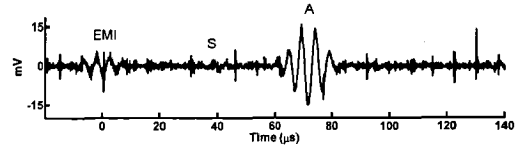


Fig. 16 Measured raw response signal

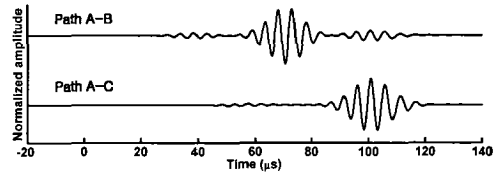


Fig. 17 Response signals for the paths A-B and A-C when the damage is at D1

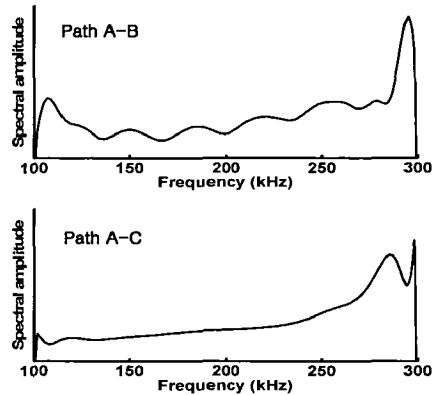


Fig. 18 Transfer functions for the paths A-B and A-C when the damage is at D1

위치에 있기 때문에 신호 S 와 A 가 순서대로 도착하여 측정된 다음에 손상 D1을 거쳐서 도착한 신호 AA 가 맨 나중에 측정되는 것을 확인할 수 있다. 그러나, Path A-C의 경우에는 손상이 직접경로상의 중앙에 위치하고 있기 때문에 약한 신호 S 가 먼저 도착하여 측정된 이후에 신호 A 와 AA 가 모두 동일한 직접경로를 따라 증첩되어 측정됨을 알 수 있다.

입력신호와 신호처리된 응답신호를 식(4)에 적용하여 전달함수를 구하였으며, Fig. 18은 손상이 D1의 위치에 있을 때 경로 A-B와 A-C에 대한 전달함수를 보인다. 재생신호는 식(6)에 보인 바와 같이 전달함수에 시간-역전시킨 응답신호를 곱하여 구하였으며 이렇게 구한 재생신호에 웨이브렛

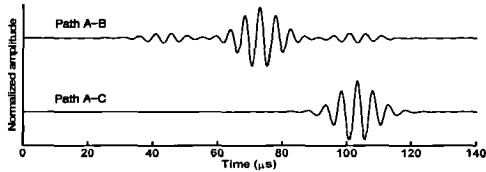


Fig. 19 Reconstructed signals for the paths A-B and A-C when the damage is at D1

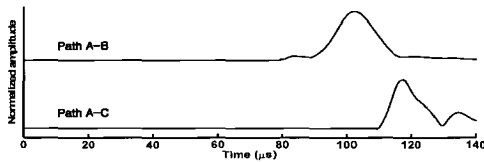


Fig. 20 Damage signals for the paths A-B and A-C when the damage is at D1

변환(wavelet transform)을 적용하여 입력신호의 중심주파수인 200 kHz 성분을 취하는 신호처리 과정¹⁶을 적용하였다. Fig. 19는 웨이블릿 변환을 적용하여 얻은 재생신호를 예로서 보인다. Fig. 8에 자세히 나타낸 바와 같이, Fig. 19에서 Path A-B의 경우에는 손상 D1이 PZT A와 PZT B를 직선으로 연결하는 직접경로상에서 벗어난 위치에 있기 때문에 신호 AA/A와 A/AA가 신호 A/A를 중심으로 좌우에 직접경로와 우회경로의 거리 차이에 해당하는 시차만큼에 위치에서 측정됨을 확인할 수 있다. 그러나, Fig. 19에서 Path A-C의 경우에는 손상 D1이 PZT A와 PZT B를 직선으로 연결하는 직접 경로상의 중앙에 위치하고 있기 때문에 직접 경로와 우회경로의 거리 차이가 없게 되며 이로 인하여 신호 AA/A와 A/AA가 모두 신호 A/A에 중첩되어 나타난다. Fig. 8에 나타낸 바와 같이 신호

A/S와 S/A가 신호 A/A의 좌우에 대칭으로 측정될 수 있으나 이들의 신호가 실제로 매우 작기 때문에 Fig. 19에서는 식별하기 어렵다.

마지막으로, 식(7)과 식(8)을 이용하여 재생신호의 중심 부위와 일치하는 비교신호를 유도한 후, 재생신호에서 비교신호를 제거하여 모든 전과경로에 대한 손상신호를 구하였다. Fig. 20은 손상이 D1의 위치에 있을 때 경로 A-B와 A-C에 대해 구한 손상신호의 포락선을 보인다. 이렇게 구한 손상신호의 포락선을 이용하여 손상의 위치를 이미지로 나타내는 이미징 기법을 사용하여 손상을 검출하였으며 그 결과를 Fig. 21에 나타내었다. Fig. 21에서 액추에이터와 센서로 사용한 4개의 PZT 위치를 흰색의 작은 원으로 표시하였다. Fig. 20에 보인 바와 같은 각 경로에 대한 손상신호를 이용하여 이미지를 그리면 (Fig. 13에 예시한 바와 같이) 각 경로에 해당하는 액추에이터와 센서를 초점으로 하는 12개의 타원형(실제로는 상호성 특성에 의해서 6개 경로에 대한 6개의 타원형)을 그릴 수 있다. 식(11)에 의해서 모든 타원형이 공통적으로 중첩되는 픽셀 위치에서 가장 큰 이미지 값을 갖게 되는데 이 곳이 바로 손상이 위치를 나타낸다. 실제로 Fig. 21의 각 그림을 살펴보면 여러 개의 달무리형상의 이미지가 보이는데 이들이 바로 각 경로에 대한 손상신호를 이용하여 그린 이미지 타원형이다. 달무리형상의 이미지들이 공통적으로 중첩되는 위치가 빨간색 반점(화살표로 표시)으로 나타나고 있는데 이 곳이 바로 손상 위치의 예측 지점이다.

Fig. 21에 보인 손상검출 실험결과를 통해서 본 연구에서 제안한 시간-역전 현상을 기반으로 하는 구조손상 진단기법이 알루미늄에 발생한 손상을 성공적으로 잘 검출하고 있음을 알 수 있다.

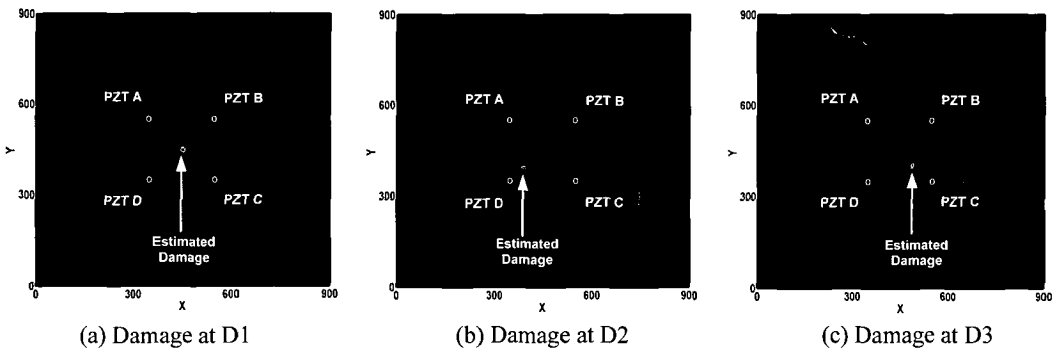


Fig. 21 Damage diagnosis results

6. 결론

본 연구에서는 유도초음파인 Lamb 파의 시간-역전(TR) 특성을 활용하여 기준데이터가 더 이상 필요 없는 새로운 TR-기반 SHM 기술을 제안하였다. 제안된 새로운 TR-기반 SHM 기술은 문헌에 보고된 기존의 TR-기반 SHM 기술과 비교하여 다음과 같은 특징을 갖는다.

(1) 기존의 TR-기반 SHM 기술에서 실측으로 수행한 TR 과정의 후진과정을 전산과정으로 대체하였다.

(2) 기존의 TR-기반 SHM 기술에서 사용한 형상비교법을 대체하여, 재생신호로부터 도출한 손상신호의 TOF 정보를 활용하였으며, 여기에 손상의 위치를 이미지로 나타내어 손상을 검출하는 이미징 기법을 적용하였다.

본 연구에서 제안된 새로운 TR-기반 SHM 기술을 검증하기 위하여 손상이 부가된 알루미늄 평판에 대한 손상 검출실험을 수행하였다. 그 결과 본 연구의 TR-기반 SHM 기술이 평판에 부가한 손상을 성공적으로 검출하는 것을 확인하였다.

후 기

본 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 지원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2008-313-D00014).

참고문헌

1. Hansen, R. J., Hall, D. L. and Kurtz, S. K., "A New Approach to the Challenge of Machinery Prognostics," *Journal of Engineering Gas Turbines and Power*, Vol. 117, No. 2, pp. 320-325, 1995.
2. Kwon, T. K., Yoo, G. H. and Lee, S. C., "Damage Detection in Time Domain on Structural Damage size," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 23, No. 6, pp. 119-127, 2006.
3. Raghavan, A. and Cesnick, C. E. S., "Review of Guided-wave Structural Health Monitoring," *The Shock and Vibration*, Vol. 32, No. 2, pp. 91-114, 2007.
4. Montalvao, D., Maia, N. M. M. and Ribeiro, A. M. R., "A Review of Vibration-Based Structural Health Monitoring with Special Emphasis on Composite

- Materials," *The Shock and Vibration*, Vol. 38, No. 4, pp. 295-324, 2006.
5. Park, H. W., Sohn, H., Law, K. H. and Farrar, C. R., "Time Reversal Active Sensing for Health Monitoring of a Composite Plate," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 302, No. 1-2, pp. 50-66, 2007.
6. Sohn, H., Park, H. W., Law, K. H. and Farrar, C. R., "Damage Detection in Composite Plates by Using an Enhanced Time Reversal Method," *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 20, No. 3, pp. 141-151, 2007.
7. Sohn, H., Park, H. W., Law, K. H. and Farrar, C. R., "Combination of Time Reversal Process and a Consecutive Outlier Analysis for Base-line Free Damage Diagnosis," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 18, No. 7, pp. 335-346, 2007.
8. Kim, S. B. and Sohn, H., "Application of Time-Reversal Guided Waves to Field Bridge Testing for Baseline-free Damage Diagnosis," *Proc. of the SPIE International Symposia, Smart Structures & Materials and Nondestructive Evaluation for Health Monitoring and Diagnosis*, 2006.
9. Fink, M., "Time Reversal of Ultrasonic Fields -Part I: Basic Principles," *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 39, No. 5, pp. 555-566, 1992.
10. Wang, C. H., Rose, J. T. and Chang, F. K., "A Synthetic Time-Reversal Imaging Method for Structural Health Monitoring," *Smart Materials & Structures*, Vol. 13, No. 2, pp. 415-423, 1998.
11. Xu, Y. and Wang, L. V., "Time Reversal and Its Application to Tomography with Diffracting Sources," *Physical Review Letters*, Vol. 92, No. 3, Paper No. 033902, 2004.
12. Viktorov, I. A., "Rayleigh and Lamb Waves: Physical Theory and Applications," Plenum Press, 1967.
13. Strang, G. and Nguyen, T., "Wavelets and Filter Banks," Wellesley-Cambridge Press, 1997.
14. Santoni, G. B., Yu, L., Xu, B. and Giurgiutiu, V., "Lamb Wave-mode Tuning of Piezoelectric Wafer Active Sensors for Structural Health Monitoring," *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 129, No. 6, pp. 752-762, 2007.
15. Ihn, J. B. and Chang, F. K., "Pitch-catch Active

- Sensing Methods in Structural Health Monitoring for Aircraft Structures,” *Structural Health Monitoring*, Vol. 7, No. 1, pp. 5-15, 2008.
16. Sohn, H., Park, G., Wait, J. R., Limback, N. P. and Farrar, C. R., “Wavelet-based Active Sensing for Delamination Detection in Composite Structures,” *Smart Materials and Structures*, Vol. 13, No. 1, pp. 153-160, 2004.
 17. Anton, S. R., “Baseline-free Self-powered Structural Health Monitoring,” *Mechanical Engineering*, MS Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2008.