

# 미세 크랙에 의한 음향 비선형성의 발생에 대한 연구

## A Study on the Acoustic Non-linearity Due to Micro-Crack

강 석환\*, 김 경조\*, 장 효성\*, 장 경영\*\*  
S. H. Kang, K. C. Kim, H. S. Jang, K. Y. Jhang,

\* : 한양대학교 대학원, \*\* : 한양대학교  
\* : Graduate School of Hanyang Univ. , \*\* : Hanyang Univ.

### 요 약

본 연구에서는 매우 작은 틈새를 갖는 미세 크랙을 초음파가 투과할 때, 크랙 면의 부분 접촉에 의한 새로운 음향 비선형성의 발생 구조를 제안하고 그 정당성을 검증하는데 목적을 두고 있다. 이를 위하여, 초음파가 미세 크랙을 투과할 때 부분 접촉 효과에 의해 나타나게 되는 파형을 반과 모델로 모델링하고 이를 통해 고주파 조파 성분(Harmonics)이 발생하는 원인을 제시하였으며 틈새의 크기와 음향 비선형성의 크기와의 상관 관계를 시뮬레이션과 실험을 통하여 확인하였다. 이를 통해 미세 틈새와 음향 비선형성의 상관 관계를 밝히고 틈새의 크기가 증가해 감에 따라 음향 비선형성이 증가함을 확인할 수 있었다.

### 1. 서 론

초음파의 전파에 따른 비선형 음향효과는 오래 전부터 논의되어 왔으며, 최근에는 이를 계측함으로써 재료 열화나 손상의 정도를 평가하고자 하는 노력이 시도되고 있다. 이러한 음향 비선형성의 발생 메커니즘에 대해서는 여러 연구자에 의해서 제시된 모델이 있으나 대체적으로 격자자체에 의한 비선형성과 전위에 의한 비선형성으로 생각되어져 왔다. 격자자체의 비선형성이란 재료 고유의 비선형성을 말하며, 재료에 아무런 변형이 없을 때부터 가지고 있는 비선형성을 의미한다. 전위에 의한 비선형성은 피로나 하중에 의해 발생하는 미세 구조적인 결함 즉, 전위에 의해 발생하는 비선형성을 말한다[1, 2, 3]. 그러나, 시편의 표면에 고의로 만든 노치

에 의해서도 이러한 음향 비선형성이 나타남을 보고한 예가 있다[4]. 이와 같은 경우에는 위의 두 가지 원인만으로 설명될 수 없다.

본 연구에서는 여기에 착안하여 매우 작은 틈새를 갖는 크랙을 초음파가 투과할 때 크랙면의 부분 접촉에 의한 새로운 비선형성의 발생구조를 제안하고 그 타당성을 검증하는데 목적을 두었다. 이를 위하여, 우선 반과모델을 이용하여 고주파 성분이 발생하는 과정을 제시하였으며, 틈새의 크기와 비선형성의 크기와의 상관 관계를 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 또한 실증적인 검증을 위하여 미세 틈새를 갖는 Newton Ring 과 알루미늄 시편에 대한 S.A.M.(초음파 현미경) 신호를 분석하였으며 틈새가 증가해 감에 따라 비선형성이 증가함을 확인할 수 있었다. 이러한 시뮬레이션과 실험 결과로부터 열화된 재료에서의 음향비선형성은 기존에 논의된 원인 이외에 틈새효과에 의한 원인이 함께 고려되어야 함을 제안하였다.

### 2. 크랙 틈새에서의 음향 비선형성 발생 원리

Fig.1에 보이는 바와 같이, 재료 내부에 존재하는 결함이나 기공(Void)에 의한 미세한 틈새를 초음파가 투과할 때 초음파의 음압에 의한 계면의 이동이 발생할 수 있음을 생각할 수 있다. 이 때 입사측 계면의 변위가 틈새의 간격보다 클 경우에는 두 계면 사이의 접촉과 미접촉 상태가 주기적으로 반복하여 발생하게 된다. 이러한 과정을 보다 자세히 살펴보면 가해진 초음파의 음압에 의해 미세 크랙과 같은 결함의 입사측 계면의 변위가 발생하게 되고, 변위가 틈새의 간격보다 클 경우

에는 두 계면 사이의 접촉과 비접촉의 상태가 주기적으로 반복하여 발생하게 된다. 따라서 입사 신호가 단일 주파수 성분의 주가함수 파형으로 주어질 경우를 생각해 보면, 투과되는 신호는 그림과 같이 (+) 음압의 일부분만이 통과하게 되어 마치 전기 신호에서 다이오드에 의해 반파 정류된 것과 같은 파형이 수신될 것이다. 이러한 수신 신호는 파형상에 불연속부가 존재하게 되어 음향 비선형성의 척도가 되는 고주파 조화(High Order Harmonics) 성분이 발생하는 원인이 된다. 결과적으로 재료 내에 미세 크랙이 발생-성장하는 과정 후기 과정에서는 재료 자체의 비선형성, 석자 변형에 따른 비선형성과 함께 이와 같은 틈새 효과에 의한 비선형성이 동시에 발생하는 것으로 생각할 수 있다.

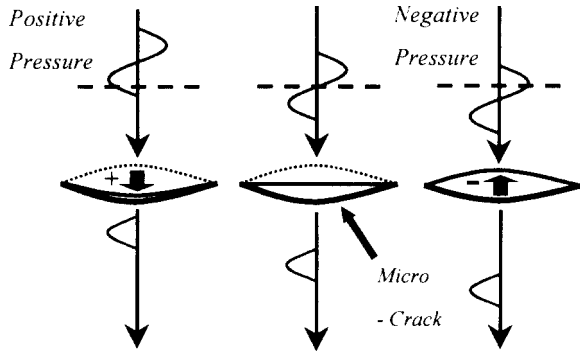


Fig. 1. 크랙에서 반파 모델에 의한 파형의 수신 모델링

$$x(t) = \begin{cases} A \sin 2\pi f_1 t - \alpha A, & \sin 2\pi f_1 t \geq \alpha \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{where } t_1 = \frac{1}{2\pi f} \sin^{-1} \alpha, \quad t_2 = T_1/2 - t_1$$

Fig.1 에 나타난 수신 파형에 대한 모델은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며,  $x(t)$ 는 입사 조음파의 변위가 진폭 A, 주파수  $f_1$ 의 사인함수로 주어질 때 수신되는 변위 파형의 한 주기 파형을 나타내며,  $\alpha$ 는 틈새의 간격을 의미한다.

$$\begin{aligned} X(f_n) &= \frac{A}{2T_1} \int_{t_1}^{t_2} [\sin 2\pi(f_1 - f_n)t + \sin 2\pi(f_1 + f_n)t] dt \\ &\quad - \frac{jA}{2T_1} \int_{t_1}^{t_2} [\cos 2\pi(f_1 - f_n)t - \cos 2\pi(f_1 + f_n)t] dt \quad (2) \\ &= \frac{jA}{2\pi f_n T_1} [\sin 2\pi f_n t_1 - \sin 2\pi f_n t_2 - i \cos 2\pi f_n t_1 \\ &\quad + i \cos 2\pi f_n t_2] \end{aligned}$$

식(2)는 식(1)에 의해 나타내어지는 반파 모델의 퓨리에 변환을 나타낸다. 이로부터 고조파 성분의 크기  $|X(f_2)|, |X(f_3)|, \dots$ 는 틈새 간격이 클수록 커지게 됨을 알 수 있으며, 결과적으로 크랙에 의한 계면의 성장과 조음파 비선형성이 밀접한 상관관계를 갖게 됨을 알 수 있다.

### 3. 컴퓨터 시뮬레이션

제안된 반파 모델(Diode model)에 의해서 비선형 효과가 발생하는 것을 정량적으로 검증하기 위해 컴퓨터 상에서 *Matlab* 프로그램을 이용한 시뮬레이션을 행하였다. 진폭의 크기  $A=1$ , 주파수  $f=1 Hz$ 를 갖는  $\sin$  파형을 만들고, 그 2 주기에 대하여 반파 정류된 파형을 만들어 주파수 성분의 변화를 살펴보았다. 이때 틈새 간격을 나타내는  $\alpha$ 의 값을 0에서 1까지, 0.2씩 증가 시키면서, t에 따르는 고주파 조화성분의 발생 크기를 관찰하였다. 여기서  $\alpha$ 의 값이 증가한다는 것은 미세 크랙의 치수가 점점 커짐에 따라 피로 열화가 진행되는 과정을 의미한다고 볼 수 있다.

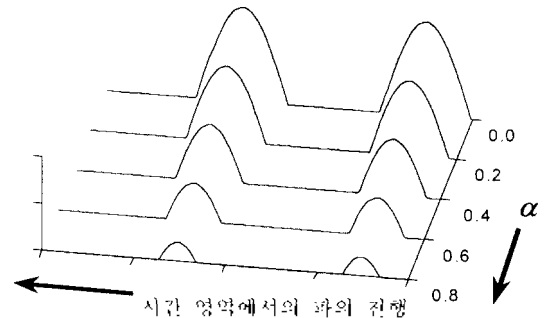


Fig. 2.  $\alpha$ 의 값의 증가에 따른 파형의 변화

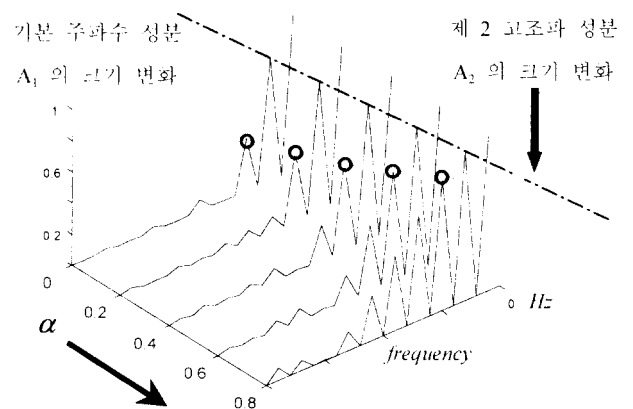


Fig. 3.  $\alpha$ 의 값의 증가에 따른 주파수 성분의 변화

뜸새 크기  $\alpha$  의 변화와 비선형성 증가와의 관계를 보다 확실하게 살펴보기 위해 각 주파수 스펙트럼 상의 DC 성분의 크기를 통일시킨 Fig. 3 을 살펴보면, 기본 주파수의 크기,  $A_1$  은  $\alpha$  의 증가와 거의 무관하게 일정한 레벨을 유지하고 있지만 제 2 차 조화 성분은  $\alpha$  의 크기가 증가함에 따라 급격한 상승 곡선을 그리는 것을 관찰할 수 있다. 보다 객관적인 비교 분석을 위하여,  $\alpha$  의 크가 변화에 따른 비선형성의 크기  $A_2/A_1^2 (\approx \beta)$  의 변화를 살펴 보면 다음과 같다.

Table 1.  $\alpha$  의 크기 변화에 따른 비선형성의 변화

$\alpha$	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8
$A_1$	0.25	0.187	0.127	0.073	0.026
$A_2$	0.11	0.10	0.082	0.054	0.023
$A_2/A_1^2 (\approx \beta)$	1.7600	2.8597	5.0840	10.1332	34.0237

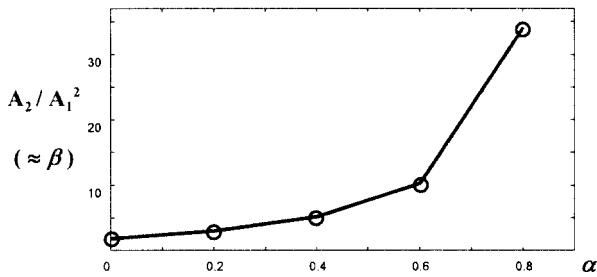


Fig. 4.  $\alpha$  의 크기 변화에 따른 비선형성의 변화 곡선

위 결과들로부터 뜸새 간격  $\alpha$  의 크기가 증가함에 따라 음향 비선형성이 증가하는 사실을 확인할 수 있었다. 이는 결과적으로 미세 크랙의 성장에 따라서, 뜸새 효과에 의한 음향 비선형성이 커짐을 의미한다.

#### 4. 실험 장치와 시편

뜸새가 증가함에 따라서 음향 비선형성이 증가하는 것을 실증적으로 검증하기 위해 준비된 시편에 대해 초음파 현미경을 이용한 투과법(T-scan) 감사를 실시하여 획득한 파형을 분석하였다. Fig. 5 는 실험에 사용된 초음파 현미경 시스템을 나타내고 있다.

초음파 투과 파형의 획득을 위해 15 MHz 의 집속형 탐촉자를 이용하였고 투과된 파형은 500 MHz 의

샘플링 주파수로 A/D 변환되었다.

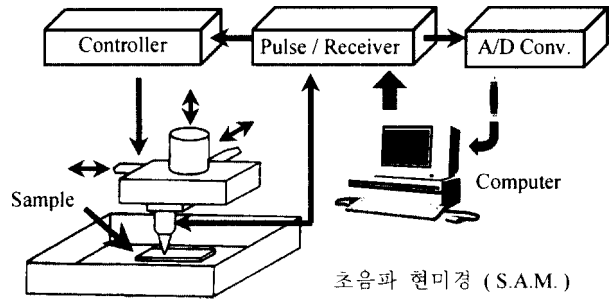


Fig. 5. 실험 시스템의 구성

시편으로는, 제안된 반과 모델과 유사한 불완전 접촉 구조를 갖는 알루미늄 시편과 미세 뜸새의 크기가 정량적으로 증가하는 Newton Ring 을 사용하여 뜸새 간격의 변화와 음향 비선형성의 발생 정도와의 상관 관계를 알아보았다.

#### 5. 실험 결과 및 고찰

준비된 시편에 대해 초음파 현미경을 이용한 T-scan 을 행한 결과를 Fig. 6 에 나타내고 있는데, 이로부터 알 수 있듯이 접촉부의 가장자리는 완전한 접촉 상태를 보이고 있으며 중앙부에서는 미세한 뜸에 의해 불완전한 투과 상태를 보이는 것을 알 수 있다.

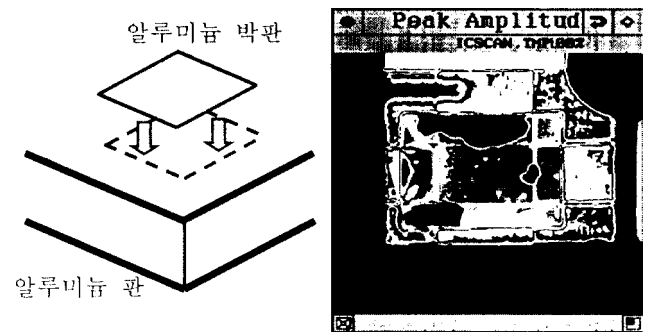


Fig. 6. 알루미늄 시편과 실험 결과

Table 2 불량이 있는 곳에서의 음향 비선형성 발생

Point	#. 0	#. 1	#. 2	#. 3
$A_1$	9.3100	18.1346	14.0481	11.8622
$A_2$	0.1696	7.7297	14.2998	18.7245
$A_2/A_1^2$	0.0020	0.0235	0.0725	0.1331

Table. 2 은 알루미늄 호일을 붙인 알루미늄 시편에서 들뜸이 없는 기준 점과 들뜸이 있는 세 지점에서 얻은 파형의 기본 주파수 성분,  $A_1$  과 2 차 조화 성분,  $A_2$  그리고 비선형 파라미터에 대응하는 값,  $A_2 / A_1^2$  을 통해 음향 비선형성을 평가한 결과이다. 들뜸 형태의 결함에 의해 초음파의 투과가 불완전한 부분에서는 결함이 없는 기준 투과 파형에 비해 매우 큰 음향 비선형성을 보이고 있다. 이러한 결과를 통해 초음파가 재료 내를 투과해 갈 때, 재료의 물성 뿐만 아니라, 기계적인 경계 조건의 변화에 의한 파형(음압)의 불연속이 음향 비선형성을 생성하는 요인이 될 수 있음을 확인하였다.

Fig. 7 은 Newton Ring 에 대한 T-scan 이미지를 나타낸 것으로 Newton Ring 각 부위에 대한 초음파 투과파의 크기 분포가 잘 나타나 있다. 중심에서 반경 방향으로 갈수록 렌즈의 곡률에 의해 유리판과 렌즈 사이의 틈새 간격이 벌어지게 되어 초음파의 투과가 어려워지는 것을 알 수 있다.

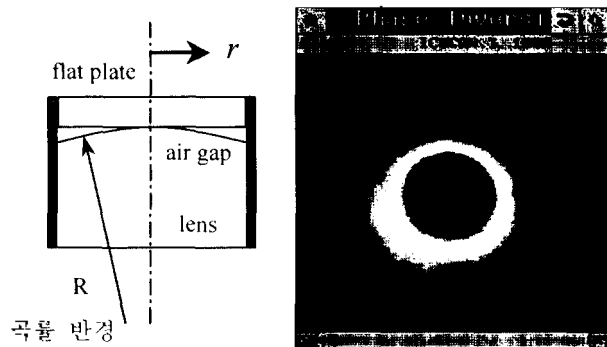


Fig. 7. Newton Ring 과 실험 결과

Table 3. 틈새 간격 증가에 따른 음향 비선형성

Gap	0.0	0.6	1.3	1.6	2.0	2.2
$A_1$	41.193	28.856	6.149	5.967	6.291	5.988
$A_2$	14.296	10.013	1.407	2.121	2.478	2.878
$A_2 / A_1^2$ ( $\approx \beta$ )	0.008	0.012	0.037	0.059	0.062	0.080

Table. 3 은 Newton Ring 에서 중심에서부터 반경 3방향으로 0.1 mm 간격씩 이동시켜가며 틈새 가리를 변화시킬 때 얻은 파형에 대해 음향 비선형성을 평가한 결과이다. Fig. 8 에서 보이는 바와 같이, 틈새 크기가 증가함에 따라, 비선형 파라미터의 크기가 점점 증가하는 것을 볼 수 있다.

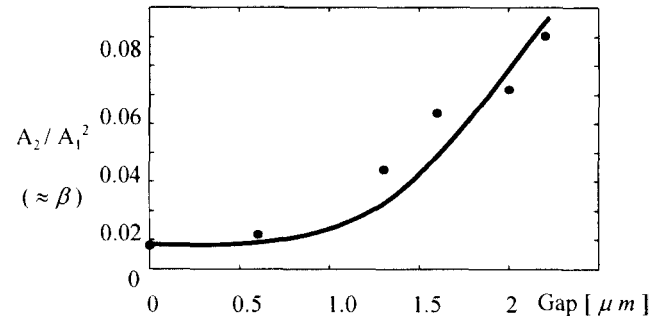


Fig. 8. 틈새 간격 증가에 따른 음향 비선형성

이러한 결과들을 통해, 재료 열화 후기 단계에서의 미세 크랙의 성장이 비선형성의 증가와 밀접한 관계를 가지고 있다는 것을 알 수 있다.

## 6. 결 론

반파모델을 이용하여 초음파가 미세 틈새를 투과할 때 비선형성이 발생하는 원리를 설명하였으며, 틈새의 크기가 증가함에 따라 비선형성이 증가하는 것을 시뮬레이션과 실험을 통하여 확인할 수 있었다.

이상의 결과들로부터, 틈새효과에 의한 비선형성의 발생구조를 분명히 하였으며, 특히 초음파 비선형을 이용한 재료 열화의 평가시 기존의 알려지 있는 비선형 발생 원인인 재료 자체의 비선형성과 전위 구조에 의한 영향 외에 크랙에서의 미세 틈새에 의한 요인도 함께 고려해야 한다고 시료되어진다.

## 참고 문헌

- [1] A. Hikata, et. al., "Dislocation Contribution to the Second Harmonic Generation of Ultrasonic Waves", JAP Vol. 36, No.1, pp. 229-236, 1965
- [2] A. Hikata, et. al., "Effect of Dislocations on Finite Amplitude Ultrasonic Waves in Aluminum", Applied Physics Letters 13 Vol. 11, pp. 195-197, 1963
- [3] W. T. Yost, et. al., "Ultrasonic Nonlinearity Parameters and Thire-order Elastic Constants of copper between 300 and 3°K", JAP, Vol. 52, No. 1, pp 126-128, 1981
- [4] A.M. Sutin, et. Al., "Nonlinear Acoustic Methods for Crack and Fatigue Detection", 제 4회 물리음향학 연구모임workshop, pp 43-54, (1995)