

경사입사 초음파에서 계면 접촉 음향 비선형성에 의해 발생한 고조파의 영상화

Imaging of Harmonic Wave Generated by Contact Acoustic Nonlinearity in Obliquely Incident Ultrasonic Wave

윤동석*, 최성호*, 김정석*[†], 장경영**

Dongseok Yun*, Sungho Choi*, Chungseok Kim*[†] and Kyung-Young Jhang**

초 록 본 연구에서는 닫힘균열의 조기발견을 위해서 경사입사 초음파를 이용하여 계면 접촉 음향 비선형성에 의해 발생한 고조파를 영상화하고자 한다. 알루미늄 시편 두 개를 접촉하여 고체-고체 접촉계면을 만들어 닫힘균열을 모사하였고, 접촉계면 압력에 따른 초음파의 음향 비선형을 영상화하였다. 영상화 기법으로는 sampling phased array(SPA)와 synthetic aperture focusing technique(SAFT) 기법을 사용하였다. 접촉계면 압력이 증가하면서 기본 주파수의 성분은 감소하였고 2차 고조파 성분은 증가하다가 닫힘균열로 모사된 부분에서 가장 큰 값을 나타내고 이후에는 감소하였다. 결과적으로 접촉계면에서 음향 비선형성에 의해 발생한 고조파를 영상화 하는 것이 가능하며 이는 초기균열의 조기발견에 적용 가능할 것으로 기대 된다.

주요용어: 계면 접촉 음향 비선형성(CAN), 닫힘균열, Sampling Phased Array(SPA), Synthetic Aperture Focusing Technique(SAFT)

Abstract The objective of this study is to image the harmonic wave generated by contact acoustic nonlinearity in obliquely incident ultrasonic wave for early detection of closed cracks. A closed crack has been simulated by contacting two aluminum block specimens producing solid-solid contact interfaces and then acoustic nonlinearity has been imaged with contact pressure. Sampling phased array(SPA) and synthetic aperture focusing technique(SAFT) are used for imaging techniques. The amplitude of the fundamental frequency decreased with applying pressure. But, the amplitude of second harmonic increased with pressure and was a maximum amplitude at the simulation point of closed crack. Then, the amplitude of second harmonic decreased. As a result, harmonic imaging of contact acoustic nonlinearity is possible and it is expected to be apply for early detection of initial cracks.

Keywords: Contact Acoustic Nonlinearity(CAN), Closed Crack, Sampling Phased Array(SPA), Synthetic Aperture Focusing Technique(SAFT)

1. 서 론

구조물은 운전연한이 증가함에 따라 재료에 가해지는 응력 및 피로 등의 하중과 열, 부식 등 환경의 영향 때문에 점차 노후화된다. 이러한 원인

으로 발생하는 결함 중에서 균열은 구조물의 건전성을 심각하게 위협하므로 구조물의 건전성 확보를 위하여 파손으로 이어질 수 있는 잠재적 결함까지 정확하게 진단하는 것이 매우 필요하다. 이러한 균열성 결함에는 균열의 생성 위치와 상관없

이 일반적으로 초음파의 변위와 균열의 두 계면 폭을 기준으로 하여 열림균열과 닫힘균열로 구분할 수 있다. 열림균열은 거시적인 균열로 균열 폭보다 초음파의 변위가 작을 때이며 일반 초음파로 검출이 가능하다. 하지만 닫힘균열은 균열 폭이 초음파의 변위수준이 된다. 따라서 기존의 초음파 검사법으로는 이러한 닫힘균열을 검사하는데 한계가 있다. 이런 문제를 극복하기 위해 비선형 초음파를 이용하는 기술이 주목받고 있다[1]. 비선형 초음파란 음파가 매질을 따라 전파할 때 기본 주파수 성분 이외에 고조파 성분이 발생하는 것으로, 그 발생 메커니즘으로는 재료의 비선형 탄성과 계면 접촉으로 구분된다. 그중에서 계면 접촉에 의한 비선형 초음파 효과는 초음파가 내부 미세균열에 입사될 때 균열면에서 압력과 변위의 관계가 선형이 아닌 비선형 관계를 보임에 따라 신호의 파형이 왜곡되고 고조파 성분이 발생하는 현상이다. 이러한 계면에서의 비선형 초음파 현상은 재료에 의한 비선형성보다 매우 커서 기존의 투과법 또는 반사법으로 측정하기 어려운 미세균열이나 닫혀있는 균열을 검출하는 데 매우 효과적이다[2-4].

그러나 초음파 비선형 특성을 이용한 기술은 아직 현장에 제한적으로 적용되고 있다. 그 이유는 현재까지 연구된 비선형 초음파기술은 대부분 투과모드로서 In-service 상태의 현장 사용성 측면에서 비실용적이며, A-scan 신호에 대한 분석에 치중되어 있어 고도의 숙련자만이 적용할 수 있기 때문이다. 이런 문제를 극복하기 위해서는 더욱 실용적인 기법으로의 발전이 필요하다[5]. 본 연구에서는 경사입사 초음파의 계면 접촉 음향 비선형성에 의해 발생한 고조파 영상화 기술을 제안한다. 영상화 기술은 검사 결과의 분석을 용이하게 하며, 현장 적용성을 높이는데 있어서 매우 효과적이다. 한편, 초음파 영상화 기술은 이미 의료진단이나 비파괴검사에서 위상배열기법으로 실용화되어 있다[6,7]. 그러나 현재의 위상배열기법을 비선형 초음파의 영상화에 직접 적용하는 데에는 어려운 점이 있다. 그 이유는 다음과 같다. 우선 위상배열기법에서는 작은 탐촉자를 배열로 사용하는데 이들 탐촉자로부터 발생하는 초음파의 음향에너지가 금속재료에서의 음향비선형성을 충분히 야기시키기에는 아직 너무 미약하다. 의료영상기술에서 위상배열기법으로 고조파의 이미지를 얻기도

하였으나 이는 생체조직의 경우 비선형성이 매우 커서 비교적 작은 음향에너지에서도 음향비선형성에 의한 고조파성분이 관측 가능할 정도로 발생하기 때문에 가능한 일이다[8,9]. 한편, 탐촉자에서 발생하는 초음파의 음향에너지를 크게 하기 위해서는 고전력의 전기신호를 인가해야 하고, 이를 기존의 위상배열기법으로 구현하기 위해서는 이런 고전력의 전기신호를 배열탐촉자에 짧은 시간차로 순차 공급해 주기 위한 고속 스위치가 필요한데 현 시점에서 이런 스위치가 일반화되어 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 일반적으로 사용되고 있는 단일 탐촉자를 스캔하여 영상을 처리할 수 있는 SPA(sampling phased array)와 SAFT(synthetic aperture focusing technique) 기법을 이용하는 기술을 적용하였다. SPA는 한 개의 탐촉자에서 송신하고 여러 탐촉자에서 수신하는 기법이며[10,11], SAFT는 수신신호를 이용하여 계산을 통해 집속효과를 얻는 방법이다[12-14]. 또한 음향 비선형의 영상화를 위해서는 기본주파수 성분과 고조파 성분을 분리하여 영상화할 필요가 있으며, 이를 위해 시간에 따른 주파수의 변화를 알 수 있는 STFT(short time fourier transform)을 이용하였다. 본 논문에서는 이들과 관련된 일련의 영상화 알고리즘을 제시하였으며, 이를 고체-고체 접촉계면으로 닫힘균열로 모사된 시험편에 적용하여 그 타당성을 실험적으로 검증하였다. 특히 접촉계면에 압력의 변화를 주면서 계면접촉상태의 변화에 따라 달라지는 계면 음향 비선형 특성의 변화를 2차 고조파 성분의 영상을 통하여 비교-분석하였다[15].

2. 영상화의 기본 원리

SPA기법은 배열로 이루어진 탐촉자에 대하여 1개의 채널에서 초음파를 송신하고 모든 채널에서 반사된 신호를 수신하는 방법이다. SPA기법은 전통적인 빔 집속방법과 비교하여 여러 가지 실용적인 장점을 가지고 있다[10,11].

SPA기법을 통하여 수신된 신호에 대한 가상의 빔 집속 효과 및 신호의 중첩을 위해서는 SAFT가 이용된다. SAFT는 SPA기법을 통하여 얻게 된 수신데이터를 이용하여 계산을 통해 집속 효과를 얻는 방법이다[12-14]. Fig. 1은 SPA의 기본 원리를 나타낸다.

Fig. 1은 1번 채널의 탐촉자에서 송신한 초음파

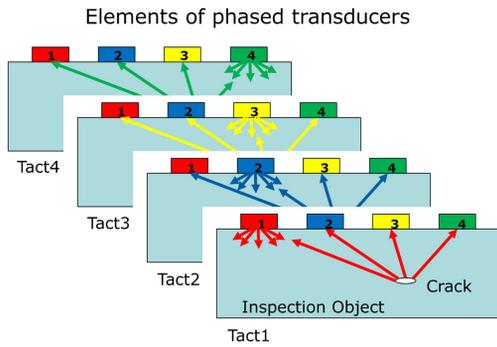


Fig. 1 Basic principle of the SPA

에 대하여 1-4까지의 모든 채널에 대하여 수신하고 이를 모든 채널에 반복하는 과정을 나타낸 그림이다. 결함으로부터 각각의 채널까지의 거리가 다르므로, 수신된 1-4번의 데이터는 시간 축에서 서로 다른 반사신호의 위치를 가진다. 이처럼 서로 다른 시간 축을 가지는 수신신호를 이용하여 결함을 영상화하기 위해서는 Fig. 2와 같은 방법을 이용할 수 있다.

Fig. 2(a)는 배열탐촉자 및 그 영상화 포인트의 위치를 나타내고 있으며, Fig. 2(b)는 이에 대한 이미지 구성 방법을 나타낸다.

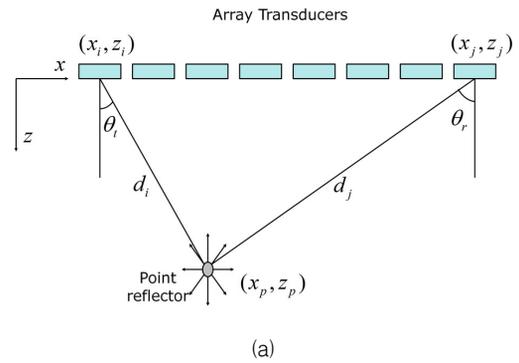
이 때 배열탐촉자의 i 번째 탐촉자에서 송신된 초음파가 영상화 포인트 (x_p, y_p) 에서 j 번째 탐촉자에서 수신되는 경우의 초음파의 전파거리 $(d_{ij}(x_p, y_p))$ 는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$d_{ij}(x_p, y_p) = d_i + d_j \tag{1}$$

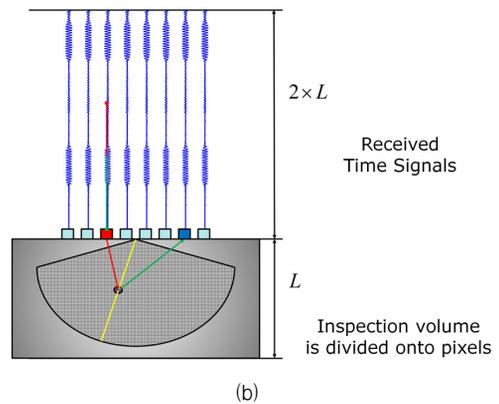
그리고 이에 대한 전파시간은 식(2)와 같이 나타내어진다.

$$t_{ij}(x_p, y_p) = \frac{d_{ij}(x_p, y_p)}{c} \tag{2}$$

여기서, (x_i, z_i) 는 송신위치, (x_j, z_j) 는 수신위치, c 는 전파속도, 그리고 d_i 는 초음파가 입사된 위치 (x_i, z_i) 와 영상화 포인트 (x_p, z_p) 간의 거리, d_j 는 수신된 위치 (x_j, z_j) 와 영상화 포인트 (x_p, z_p) 간의 거리이다. 여기서 초음파의 진행속도 c 는 다른 실험을 통해서 측정한다. 그러면, 재료 내부의 임의 위치 (x_p, z_p) 에 대한 영상정보는 식(3)과 같은 이미지 재구성을 통하여 얻을 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 2 (a) Basic principle of the SAFT: (a) phased array geometry and (b) SPA sector scan-image reconstruction

$$I(x_p, z_p) = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N y_{ij}(t_{ij}(x_p, z_p)) \tag{3}$$

여기서 y_{ij} 는 i 번째 탐촉자에서 송신하고, j 번째 탐촉자에서 수신한 신호이다. 신호는 $N \times N$ 개 획득되며, 이들 신호에서 영상화 포인트 (x_p, z_p) 를 경유하는 경로 d_{ij} 에 해당하는 전파시간 t_{ij} 에서의 신호크기를 모두 합하여 최종적으로 영상화 이미지 $(I(x_p, z_p))$ 를 얻게 된다.

3. 하모닉 이미지 구성을 위한 STFT 기법

음향 비선형을 영상화하기 위해서는 기본주파수 성분의 크기와 고조파 성분의 크기를 분리할 필요가 있다. 이를 위해서 STFT의 개념을 도입하였다. STFT를 이용하게 되면 시간 축에 대한 반사 신호의 크기를, 시간 축에 대한 기본주파수 성분의 크기와 고조파 성분의 크기로 분리할 수 있다.

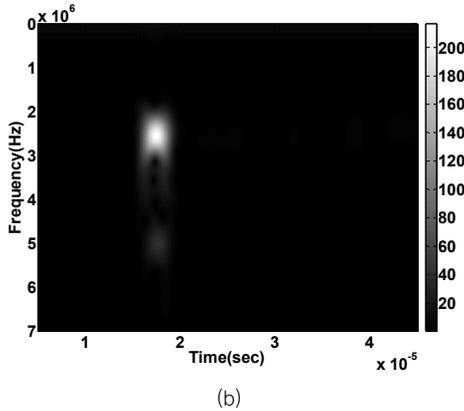
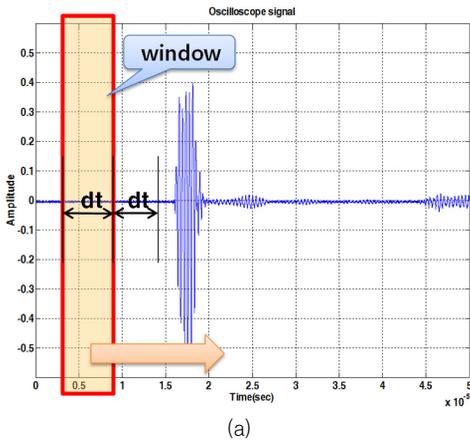


Fig. 3 STFT signal process for imaging: (a) received signal and (b) STFT of received signal

Fig. 3은 STFT의 원리를 나타낸다. 즉 탐촉자로부터 수신한 신호는 Fig. 3(a)에 보인 바와 같은 윈도우를 씌우고 윈도우 영역에 대하여 FFT를 처리한다. 그리고 dt 의 시간 간격으로 윈도우를 이동시키면서 이를 반복한다. 그러면 Fig. 3(b)와 같이 시간 축에 대한 주파수 성분의 크기 분포를 얻을 수 있다. 이를 통하여 시간 축에 대해 기본주파수 성분과 고조파 성분을 둘 다 얻을 수 있게 되며, 식(3)의 이미지 재구성 과정을 거쳐 각각의 영상화가 가능하다.

4. 실험

단함균열성 접촉계면에서 음향 비선형 특성을 실험으로 검증하기 위하여 Fig. 4와 같이 실험 장치를 구성하였다. 접촉계면을 모사하기 위하여 상하부 두 개의 시편을 만들어 접촉시켰으며 하부시

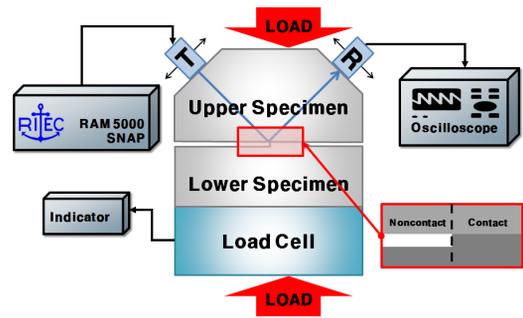


Fig. 4 Schematic diagram of measurement system

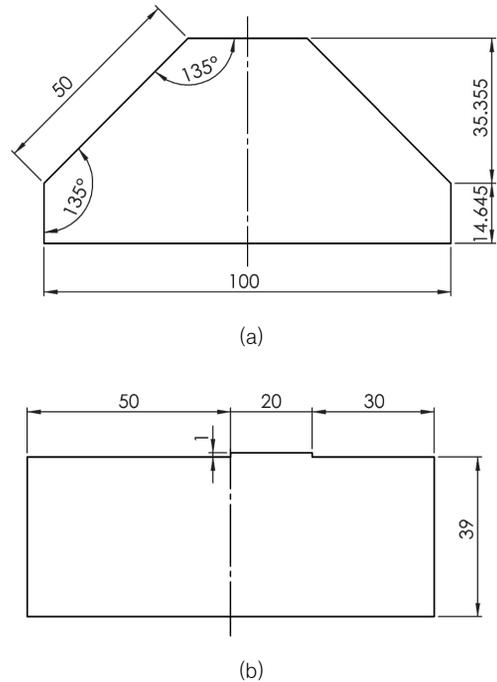


Fig. 5 Dimensions of two aluminum blocks: (a) upper specimen and (b) lower specimen (unit: mm)

편에는 약간의 돌기를 만들어 상부시편과 접촉되도록 하였다. 중앙부 직사각형로 표시한 영역이 영상화 영역이며, 우측에 확대된 그림을 나타내었다. 영상화 영역의 좌측은 비접촉 상태로, 우측은 접촉 상태가 되도록 하였다.

시편의 크기와 형상은 Fig. 5에 나타냈다. 또한, 시편의 두께는 40 mm이다. 중심선의 오른쪽 돌기 부분은 압력이 증가함에 따라 열림균열에서 부분 단함균열, 압력이 더욱 증가하면 완전단함균열로 변하게 된다. 시편의 재료는 Al6061-T6를 이용하였다. 시편의 접촉면은 #600 사포를 이용하여 연마하여 표면 상태를 일정하게 유지되도록 하였다.

한편, 상부시편 좌우에 경사를 두어 송수신 탐촉자를 배치하여 경사입사-반사법이 적용되도록 하였다. 송신탐촉자는 중심 주파수가 2.25 MHz이고 크기가 12.7×25.4 mm인 사각탐촉자를 사용하고, 수신에는 고조파 성분을 보다 민감하게 측정하기 위하여 동일크기의 5 MHz 사각탐촉자를 사용하였다. 또한 시편의 접촉상태를 일정하게 유지하기 위해서 Fig. 6과 같은 지그를 사용하였다. 지그 안에 있는 스프링을 이용하여 시편과 탐촉자 간의 압력을 일정하게 유지시킬 수 있는 동시에 탐촉자의 이동을 자유롭게 하였다. 수신된 초음파 신호로부터 주파수 분석을 통해 효과적으로 고조파 성분을 분리 및 측정하기 위해서 톤버스트 형태의 협대역 신호를 이용하였다. 톤버스트 신호는 2.5 MHz의 사인파형을 사용하였고 개수는 5개이며 피크 간의 시간 간격은 0.4 μ s 이다. 이러한 톤버스트 형태의 초음파를 발생시키기 위해 Ritec Gated Amplifier(RITEC, USA) 시스템이 사용되었다. 수신 신호는 디지털 오실로스코프(Lecroy WS452)에서 A/D 변환되고 컴퓨터에서 신호를 처리하였다.

SPA와 SAFT 기법을 적용하기 위해 상부 시편에서 송신탐촉자와 수신탐촉자를 5 mm 간격으로 이동시키면서 총 6개의 지점에서 송수신하여 $N \times N$ 개, 총 36개의 신호를 얻었다.



Fig. 6 Photograph of jig

그리고 STFT를 이용하여 기본주파수의 시간별 크기, 2차 고조파의 시간별 크기를 얻었다. 또한, 계면 접촉 압력은 유압장치를 이용하여 압력을 가하고 가압하중을 로드셀로 측정하였다.

5. 실험 결과

접촉압력에 따른 기본 주파수 성분과 2차 고조파 성분의 영상화 결과는 다음 Fig. 7과 같다. 비접촉계면 부분에 대한 기본주파수 성분 및 2차 고조파 성분은 압력에 따라 진폭의 차이에 의한 컨트라스트 변화가 거의 미미한 수준으로 나타났다. 하지만 시편 중심 축 오른쪽 접촉계면 부분에서는 접촉압력이 증가함에 따라 발생하는 기본 주파수 성분은 지속적으로 감소하는 결과를 볼 수 있다. 이는 열림계면 상태에서 접촉압력이 증가함에 따라서 계면이 단립화 되므로 하부시편으로의 에너지 전달에 기인한 것이다. 하지만 2차 고조파 성분은 점차 증가하다가 접촉압력 20 MPa에서 최대값(Fig. 7의 contact 영역)을 보이다가 이후 감소하는 것을 확인할 수 있다.

또한, 상대적 비선형 파라미터($\beta = A_2/A_1^2$)의 값은 Fig. 8에 나타난 결과와 같이 접촉계면의 경우에는 상대적 비선형 파라미터가 증가하는 반면에, 비접촉계면에서는 큰 변화를 보이지 않음을 알 수 있다.

6. 결론

비접촉계면 및 접촉계면을 가지는 시험편에 대하여 하중이 증가함에 따라 발생하는 기본 주파수 및 2차 고조파 성분의 특성을 이용하여 접촉 계면을 영상화 하였다. 접촉압력의 증가에 따라 열림 균열부와 부분단립균열 그리고 완전단립균열로 묘사되는 부분에서의 영상화 결과가 다름을 확인할 수 있었다. 열림균열부로 묘사된 부분에서 부분단립균열로 계면이 변하는 경우에는 기본 주파수 성분이 감소하고 2차 고조파 성분이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 부분단립균열에서 완전단립균열로 계면이 변하는 경우에는 기본 주파수 성분과 2차 고조파 성분이 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 접촉 계면의 영상화에서 단립균열부가 강조된 이미지를 성공적으로 얻을 수 있었으며, 향후

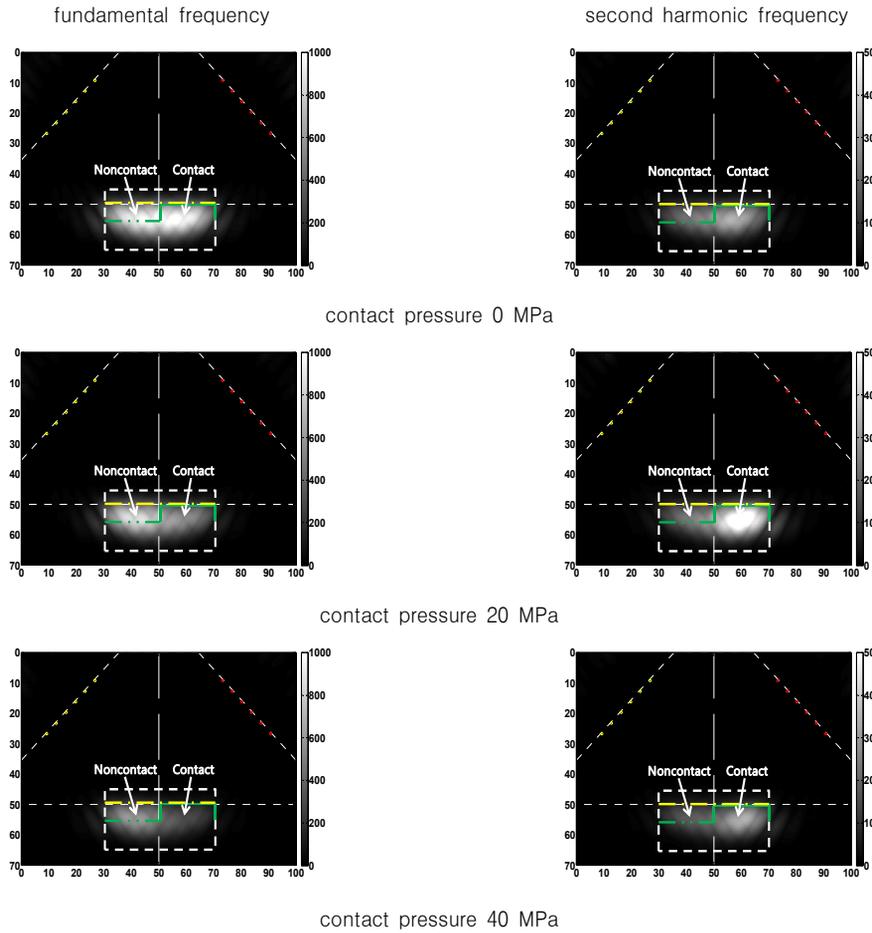


Fig. 7 Result of images at three different contact pressure

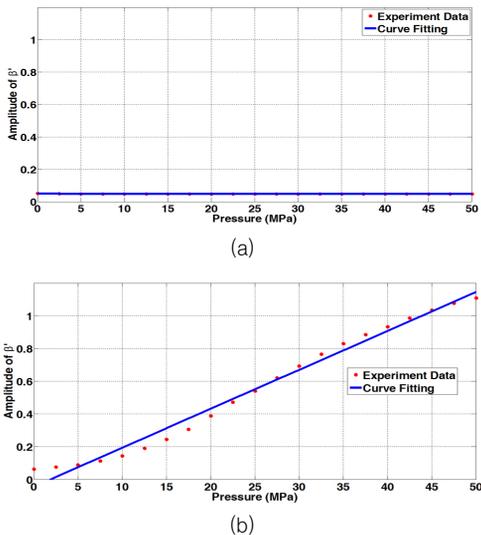


Fig. 8 Result of β' at (a) noncontact interface, (b) contact interface

2차 고조파를 이용한 단층균열을 이미지화하는 기법은 구조물의 미세균열까지도 정밀하게 측정하는데 매우 유망한 기법이 될 수 있다.

후 기

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2008-2003505).

참고문헌

[1] T. H. Lee and K. Y. Jhang, "Evaluation of micro crack using nonlinear acoustic effect," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 28, No. 4, pp. 352-357 (2008)

- [2] J. Y. Kim, A. Baltazar, J. W. Hu and S. I. Rokhlin, "Hysteretic linear and nonlinear acoustic responses from pressed interfaces," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 43, No. 21, pp. 6436-6452 (2006)
- [3] T. H. Lee and K. Y. Jhang, "Experimental investigation of nonlinear acoustic effect at crack," *NDT & E International*, Vol. 42, No. 8, pp. 757-764 (2009)
- [4] B. J. Park, T. H. Lee, C. S. Kim and K. Y. Jhang, "Acoustic nonlinear characteristics of ultrasonic wave reflected at contact interfaces," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 31, No. 1, pp. 40-46 (2011)
- [5] K. Y. Jhang, "Nonlinear ultrasonic techniques for non-destructive assessment of micro damage in material: A Review," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 10, No. 1, pp. 123-135 (2009)
- [6] 이해, "위상배열 초음파검사기술", *기계산업*, No. 372, pp. 71-77 (2008)
- [7] J. M. S. Hutchison and R. D. Selbie, "Ultrasonic Phased Array System," U.S. Patent, 4149420 (1979)
- [8] D. C. Hurley, D. Balzar, P. T. Purtscher and K. W. Hollman, "Nonlinear ultrasonic parameter in quenched martensitic steels," *Journal of Applied Physics*, Vol. 83, pp. 4584-4588 (1998)
- [9] F. Dong, E. L. Madsen, M. C. McDonald and J. A. Zagebski, "Nonlinearity parameter for tissue-mimicking materials," *Ultrasound in Medicine & Biology*, Vol. 25, No. 5, pp. 831-838 (1999)
- [10] L. V. Bernus, A. Bulavinov, D. Joneit, M. Kröning, M. Dalchov, and K. M. Reddy, "Sampling phased array a new technique for signal processing and ultrasonic imaging," *European Conference on NDT*, pp. 1-8 (2006)
- [11] A. Bulavinov, M. Dalichow, M. Kröning, J. H. Kurz, F. Walte and K. Reddy, "Quantitative ultrasonic testing of pressurized components using sampling phased array," *Proceeding of National Seminar on Non-Destructive Evaluation*, pp. 437-449 (2006)
- [12] J. A. Jensen, S. I. Nikolov, K. L. Gammelmark and M. H. Pedersen, "Synthetic aperture ultrasound imaging," *Ultrasonics*, Vol. 44, pp. e5-e15 (2006)
- [13] D. Lévesque, A. Blouin, C. Néron and J. -P. Monchalin, "Performance of laser-ultrasonic f-saft imaging original research article," *Ultrasonics*, Vol. 40, No. 10, pp. 1057-1063 (2002)
- [14] Y. Ozaki, H. Sumitani, T. Tomoda and M. Tanaka, "A new system for real-time synthetic aperture ultrasonic imaging," *NDT & E International*, Vol. 35, No. 6, pp. 828-838 (1988)
- [15] T. H. Nam, T. H. Lee, C. S. Kim, K. Y. Jhang and N. Y. Kim, "Harmonic generation of an obliquely incident ultrasonic wave in solid-solid contact interface," *Ultrasonics*, Vol. 52, No. 6, pp. 778-783 (2012)