

# 구조물 건전성 모니터링을 위한 Lamb 파 모드 구별법

## A Method of Lamb-Wave Modes Decomposition for Structural Health Monitoring

전용주<sup>1</sup>, 박일욱<sup>1</sup>, 이우식<sup>1,✉</sup>

Yongju Jun<sup>1</sup>, Ilwook Park<sup>1</sup>, and Usik Lee<sup>1,✉</sup>

<sup>1</sup> 인하대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Inha University)

✉ Corresponding author: ulee@inha.ac.kr, Tel: 032-860-7318

Manuscript received: 2012.1.9 / Accepted: 2012.5.29

*Lamb waves have received a great attention in the structural health monitoring (SHM) societies because they can propagate over relatively large distances in wave guides such as thin plates and shells. The time-of-flights of Lamb waves can be used to detect damages in a wave guide. However, due to the inherent dispersive and multi-mode characteristics of Lamb waves, one must decompose the Lamb wave modes into the symmetric and anti-symmetric modes for SHM applications. Thus, this paper proposes a decomposition method for the two-mode Lamb waves based on two rules: the group velocity ratio rule and the mode amplitude ratio rule. The group velocity ratio rule means that the ratio of the group velocities of fundamental symmetric and anti-symmetric modes is constant, while the mode amplitude ratio rule means that the magnitude of the fundamental symmetric modes of all measured response signals should be always larger than those of the anti-symmetric mode once the input signal is applied so that the magnitude of fundamental symmetric mode of excited Lamb-wave is larger than that of anti-symmetric mode, and vice versa. The proposed method is verified through the experiments ducted for an aluminum plate specimen.*

Key Words: Lamb Wave (Lam 파), Lamb Wave Modes Decomposition (Lamb 파 모드 구별), Structural Health Monitoring (구조물 건전성 모니터링), Damage (손상), Plate (평판)

### 1. 서론

구조물에 손상이 발생하여 그 정도가 점차 심해지면 결국 구조물이 파괴되면서 심각한 사고가 발생할 수 있다. 따라서 구조물에 발생하는 손상을 조기에 탐색하고 진단함으로써 체계적인 유지보수관리를 도모할 수 있는 구조물 건전성 모니터링(SHM, structural health monitoring) 기술에 대한 연구가 최근 활발하게 이루어지고 있다.

Lamb 파(Lamb wave)는 평판이나 셸(shell)과 같은 박판 구조물에 발생되어 전파하는 탄성파로서 전파거리가 상당히 크다. 따라서, Lamb 파가 구조

물의 넓은 영역에 발생한 손상을 신속하게 탐색하기 위한 수단으로써 유리하기 때문에 최근 SHM 기술에 많이 활용되고 있다.<sup>1</sup>

1960 년대에 Viktorov<sup>2</sup>가 Lamb 파의 고유특성인 이산(dispersion)특성과 다중모드(multi-modes)특성을 고찰하였다. 이후에 Ing 과 Fink<sup>3</sup>가 Lamb 파의 시간-반전(time-reversal) 과정을 이용하는 손상탐지기법을 제안하였고 Wang 등<sup>4</sup>은 Lamb 파의 시간-반전 과정에서 도출되는 손상신호(damage signal)로부터 손상을 직접 이미지화하여 검출하는 이미징 기법(imaging method)을 소개하였다. Sohn 등<sup>5</sup>은 압전소자(PZT) 액츄에이터와 센서를 사용하여 Pitch-catch

법으로 측정된 Lamb 파 신호로부터 손상신호를 도출하고 이에 손상검출지표를 적용하여 손상을 검출하는 기법을 제시하였다. 이들 연구<sup>3-5</sup>에서는 모두 손상탐지를 위하여 손상이 발생하기 이전에 미리 측정해둔 기준신호(baseline signal)를 반드시 필요로 하였다. 이러한 불편함을 해결하기 위하여 기준신호를 필요로 하지 않는 새로운 기법들이 여러 연구자들에 의해 최근 발표되고 있다. 대표적인 예로서 Park 등<sup>6</sup>과 Sohn 등<sup>7</sup>은 입력신호의 형상이 손상에 의해 변화된다는 사실을 활용하여 기준신호가 필요 없는 Lamb 파의 시간-반전 현상과 형상비교법(pattern comparison method)을 사용하는 기법을 제안하였다. 최근에 Go 와 Lee,<sup>8</sup> Lee 와 Choi,<sup>9</sup> Jun 과 Lee<sup>10</sup> 등은 Lamb 파의 시간-반전 과정을 이용하되 형상비교법을 대신하여 손상신호에 이미징 기법을 적용하는 새로운 SHM 기법을 소개하였다.

기준신호를 필요로 하지 않는 기존의 SHM 기법<sup>6-10</sup>은 측정된 응답신호에서 구조물의 각 경계에서 반사되어 오는 모든 경계신호(boundary signals)를 제거하거나 무시할 수 있는 경우에 국한하였다. 이는 Lamb 파가 갖는 고유한 이산특성과 다중모드 특성으로 인하여 경계신호 속에 포함된 수많은 Lamb 파 모드(modes)를 구분하는 것이 어려웠기 때문이다. 특히, 이미징 기법을 사용하는 경우 각 Lamb 파 모드의 비시간(time-of-flight)으로부터 전파 거리를 산출해야 하는데 이를 위해서는 각 Lamb 파 모드의 그룹속도(group velocity)를 알아야 하고 이는 해당 Lamb 파 모드가 대칭(symmetric) 모드인지 아니면 비대칭(anti-symmetric) 모드인지를 명확하게 구분되는 것을 전제로 한다.

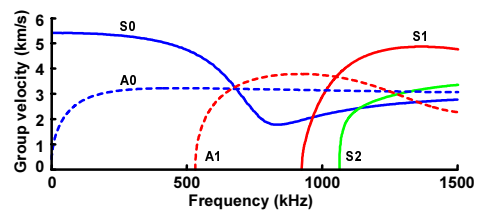
위와 같은 이유로 Lamb 파 모드를 구분하기 위한 연구가 몇몇 연구자<sup>11-13</sup>들에 의해 이루어진 바 있다. Luangvilai 등<sup>11</sup>은 Lamb 파의 이산특성 곡선을 알고 있다는 가정하에 서로 다른 두 지점에서 측정된 신호를 사용하여 S<sub>0</sub> 모드와 A<sub>0</sub> 모드를 구별하였으며 Xu 등<sup>12</sup>은 소위 'matching pursuit'법을 활용하는 방법을 제안하였다. 또한 Sohn 등<sup>13</sup>은 특별한 형태로 제작된 동심원형의 압전소자 변환기(transducers)를 활용하는 기법을 소개하였다.

본 논문에서는 기존의 연구<sup>11-13</sup>에서 제시한 방법에 비해 보다 간편한 방법으로 Lamb 파의 S<sub>0</sub> 모드와 A<sub>0</sub> 모드를 구별할 수 있는 새로운 기법을 제안하고 이를 알루미늄 평판에 대한 손상검출실험을 통해 검증하였다.

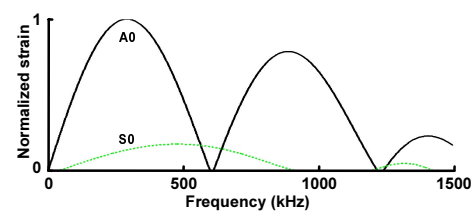
## 2. Lamb 파의 특성

Lamb 파는 입력신호의 주파수에 따라 다양한 모드로 구성되며 평판의 중심 면을 기준으로 대칭성을 갖는 대칭 모드와 비대칭 모드로 구분되며 각각 S<sub>n</sub>과 A<sub>n</sub> (n = 0, 1, 2, ...)으로 나타낸다. 일반적으로 Lamb 파의 각 모드는 주파수에 따라 각기 다른 그룹속도를 갖기 때문에 Lamb 파가 전파해가는 동안 그 형상이 변화하는 이산특성을 보인다. Lamb 파가 갖는 이러한 이산특성과 다중모드 특성은 Fig. 1(a)에 보인 알루미늄 평판에 대한 이산곡선(dispersion curves)를 통해 확인할 수 있다.<sup>2,9,10</sup>

Fig. 1(a)에 보인 이산곡선으로부터 약 500 kHz 이하의 주파수에서는 두 개의 기본 Lamb 파 모드, 즉 A<sub>0</sub>와 S<sub>0</sub> 모드만이 발생하고 그 이상의 주파수에서는 3 개 이상의 모드가 발생함을 알 수 있다. 발생된 Lamb 파 모드가 많은 경우 이산특성으로 인하여 손상검출을 위한 신호처리과정이 더욱 어렵게 된다. 따라서, Giugliuti<sup>14</sup>가 고찰한 바와 같이 가진 주파수를 잘 선택하여 평판 구조물에 A<sub>0</sub>와 S<sub>0</sub> 모드만이 발생하도록 함으로써 손상검출의 효율성을 높일 수 있다. Fig. 1(b)는 A<sub>0</sub>와 S<sub>0</sub> 모드의 진폭의 크기를 주파수의 함수로 도시한 것이다.<sup>14</sup> 이는 가진 주파수의 선택에 따라 A<sub>0</sub>와 S<sub>0</sub> 모드의 진폭의 크기의 비를 조절할 수 있음을 의미한다. 두 개의 기본 모드 가운데 손상검출에 사용할 모드의 크기가 상대적으로 클수록 신호처리가 보다 수월



(a) Dispersion curves



(b) Amplitudes of Lamb wave modes

Fig. 1 Dispersion curves and amplitudes of two fundamental Lamb wave mode in a plate

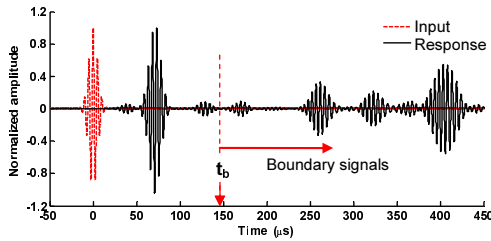


Fig. 2 Input and response signals

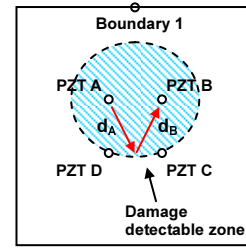


Fig. 3 Damage detectable zone

하다.

따라서 본 연구에서는 알루미늄 평판에 중심주파수가 200 kHz 인 입력신호를 입사하여  $A_0$  와  $S_0$  모드만으로 구성된 Lamb 파가 발생하도록 하였다. Fig. 2 는 이와 같이하여 평판의 한 위치에서 측정된 응답신호를 예로써 도시한 것이다. Fig. 2 에서 시간  $t = t_b$  이전의 응답신호에는  $S_0$  모드,  $A_0$  모드, 손상신호(손상에서 반사되어 온 신호)가 순차로 나타나고 있으며 시간  $t = t_b$  이후의 응답신호는 대부분 평판의 경계에서 반사되어 온 경계신호들이다. 이 경계신호들도  $S_0$  모드와  $A_0$  모드로 구성되어 있으나  $t = t_b$  이전의 것들과는 달리 어느 것이  $S_0$  모드이고 어느 것이  $A_0$  모드인지의 구별이 용이하지 않아 손상검출을 위한 신호처리에 어려움이 있다.

### 3. 기존 손상탐지기법의 문제점

Pitch-catch 법을 기반으로 하는 기존의 연구<sup>5,8</sup>에서는 손상검출을 위한 신호처리에 방해가 되는 경계신호를 손쉽게 제거하기 위하여 평판의 크기가 충분히 크다고 가정하였다. 또한 Lamb 파의 시간-반전 특성을 이용한 기존의 연구<sup>4,6,7,9,10</sup>의 경우에도 평판의 크기가 충분히 크다고 가정함으로써 경계신호를 충분히 배제할 수 있는 경우로 국한하였다. 그러나 실제의 경우 일반 구조물은 그 사이즈가 유한하기 때문에 Fig. 2 에 보인 바와 같이 충분한 시간 동안 측정된 응답신호에 경계신호가 포함될 수 있음을 알 수 있다.

측정된 응답신호에 경계신호가 포함된 경우에 기존의 연구에서는 속도가 빠른  $S_0$  모드의 그룹속도  $v_g$  와 평판에서 가장 가까운 경계면까지의 거리  $d_b$  를 이용하여 산출된 시간  $t_b = d_b/v_g$  를 이용하여 Fig. 2 에 표시된 시간  $t_b$  이후의 경계신호를 제거하였다.

그러나 시간  $t_b$  이후의 경계신호 부위를 제거하는 경우 손상검출 영역이 좁아지는 문제점이 발생

한다. 그 이유는 시간  $t_b$  동안에 그룹속도가 큰  $S_0$  모드는 경계면까지 전파가 가능하지만 손상탐지에 활용되는 그룹속도가 작은  $A_0$  모드는 동일한 시간 동안에 전파할 수 있는 거리가 경계면 이내의 작은 구역으로 제한되기 때문이다. Fig. 3 에 보인 평판의 경우를 예로 생각해 볼 수 있다. 즉, PZT A 에 입력신호를 가한 후 PZT B 에서 응답신호를 Fig. 2 와 같이 측정한다. 측정된 응답신호에서 시간  $t_b$  이후의 경계신호를 제거했을 때 경계신호를 제거한 응답신호로부터 손상을 탐지할 수 있는 영역은 Fig. 3 에 보인 바와 같이 PZT A 와 PZT B 를 초점으로 하는 타원의 안쪽 영역으로서 다음식을 만족한다.

$$t_b v_g = d_A + d_B \tag{1}$$

따라서, 손상탐지 가능 영역을 확대하기 위해서는 측정된 응답신호에서 경계신호를 제거하지 않고 그대로 사용하는 것이 바람직하다. 그러나, Fig. 2 에 예시한 바와 같이 시간  $t_b$  이후의 신호에는 여러 방향의 경계면에서 반사되어 온 많은  $S_0$  모드와  $A_0$  모드가 섞여 있기 때문에 이를 손상탐지에 그대로 사용하기 위해서는 어느 신호가  $S_0$  모드이고 어느 신호가  $A_0$  모드인지를 구별할 필요가 있다. 따라서 다음 장에서는 측정된 응답신호에서 Lamb 파의 기본 모드인  $S_0$  모드와  $A_0$  모드를 구별하는 방법을 제안하였다.

### 4. Lamb 파 모드의 구별법

본 연구에서는 Lamb 파의  $S_0$  모드와  $A_0$  모드를 구별하기 위하여 아래에 제안한 그룹속도비 규칙과 모드진폭비 규칙을 적용하였다.

#### 4.1 그룹속도비 규칙

##### 4.1.1 그룹속도비 규칙의 개념

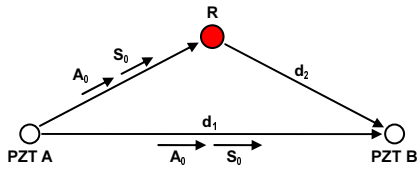


Fig. 4 Lamb wave propagation paths

Fig. 4 는 평판의 한 위치(PZT A)에서 입력신호를 가하고 다른 위치(PZT B)에서 응답신호를 측정하는 경우, PZT A 를 출발한 Lamb 파가 PZT B 까지 전파해가는 경로를 보인 것이다. PZT B 에서 측정되는 응답신호는 PZT A 에서 PZT B 를 곧 바로 연결하는 거리  $d_1$  의 직선경로(A-B)를 따라 전파된 신호와 PZT A 를 출발하여 경계면이나 손상과 같은 반사점에서 반사된 후 PZT B 까지 총 거리  $d_2$  의 우회경로(A-R-B)를 따라 전파되어 오는 신호로 이루어져 있다.

$S_0$  모드와  $A_0$  모드는 전파 경로와 무관하게 각각 동일한 그룹속도로 전파된다. 따라서 직선경로로 전파된  $S_0$  모드와  $A_0$  모드의 두 신호를 이용하여 우회경로로 전파된 신호들의 모드를 구별할 수 있다. 직선경로 A-B 를 따라 전파된 신호 중  $S_0$  모드의 비시간(time-of-flight)을  $t_S$ ,  $A_0$  모드의 비시간을  $t_A$  라고 하면  $S_0$  모드의 속도와  $A_0$  모드의 속도는 다음과 같다.

$$v_S = \frac{d_1}{t_S}, \quad v_A = \frac{d_1}{t_A} \quad (2)$$

따라서  $S_0$  모드와  $A_0$  모드의 그룹속도비를 다음과 같이 측정된 각각의 비시간으로부터 산출할 수 있다.

$$r_v = \frac{v_S}{v_A} = \frac{t_A}{t_S} \quad (3)$$

반사점 R 을 거쳐 우회경로 A-R-B 를 따라 PZT B 에 도착한  $S_0$  모드 신호의 비시간을  $t_S^*$ ,  $A_0$  모드 신호의 비시간을  $t_A^*$  라고 하면 이들은 다음 식을 만족한다.

$$v_S t_S^* = v_A t_A^* = d_2 \quad (4)$$

식(4)에 식(3)을 적용하면 다음 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{t_A^*}{t_S^*} = r_v \quad (5)$$

즉, 동일한 경계면(즉 반사점)에서 반사되어 온  $S_0$  모드와  $A_0$  모드의 비시간의 역비는 식(3)에서 산출된 그룹속도비  $r_v$  와 같다. 식(5)를 만족하는 임의의 두 모드 신호는 동일한 경계면에서 반사되어 온 기본 모드 짝(couple)을 의미하며 이 가운데 비시간이 상대적으로 짧은 모드 신호는  $S_0$  모드, 비시간이 긴 모드 신호는  $A_0$  모드임을 의미한다. 따라서, 식(5)는 경계신호로부터  $S_0$  모드와  $A_0$  모드를 구별하는 판별식으로 사용할 수 있다.

### 4.1.2 그룹속도비 규칙의 적용

Fig. 5 는 Fig. 2 에 예시한 응답신호에 대한 포락선(envelope)을 도시하고 각 Lamb 파 모드 신호의 도착시점을 나타내는 각 피크 점의 위치에 일련 번호를 부여한 것이다. Fig. 5 에서 피크 ①은 PZT A 와 PZT B 를 잇는 직선경로를 따라 전파된  $S_0$  모드를 나타내고 피크 ②는 같은 경로로 전파된  $A_0$  모드를 나타낸다. 피크 ①과 ②의 비시간 정보와 PZT A 와 PZT B 사이의 거리  $d_1 = 0.2$  m 를 이용하면  $S_0$  모드와  $A_0$  모드의 그룹속도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$v_S = \frac{0.2m}{39.2\mu s} = 5.105km/s \quad (6)$$

$$v_A = \frac{0.2m}{70.8\mu s} = 2.824km/s$$

따라서 그룹속도비는 다음과 같이 산출된다.

$$r_v = \frac{v_S}{v_A} = 1.807 \quad (7)$$

Table 1 은 Fig. 5 에 보인 각 피크 들의 비시간  $t_i (i = 1, 2, 3, \dots, 6)$ 와 각 비시간  $t_i$  값에 식(7)에서 구

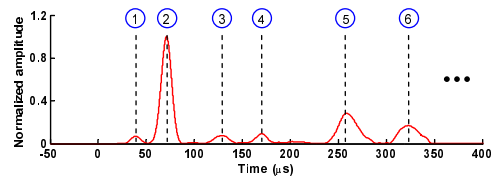


Fig. 5 Numbering of the peaks of enveloped Lamb wave mode signals

Table 1 Process of searching for candidate couples

Peak number	①	②	③	④	⑤	⑥
$t_i$ (μs)	39	71	130	170	259	322
$t_i^* = t_i r_v$ (μs)	71	128	234	307	468	581

Table 2 Application of the group velocity ratio rule for Lamb wave modes decomposition

Candidate couples		$r_v$	Couple? (Yes/No)
S <sub>0</sub> mode	A <sub>0</sub> mode		
Peak ①	Peak ②	1.81	Yes
Peak ②	Peak ③	1.83	Yes
Peak ③	Peak ⑤	1.99	No
Peak ④	Peak ⑥	1.89	Yes

한 그룹속도비  $r_v$  를 곱하여 산출한 비시간 값  $t_i^*$  를 비교하여 보인 것이다. Table 1 에서  $t_i$  과  $t_i^*$  의 값이 일치하거나 거의 비슷한 경우 해당 피크들을 동일한 경계면에서 반사해 온 S<sub>0</sub> 와 A<sub>0</sub> 모드 쌍으로 추정할 수 있다.  $t_i$  과  $t_i^*$  값의 차이가 10% 이내에 해당하는 피크를 선정하여 Table 2 에 4 개의 S<sub>0</sub> 와 A<sub>0</sub> 모드 쌍을 추정하였다.

Table 2 에 보인  $r_v$  값은 추정된 4 개의 S<sub>0</sub> 와 A<sub>0</sub> 모드 쌍들에 대한 실제 그룹속도비를 나타낸다. 식(7)에서 산출된 그룹속도비와 Table 2 에 보인  $r_v$  값이 약간씩 차이가 있음을 알 수 있다. 이러한 차이는 그룹속도비의 결정에 필요한 각 Lamb 파 모드의 비시간에 대한 측정 오차에 기인한다. 각 Lamb 파 모드의 비시간을 정확하게 측정하기 위해서는 Fig. 5 에 보인 포락선의 피크가 Fig. 2 에 보인 원래 신호의 피크와 정확히 일치해야 하지만 STFT<sup>15</sup> 를 이용하는 신호처리 과정에서 좌 또는 우로 약간씩 이동하기 때문으로 파악되었으며, 본 연구에서 연구 대상으로 삼은 알루미늄 평판에 대한 실험을 통해 그룹속도비  $r_v$  의 값이 실제로는 다음과 같은 범위에 있음을 확인하였다.

$$1.72 \leq r_v \leq 1.90 \quad (8)$$

따라서 그룹속도비  $r_v$  의 값이 식(8)를 만족하는 경우의 후보 쌍을 S<sub>0</sub> 와 A<sub>0</sub> 모드 쌍으로 판정할 수 있다. Table 2 를 보면 피크 ①과 ②, 피크 ②와 ③, 피크 ④과 ⑥의 쌍들은 각각 S<sub>0</sub> 와 A<sub>0</sub> 모드 쌍으로 1 차 판정하였으나 피크 ③과 ⑤의 쌍에 대한 판단

은 유보하였다. 유보된 피크 ③과 ⑤의 쌍에 대한 판단을 위해 다음에서 제안하는 모드진폭비 규칙을 2 차로 적용할 수 있다.

## 4.2 모드진폭비 규칙

### 4.2.1 모드진폭비 규칙의 개념

Table 2 에 보인 바와 같이 그룹속도비 규칙만을 사용하는 경우 그룹속도비가 갖는 오차 등으로 인하여 S<sub>0</sub> 와 A<sub>0</sub> 모드 쌍을 확정할 수 없는 경우가 발생한다. 이러한 경우를 대비하여 추가적인 판정 기준이 필요하다.

Fig. 1 을 통해 이미 기술한 바와 같이 가진 주파수의 선정에 따라 S<sub>0</sub> 모드와 A<sub>0</sub> 모드의 진폭의 상대적 크기가 확정된다. 예로서, 본 연구에서 사용한 중심주파수가 200 kHz 인 입력신호를 사용하는 경우 A<sub>0</sub> 모드의 진폭이 S<sub>0</sub> 모드의 진폭에 비하여 크다는 것을 Fig. 1 로부터 확인할 수 있다. 따라서, 선형시스템의 경우에 측정된 경계신호에서 A<sub>0</sub> 모드의 진폭도 S<sub>0</sub> 모드의 진폭에 비해 항상 크다고 가정할 수 있다. 즉, S<sub>0</sub> 모드와 A<sub>0</sub> 모드의 진폭비가 가진 주파수의 선정에 따라 1 보다 항상 크거나 작다는 규칙이 성립한다. 현재 다루고 있는 예시의 경우에는 다음의 모드진폭비 규칙이 성립한다.

$$r_A = \frac{\text{Magnitude of } S_0}{\text{Magnitude of } A_0} < 1 \quad (9)$$

### 4.2.2 모드진폭비 규칙의 적용

Table 3 은 측정된 각 후보 쌍들에 대한 진폭의 크기(즉, 피크의 크기)와 식(9)를 이용하여 산출한 모드진폭비  $r_A$  값을 보여주고 있다. 4 개의 후보 쌍 가운데 피크 ①과 ②, 피크 ③과 ⑤, 피크 ④와 ⑥은 모드진폭비 규칙을 만족시키고 있으나 피크 ②와 ③은 만족시키지 못하고 있음을 알 수 있다.

그룹속도비 규칙을 적용한 Table 2 의 결과와

Table 3 Application of the mode amplitude ratio rule for Lamb wave modes decomposition

Candidate couples		$r_A$	Couple? (Yes/No)
S <sub>0</sub> mode	A <sub>0</sub> mode		
Peak ①	Peak ②	0.07	Yes
Peak ②	Peak ③	14.2	No
Peak ③	Peak ⑤	0.25	Yes
Peak ④	Peak ⑥	0.56	Yes

모드진폭비 규칙을 적용한 Table 3 의 결과에서 모두 긍정(Yes)으로 판정된 피크 ①과 ②, 피크 ④와 ⑥을  $S_0$  와  $A_0$  모드 쌍으로 최종 판정할 수 있으며, 동시에 피크 ②와 ③, 피크 ③과 ⑤는  $S_0$  와  $A_0$  모드 쌍이 아닌 것으로 최종 판정할 수 있다.

**5. Lamb 파 모드구별법을 활용한 손상검출기법**

기존의 연구<sup>8</sup>에서 Fig. 5 에 보인 바와 같은 응답신호에 대한 포락선을 이용하여 손상의 위치를 이미지화하여 나타냄으로써 손상을 검출하는 이미징 기법을 소개한 바 있다. 하지만 기존의 연구에서는 경계신호를 모두 제거한 경우에 국한하였으나 본 연구에서 제안한 Lamb 파 모드 구별법을 적용하는 경우 경계신호를 제거할 필요가 없다.

Fig. 5 는 PZT A (액츄에이터)와 PZT B (센서) 사이의 pitch-catch 실험을 통해 측정된 응답신호에 대한 포락선이며, Fig. 6 은 Fig. 5 에 Lamb 파 모드 구별법을 적용하여 각 피크를  $S_0$  모드와  $A_0$  모드로 판별한 후 기존의 연구<sup>8</sup>에서 소개한 이미징 기법을 적용하여 얻은 결과이다. 다른 액츄에이터와 센서 사이에 대한 pitch-catch 실험데이터에 대해서도 동일하게 작업하면 Fig. 6 과 유사한 이미지를 얻을 수 있으며 이들 이미지를 마지막으로 중첩하면 손상의 위치에서 Fig. 6 에 보인 손상의 위치를 통과하는 타원들이 보다 강하게 중첩되어 손상이 이미지화하여 검출된다. 그러나, Fig. 6 에서 손상의 위치를 통과하는 타원의 이미지 강도가 다른 타원들에 비하여 약하게 나타나게 되므로 최종 중첩 단계에서 손상의 이미지가 뚜렷하지 않을 수 있다. 이는 Fig. 5 에 보인 포락선의 진폭 값을 그대로 이미징 과정에서 사용하기 때문이다.

위에서 언급한 문제점을 해결하기 위하여 Fig. 5 에 보인 포락선 자체를 이미징 과정에서 그대로 사용하는 대신에 Fig. 7(a)에 보인 바와 같이 Fig. 5 에서 각 Lamb 파 모드의 위치(즉 피크의 위치)를 정확하게 나타내는 얇은 폭의 막대 그래프를 구하고 이 막대 그래프에 이미징 기법을 동일하게 적용하면 Fig. 7(b)와 같이 개선된 이미지를 얻을 수 있다. 즉, 손상의 위치를 통과하는 타원의 이미지 강도가 다른 타원과 동일하게 표현됨으로써 최종 중첩 단계에서 손상의 이미지를 보다 뚜렷하게 얻을 수 있다.

다음 장에서는 본 연구에서 제안한 Lamb 파 모드 구별법과 개선된 이미징 기법을 활용함으로써

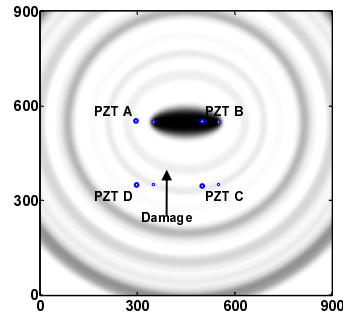
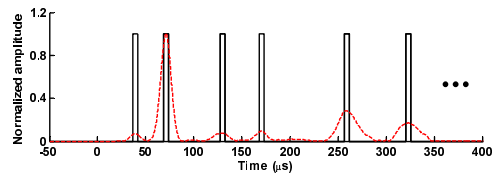
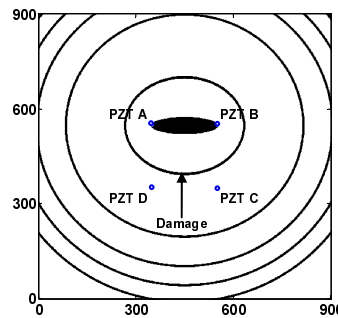


Fig. 6 Image obtained by using the envelope of response signal



(a) Bar graph



(b) Image

Fig. 7 Image obtained by using the bar graph of enveloped response signal

알루미늄 평판에 부가한 손상을 보다 성공적으로 검출함을 실험을 통해 보였다.

**6. 손상검출 실험 및 결과**

**6.1 실험장치 및 구성**

Fig. 8 은 손상검출 실험을 위한 실험장치를 보이고 있다. 실험장치는 함수발생기(PXI-5412), 디지털 타이저(PXI-5105), 선형 증폭기(FLC-F20AS), DAQ 시스템(PXI-1042Q) 등으로 구성되어 있다. 압전소자는 액츄에이터와 센서로써 모두 사용 가능한 디지털에코사의 DECH 모델을 사용하였다.

Fig. 9 는 실험에 사용한 알루미늄 평판(AL-6061



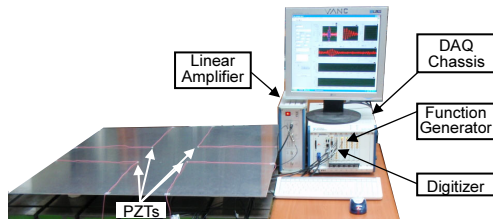


Fig. 8 Experimental set-up

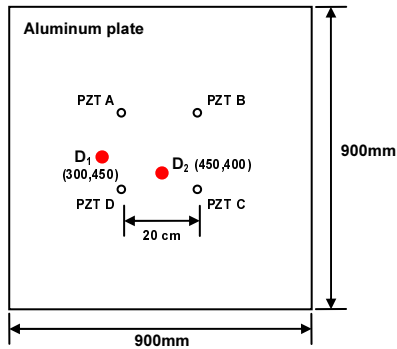


Fig. 9 Aluminum plate specimen

T6)의 시편을 보인다. 평판의 두께는 2 mm 이고 사이즈는 900 mm × 900 mm 이다. 평판에 부가한 손상의 위치는 두 가지의 경우로 하였으며 각각의 위치를 D<sub>1</sub> 과 D<sub>2</sub> 로 나타내었다. 다른 연구<sup>5-10</sup>에서와 마찬가지로 평판에 부가한 손상은 퍼티(putty)를 부착하는 방법으로 모사하였다.

6.2 실험결과

손상검출 실험을 위하여 Fig. 9 에 보인 바와 같이 4 개의 PZT 를 평판에 부착하였고 이들을 액추에이터와 센서로 교번으로 사용하면서 pitch-catch 실험을 반복하여 수행하였다. 즉, PZT A 에서 입력 신호를 가하여 PZT B, C, D 에서 측정된 응답신호, PZT B 에서 입력신호를 가하여 PZT C, D 에서 측정된 응답신호, PZT C 에서 입력신호를 가하여 PZT D 에서 측정된 응답신호 등 총 6 개 경로에 대한 응답신호 데이터를 확보하였다.

예로서 Fig. 10 은 손상을 D<sub>1</sub> 에 부가한 경우 PZT A 와 PZT B 사이의 경로 A-B 에 대한 응답신호를 나타낸다. Fig. 11 에는 Fig. 10 에 보인 응답신호를 포락선 신호로 나타내었다. 또한 본 연구에서 제안한 Lamb 파 모드 구별법에 따라 Table 4 와 Table 5 에 보인 바와 같이 그룹속도비 규칙과 모드

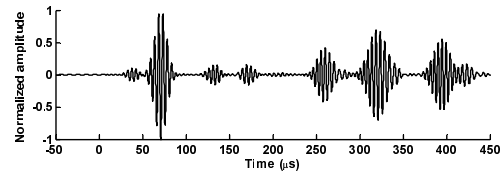


Fig. 10 Response signal for Path A-B

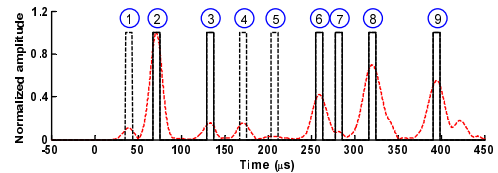


Fig. 11 Bar graph for Path A-B

Table 4 Application of the group velocity ratio rule for Lamb wave modes decomposition

Candidate couples		$r_v$	Couple?
S <sub>0</sub> mode	A <sub>0</sub> mode		
Peak ①	Peak ②	1.80	Yes
Peak ②	Peak ③	1.83	Yes
Peak ④	Peak ⑧	1.87	Yes
Peak ⑤	Peak ⑨	1.89	Yes

Table 5 Application of the mode amplitude ratio rule for Lamb wave modes decomposition

Candidate couples		$r_A$	Decision
S <sub>0</sub> mode	A <sub>0</sub> mode		
Peak ①	Peak ②	0.10	Yes
Peak ②	Peak ③	0.15	No
Peak ④	Peak ⑧	0.42	Yes
Peak ⑤	Peak ⑨	0.55	Yes

진폭비 규칙을 차례로 적용하여 두 규칙을 모두 만족하는 경우를 선별하여 S<sub>0</sub> 모드와 A<sub>0</sub> 모드로 구별하였고 그 결과를 막대 그래프로 도시하였다. Fig. 11 에서 점선의 막대 그래프는 S<sub>0</sub> 모드, 실선의 막대 그래프는 A<sub>0</sub> 모드를 나타낸다.

나머지 5 개 경로의 응답신호에 대해서도 같은 방법으로 Lamb 파 모드를 구별하여 Fig. 11 과 같은 막대 그래프를 완성할 수 있다. 각 경로 별 막대 그래프에 이미지 기법을 적용시켜 Fig. 7 과 같은 이미지를 얻고 이들을 모두 중첩시키면 Fig. 12(a) 와 같은 최종 이미지를 얻을 수 있다. Fig. 12(b)는 기존의 연구에서와 같이 각 Lamb 파 모드를 구별

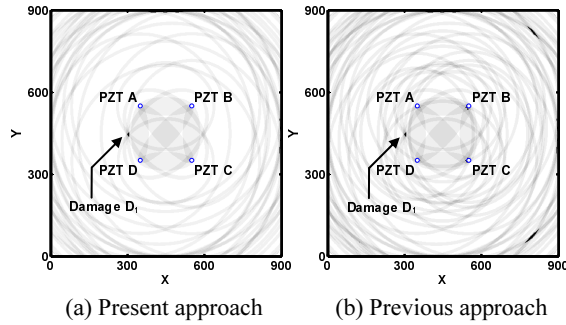


Fig. 12 Damage detection results for damage  $D_1$

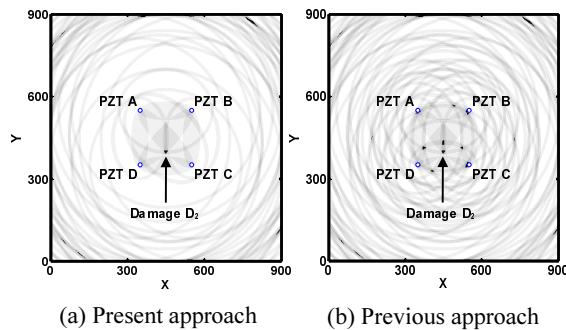


Fig. 13 Damage detection results for damage  $D_2$

하지 않고 모든 모드를  $A_0$  모드로 간주하여 이미징 기법을 적용하여 얻은 결과이다. Fig. 12(a)와 Fig. 12(b)의 비교해 보면 본 연구에서 제안한 Lamb 파 모드 구별법을 적용한 경우가 손상의 위치를 보다 명확하게 검출함을 알 수 있다. Fig. 12(b)의 경우 손상 이외의 다른 곳에도 강한 이미지가 생성되어 있어서 그 곳을 손상이 있는 것으로 오판할 수도 있다.

Fig. 13은 손상을  $D_2$ 에 부가한 경우의 실험결과이다. 마찬가지로 Lamb 파 모드 구별법을 적용한 Fig. 13(a)의 결과가 그렇지 아니한 Fig. 13(b)의 결과에 비하여 손상의 위치를 보다 분명하게 검출하고 있음을 알 수 있다. Fig. 13(b)의 경우에는 손상과 가까운 주변에 손상으로 오해될 수 있는 강한 이미지가 생성되어 있음을 확인할 수 있다.

**7. 결론**

본 연구에서는 구조물 건전성 모니터링을 위한 Lamb 파 모드 구별법을 제안하였다. 또한 손상의 위치를 보다 선명한 이미지로 표현하기 위하여 기

존의 이미징 기법을 개선하였다. Lamb 파 모드 구별법은 그룹속도비 규칙과 모드진폭비 규칙의 적용을 기반으로 하고 있다.

본 연구에서 제안한 Lamb 파 모드 구별법과 개선된 이미징 기법을 검증하기 위하여 손상을 부가한 알루미늄 평판 시편을 대상으로 손상검출 실험을 수행하였다. 측정된 응답신호에서 Lamb 파 모드를  $S_0$  모드와  $A_0$  모드로 구별함으로써 기존의 손상탐지 연구에서 문제가 되었던 경계신호를 제거해야만 했던 문제점을 극복하면서 손상 위치를 잘 검출함을 확인하였다. 이러한 결과는 구조물에서 손상탐지 가능 영역을 확대하는 것을 의미하고 보다 효율적인 구조물 건전성 모니터링이 가능하게 될 것임을 의미한다.

본 연구에서 제안한 Lamb 파 모드 구별법의 신뢰성과 적용성을 보다 향상시키기 위해서는 실측으로 확보하는 식(8)의 Lamb 파 모드의 그룹속도비에 대한 정밀성을 확보하는 것이다. 따라서 이에 대한 연구가 현재 계속 진행 중이다.

**후 기**

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

**참고문헌**

1. Raghavan, A. and Cesnik, C. E. S., "Review of Guided-wave Structural Health Monitoring," The Shock and Vibration Digest, Vol. 39, No. 2, pp. 91-114, 2007.
2. Viktorov, I. A., "Rayleigh and Lamb Waves: Physical Theory and Applications," Plenum Press, 1967.
3. Ing, R. K. and Fink, M., "Time-reversal Lamb waves," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 45, No. 4, pp. 1032-1043, 1998.
4. Wang, C. H., Rose, J. T., and Chang, F. K., "A Synthetic Time-Reversal Imaging Method for Structural Health Monitoring," Smart Materials and Structures, Vol. 13, No. 2, pp. 415- 423, 2004.
5. Sohn, H., Park, G., Wait, J. R., Limback, N. P., and Farrar, C. R., "Wavelet-based Active Sensing for Delamination Detection in Composite Structure,"



- Smart Materials and Structures, Vol. 13, No. 1, pp. 153-160, 2004.
6. 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.
  7. 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.
  8. Go, H. and Lee, U., "A Guided Wave-Based Structural Damage Detection Method for Structural Health Monitoring," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 12, No. 3, pp. 412-419, 2009.
  9. Lee, U. and Choi, J., "Structural Damage Diagnosis Method by Using the Time-Reversal Property of Guided Waves," *Journal of the KSPE*, Vol. 27, No. 6, pp. 64-74, 2010.
  10. Jun, Y. and Lee, U., "Computer-aided Hybrid Time Reversal Process for Structural Health Monitoring," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, No. 1, pp. 53-61, 2012.
  11. Luangvilai, K., Jacobs, L. J., and Qu, J., "Modal Decomposition of Double-mode Lamb Waves," *AIP Conf. Proc.*, Vol. 820, pp. 633-640, 2006.
  12. Xu, B., Giugliuti, V., and Yu, L., "Lamb Waves Decomposition and Mode Identification Using Matching Pursuit Method," *Proc. of the SPIE, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*, 2009.
  13. Yeum, C. M., Sohn, H., and Ihn, J. B., "Lamb Wave Mode Decomposition Using Concentric Ring and Circular Piezoelectric Transducers," *Wave Motion*, Vol. 48, No. 4, pp. 358-370, 2011.
  14. Giugliuti, V., "Tuned Lamb Wave Excitation and Detection with Piezoelectric Wafer Active Sensors for Structural Health Monitoring," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 16, No. 4, pp. 291-305, 2005.
  15. Gröchenig, K., "Foundations of Time-Frequency Analysis," Birkhäuser, 2001.