

초음파의 비선형 특성을 이용한 미세균열 평가

Evaluation of Micro Crack Using Nonlinear Acoustic Effect

이태훈*, 장경영**†

Tae-Hun Lee* and Kyung-Young Jhang**†

초록 구조물의 안전 보장 문제에 있어 재료의 파손 이전에 미세균열을 검출하는 것은 매우 중요하다. 비선형 초음파 기법은 일반적인 초음파 기법보다 미세결함에 민감하기 때문에 이를 이용하여 비파괴적으로 구조물이나 재료의 건전성을 진단하는 방법이 주목받고 있다. 계면접촉에 의한 비선형 초음파 효과는 초음파가 내부의 미세 균열에 입사될 때 미세균열면에서 응력과 변위가 비선형 관계를 가지고, 이에 의해 파가 왜곡되어 그 결과 고조파 성분이 발생하는 현상이다. 본 연구에서는 이러한 비선형 초음파 기법의 적용가능성을 알리기 위해 인위적으로 발생시킨 피로균열을 대상으로 실험적으로 검증하고자 하였다. 이를 위해 V-노치를 갖는 Al6061의 피로균열 시험편을 준비하고, 균열방향으로 2차 고조파 성분의 크기를 측정하였다. 실험결과 미세균열에서 고조파 성분이 크게 발생하며 이 기법에 의한 균열깊이 측정이 일반적인 반사파의 6 dB drop법보다 정확함을 확인하였다.

주요어: 비선형 초음파, 계면 음향 비선형, 피로균열, 닫힌균열, 균열깊이

Abstract The detection of micro cracks in materials at the early stage of fracture is important in many structural safety assurance problems. The nonlinear ultrasonic technique (NUT) has been considered as a positive method for this, since it is more sensitive to micro crack than conventional linear ultrasonic methods. The basic principle is that the waveform is distorted by nonlinear stress-displacement relationship on the crack interface when the ultrasonic wave transmits through, and resultantly higher order harmonics are generated. This phenomenon is called the contact acoustic nonlinearity (CAN). The purpose of this paper is to prove the applicability of CAN experimentally by detection of micro fatigue crack artificially initiated in Aluminum specimen. For this, we prepared fatigue specimens of Al6061 material with V-notch to initiate the crack, and the amplitude of second order harmonic was measured by scanning along the crack direction. From the results, we could see that the harmonic amplitude had good correlation with COD and it can be used to detect the crack depth in more accurately than the common 6 dB drop method.

Keywords: Nonlinear Ultrasound, Contact Acoustic Nonlinearity, Fatigue Crack, Closed Crack, Crack Depth

1. 서론

초음파의 비선형 음향효과란 음파가 매질을 따라 전파할 때 기본 주파수 성분 이외에 고조파 성분이

발생하는 것으로, 그 발생 메커니즘은 재료의 비선형 탄성거동에 의한 것과 계면 접촉에 의한 것으로 구분되어진다.

비선형 탄성거동에 의한 비선형 초음파는 음파가

매질에 따라 전파할 때 재료의 비선형 탄성거동에 의해 기본 주파수 성분 이외의 고조파성분이 발생하는 현상으로 그 비선형 정도를 정량화하기 위해 보통 수신된 초음파 신호에 포함된 2차 고조파성분과 기본 주파수 성분의 제곱의 비를 이용한다. 이것을 비선형 파라미터라고 하고, 매질의 열화 및 피로 상태를 평가하는데 이용할 수 있다. 특히 이 방법은 전파속도나 감쇠와 같은 일반적인 초음파의 선형적 특성의 변화를 계측하는 방법들보다 미세조직의 변화에 민감하기 때문에 이를 이용하여 비파괴적으로 구조물이나 재료의 건전성을 진단하는 방법으로 연구되어 왔다[1,2].

한편 계면접촉에 의한 비선형 초음파 효과(contact acoustic nonlinearity, CAN)은 초음파가 내부의 미세 균열에 입사될 때 압력과 변위의 관계가 선형이 아닌 비선형 관계를 가짐에 따라 신호의 파형이 왜곡되고 이에 따라 고조파 성분이 포함되는 현상이다. 이러한 계면에서의 비선형 초음파 현상은 재료의 의한 비선형성보다 매우 커서 기존의 투과법 또는 반사법으로 측정하기 힘든 미세균열이나 닫혀있는 균열(closed crack)을 검출하는데 효과적이고, 이를 이용한 미세균열을 측정하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다[3-5]. 또한 최근에는 실험적인 연구 뿐 아니라 Biwa, Kim 등 몇몇 연구자들이 계면에서의 비선형 강성개념을 도입하여 비선형 초음파 현상에 대한 계면의 수학적 모델을 개발을 하고 있고, 이를 통해 계면에서의 비선형 초음파 현상을 예측하고자 하고 있다[6-8].

본 논문에서는 이런 계면 음향비선형성의 실제 균열검사에 대한 적용가능성을 알루미늄 시편에 인위적으로 발생시킨 피로균열을 대상으로 실험적으로 검증하고자 하였다. 이를 위해 V-노치를 갖는 Al6061 CT(compact tension) 시험편에 피로시험을 통해 균열을 성장시켰다. 이렇게 만든 균열은 끝단으로 가면서 점차 닫힘상태가 될 것으로 예상하고 이 균열의 끝단부에서 초음파 비선형 특성이 얼마나 변하는지에 주목하였다. 또한 비교평가를 위해 비선형 초음파 기법을 적용하여 측정된 균열길이와 일반적으로 균열길이를 측정하는 반사파의 6 dB drop 법을 적용하여 얻은 결과를 비교하였다.

2. 계면 음향비선형성

닫힘 균열이란 Fig. 1과 같이 접촉면이 랜덤하게

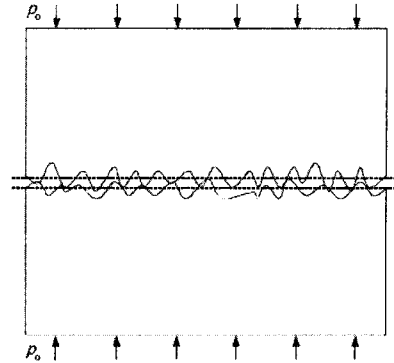


Fig. 1 A contacting interface of a closed crack

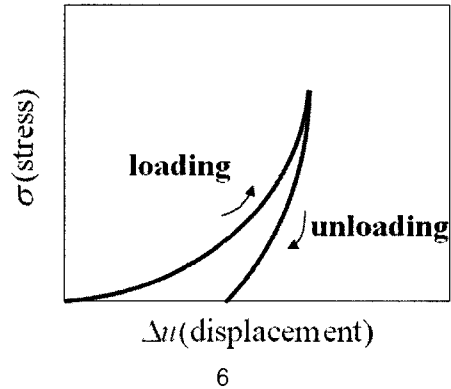


Fig. 2 Hysteretic nonlinear behavior of contact interface

분포되어 있는 미세돌출부들이 맞닿아 있는 형상으로 나타낼 수 있다. 이러한 균열에 압축력 또는 전단력이 가해지게 되면 압력-변형 곡선은 Fig. 2와 같이 비선형 곡선으로 나타나게 된다. 이것은 압력이 가해지면 표면 미세돌출부들 중 가장 높이가 큰 부분의 끝단이 먼저 닿아 변형을 하고, 압력이 높아짐에 따라 이 미세돌출부 중에서 소성변형을 하는 부분과 탄성영역 내에서 변형하는 부분이 공존하기 때문이다. 또한 압력을 제거하면 소성변형을 한 미세돌출부가 잔류하여 히스테리시스 특성을 나타내기도 한다[6-8].

이러한 비선형 변형은 초음파가 입사되었을 때 고조파 성분을 발생시키며, 따라서 닫힘 균열과 같이 비선형 거동을 하는 결함에서는 고조파 성분이 크게 발생한다고 말할 수 있다. 이는 고조파 성분을 측정함으로써 균열의 유무나 길이를 측정할 수 있음을 의미한다.

3. 실험구성 및 방법

3.1. 닫힘 균열 제작

닫힘 균열을 모사하기 위해서 Fig. 3에서 보는

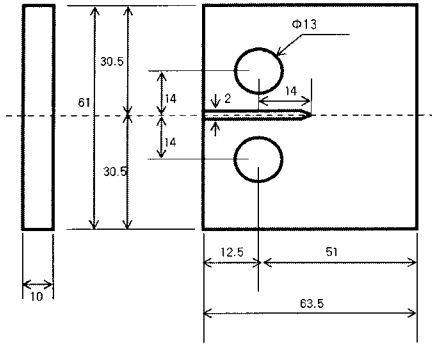
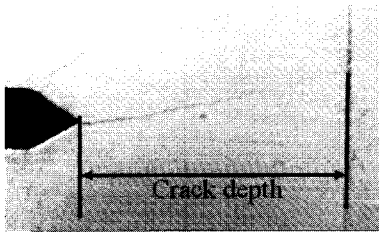


Fig. 3 Geometry of CT specimen (dimensions in mm)



(a) whole crack



(b) at V-notch



(c) at crack tip

Fig. 4 Picture of crack on CT specimen

것과 같이 재질이 Al60601인 CT 시험편을 준비하였다. 이 시험편에 피로시험을 통해 Fig. 4(a)에서 보는 것과 같이 균열을 진전시켰다. 그 결과 Fig. 4(b)에서 보는 것과 같이 V-노치 부근에서는 열린 결함(open crack)이 형성되고, Fig. 4(c)와 같이 결함 끝단에서는 닫힘 균열이 형성되었다. 균열 깊이 (crack depth)는 노치에서부터 균열 끝단까지로 정하였으며, 육안상으로 균열 깊이가 약 5 mm인 시험편과 약 10 mm인 시험편을 각각 준비하였다.

3.2. 실험장치 구성

Fig. 5는 균열 진전 방향으로 스캔을 하며 반사파와 투과파를 측정하기 위한 실험장치 구성도를 나타낸다. 중심주파수가 5 MHz이고 직경이 0.25 inch (6.25 mm)인 탐촉자를 사용하여 초음파를 발생시키고 결함에 의해 반사된 초음파를 수신하였다. 균열을 투과한 투과파를 수신하고, 고조파 성분을 보다 민감하게 측정하기 위해 송신 탐촉자 반대편에는 동일 직경에 중심주파수가 10 MHz인 탐촉자가 사용되었다. 수신된 초음파 신호로부터 주파수 분석을 통해 효과적으로 고조파성분을 분리 및 측정하기 위해서는 톤버스트 (tone-burst) 형태의 협대역 신호가 유리하며, 이러한 버스트 형태의 초음파를 발생시키기 위해 RAM 5000 SNAP(RITEC, USA) 시스템이 사용되었다. 또한 이 장비는 고전압을 탐촉자에 가해 줄 수 있기 때문에 높은 음압의 초음파를 발생시킬 수 있다. 이 시스템을 통해 송신 탐촉자에는 약 700 Vp-p, 5 MHz, 20 주기의 톤버스트 형태의 인가전압이 가해졌다. 반사파는 RAM 시스템의 리시버를 통하여 수신하였고, 투과파는 별도의 펄서/리시버 5077PR (PANAMETRIC S, USA)를 통하여 수신되었다.

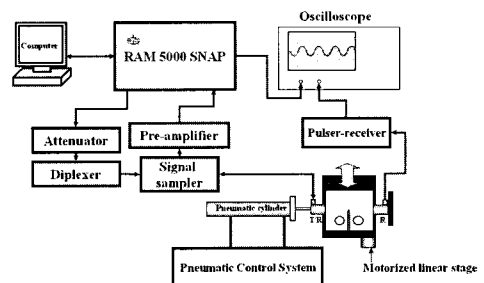


Fig. 5 Block diagram of the experimental system construction

균열 진전 방향으로 정밀하게 스캔을 하며 반사파/투과파를 측정하기 위해 모터구동 1축 스테이지가 사용되었으며, 이 위에 시편을 올려놓고 1 mm 간격으로 시편을 옮겨가며 반사파/투과파를 측정하였다. 스캔은 탐촉자의 중심이 V-노치의 끝과 일치하는 지점으로부터 시작되었다.

비선형 초음파의 측정에 있어 초음파 진폭의 정확한 측정을 보장하기 위해서는 측정마다 동일한 조건, 그 중에서도 동일한 접촉압력이 유지되어야 하며[9], 이를 위해 압력 조절이 가능한 공압시스템을 구성하여 탐촉자가 시편에 일정한 압력으로 접촉하도록 구성하였다.

각각의 위치에서 수신된 초음파 신호는 FFT를 이용한 주파수 분석을 통해 기본파와 2차 고조파 성분의 크기를 측정하였다.

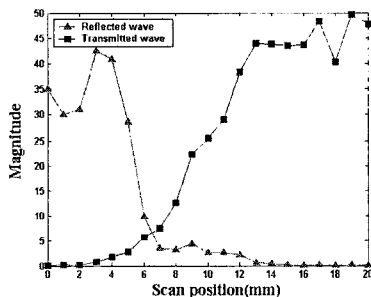
4. 실험결과

균열 깊이가 10 mm인 시편에 대하여 Fig. 6(a)는 스캔위치에 따른 반사파/투과파 초음파 신호의 기본파 성분의 크기를, Fig. 6(b)는 투과파 신호의 2차 고조파 성분의 크기를 나타내고 있다. Fig. 6(a)에서 투과파는 노치로부터 멀어질수록 크기가

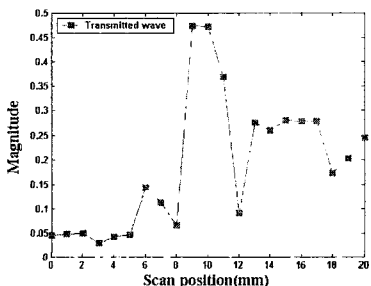
증가하고, 반사파는 점점 감소하는 것을 확인할 수 있는데 이는 노치에서 멀어질수록 균열이 점점 닫혀가는 형태를 이루고 있음을 나타낸다. 투과파 결과는 점점 그 크기가 증가하고 있는데 경계가 명확하지 않아 이로부터는 균열 깊이를 결정할 수 있는 기준을 정하기가 매우 모호하다. 반면 반사파에 대해서 균열의 길이를 평가할 수 있는 6 dB 드롭법을 적용시킬 수 있는데 이 방법을 적용한 결과 균열의 깊이는 실제길이보다 훨씬 작은 5~6 mm 정도로 과소평가된다.

이에 반해 Fig. 6(b)에 나타나 있는 투과파의 2차 고조파 성분은 균열 끝단 부분에서 피크를 형성하는 것을 확인할 수 있고, 이는 닫힘 균열에서 비선형 거동에 의해 고조파 성분이 크게 발생한다는 이론에 예측과 일치한다. 또 이 결과로부터 2차 고조파 성분의 피크 지점이 균열 끝단이라고 판단할 때 실제 균열깊이와 비슷하게 10-11 mm로 균열의 깊이를 평가할 수 있다. 이는 확대 영상으로 관찰한 균열의 크기가 약 10 mm이고 영상으로 관찰이 불가능한 미세부분이 있을 수 있으므로 실제 균열의 크기가 이보다는 조금 더 클 수 있다는 점을 감안한다면 매우 타당한 결과라고 사료된다.

Fig. 7의 결과는 균열 깊이가 5 mm인 시편에 대

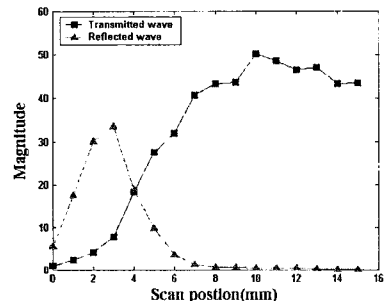


(a) Magnitude of fundamental component

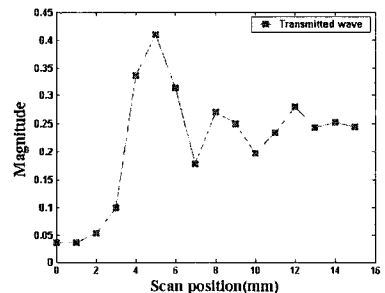


(b) Magnitude of 2nd harmonic component

Fig. 6 Results for the specimen of 10 mm crack depth



(a) Magnitude of fundamental component



(b) Magnitude of 2nd harmonic component

Fig. 7 Results for the specimen of 5 mm crack depth

한 측정 결과이며 10 mm일 때의 결과와 마찬가지로 2차 고조파 성분을 이용하여 균열 깊이를 측정하였을 때 보다 정확하게 평가할 수 있음을 알 수 있다. 다만, 앞의 경우에 비해 6 dB 드롭법 대비 정확성 개선효과가 떨어지는 것처럼 보이는 것은 균열의 열린부분에 비해 닫힌부분의 길이가 너무 작았기 때문인 것으로 사료된다. 시험한 시편이 표준시험편이 아니기 때문에 두 시편의 결과를 서로 비교하는 것은 무의미하며, 이 연구의 궁극적인 목표가 실제 균열에 대한 초음파 비선형성의 적용 가능성을 조사하는데 있다는 입장에서는 5 mm 균열 시편에 대한 실험결과 역시 의미있는 결과라고 할 수 있다.

또한 두 결과에서 균열 끝단 이후에 나타나는 2차 고조파 성분은 재료의 순수한 비선형탄성에 의한 성분이다. 그런데 서론에서 계면접촉에 의한 비선형성은 재료의 의한 비선형성보다 매우 클 수 있다고 밝혔으나 이 실험결과에서는 약 2배정도밖에 크지 않았다. 이는 균열 끝단에서의 닫힌균열이 차지하는 부분이 초음파의 빔폭 보다 매우 작기 때문에 발생하는 일종의 회석효과 때문으로 판단된다. 이런 효과는 집속 초음파와 같이 빔폭을 작게하면 억제할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 초음파의 비선형 초음파 특성, 특히 결함 계면에서 발생하는 비선형 현상을 이용하여 닫힌 균열을 포함하는 미세균열을 평가할 수 있는지를 실험적으로 검증하고자 하였다. 이를 위해 Al6061의 CT 시험편에 피로시험을 통해 균열을 발생시키고, 그 균열 끝단에 닫힌균열이 형성되도록 하였다. 균열 진전 방향으로 B-스캔이 가능한 실험장치를 구성하였으며, 피로균열시편에 대하여 반사진폭, 투과진폭, 투과파의 고조파진폭을 동시에 측정하였다.

측정 결과 투과진폭의 경우 균열의 깊이를 평가할 수 있는 기준을 정하기가 매우 힘들었으며, 반사진폭의 경우 실제 크기보다 매우 작게 평가됨을 확인하였다. 이에 반해 투과파의 2차 고조파 성분은 닫힌균열로 간주되는 균열 끝단 부분에서 크게 증가하여 피크를 형성하였고, 이로부터 균열의 크기를 보다 정확하게 측정할 수 있었다. 이와 같은 결과는 초음파의 비선형 특성을 이용하는 것이 피로초기

균열이나 SCC와 같은 닫힌 균열이 존재하는 균열의 크기를 측정하는데 효과적임을 입증한다.

하지만, 실제 구조물에서 발생하는 미세 균열은 초음파 진행 방향과 수직이지 않으며 측정시 투과법을 사용하기 힘들다. 따라서 본 연구를 바탕으로 미세결함에 경사입사된 초음파의 반사파로부터 고조파 성분을 측정함으로써 결함의 깊이를 평가하는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2007-00467, 2차년도)

참고문헌

- [1] Y. H. Choi, H. M. Kim, K. Y. Jhang and I. K. Park, "Application of non-linear acoustic effect for evaluation of degradation of 2.25Cr-1Mo steel," J. KSNT, Vol. 22, No. 2, pp. 170-176, (2002)
- [2] J. Y. Kim, L. J. Jacobs, J. Qu and J. W. Little, "Experimental characterization of fatigue damage in a nickel-base superalloy using nonlinear ultrasonic waves," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 120, pp. 1266-1273, (2006)
- [3] J. Ha, K. Y. Jhang, K. Sasaki and H. Tanaka, "Precise estimation of nonlinear parameter in pulse-like ultrasonic signal," J. KSNT, Vol. 26, No. 2, pp. 77-83, (2006)
- [4] S. Hirata and T. Sugiura, "Detection of a closed crack by nonlinear acoustic using ultrasonic transducers," Rev. Prog. Quant. NDE, Vol. 25, pp. 277-282, (2006)
- [5] Y. Ohara, K. Kawashima, M. Murase, and N. Hirose, "Identification of sintered irons with ultrasonic nonlinearity," Rev. Prog. Quant. NDE., Vol. 22, pp. 1257-1264, (2003)
- [6] J. Y. Kim, and J. S. Lee, "A micromechanical model for nonlinear acoustic properties of interfaces between solids," J. Appl. Phys., 101, 043501, (2007)
- [7] S. Biwa, S. Hiraiwaa and E. Matsumotoa,

- "Experimental and theoretical study of harmonic generation at contacting interface," *Ultrasonics*, Vol. 44, pp. e1319-e1322, (2006)
- [8] N. Y. Kim and S. Y. Yang, "Nonlinear displacement discontinuity model for generalized rayleigh wave in contact interface," *J. KSNT*, Vol. 27, No. 6, pp. 582-590, (2007)
- [9] I. H. Lee, D. S. Son, I. H. Choi, T. H. Lee and K. Y. Jhang, "Development of pressure control system of contact transducer for measurement of ultrasonic nonlinear parameter," *J. KSNT*, Vol. 27, No. 6, pp. 576-581, (2007)