

# 적층 구조물에서 결함 탐지를 위한 비선형 음향 반응 연구

정경일, 노희설, 윤석왕

성균관대학교 물리학과 음향학연구실, BK21 물리 연구단

## A Study of nonlinear acoustic responses for defect-detection in a layer-structured material

Kyung-il Jung, Heui-Seol Roh, Suk Wang Yoon

Acoustics Research Laboratory and BK21 Physics Research Division,

Department of Physics, Sung Kyun Kwan University, Suwon 440-746, Republic of Korea

### 요 약

입사된 음파에 대한 배진동 주파수의 발생과 입사 음파들간의 합·차 주파수 발생은 물체내 결함이 존재할 때에 나타나는 중요한 비선형 효과라는 것을 이용하여 단순화된 실험실 조건의 겹쳐진 두 장의 유리판에 적용하였다. 본 논문에서는 적층 접합 물체에 있어서의 비파괴 검사법을 위해 접합되지 않은 결함 부분은 두 장의 유리판 사이의 공기 층으로 단순화하였고, 접합되어진 부분은 물 층으로 단순화하여 실험을 진행하였다. 서로 다른 조건의 두 접합 부분으로부터 발생된 입사된 기본 주파수의 배진동 주파수 발생과 합·차 주파수 발생을 관측함으로써 구조물 내의 결함 유·무를 판별하였다. 배진동 주파수의 발생과 합·차 주파수의 발생은 결함이 존재할 경우에 두드러지게 나타났지만, 결함이 존재하지 않는 경우에는 비선형 반응의 발생이 억제되었다. 이 결과로부터 비선형 현상의 발생은 이차원적인 적층 구조물에도 적용 가능하며, 비선형 비파괴 음향 탐사법에 의한 결함의 존재 유·무 판별이 가능하였다.

### 1. 서 론

적층 구조로 접합되어진 판형 물체의 사용은 산업 현장에서 가볍고 강한 성질로 인하여 매우 중요한 역할

을 차지하고 있다. 판과는 이러한 판형 물체의 비파괴 탐사에 있어서 기존의 탐사법과 비교하여 많은 장점을 지니고 있음이 지금까지의 많은 연구들을 통해 밝혀졌다. 판과의 장점은 체적파를 이용한 국부검사법과 비교하여 구조물 전체에 걸쳐 진파하는 특성을 이용한 광범위 검사라는 점이다. 그리고 주파수, 판재두께 그리고 입사각도에 따라 두께 방향으로 서로 다른 입자 변위를 갖는 다양한 모드들을 이용해 구조물에 대한 최적의 정밀도를 가지는 판파모드를 선택함으로써 최적의 탐사조건을 만들 수 있다.

그러나 현존하는 선형적인 비파괴 검사방법은 단순히 입사된 음파가 물질내에 존재하는 결함으로 인하여 산란되고 반사되는 신호를 관찰하는 펄스 에코 방식이 주를 이루고 있다. 이러한 선형적 비파괴 탐사법으로는 결함에 의한 신호와 적층구조가 갖는 특징으로 인한 물체 자체의 비선형성으로부터 나타나는 신호를 구분하기가 힘들다.

비선형 음향 탐사법은 입사된 음파가 물체 내부의 비선형적 반응을 유발하는 다공성, 전위 그리고 미세한 틈새를 갖는 균열 등과의 상호작용으로 인해 왜곡되어 반사되거나 산란된 음파가 변하게 되는 원리를 이용한다. 비선형 음향 탐사법은 기본파의 배진동 발생, 고주파수 음파와 저주파수 음파의 상호 작용에 의한 결함

주파수 발생인 주파수 변조, 그리고 반주파수 등의 비선형 현상이 나타나는 원리를 이용하여 시료의 균열을 진단하는 방법으로써, 단순히 펄스 형태의 입사 음파가 균열 등에 의해 반사나 산란되는 신호를 관찰하는 선형 음향 탐사법과는 명확하게 구분된다[1].

본 논문에서는 일차원적인 물체에서 실행되었던 실험 결과로부터[2] 이차원적인 판 형태의 물체에 비선형 비파괴 음향 탐사법을 적용하기 위한 연구[3]를 발전시켜 접합된 물체에서 나타날 수 있는 비선형적 반응을 판파를 이용하여 살펴보았다. 겹쳐진 두 장의 유리판에서 나타나는 입사 음파에 대한 접합면의 틈새 유·무로 인하여 나타날 수 있는 비선형적 반응을 물파 공기로 나타내어지는 단순화된 실험실 모델로 알아보았다.

## 2. 실험

### 2-1. 실험 장치

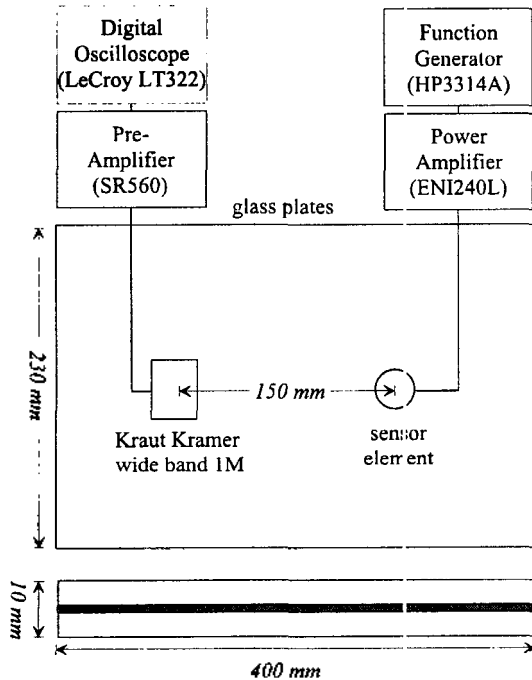


그림 1. 실험 장치

실험에 사용된 시료는 그림 1과 길이  $400 \times 230 \times 5 \text{ mm}^3$ 의 유리판이다. 두 장의 유리판 사이에 얇은 층은 단순화된 접합층을 나타내고, 유리판들은 유리판 사이의 접합층에 대해 균일한 압력에 의해 유지되어졌다. 두 유리판 사이의 접합층 물질은 공기와 물로써, 공기층은 틈새를 갖는 접합되어지지 않은 상태를, 물층은 틈새가 없는 잘 접합되어진 상태를 나타낸다.

송신 탐촉자로서 중심주파수 140 kHz를 갖는 동일한 특성을 갖는 두 개의 원형 PZT를 사용하였고, 수신 탐촉자로는 광대역 수신 탐촉자를 사용하였다. 입사 음

파는 함수 발생기(HP3314A)를 이용하여 유리판 면에 부착된 송신 탐촉자를 통하여 발생시켰고, 접합층에서 발생하는 신호는 유리판 면에 부착된 송신 탐촉자로부터 150 mm 떨어진 수신 탐촉자를 통하여 수신된 신호는 전치증폭기(SR560)에 의하여 잡음을 걸러내고 증폭되어 디지털 오실로스코프(LeCroy LT322)를 통하여 컴퓨터에 저장, 분석되었다.

### 2-2. 음속 측정 및 입사 주파수 선택

먼저 시료에서 음파의 속도를 측정하였다. 종파의 속도는 5,890 m/s 이고 횡파의 속도는 3,400 m/s였다. 입사 음파의 주파수는 사용된 PZT를 사용하여 50kHz에서 2MHz 까지 구동시켜 송신 탐촉자와 수신 탐촉자의 감도를 고려하여, 최대 진폭을 갖는 주파수 주변에서 기본 주파수와 그 배진동 주파수의 응답이 같은 주파수를 선택하였고, 수치계산에 의한 위상속도의 분산 곡선으로부터 에너지 분산을 최소화할 수 있도록 모드의 수가 최소가 되는  $A_1$  모드의 임계주파수 이하로 결정하였다. 이때 결정된 입사 주파수는 10 mm 두께의 유리판일 경우, 저주파수 음파로서 91.3 kHz와 고주파수 음파로 127 kHz로 선정하였으며, 가능한 모드는 그림 2와 같이 두 주파수  $fd_1, fd_2$  모두  $A_0, S_0$ 이다.

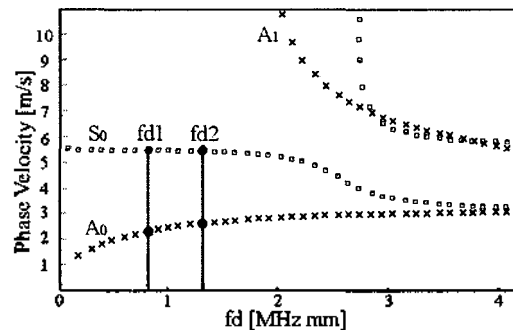


그림 2. 주파수·두께에 대한 위상속도 분산 곡선

### 2-3 결함 유·무에 따른 배진동 주파수 발생

매질 자체의 비선형성으로 인한 배진동 주파수 발생과 결함이 매질에 생성된 경우, 비선형성에 대한 변화를 판파에 의해 관측하기 위하여, 결함이 존재하지 않는 물층에서 연속파 형태의 저주파수 음파를 입사시켜 수신한 파형을 푸리에변환에 의하여 주파수 응답을 관측하여 기준을 정했다. 결함이 존재할 경우인 공기층에 대하여 동일한 방법으로 주파수 응답을 관찰하여, 결함 유·무에 따른 주파수 응답 변화를 살펴보았다.

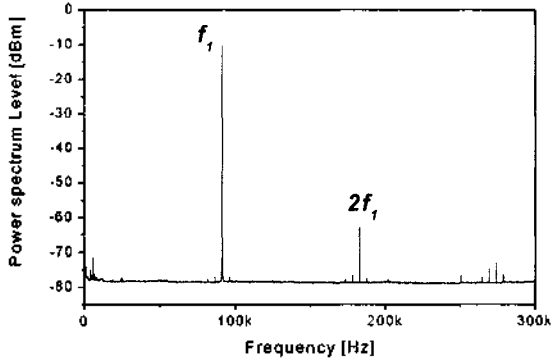
### 2-4 결함 유·무에 따른 합·차 주파수 발생

결함에 의한 비선형 음향반응중의 하나인 합·차주

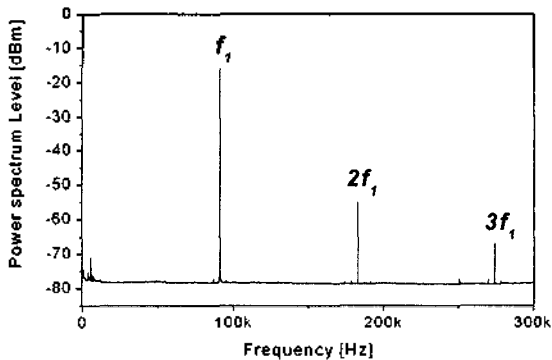
파수 발생을 확인하기 위하여 두 개의 탐측자를 사용하여 연속파 형태의 각각 다른 주파수를 갖는 음파를 동시에 입사시킨 후, 두 입사 음파의 결합으로 인한 상호작용을 수신 음파의 주파수 분석을 통해 각 주파수에서의 진폭 변화를 측정하였다.

### 3. 결과 및 분석

#### 3-1 결합 유·무에 따른 배진동 주파수 발생



(a)



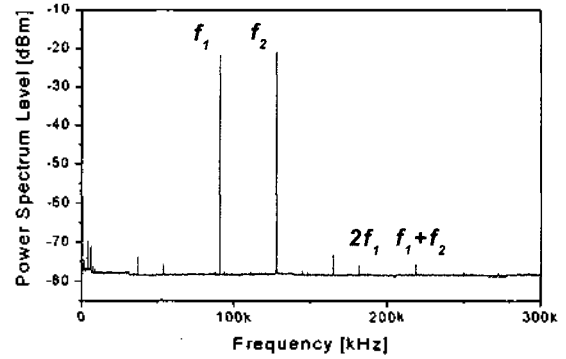
(b)

그림 3. 두 장의 유리판을 접합시켰을 경우 틈새 유·무에 따른 배진동 주파수 변화.  $f_1$ : 기본주파수,  $2f_1$ : 배진동 주파수 (a) 물층 (b) 공기층.

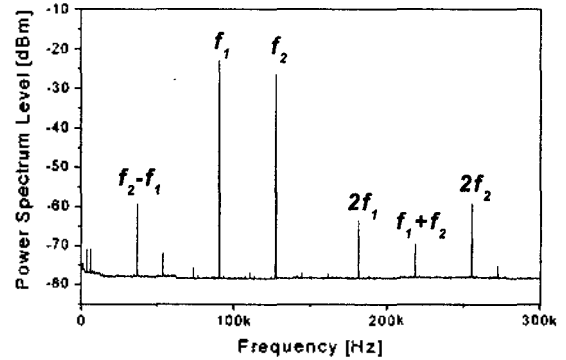
두 장의 유리판이 접합되어 있는 상태에서 접합층의 물질이 변화하는 경우 그림 3에서 보는 것과 같이 틈새를 갖는 공기층일 경우 기본음파의 배진동 주파수의 음압준위가 틈새가 없는 경우인 물층일 경우에 비해 약 7 dB 정도 증가하고 있으나, 기본파 주파수의 음압준위는 약 5 dB 정도 감소하고 있다. 이것은 공기층으로 인한 접합되지 않은 틈새 효과로 인하여 기본파 주파수의 에너지가 배진동 주파수로 전이된 것으로 보이며, 이는 공기층에 의한 틈새로 인하여 매질의 비선형성이 증가

하였다고 볼 수 있다.

#### 3-2 결합 유·무에 따른 합·차 주파수 발생



(a)



(b)

그림 4. 두 장의 유리판을 접합시켰을 경우 틈새 유·무에 따른 배진동 주파수 및 합·차 주파수 변화.  $f_1$ : 기본주파수,  $2f_1$ : 배진동 주파수,  $f_2$ : 입사 주파수,  $2f_2$ : 배진동 주파수,  $f_1+f_2$ : 합주파수,  $f_1-f_2$ : 차주파수 (a) 물층 (b) 공기층.

그림 4는 틈새의 유·무에 따라 입사한 두 기본파들 간의 상호작용에 따른 합·차 주파수 성분의 발생 유·무를 보여주고 있다. 그림 4 (a)는 틈새가 존재하지 않는 물층인 경우의 주파수 응답을 나타내고 있다. 이 결과에서 기본파 주파수들은 두드러지게 나타나는 반면에, 그림 3(a)에서의 결과와 같이 각 기본파들에 대한 배진동 주파수들은 아주 미약하게 나타나고 있으며, 또한 두 입사 주파수들간의 합주파수와 차주파수의 진폭 역시 매우 미약하여 소음음압준위와 비슷한 수준으로 나타나고 있다. 결합이 존재할 경우인 그림 4(b)에서는 기본파들의 음압준위는 감소하는 반면에 그림 3(b)의 결과에서와 같이 배진동 주파수들의 음압준위는 증가

고, 합·차주파수의 음압준위 역시 증가하여 배경 소음 음압준위과는 확실히 구분되는 값을 갖는 것을 보이고 있다. 그림 4(b)에서와 같이 결함이 존재할 경우에 두 기본 주파수의 음압준위는 결함이 없는 경우에 비하여 감소하고 있는 것을 보이고 있으며, 반대로 합주파수와 차주파수의 음압준위는 각각 10 dB, 15 dB 이상이 증가했다. 이와 같은 합·차주파수 음압준위의 증가는 공기층에 의한 미세 틈새가 물체내의 비선형성을 증가시키고, 이로 인하여 비선형 음향반응을 증가시켜 각 기본파 주파수의 에너지가 합·차 주파수로 전이한 것으로 여겨진다.

### 3.3 미세 틈새에 의한 비선형 음향효과 발생

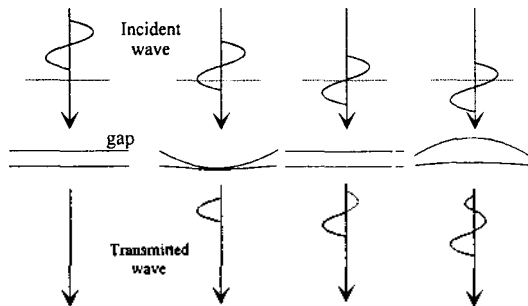


그림 5. 1차원에서 틈새에 의한 비선형 음향효과 발생 모델

틈새에 의한 비선형 음향효과 발생은 그림 5에 보이는 것과 같이 틈새에 음파가 입사될 때, 입사측 틈새면은 입사 음파에 의한 강제 진동의 형태를 띠게 되고, 틈새면의 이동 변위가 틈새 간격보다 클 경우, 입사측 반대에 놓인 틈새면은 단점이 발생하는 때에만 힘이 작용하고 열림이 발생할 때는 힘이 작용하지 않는 강제 진동의 형태를 갖는다고 할 수 있다. 이 강제 진동과 강제 진동이 주기적으로 반복됨으로써 비선형 음향효과를 발생시킨다고 생각할 수 있다.

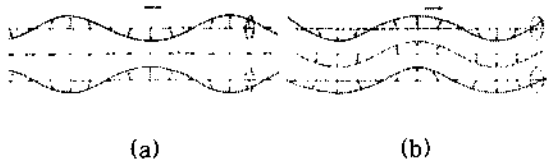


그림 6. 판파의 (a)대칭모드와 (b) 비대칭모드

판파에 있어서 비선형 음향효과 발생은 틈새 모델에 판파 모드의 입사 변위 방향을 같이 고려함으로써 그 원인을 생각할 수 있다. 그림 6과 같이 틈새가 놓인 방향과 판파의 입사 변위가 수직인 비대칭모드인 경우, 틈새 모델이 잘 적용됨을 알 수 있다.

판에 수직으로 작용하는 점원에 의해 발생하는 판파

모드의 진폭 기여도가 Weaver[4]에 의해서 계산된 바 있다. 이 결과에서  $A_0$  비대칭모드의 진폭 기여도는 주파수가 낮아질수록 증가하고 있다. 입사 주파수인 91.3 kHz에서  $A_0$ 모드의 진폭기여도가  $S_0$ 모드에 비해 대부분을 차지하며  $A_0$ 모드가 도파방향과 수평하게 놓인 결함에 대해 민감하게 반응하여 비선형 음향효과를 쉽게 발생시킨다는 것을 생각할 수 있게 한다. 나아가서 도파방향과 수직하게 놓인 결함에 대해서는 대칭모드의 비선형 음향효과 민감도가 높을 것이라는 것을 가능하게 한다.

### 4. 결론

접합층에 틈새가 존재할 경우와 존재하지 않을 경우, 그 차이에 의한 비선형 현상발생 정도가 크게 차이남을 본 연구를 통해 알 수 있었다. 틈새 유·무에 따른 수신 신호의 변화는 15 dB 이상의 배진동 주파수의 진폭이 변화하였고, 합·차주파수의 경우 역시 크게 변화함을 관찰하였다.

본 연구로부터 접합된 판형 물체에서 시료 자체의 비선형성과 경계조건의 변화에서 나타나는 반응 이외에 틈새의 존재 유·무에 따라 입사 음파에 대한 비선형 음향효과가 나타남을 알 수 있었고, 틈새 모델에 의하여 판파의 모드에 따라 각기 다른 틈새 검출에 대한 가능성을 보였다. 이로부터 비선형 음향효과가 이차원적인 판 형태의 접합 물체에서 비접합 부분의 유무를 진단할 수 있는 유용한 도구가 될 수 있음을 제시하였다.

### 감사의 글

이 논문은 한국과학재단이 지원한 특정기초연구과제(R01-2000-00014)로 이루어진 연구 결과의 하나이며 지원에 감사드립니다.

### 참고 문헌

- [1] S. Hirose, J. Achenbach, "Higher harmonics in the far field due to dynamic crack-face contacting," J. Acoust. Soc. Am. **93**(1), pp.142-147, (1993).
- [2] J. P. Kim, E. J. Kim, S. W. Yoon "Nondestructive Evaluation of flaws in solids using Nonlinear Acoustic Modulation Technique." 한국음향학회지, **15**, 1(s), (1996).
- [3] 경경일, 윤석왕, "이중 접합된 유리판에서의 비선형 음향 효과," 한국음향학회지, **17**(2), pp. 99-102, (1998).
- [4] R. L. Weaver and Y. H. Pao, "Axisymmetric elastic waves excited by a point source in a plate," J. Appl. Mech., **49**, pp.821-836, (1982).