

평판에서 미세 틈새에 의한 비선형 음향반응 연구

박래범, 정경일, 윤석왕
성균관대학교 물리학과 음향학연구실

A Study of Nonlinear Acoustic Response from Defect in a Plate

Rae Buem Park, Kyoung Il Jung, Suk Wang Yoon
Acoustics Research Laboratory, Department of Physics, Sung Kyun Kwan University
ppal92@nature.skku.ac.kr

요약

평판에서 발생하는 램파가 물체 내에 존재할 수 있는 미세 결함과의 상호작용에 의해 비선형 음향효과를 발생시키는지 관찰하고 이로부터 결함의 존재 유·무를 확인하고자 했다. 이차원의 판형 매질로서 $2000 \times 110 \times 2\text{mm}^3$ 인 강철판을 사용했으며 결함은 강철판의 임의의 위치에 인위적으로 미세틈새를 형성하여 모델화시켰다. 488kHz의 저주파수 연속파와 톤버스트 형태의 1MHz 고주파수 음파를 입사시켰다. 결함의 유·무에 따른 강철판에서의 수신음파에 대한 주파수 응답을 통하여 비선형 음향반응인 배진동 주파수와 합·차 주파수의 발생을 관측함으로써 매질 내의 결함 유·무를 판별하고자 했다. 결함이 존재할 경우, 존재하지 않을 경우와 비교했을 때 배진동 주파수는 진폭이 15dB, 합·차 주파수는 진폭이 18dB이상 증가됨을 관찰함으로써 평판에서의 결함의 존재 유·무를 확인할 수 있었다.

1. 연구 배경 및 목적

비파괴 음향 탐사법의 장점은 물체에 손상을 주지 않고 결함의 유·무를 검사하여 물체의 안전성을 판별하는데 있다. 현재 비파괴 음향 탐사법은 주로 선형적인

방법을 이용하고 있다. 그러나 현재 사용되고 있는 선형적 비파괴 음향 탐사법은 결함의 크기가 작을 경우 미세한 결함 부분에서 나타나는 미약한 신호와 물체 자체의 비선형성으로 인해 발생한 수신 신호를 구별해 내기가 매우 힘들다. 균열에 대한 정보를 가지는 산란음파가 매질의 비균질한 특성에 의해 크게 감쇠되기 때문에 매질 내 균열이 작을 경우, 또는 음파의 진행 방향과 균열이 나란하게 놓이거나 음파의 반사 경로가 복잡한 경우는 분석하기에 난해하므로 매질 내 균열의 존재 유·무를 인식하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 또한 감사하고자하는 대상물체의 크기가 큰 경우, 많은 검사시간을 필요로하는 단점이 있다.

비선형 음향 탐사법은 대상 물체에 입사된 음파가 물체 내를 진행할 때 다공성, 균열, 전위 등과의 상호작용으로 인하여 반사 또는 산란되어 음파가 비선형적으로 변하는 원리를 이용한다. 즉 기본파의 배진동 발생, 고주파수 음파와 저주파수 음파의 상호 작용에 의한 결함 주파수 발생 그리고 반주파수 등의 주파수 변조 등의 비선형 반응이 나타나는 원리를 이용하여 시료의 균열을 진단하는 방법으로서, 단순히 펄스형태의 입사 음파가 균열 등에 의해 반사나 산란되는 신호를 관찰하는 선형적인 비파괴 음향 탐사법과는 명확하게 구분된다.[1-2]

평판형태의 구조물은 현장에서 쉽게 접할 수 있는 구조물로서 단층 또는 다층 구조의 형태로서 많이 사용된다. 판의 내부 및 접합층 사이에 균열이 존재할 경우 경계면 또는 매질자체의 비균질성 때문에 선형적인 음향탐사법으로 균열의 유·무를 탐지하기가 어렵다. 본 실험에서는 일차원적인 강철막대에서의 결함 유·무 탐지를 배경으로(3-4) 접합층에서의 균열을 탐지하기 위한 전 단계로서 단일 평판에서의 결함 유·무를 탐지하기 위하여 강철판을 시료로 사용하여 인위적인 결함인 미세 틈새를 형성하여 이로부터 발생하는 비선형 현상을 관찰했다. 이용하는 신호로서 일차원에서의 것과 유사한 결과를 얻기 위하여 평판구조물을 전파할 때 전파 특성이 좋은 램파(Lamb Wave)를 이용한다.(5)

II. 실험

1. 장치

실험에서는 2개의 송신 센서와 1개의 수신 센서를 사용한다. 그림 3과 같이 송신 센서는 저주파수 연속파를 구동시키는 센서와 톤버스트 형태의 고주파수 음파를 발생시키는 센서를 뒷면에 부착시켰고, 수신 센서는 고주파수 발신센서와 같은 면에 부착시켰다. 고주파수 센서는 입사각을 주어 음파를 입사시켰다. 강철판의 한쪽 끝에서 50mm거리에 위치한 저주파수 송신센서와 고주파수 송신센서의 거리는 70mm이고 고주파수 송신센서와 수신센서의 거리는 135mm이다. 결함으로부터 수신 센서까지의 거리는 145mm이다.

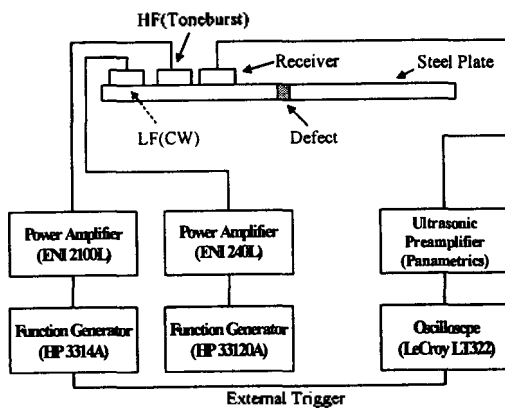


그림 1. 실험 장치도

실험에 사용된 강철판은 $2000 \times 110 \times 2 \text{mm}^3$ 의 크기로 제작되었다. 강철판에 2mm의 간격으로 인위적으로 형성시킨 틈새 에폭시로 완전히 채울 경우는 결함이 존재하지 않는 것으로, 그림 2와 같이 에폭시의 한쪽 면만을 램으로 감싸 강철판과 분리시킨 경우를 결함이 존재

하는 것으로 고려했다.

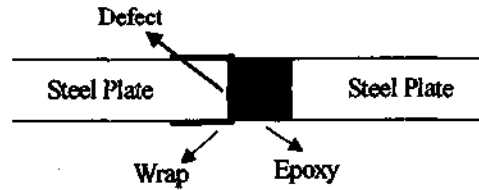


그림 2. 미세 틈새의 형태

2. 음속측정

시료에서 종파와 횡파의 속도를 각각 측정했다. 종파의 속도는 펄스-에코 방법으로 입사음파에 대한 수신 음파의 시간차를 측정하여 종파의 속도를 측정하였고, 송·수신 센서를 250mm 떨어뜨린 후 파열음을 발생시켜 수신함으로써 횡파의 속도를 측정하였다. 종파의 속도는 6094m/s, 횡파의 속도는 2766m/s였다.

3. 입사각의 결정

고주파수 음파의 입사각을 결정하기 위해서 강철판에서의 도파모드를 구한다. 우선 결함이 없는 강철판에서 종파와 횡파의 속도를 각각 측정하고 이를 이용하여 무차원 주파수에 대한 군속도의 분산곡선을 구했다.

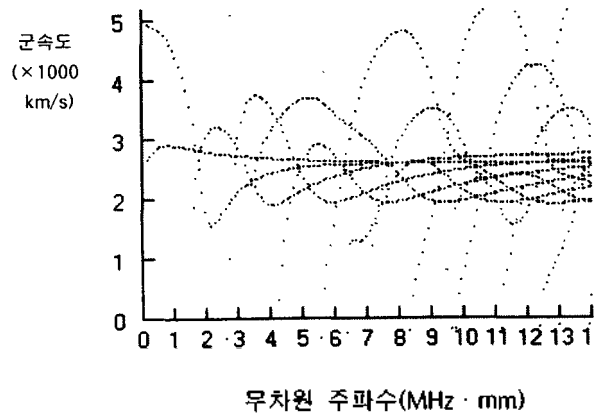


그림 3. 결함이 없을 경우의 분산곡선

결함이 존재하지 않을 경우 그림 3의 분산곡선을 통하여 강철판에서 램파의 모드를 분석한 후 가능한 램파의 모드 중에서 해석이 용이한 모드를 선택했다. 시료 두께를 고려했을 때 가능한 모드는 무차원 주파수 약 2MHz · mm에서 A_0 , S_0 , A_1 였다. 이들 모드 중에서 군속도가 가장 큰 A_1 모드의 위상속도와 군속도는 각각 5703km/s와 3193km/s였다. Snell's law에 의해 결

정된 입사각은 29 °이다.

$$\frac{v_{shoe}}{\sin \theta_i} = \frac{v_{ph}}{\sin \frac{\pi}{2}} \quad (\text{Snell's Law})$$

여기서, v_{shoe} 는 웨지에서의 음파속도, v_{ph} 는 위상속도 그리고 θ_i 는 입사각이다.

4. 주파수 선택

입사음파의 주파수는 사용된 각각 센서의 공진 주파수를 중심으로 주파수를 일차적으로 선택했다. 그런 다음 그림 3의 분산곡선에서 램파의 모드 수가 가장 적은 부분을 택하여 고주파수 입사음파의 주파수를 설정하였다. 설정된 모드는 무차원 주파수 2MHz · mm에서였고 이 때 선택한 고주파수와 가장 상호작용이 큰 저주파수를 100kHz까지 1MHz까지 스위프(Sweep)하여 결정하였다. 이 때의 주파수는 각각 저주파수 488kHz, 고주파수 1MHz이었다.

5. 결함의 유·무에 따른 배진동 주파수 관찰

매질 자체의 비선형성으로 인한 배진동과 결함에 기인한 배진동의 발생을 구별하기 위하여, 결함이 존재하지 않을 경우에 저주파수의 음파만을 입사시켜 수신한 파형의 시간 대역에서의 진폭의 변화를 관찰하고 파형을 FFT하여 주파수 응답을 관측하여 기준을 정했다. 결함이 존재할 경우에 동일한 방법으로 주파수 응답을 관측하였다.

6. 결함의 유·무에 따른 합·차주파수 관찰

결함에 의한 비선형 음향반응을 관찰하기 위하여 톤버스트 형태의 고주파수 음파와 연속파인 저주파의 입사음파에 대한 주파수 응답을 통해 수신음파의 파워스펙트럼 레벨의 진폭의 변화를 측정하였다.

III. 결과

1. 모드의 확인

이론적으로 계산한 도파 모드가 실제로 발생되는지 확인하기 위하여 송수신 센서간의 거리를 임의로 선택한 후 1MHz의 톤버스트를 입사시켜 수신된 음파의 파형을 살펴보았다. 신호를 분석한 결과 그림 4에서처럼 가장 빠른 군속도를 갖는 A_1 모드가 발생되어 전파향을 확인할 수 있었다.

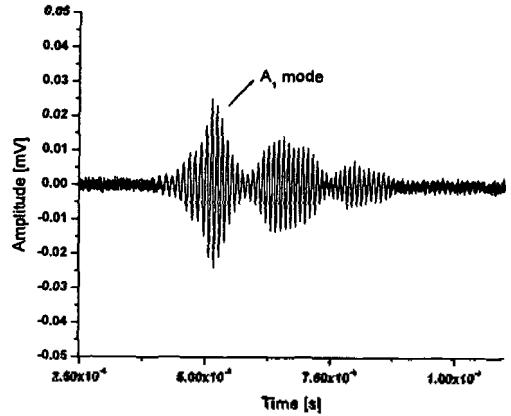


그림 4. 1MHz의 톤버스트를 입사시켜 수신했을 때의 파형. 센서간의 거리는 임의로 선택

2. 저주파수 입사음파에 수신음파의 주파수 응답

그림 5에서 결함의 존재 유·무에 대한 배진동을 살

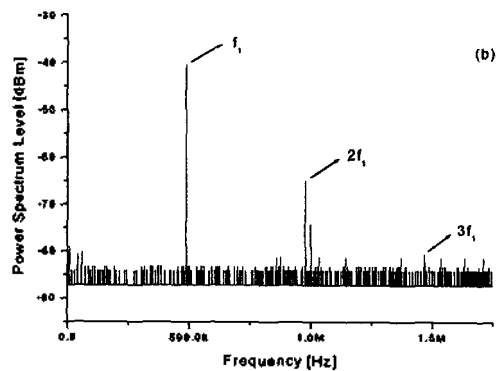
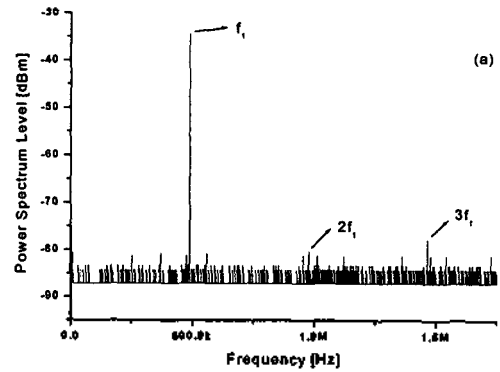


그림 5. 저주파수 488kHz의 입사음파에 대한 수신음파의 주파수 응답 (a) 결함이 없을 경우 (b) 결함이 존재할 경우

해보면 결함이 존재할 경우 결함이 없을 경우보다 1차 배진동($2f_1$)이 15dB이상 증가했는데, 이는 결함에 의한 비선형 음향 반응이 증가했음을 나타낸다.

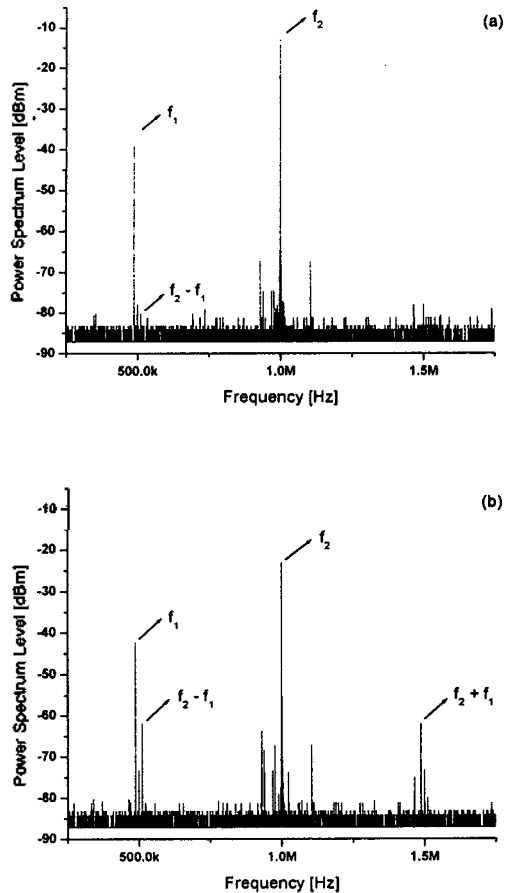


그림 6. 결함이 존재하지 않을 경우(a)와 결함이 존재할 경우(b)의 수신 신호의 주파수 응답.

$$f_1 = 488kHz, f_2 = 1MHz$$

3. 결함의 유·무에 따른 합·차 주파수의 배진동 관찰

결함이 존재할 경우와 존재하지 않을 경우에, 파워 스펙트럼 레벨에서 두 개의 기본 주파수에 대한 합·차 주파수의 발생과 그 진폭의 변화를 관찰했다. 그림 6에서 결함이 존재할 경우에 두 기본 주파수의 진폭은 줄어들고 합주파수($f_2 + f_1$)와 차주파수($f_2 - f_1$)의 진폭이 증가했음을 볼 수 있다. 이는 결함에 의한 비선형 음향 반응으로 인하여 기본주파수의 에너지가 합·차 주파수의 에너지로 전이되어 그 진폭이 증가된 것으로 생각되어진다.

IV. 결론

본 연구에서는 판형 구조의 물체에서 램파를 이용하여 미세 틈새에 의한 비선형 반응을 관찰함으로써 결함의 유·무를 판별하고자 했다. 강철판에 결함이 없을 경우에 입사음파에 대한 수신음파의 주파수 응답을 기준으로 삼고, 결함이 존재할 경우 동일한 방법으로 배진동 발생과 합·차 주파수의 발생을 관측하여 결함이 존재할 경우와 비교하였다. 결함이 존재할 경우, 존재하지 않을 경우와 비교했을 때 입사음파에 대한 수신음파의 배진동 주파수의 진폭은 15dB, 수신음파의 합·차주파수의 진폭은 18dB이상 증가됨을 관찰함으로써 평판에서의 결함의 존재 유·무를 확인할 수 있었다.

평판에서 램파를 이용한 비선형 음향반응의 관찰은 일차원적인 구조에서 물체의 결함을 판별하는 것과 같은 동일한 효과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-1-11100-002-2)지원으로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] A. Korotkov, M. Slavinsky and A. Sutin, "Nonlinear vibro-acoustic methods for diagnostics of metal strength properties fluid mechanics in nonlinear acoustics". (World Scientific, Singapore, 1993.), 370-375.
- [2] A. Sutin, "Nonlinear acoustic diagnostics of micro-inhomogeneous media", (Proc. Int. Symp., 1992), 497-506
- [3] 김정표, 김의준, 윤석왕 "고체내 결함의 위치 추정을 위한 비선형 음향탐지법", 한국음향학회 학술발표대회 논문집 15(s)호 pp.363-368, (1996)
- [4] C. M. Song, K. I. Jung and S. W. Yoon "Non-destructive flaw detection in a solid material using nonlinear acoustic responses", Proceedings of 16th International Congress on Acoustics pp. 1561-1562 (1998)
- [5] M. J. S. Lowe, R. E. Challis, "The transmission of Lamb waves across adhesively bonded lap joints", J. Acoust. Soc. Am., Vol.107, No.3, March 2000, 1333-1345