

구조물의 건전성 모니터링을 위한 유도초음파 응용 구조손상 탐지기법

A Guided Wave-Based Structural Damage Detection Method for Structural Health Monitoring

고한석* · 이우식[†]
Hansuk Go · Usik Lee

Abstract How to efficiently and accurately detect the damages generated in a structure has become an important issue for structural health monitoring (SHM). Most existing SHM techniques require the baseline data which should be measured before a structure get damaged. Thus, this paper presents a new pitch-catch method-based SHM technique which will not require the baseline data any more. In the proposed SHM technique, the imaging method is also utilized to visualize damage locations. The proposed SHM technique is then validated through the damage detection texts for damaged aluminum plates.

Keywords : Structural health monitoring, Damage, Pitch-catch method, Imaging method, Baseline data

요 지 구조물 건전성 모니터링에서 구조물에 발생한 손상을 어떠한 방법으로 가장 효율적이고 정확하게 탐지하는 것은 매우 중요한 연구과제이다. 기존의 대부분 SHM기술에서는 구조물에 손상이 발생하기 이전에 측정해 놓은 탄성파 신호를 손상 검출을 위한 기준 데이터로서 활용하고 있다. 본 연구에서는 Lamb파를 이용하는 pitch-catch (PC)-기법을 기반으로 기준 데이터를 필요로 하지 않는 새로운 SHM기술을 제안하였다. 또한 손상 신호에 이미지화 기법을 적용하여 손상의 위치를 이미지화 함으로써 손쉽게 파악할 수 있도록 하였다. 제안된 SHM기술은 알루미늄 평판 시편에 대한 실험을 통해 응용 가능성을 고찰하였다.

주요어 : 구조물 건전성 모니터링, 손상, Pitch-catch 기법, 이미지화 기법, 기준신호, 손상신호

1. 서론

항공기, 자동차, 선박, 고속전철, 교량 및 고층 빌딩과 같은 다양한 구조물의 수명과 안전성 확보의 중요성이 증대함에 따라, SHM (structural health monitoring) 기술의 개발에 관한 연구가 최근 많은 관심을 받고 있다. 구조물에 발생한 손상을 어떠한 방법으로 효율적이고 정확하게 탐지할 수 있는지는 SHM기술의 핵심 요소기술로서 매우 중요한 위치를 차지한다. 기존의 대부분의 연구에서는 구조물에 손상이 발생하기 이전에 미리 측정해 둔 진동 또는 탄성파 신호를 기준 데이터(baseline data)로서 보관하고 있다가, 그 이후에 동일한 구조물에서 측정된 신호와 비교하여 기

준 데이터와 차이가 발생했는지의 여부를 확인하고 이로부터 손상의 발생 여부와 위치 및 손상의 정도를 평가하는 방법 등이 대부분이었다[1-3]. 하지만, 현실적인 측면에서 방대한 기준 데이터를 상시적으로 측정하여 보관 유지한다는 것은 그다지 쉬운 일이 아니며, 이는 복잡한 대형 구조물일수록 그리고 주변 환경의 변화에 따라 구조물의 기준 데이터가 수시로 변화하는 경우에는 더욱 그러하다. 따라서 보다 현실적인 방안으로써 기준 데이터를 사용하지 않는 구조손상 탐지기법의 개발이 중요시 되고 있다[1-4].

지난 20여 년간 유도 초음파를 이용한 다양한 구조손상 탐지기법이 문헌에 발표되고 있다. 유도 초음파란 보 (beam), 파이프, 평판 등과 같이 경계 면으로 싸여 있는 구조물 매체를 따라서 전파되는 탄성파를 말하는 것으로서, 평판의 경우 Lamb파[5]가 유도초음파의 예에 해당한다. Lamb파를 이용한 구조손상 탐지기법에는 pitch-catch (PC)-

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

기법[6-10], pulse-echo(PE)-기법[11-13] 및 time-reversal (TR)-기법[14-17] 등이 있다. 이들 기법에 대한 원리와 장 단점에 대한 내용은 문헌[1-4]에 잘 소개되어 있다. 본 연구에서는 기준데이터를 필요로 하지 않는 SHM기술의 개발을 위해 PC-기법을 우선 연구 대상으로 하였다.

기존의 PC-기법에서는 첫 과정으로서 구조물의 한 지점에 설치한 PZT-액츄에이터를 이용하여 탄성파를 발생시키고 다른 지점에 설치된 PZT-센서를 이용하여 양 PZT 사이의 경로를 따라 전파되어온 탄성파를 측정한다. 다음 과정으로서 이와 같이 측정된 탄성파 신호를 사전에 확보해 둔 기준 데이터와 비교하여 손상으로 인하여 발생한 신호의 차이를 계산한 후 여기에 적절한 통계적 기법을 적용하여 발생한 손상을 검출한다. PC-기법을 사용한 연구로서, Tua 등[7]은 Lamb파의 TOF(time-of-flight)를 이용하여 평판과 파이프에 발생한 손상을 검출하였으며, Park 등[8]은 Lamb파의 TOF와 웨이블릿(wavelet) 계수에 대한 RMSD(root mean square derivation)을 활용하여 교량의 철재 트러스 부재에 발생한 손상을 검출하였다. 또한, Cuc 등[9]은 알루미늄으로 제작된 항공기 패널 시편에 부가한 손상을 PWAS (piezoelectric wafer active sensors)를 이용하여 검출하는 실험연구를 수행하였다. 최근에는 Ihn과 Chang[10]이 항공기 구조물에 발생한 손상을 검출하기 위해 손상지수(damage index)를 제안하고 이미지화 기법(imaging method)을 적용하였다.

PC-기법을 적용한 기존의 대부분 SHM기술에서는 손상 검출에 기준 데이터를 필요로 하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 구조물에 손상이 발생하기 이전에 미리 측정해 둔 기준 데이터를 필요로 하지 않는 개량된 PC-기법과 이미지화 기법을 기반으로 하는 새로운 SHM기술을 제안하고 실험을 통해 제안된 기술의 응용 가능성을 고찰하였다.

2. Lamb파의 중심주파수 및 파형 선정

Lamb파는 평판과 같이 두 표면을 경계 면으로 갖는 얇은 두께의 구조물 내부를 따라 전달되는 초음파로써 평판의 표면에 부착된 PZT-액츄에이터를 이용하여 발생시킬 수 있다. Lamb파는 중심주파수에 따라 전파속도가 변하는 분산(dispersion) 특성을 보이며, 대칭(symmetric; S) 모드(mode)와 비대칭(anti-symmetric; A) 모드(mode)가 존재한다. 대칭 모드와 비대칭 모드에 대한 이론적 분산식(dispersion equation)은 다음과 같이 주어진다[5].

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} \quad (\text{대칭모드}) \quad (1)$$

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{(q^2 - k^2)^2}{4k^2 pq} \quad (\text{비대칭모드}) \quad (2)$$

여기서 h 는 평판의 두께이고 k 는 파수(wavenumber)이다. 또한 p 와 q 는 다음과 같이 정의된다.

$$q^2 = \left(\frac{\rho}{\mu}\right)\omega^2 - k^2, \quad p^2 = \left(\frac{\rho}{\lambda + 2\mu}\right)\omega^2 - k^2 \quad (3)$$

윗 식에서 λ 와 μ 는 Lamé상수이고 ρ 는 질량 밀도, ω 는 가진 주파수이다.

Fig. 1은 이론 분산식을 이용하여 구한 알루미늄 평판 시편에 대한 분산 곡선과 실험을 통해 구한 결과를 함께 보여 주고 있다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 구조물에 파열성 파(burst wave)를 가진다면 가진주파수에 따라 여러 개의 A모드와 S모드 Lamb파가 동시에 발생한다. 발생하는 Lamb파의 수를 최소화하는 것이 신호처리에 유리하므로 가진 주파수의 범위는 대략 600kHz 이하로 해야 한다. Fig. 1을 보면 사용된 평판 시편의 경우, S0모드는 대략 200kHz 이하에서 그리고 A0모드는 대략 200kHz 이상에서 비분산성(non-dispersive ness)이 우수함을 알 수 있다. 파열성 파의 중심 주파수(center frequency)와 파형(wave form)은 기존의 연구[10,11]에서 사용한 방법에 따라 실험적으로 결정하였다. 즉, 실험을 통해 250kHz에서 A0모드의 비분산성이 수용 가능한 정도임과 S0모드에 비하여 수신신호의 세기가 상대적으로 우수함을 관찰하여 파열성 파의 중심주파수를 250 kHz로 선정하였다. 파열성 파의 파형은 주어진 중심주파수에서 피크의 수에 따라 전파에 따른 파형의 변형이 작아진다. 실험을 통해 Fig. 2(a)에 보인 바와 같이 파형의 변형이 상대적으로 적은 7개의 피크를 갖도록 실험적으로 결정하였으며 다음의 함수로 표현된다.

$$\psi(t) = e^{-t^2/2\sigma^2} \cos(2\pi ft) \quad (4)$$

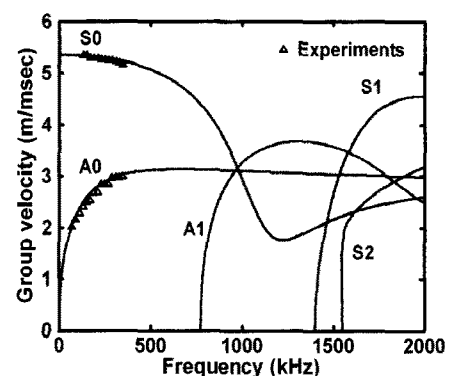


Fig. 1. Dispersion curve for the aluminum plate of thickness 2 mm

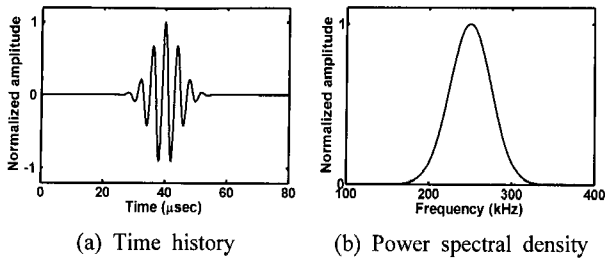


Fig. 2. Excitation burst wave of center frequency 250 kHz

여기서 $f=250\text{kHz}$ 는 중심 주파수이고 $\sigma=4.5\mu\text{sec}$ 는 7개의 피크를 가질 수 있도록 Lamb파의 폭을 결정해주는 상수이다. Fig. 2(b)는 Fig. 2(a)에 보인 파열성 파에 대한 PSD (power spectral density)로서 중심 주파수가 250kHz인 Lamb파임을 보여주고 있다. Fig. 2(b)의 PSD는 MATLAB 함수인 'periodogram'을 이용하여 쉽게 구할 수 있다.

3. Lamb파의 TOF 및 Group속도 측정

PZT-액추에이터와 PZT-센서 사이의 거리를 알고 있을 때, PZT-액추에이터에서 가진된 입력신호가 PZT-센서에 응답신호로서 도달하는데 걸린 시간을 TOF (time-of-flight)라 한다.

TOF를 실험을 통해 구하는 방법으로는 입력신호와 응답신호를 측정된 그대로 사용하여 응답신호의 최대값에 대응하는 시점과 입력신호의 최대값에 대응하는 시점 사이의 시차를 TOF로 정의하는 방법이 있다. 하지만 측정된 신호를 그대로 사용할 경우 탄성파의 분산특성에 의해 응답신호의 파형이 입력신호와 달리 형태로 변화할 수 있기 때문에 실제로는 신호의 에너지가 가장 큰 시점 사이의 시차를 TOF로서 측정하는 것이 아니라 신호의 피크 값이 가장 큰 시점 사이의 시차를 TOF로서 측정할 수 있기 때문에 측정된 TOF의 물리적 정확성이 떨어지게 된다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 Ihn[10,18]은 STFT(short-time Fourier transform)를 이용한 신호처리 기술을 이용하였다. 일반 푸리에 변환은 주어진 신호에 대한 주파수 스펙트럼만을 제공할 뿐 신호의 매 순간마다 어떠한 주파수 성분이 어느 정도 포함되어 있는지는 제공하지 못한다. 반면에 STFT는 신호를 짧은 시간 구역으로 나누어 푸리에변환을 시킴으로써 시간에 따른 신호 속의 주파수 스펙트럼의 변화를 관찰할 수 있다.

Fig. 3은 점선으로 나타낸 입력신호와 응답신호에 STFT를 모두 적용시킨 후 입력신호의 중심주파수(예로, 250 kHz)에 해당하는 스펙트럼만을 취하여 실선으로 나타낸 것이다. Fig. 3에서 각 그래프는 피크의 크기를 단위 값 1이

되도록 조정하여 도시한 것이다. 이와같이 입력신호와 응답신호 모두에 STFT를 적용하면 각 신호에서 최대 에너지를 갖는 시점 사이의 시차를 보다 명확하게 찾을 수 있다. 따라서 입력신호와 응답신호가 각각 최대 에너지를 갖는 시점 사이의 시차를 TOF로서 보다 쉽게 측정할 수 있다. 이렇게 구한 TOF와 두 PZT 사이의 직선거리 d 를 이용하여 Group속도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$c_g = \frac{d}{TOF} \tag{5}$$

Group속도는 물리적으로 에너지가 전파되어 가는 속도를 의미하며, 이는 Fig. 3에 보인 바와 같이 Lamb파의 한 파형 다발(wave packet)이 전파되어 가는 속도에 해당한다.

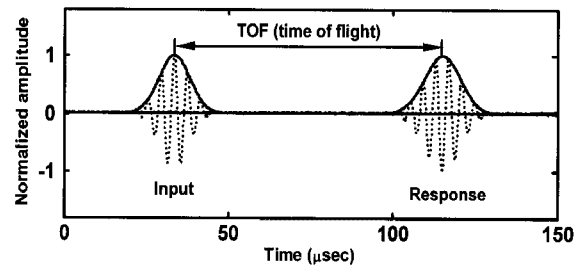


Fig. 3. Measurement of TOF by using STFT

4. Pitch-Catch(PC)-기법

Fig. 4는 PC-기법에 대한 개략도이다. PZT A는 액추에이터로서 파열성 Lamb파를 가진하는 역할을 하고, PZT B는 PZT A와 PZT B 사이의 직선 경로(경로 1)를 통해 직접 전달되어 오는 신호와 PZT A에서 출발하여 손상에 도달한 후 그곳에서 반사되어 PZT B로 향하는 간접 경로(경로 2)를 통해 전달되어 오는 신호를 모두 응답신호로서 감지하는 센서 역할을 한다. 경로 (1)의 거리를 d_1 이라 하고 경로 (2)의 거리를 d_2 라 하면, PZT A에서 출발한 가진 신호가 경로(1)을 통과하는 시간은 다음과 같이 계산된다.

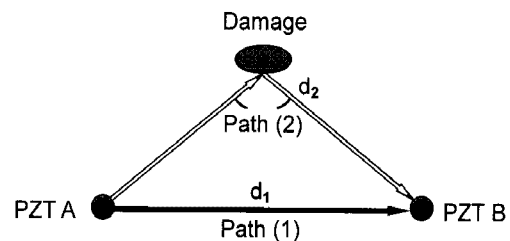


Fig. 4. Lamb wave propagation path from PZT A to PZT B

$$t_1 = \frac{d_1}{c_g} \tag{6}$$

여기서 c_g 는 가진 신호의 Group속도로서 식 (5)를 이용하여 사전에 산출할 수 있다. Fig. 4에 보인 바와 같이 손상이 PZT 액츄에이터와 PZT 센서를 잇는 직선 경로에서 얼마간 떨어져 있다면, 경로 (1)과 경로 (2)의 거리의 차이는 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta d = d_2 - d_1 \quad (d_2 > d_1) \quad (7)$$

따라서 PZT A에서 동시에 출발한 가진 신호가 경로 (1)과 경로 (2)를 통과하여 PZT B에 도달하는 데 걸리는 시간 차이는 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta t = \frac{\Delta d}{c_g} \quad (8)$$

즉, 손상을 통과하여 간접 경로 (2)를 따라 PZT B (센서)에 도달하는데 걸리는 시간은 직접 경로 (1)을 통과하는데 걸리는 시간에 비하여 다음 식과 같이 Δt 만큼 지연된다.

$$t_2 = t_1 + \Delta t \quad (9)$$

직선 경로 (1)을 통과한 신호는 손상의 영향을 받지 않은 신호로서 손상에 대한 정보를 지니지 않고 있다. 반면에, 간접 경로 (2)를 따라 손상을 통과한 후 시간 Δt 만큼 늦게 도착한 신호는 손상에 대한 정보를 지니고 있는 손상신호에 해당한다. 따라서 성공적인 손상검출을 위해서는 센서에서 측정된 신호로부터 손상신호를 잘 추출하는 것이 매우 중요하다.

Fig. 5(a)에 보인 바와 같이 손상이 없는 정상 평판(intact plate)에 대한 Pitch-Catch실험에서 가진신호의 중심 주파수와 파형이 센서에서 측정된 응답신호에서도 잘 유지됨을 알 수 있다. 또한 Fig. 5(b)에 보인 바와 같이 응답신호를 STFT 처리를 한 다음 가진신호의 중심주파수에 해당하는 스펙트럼만을 취하여 시간의 함수로 도시하면 STFT 처리된 응답신호가 거의 좌우 대칭의 형태를 보임을 알 수 있다. 이러한 사실은 Wang 등[15]의 연구에서도 언급한 바 있다. 그러나 Fig. 6에 보인 바와 같이 손상을 갖는 평판에 대해 Pitch-Catch실험을 수행하는 경우, 간접 경로 (2)를 거친 손상신호에 직선 경로 (1)을 거쳐 센서에서 측정된 신호가 중첩됨으로써 STFT 처리된 응답신호가 더 이상 대칭성을 유지하지 않게 됨을 알 수 있다.

손상이 직접 경로 상에서 일정한 거리 이상 떨어진 경우, 손상신호의 영향은 STFT 처리된 응답신호의 피크 점 t_{peak} 를 기준으로 오른쪽 부위에 주로 작용하고 있으며 왼쪽 부위에는 거의 없거나 상대적으로 적다. 따라서 Fig. 7에 보인 바와 같이, 손상신호의 영향을 덜 받은 STFT 처리된 응답신호의 피크 점을 기준으로 왼쪽 부위, 즉 $t_1 \leq t \leq t_{peak}$

부위를 복사하여 손상신호로 인해 오염된 오른쪽 부위에 붙임으로써 t_{peak} 를 중심으로 좌우 대칭이 되도록 만들어줌으로써 손상신호가 배제된 응답신호, 즉 정상 평판에서 측정해야 할 기준신호를 간단한 신호처리만을 통해 근사적으로 복원할 수 있다.

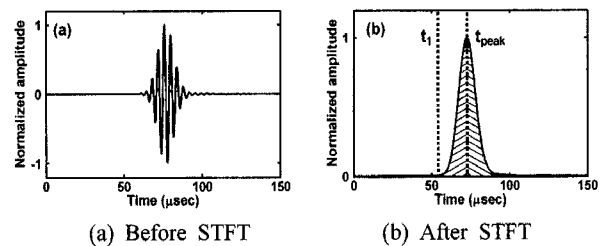


Fig. 5. Response signal at intact state

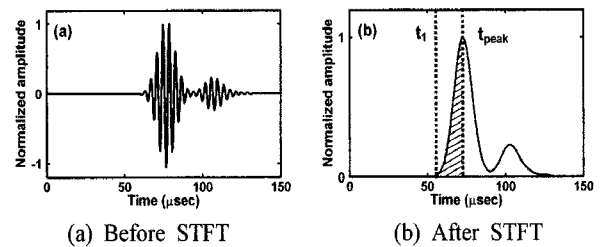


Fig. 6. Response signal at damaged state

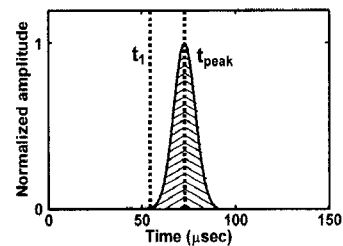


Fig. 7. Reconstructed approximate reference signal

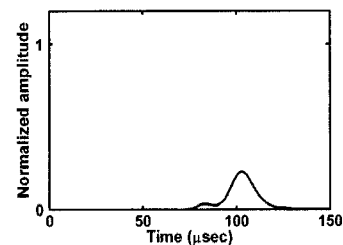


Fig. 8. Extraction of damage signal

위에 기술한 방법으로 각 PZT 쌍(액츄에이터와 센서)에 대한 Pitch-Catch실험을 통해 기준신호를 복원한 후 이를 이용하여 손상신호를 추출한다. 즉, Fig. 8에 보인 바와 같이 손상된 평판에 대한 Pitch-Catch실험에서 측정하여 STFT 처리한 응답신호로부터 앞에서 언급한 방법으로 복원한 기준신호를 제거함으로써 원하는 손상신호를 추출하는 것이 가능하다. 이러한 방법은 Wang 등[15]이 손상신호

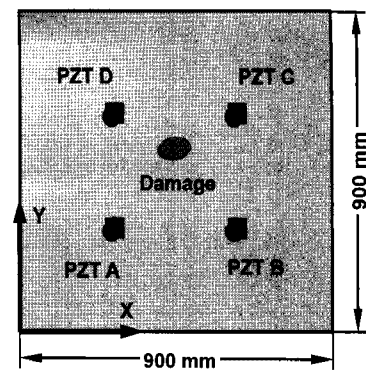
를 추출하기 위하여 정상 평판에서 직접 측정된 기준신호를 사용했던 방법과는 달리 더 이상 기준신호를 실제로 측정을 통해 확보하지 않아도 되는 장점이 있다.

위에서 소개한 기준신호의 복원 기법은 손상이 액츄에이터와 센서 사이의 직선 경로에서 얼마간 떨어져 있어야 유용하다. 손상이 액츄에이터와 센서 사이의 직선 경로에서 아주 가까운 거리에 있는 경우에는 손상신호가 직선 경로를 통해 직접 전달되는 신호와 거의 시차 없이 중첩되기 때문에 기준신호의 복원이 어렵다. 따라서, 손상이 너무 가까이 위치한 (액츄에이터와 센서 사이의) 경로에서 취한 정보는 손상검출에 도움이 되지 못할 것이다. 보다 정밀한 손상 탐지를 위해서는 보다 많은 유효한 경로가 필요하다. 이는 다수의 PZT를 사용하여 액츄에이터와 센서의 쌍을 증가시킴으로써 가능할 것이다. 본 연구에서는 구조물의 경계면이 부착된 센서들로부터 충분한 거리에 떨어져 있다고 가정하여 경계면에서 반사되어온 신호가 응답신호에 간섭되어 중첩되지 않는 경우로 가정하였다. 경계면의 영향이 존재하는 보다 실제적인 문제를 다루기 위해서는 경계면에서 반사되어온 신호를 충분히 제거하기 위한 기술이 장차 해결되어야 할 것이다.

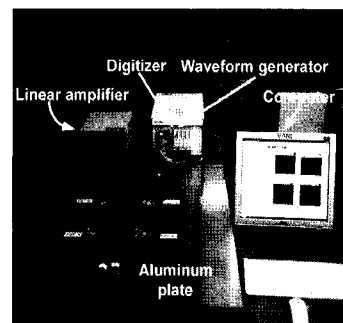
지금까지 기술한 기준신호의 복원과 손상신호의 추출과정에서 사용되는 응답신호에는 원하지 않는 잡음(noise)이 포함되어 있다. 따라서 사전에 잡음을 제거하여 S/N(signal-to-noise)비를 최대한 향상시킬 필요가 있다. 본 연구에서는 FFT를 이용하여 수신된 응답신호에 대한 푸리에 스펙트럼을 구한 후, 응답신호에너지의 90%에 해당하는 스펙트럼 성분만을 취하고 나머지는 잡음 성분으로 간주하여 제거하였다[1]. 잡음성분이 제거된 푸리에 스펙트럼에 inverse FFT를 적용하여 정제된 응답신호를 시간의 함수로 구한 다음, 위에 기술한 기준신호의 복원과 손상신호의 추출과정을 수행하였다.

5. 손상 검출실험 및 이미지화 기법

Fig. 9는 손상 검출실험에 사용한 알루미늄 평판과 실험 장치도를 보여주고 있다. 정사각형 알루미늄 평판의 한 변의 길이는 900mm이고 두께는 2mm 이다. Fig. 9(a)에 보인 바와 같이 알루미늄 평판에 4개의 PZT (즉 PZT A, PZT B, PZT C, PZT D)를 부착하였으며, 기존 연구[12]에서도 사용한 방법의 하나로써 구조손상을 대신하여 질량(직경 20mm의 추)을 부착하였다. PZT센서는 국내 디지털에코(주)에서 제작된 것으로서 직경이 5mm이고 두께가 0.5mm 인 원판형이며, 알루미늄 평판에 전도성 에폭시로 부착하였다.



(a)



(b)

Fig. 9. Damage detection test: (a) aluminum plate specimen, (b) experiment set-up

손상 검출 실험장치는 신호 발생장치, 신호 증폭장치 및 데이터 측정 및 처리장치로 이루어진다. 신호 발생장치로는 National Instrument(NI)사의 Waveform Generator (Model: PXI-5412), 신호 증폭장치로는 20배까지 증폭이 가능한 FLC Electronics사의 Amplifier (Model: F20AD), 그리고 데이터 측정 및 처리장치로는 NI사의 Digitizer (Model: PXI-5105)와 Embedded Controller (Model: PXI-8196)를 사용하였다. 신호 발생장치를 이용하여 원하는 가진신호의 파형을 발생시키면 발생된 신호는 데이터 측정장치에 기록이 되는 동시에 증폭장치를 통해 증폭되어 PZT-액츄에이터를 가진시킨다. PZT-액츄에이터에 의해 가진된 Lamb파는 평판을 따라 전파되어 PZT-센서에 의해 측정되어 데이터 측정장치에 저장된다. 데이터 측정장치에 저장된 응답신호에 대한 신호처리 통하여 손상신호를 추출한 후 다음에 소개하는 이미지화 기법을 적용하여 손상의 위치를 가시화 한다.

Pitch-Catch 실험에서 PZT A를 액츄에이터로 사용하는 경우 PZT B, PZT C 및 PZT D는 모두 센서로 사용하여 모두 3개의 경로를 얻게 된다. 이와 같은 요령으로 PZT B, PZT C 및 PZT D를 순서대로 액츄에이터로 사용하고 나머지 PZT를 모두 센서로 사용함으로써 액츄에이터와 센서의 쌍을 총 12개로 증가시킬 수 있으며, 상호성(reciprocal) 원

리를 적용하여 실제 측정은 6개 경로(즉, AB, AC, AD, BC, BD, CD)에 대해서만 수행하였다.

Fig. 10은 손상이 4개의 PZT의 중간 위치에 놓여 있을 때, PZT A 액추에이터로 사용하여 PZT B, PZT C 및 PZT D에서 측정한 6개의 경로별 응답신호(가는 선)와 복원된 기준신호(굵은 선)를 보여주고 있다. Fig. 11은 경로 별 응답신호에서 기준신호를 제거한 손상신호를 보여주고 있다. 이와 같이 도출된 손상신호에 다음에 설명하는 이미지

화 기법 (imaging method)을 적용시켜 손상의 위치를 가시화할 수 있다. Fig. 10과 11에서 손상에 대해 대칭적인 경로(예로 경로 AB, AD)에 대한 신호가 동일하지 않는 이유는 현실적으로 완벽하게 피할 수 없는 질량 부착 상태의 불균일성, 사용된 PZT들의 감도의 차이에 기인한다.

Fig. 12에 보인 바와 같이, 임의의 위치 (x, y)에 있는 픽셀(pixel)에 대한 이미지 데이터 값을 빔포밍(beamforming)법[1,10,15]을 이용하여 아래와 같이 표현할 수 있다.

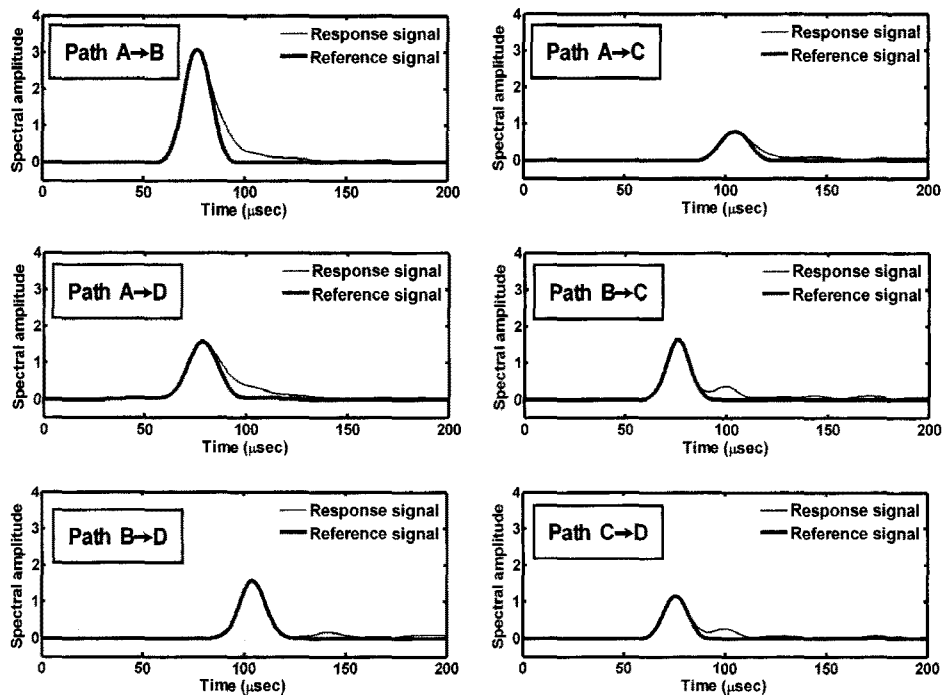


Fig. 10. STFT response and reference signals for the Case 1

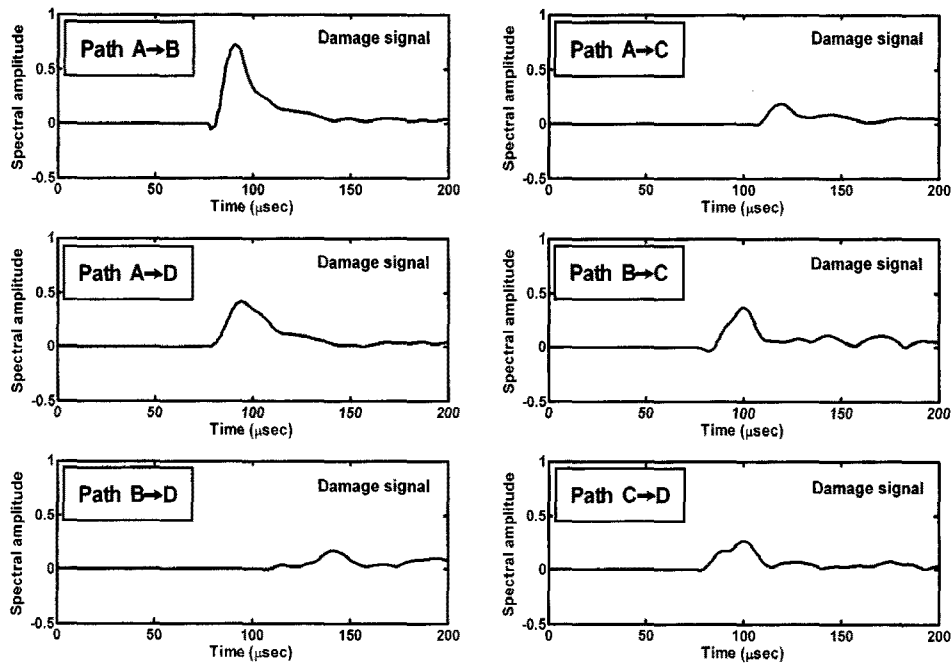


Fig. 11. STFT damage signals for the Case 1

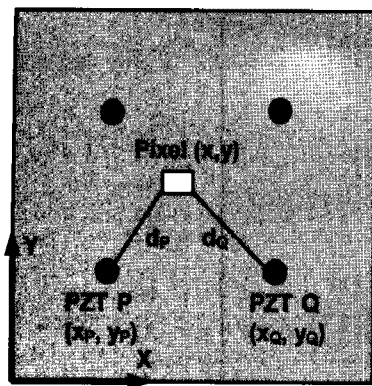


Fig. 12. Beamforming method used for the imaging process

$$S(x, y) = \sum_{P=1}^N \sum_{Q=1}^N A_{PQ} f_{PQ}(t_{PQ}(x, y)) \quad (10)$$

여기서, N 은 사용된 PZT의 개수를 나타내고, $f_{PQ}(t)$ 는 임의의 PZT 쌍 (즉 PZT P와 Q) 사이의 손상신호이고, $t_{PQ}(x, y)$ 는 Lamb파가 PZT P의 위치 (x_p, y_p) 에서 출발하여 픽셀의 위치 (x, y) 를 거쳐 PZT Q의 위치 (x_q, y_q) 에 도달하기까지의 시간으로서 다음 식으로 표현된다.

$$t_{PQ}(x, y) = \frac{d_p(x, y) + d_q(x, y)}{c_g} \quad (11)$$

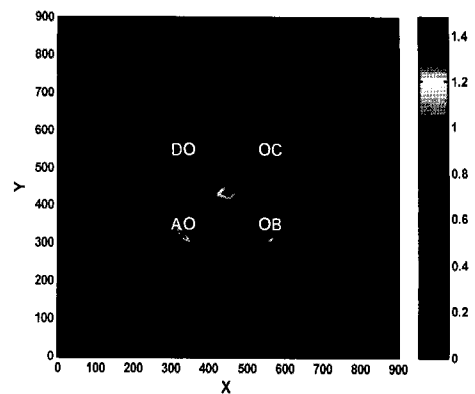
여기서,

$$\begin{aligned} d_p(x, y) &= \sqrt{(x_p - x)^2 + (y_p - y)^2} \\ d_q(x, y) &= \sqrt{(x_q - x)^2 + (y_q - y)^2} \end{aligned} \quad (12)$$

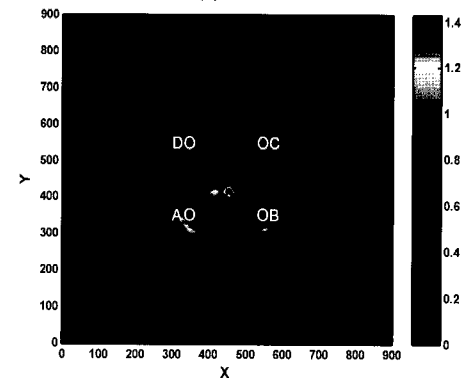
또한 APQ는 PZT (P, Q) 쌍에 따른 가중치로서 본 논문에서는 1로 하였다. 임의의 경로에 대한 손상신호를 식(10)에 적용하면 해당 두 개의 PZT를 초점으로 하는 타원형 궤도가 그려진다. 손상신호 $f_{PQ}(t)$ 의 피크 값은 픽셀의 위치 (x, y) 가 손상의 위치와 일치하는 경우에 해당하고 그 이외의 위치에서는 항상 피크 값 보다 작은 값을 갖게 되므로, 손상의 위치를 통과하는 타원형 궤도가 가장 큰 값을 갖도록 이미지화할 수 있다. 따라서 경로별로 가장 큰 값을 갖는 타원형 궤도들이 공통으로 중첩되는 픽셀의 위치가 바로 손상의 위치를 나타낸다. Fig. 13에서 보이는 달무리 형상은 타원형 궤도들의 중첩에 의해 보이는 것이다.

Table 1. PZTs and damage locations (units: mm)

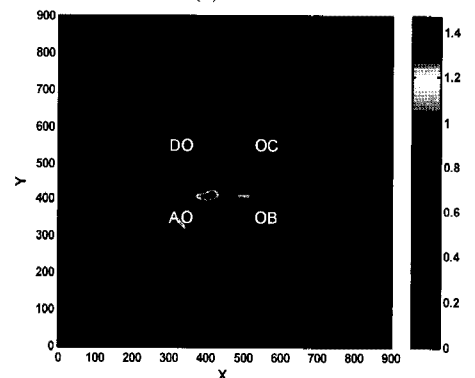
	Damage location (x, y)	PZT locations (x, y)			
		PZT A	PZT B	PZT C	PZT D
Case 1	(450,450)	(350, 350)	(550, 350)	(550, 550)	(350, 550)
Case 2	(450,400)	(350, 350)	(550, 350)	(550, 550)	(350, 550)
Case 3	(400,400)	(350, 350)	(550, 350)	(550, 550)	(350, 550)



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 13. Damage detection results for 3 different damage locations

Table 1은 정시각형 알루미늄 평판에 설치한 고정된 4개 PZT 위치와 손상의 위치를 보이고 있다. 손상의 위치는 서로 다른 세 가지의 경우를 생각하였다. Fig. 13(a)는 손상이 4개의 PZT의 중간 위치에 놓여 있을 경우(즉, Case 1)에 대한 손상검출 결과이다. 마찬가지로 Fig. 13(a), 13(b) 및 13(c)는 각각 Case 1, Case 2 및 Case 3에 대한 손상검출 결과이다. 위 세 가지 경우에 대해서 제안한 SHM기술이 손상의 위치를 비교적 잘 검출하고 있음을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 기존의 대부분 SHM기술과 달리, 구조물에 손상이 발생하기 이전에 기준신호를 미리 측정해 놓을

필요 없이 손상을 검출할 수 있는 새로운 SHM기술의 개발을 위해서 개량된 PC-기법을 제안하고 이미지화 기법을 적용하였다. 제안된 SHM기술을 평가하기 위하여 알루미늄 평판에 대한 손상 검출 실험을 수행하였다. 그 결과, 제안된 SHM기술이 다양한 경우의 손상 위치를 성공적으로 검출함을 확인하였다.

본 연구에서는 구조물의 경계면이나 손상 이외의 다른 원인에 의해 반사된 신호의 영향을 무시할 수 있는 경우로 가정하였다. 그러나, 보다 실제적인 문제에서의 적용을 위해서는 이들 신호의 영향을 성공적으로 제거함으로써 제안된 SHM기술을 적용하기 위한 연구가 필요하다고 판단한다. 또한, 온도를 포함하는 환경 변화, PZT 감도의 차이 등에 대한 영향 평가와 보다 다양한 손상의 유형과 위치에 대한 추가적인 실험연구가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2007-313-D00011)



1. Raghavan, A. and Cesnick, C.E.S.(2007), "Review of guided-wave structural health monitoring," *The Shock and Vibration*, Vol. 32, No. 2, pp. 91-114.
2. Montalvao, D., Maia, N.M.M., and Ribeiro, A.M.R.(2006), "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.
3. Giurgiutiu, V. and Cuc, A.(2005), "Embedded non-destructive evaluation for structural health monitoring, damage detection, and failure prevention," *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 37, No. 2, pp. 83-105.
4. Anton, S.R.(2008), "Baseline-free and self-powered structural health monitoring," MS Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, USA.
5. Viktorov, I.A.(1967), "Rayleigh and Lamb waves - physical theory and applications," Plenum Press, New York.
6. Prasad, S.M., Balasubramaniam, K., and Krishnamurthy, C. (2004), "Structural health monitoring of composite structures using Lamb wave tomography," *Smart Materials and Structures*,

- Vol. 13, No. 5, pp. 873-879.
7. Tua, P., Quek, S., and Wang, Q.(2005), "Detection of cracks in cylindrical pipes and plates using piezo-actuated Lamb waves, *Smart Materials and Structures*," Vol. 14, No. 6, pp. 1325-1342
8. Park, S., Yun, C.B., Roh, Y., and Lee, J.J.(2006), "PZT-based active damage detection techniques for steel bridge components," *Smart Materials and Structures*, Vol. 13, No. 5, pp. 873-879.
9. Cuc, A., Gougiutiu, V., Joshi, S., and Tidwell, Z.(2007), "Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors for space applications," *AIAA Journal*, Vol. 45, No. 12, pp. 2838-2850.
10. Ihn, J.B. and Chang, F.K.(2008), "Pitch-catch active sensing methods in structural health monitoring for aircraft structures," *Structural Health Monitoring*, Vol. 7, No. 1, pp. 5-15
11. Rose, J.L., Ditri, J.J., Pilarski, A., Rajana, K., and Carr, F.T. (1994), "A guided wave inspection technique for nuclear steam generator tuning," *NDT&E International*, Vol. 27, pp. 307-310.
12. Alleyne, D.N., Pavlakovic, B., Lowe, M.J.S. and Cawley, P. (2001), "Rapid, long-range inspection of chemical plant pipework using guided waves," *Review of Progress in QNDE*, Vol. 20, pp. 180-187.
13. Giurgiutiu, V., Zagrai, A., and Bao, J.(2004), "Damage identification in aging aircraft structures with piezoelectric wafer active sensors," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 15, No. 9-10, pp. 673-687.
14. Fink, M.(1992), "Time reversal of ultrasonic fields - Part I: basic principles," *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 39, No. 5, pp. 555-566.
15. Wang, C.H., Rose, J.T., and Chang, F.K.(2004), "A synthetic time-reversal imaging method for structural health monitoring," *Smart Materials and Structures*, Vol. 13, pp. 415-423
16. 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*, Vol. 20, No. 3, pp. 141-151.
17. Santani, G.B., Yu, L., Xu, B., and Giurgiutiu, V.(2007), "Lamb wave-mode tuning of piezo-electric wafer active sensors for structural health monitoring," *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 129, No. 6, pp. 752-762.
18. Ihn, J.B.(2003), "Built-in diagnostics for monitoring fatigue crack growth in aircraft structures," PhD Thesis, Stanford University, CA, USA.

접수일(2008년 12월 19일), 수정일(2009년 4월 13일),
 게재확정일(2009년 5월 18일)