

SUS316L 강의 초음파 비선형 특성평가를 위한 경사입사기법

Oblique Incidence Technique for Ultrasonic Nonlinear Characterization in SUS316L Alloy

백승현*, 이태훈*, 김정석*, 장경영**†

Sunghyun Baek*, Taehun Lee*, Chungseok Kim* and Kyung-Young Jhang**†

초 록 본 연구에서는 고주기 피로를 받은 SUS316L 강에서의 초음파 비선형 특성평가를 위한 종파 경사입사기법을 연구하였다. Dog-bone형의 판상시편을 준비하여 시편 중심부에서 응력집중이 되며 각 위치마다 피로 손상이 다르도록 제작하였다. 수직투과법 외에 본 연구에서 새로이 제안한 경사입사법을 이용하여 초음파 비선형 파라미터를 측정하였다. 두 기법 모두에서 피로 손상 전보다 고주기 피로 손상 후 초음파 비선형 파라미터가 높게 나타났다. 특히, 응력 집중을 받은 시편 중심부에서 크게 증가하였다. 상대적인 초음파 비선형 파라미터는 피로 손상과 밀접한 상관성을 보였으며 결과적으로 종파를 이용한 경사입사기법은 피로 손상을 평가하는데 효과적인 기법이라 할 수 있다.

주요용어: 비선형 파라미터, SUS316L, 피로, 수직투과, 경사입사

Abstract The oblique incidence technique for ultrasonic nonlinear characterization was studied in stainless steel 316L alloy subjected to high cycle fatigue. A dog-bone plate specimen was prepared to make different fatigue-driven deformation at each position where the stress concentration could occur in the middle of specimen. In addition to the normal transmission technique, the oblique incidence technique which is newly suggested in this study, was used to measure ultrasonic nonlinear parameter. The fatigued specimen shows higher ultrasonic nonlinear parameter than the virgin specimen for both techniques. Ultrasonic nonlinear parameter highly increases in the middle of test specimen where the stress concentration exists. Relative nonlinear parameter has strong correlation with fatigue damage. Consequently, the oblique incidence technique with longitudinal wave can be potential to characterize high cycle fatigue damage.

Keywords: Nonlinear Parameter, SUS316L, Fatigue, Normal Transmission, Oblique Incidence

1. 서론

최근 전 세계적으로 에너지 절약 요구와 환경 규제가 강화되고 있으며 이는 기후변화를 일으키는 급격한 지구온난화를 지연시키는데 있다. 온난화의 가장 큰 요인으로 온실가스의 증가가 주원인으로 알려져 있다. 이러한 온실가스 저감의 대안으로 현

재 원자력발전이 가장 중요한 에너지원임이 분명하다. 하지만 원자력에 대한 안전성과 폐기물 안전관리 등에 대한 문제로 에너지뿐만 아니라 환경오염으로부터 유일한 대안이 되지는 못하고 있다. 이러한 이유로 인해서 원자력 설비에 대한 안전성을 극대화시키는 것이 필수적이라 할 수 있다. 기존 원전시설의 안전관리를 위해서 오래전부터 수많은 전

통적 요소기술들이 적용되었고 연구되고 있다. 전통적인 안전검사 기술로는 자기누설기법, 와전류기법, 방사선기법, 액체 침투기법, 전통적인 초음파기법, 표면복제법 등이 실제 시설에 대한 검사기법으로 적용되고 있다. 하지만 원전시설의 안전성을 향상시키기 위해 기존의 상태진단(diagnosis)뿐만 아니라 수명예측(prognosis)을 포괄하는 새로운 파라다임인 구조 건전성 모니터링(structural health monitoring, SHM)에 대한 관심과 노력이 집중되고 있다. 물론 SHM을 위해서 지금까지의 수많은 진단 검사기법과 시설물의 열화(degradation, aging) 모니터링기법, 이들의 변화에 대한 물리적 기반 손상 해석 그리고 부가적인 자동화, 무선전송, 로봇, 에너지 등 여러 산업기술들이 유기적으로 융합되어야 가능해 진다. 하지만 우선적으로 다양한 첨단 비파괴평가(nondestructive evaluation, NDE)기법을 이용하여 구조물의 열화를 정밀하게 모니터링 할 수 있는 기법은 매우 중요한 요소기술이라고 하겠다. 이러한 첨단 NDE기법중 기존의 초음파 속도, 감쇠, 산란 등을 이용하는 전통적인 선형초음파기법과는 다르게 재료가 갖는 비선형특성을 초음파를 이용하여 매우 정밀하게 측정함으로써 미소한 재료의 변질을 평가하는 것이 가능하게 되었다[1-5].

Cantrell은 1970년대부터 초음파 비선형에 대한 분석적 연구를 중심으로 수많은 기초연구를 보고해 왔으며 초음파 비선형성에 대한 석출물과 전위의 영향을 수학적으로 매우 심도있게 연구를 하였다. 그는 마르텐사이트 스테인레스강에서 피로 손상 정도에 따라 초음파 비선형 파라미터가 증가함을 보고하였으며 알루미늄 2024에서의 피로변형동안 전위쌍극자가 생성되며 그로 인해 재료 내를 전파하는 초음파의 왜곡 정도가 심해져 초음파 비선형 파라미터가 지속적으로 증가한다고 보고하였다[6-9]. Jhang은 1990년대부터 초음파 비선형성에 대한 응용연구를 활발하게 연구해 오고 있다. 비선형 계측에 대한 여러 측정변수의 영향과 오차 원인 규명 등 정밀계측 기법을 심도 있게 보고하고 있다. 또한, 전통적인 종파투과기법을 극복한 새로운 초음파모드를 이용한 유도초음파, 표면파 그리고 레이

저를 이용한 비접촉 초음파의 비선형성 연구를 보고하고 있으며 전위와 석출물 외에 결정립, 균열 등의 영향을 보고하였다[10-16].

기존의 초음파 비선형 계측기법은 주로 시편의 한쪽면에서 종파 초음파를 가진하고 반대면에서 시편을 전파한 신호를 수신하는 시스템을 사용하는 것이 일반적이었다. 이러한 기법들의 경우, 구조물 시공 시에는 적용이 가능하나 가동 중인 경우 펌프, 밸브, 배관 등 복잡한 내부 구조로 인한 접근성 문제를 안고 있었다. 물론 유도초음파나 표면파는 초음파의 특성상 동일면에서 계측이 가능하며 유도 초음파 및 표면파를 이용한 초음파 비선형성 연구가 현재 활발하게 이루어지고 있다[17-20]. 하지만, 유도초음파가 갖는 근본적인 문제인 수많은 모드와 분산성, 위치에 따른 변위차(파형구조, wave structure) 그리고 낮은 주파수로 인해서 미시적 재료 손상 정도를 평가하는데 극복해야 할 많은 어려움이 존재한다.

따라서, 본 연구에서는 가동 중인 원전 구조물의 열화를 모니터링 할 수 있는 초음파 비선형 계측기법을 연구하고 구조적 특성상 동일면에서 송수신이 가능한 종파 경사입사법을 제안하고자 한다. 이를 위해서 원전 구조재로 널리 사용되는 SUS316L강의 고주기 피로손상에 대해 수직투과법과 경사입사법을 이용하여 초음파 비선형 파라미터를 측정하고 비교평가 하였다.

2. 실험방법

2.1. 시험재료

본 연구에서 사용한 시편은 원전 구조물의 압력 용기와 배관재료로 널리 사용되고 있는 SUS316L강으로 Table 1에 화학적 조성을 나타내었다. 판상형의 열간압연재는 수많은 어닐링 쌍정을 포함하는 전형적인 오스테나이트 조직을 나타내었다. 피로시험을 위한 시편은 Fig. 1(a)와 같이 두께 11 mm 판상시편으로 정밀가공 하였고 시편 각 부위의 치수를 나타내었다. 특히, 피로시험 중 시편에 가해지는

Table 1 Chemical composition of SUS316L alloy

(wt.%)

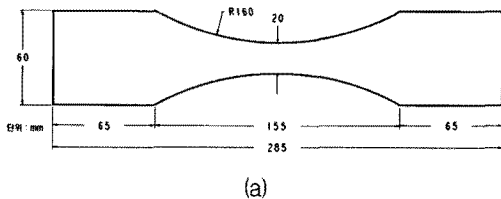
C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	V	Ti	Nb	N	Fe
0.002	0.35	1.58	0.032	0.001	2.47	10.82	17.41	0.43	0.06	0.001	0.02	-	Bal

누적 피로 손상을 인위적으로 시편 중심부에 최대 응력이 가해질 수 있도록 곡률 R=160 mm으로 가공하였다.

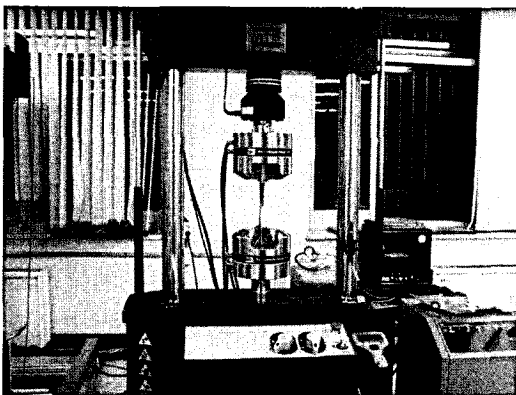
피로 시험은 ASTM E 466에 준하여 시험하였으며 Fig. 1(b)와 같은 25톤 용량의 만능 인장-압축 피로 시험기를 사용하였다. 피로주기는 5 Hz로 고주기 피로를 이용하여 응력 집중부에서 최대 응력이 200 MPa이 되도록 하였고 피로 사이클은 1.5×10^6 까지 가하였다.

피로시험 재료의 손상 정도를 확인하기 위하여 피로손상 전과 후의 미소경도를 측정하였다. 시편 중앙부를 중심으로 좌우 방향 1 cm 간격으로 한 위치 당 3번의 반복 실험을 하였다. 이에 대한 평균값은 Fig. 2와 같다. 피로를 가하지 않은 시편 (virgin)은 +, 피로를 가한 시편 (fatigued)는 ■으로 나타내었으며 그에 따른 경향은 각각 점선과 실선이다. 본 논문에서 제시하는 경도값과 초음파 비선형 파라미터값은 피로 손상을 받지 않은 부분의 평균값인 H_{V0} 과 β_0 로 정규화한 값으로써 H_V/H_{V0} , β/β_0 로 표현했음을 밝힌다.

피로를 가하지 않은 시편의 경우 전 구간에 걸쳐 위치와 상관없이 유사한 경도값을 보이고 있으며



(a)



(b)

Fig. 1 High cycle fatigue test of SUS316L alloy: (a) Geometry of test specimen and (b) Fatigue test machine

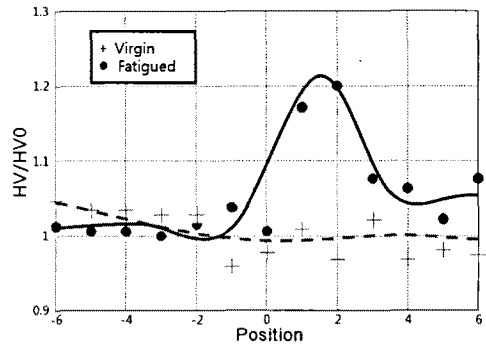


Fig. 2 The variation in Vickers hardness at each position of SUS316L alloy subjected to high cycle fatigue

피로를 가한 시편은 중심부를 벗어난 우측 1-2 cm 부근에서 미소경도가 크게 증가하였다. 이와 같이 경도의 변화가 중심으로부터 대칭성을 갖지 않는 이유는 본 연구에서 피로 시편에 곡률을 주어 중심부에 응력 집중이 되도록 의도한 것과는 달리 실제적으로 시편 내부의 조직 상태나 표면 상태 그리고 많은 변수를 가지고 있는 피로 시험으로 인한 것으로 판단된다. 피로를 가하지 않은 시편에 비하여 국부적인 응력집중으로 최대 약 20% 증가하였다. 이와 같은 결과는 본 연구에서 시편에 가해지는 누적 피로손상 정도를 위치마다 달리 하기 위해서 곡률을 갖는 시편을 사용하였기 때문이다.

2.2. 초음파 비선형 특성 계측

2차 고조파 발생 효과를 이용한 초음파 비선형 특성 계측을 위해 본 연구에서는 측정 결과에 영향을 줄 수 있는 외부 인자인 인가전압과 접촉압력 그리고 진폭분해능을 제어하여 계측의 신뢰성을 향상시킨 장치를 이용하였다[22]. 접촉 압력의 경우 공압 조절 장치 설계를 통해 탐촉자와 시편 사이에 일정한 압력을 유지 할 수 있도록 하였으며 재료와 탐촉자 사이의 접촉압력을 일정 크기 이상으로 가하게 되면 안정적인 비선형 파라미터 데이터를 취득할 수 있게 된다.

수직입사와 경사입사 계측 시스템은 각각 Fig. 3(a), Fig. 3(b)와 같이 구성하였으며 일정한 기본 주파수 성분 크기를 유지하여 재료 변형에 따른 비선형성만을 취득하기 위하여 다음과 같은 장비들

법으로 SUS316L 시편에서의 음파 속도를 구한 후 경사입사법에서의 음파 성분을 확인할 필요가 있다. 경사입사법에 의해 수신된 음파 성분은 Fig. 4와 같다. 약 5450 m/s인 종파-종파(LL)가 가장 빠르게 수신되었으며 종파와 횡파가 혼합된 종파-횡파, 횡파-종파(LT 혹은 TL)가 두 번째, 마지막으로 약 3020 m/s의 속도로 횡파-횡파(TT) 성분이 수신되었다. 초음파 비선형 파라미터는 측정된 기본 주파수 성분($\overline{A_1}$)과 이차 고조파 성분($\overline{A_2}$)을 이용하여 다음과 같이 표현된다[5,7].

$$\beta = \frac{8\overline{A_2}}{k^2 x \overline{A_1}^2}$$

여기서, k 는 종파의 파수, x 는 초음파 전파거리이다. 본 연구에서는 기본주파수, 전파거리 그리고 계인을 일정하게 유지하여 절대비선형 파라미터에 비례하는 상대적 비선형 파라미터 $\beta' = \overline{A_2}/\overline{A_1}^2$ 를 정의하였다. 여기서 $\overline{A_1}$ 은 기본주파수 성분의 진폭이고 $\overline{A_2}$ 는 2차 고조파 성분의 진폭이다.

3. 결과 및 고찰

수직투과법으로 탐상한 비선형 파라미터는 Fig. 5와 같다. 피로를 가하지 않은 시편에 비하여 피로를 가한 시편은 시편 중심으로부터 0 cm~4 cm 떨어진 곳에서 비선형 파라미터가 높았으며 2 cm에서 가장 크게 나타났다. 피로를 가하지 않은 시편에 비하여 약 50% 증가하였다.

종파 경사입사법을 이용한 비선형 파라미터 결과는 Fig. 6과 같다. 피로를 가하지 않은 시편은 점선으로써 전 구간에 걸쳐 위치와 무관한 경향을 보였으며 이는 수직투과법과 유사한 결과를 나타내었다. 피로를 가한 시편은 실선으로 시편 중앙부에서 약간 오른쪽 위치인 -2 cm~4 cm에서 높게 나타났으며 피로를 가하지 않은 시편에 비해서는 약 10% 증가하였다. 전체적으로 경도와 수직투과법에서 얻은 결과와 유사한 경향을 보이고 있으며 피로가 가해진 부분과 가해지지 않은 부분의 차이가 현저하게 나타났다. 하지만 수직투과법에서 얻은 수치보다 낮은 비선형 파라미터 변화 폭을 보였다. 이러한 이유는 본 연구에서 피로로 인한 재료내의 피로 누적 손상이 국부적으로 특정 위치마다 서로 다른

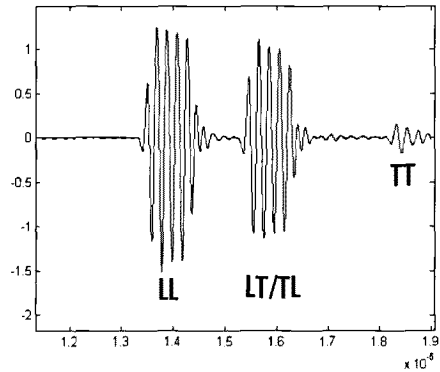


Fig. 4 Time domain signals received by the oblique incidence technique showing wave modes: LL(longitudinal-longitudinal wave), LT/TL(longitudinal-transvers wave) and TT(transvers-transvers wave)

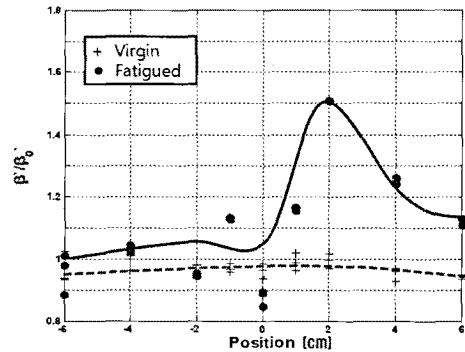


Fig. 5 The variation in relative nonlinear parameter as a function of position for normal transmission technique

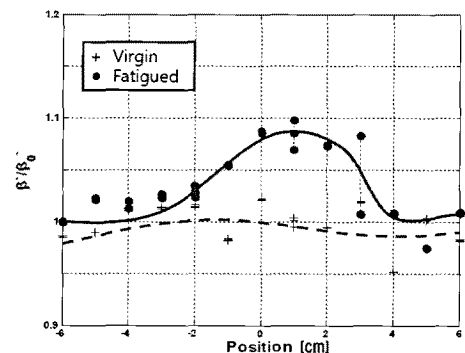


Fig. 6 The variation in relative nonlinear parameter as a function of position for longitudinal wave oblique incidence technique

변화를 나타내기 때문이며 따라서 공간적으로 보다 민감한 수직투과법이 응력 집중부에서 경사입사보다 더 큰 변화를 보인 것으로 사료된다. 또한 종파 경사입사법에서는 수직투과법과 달리 비선형 파라미터가 다소 넓게 분포하였다. 이는 두 기법 간에 초음파가 진행되는 전파거리와 서로 다른 피로 손상 위치로 인해 나타난 것이다. 즉, 종파 경사입사법은 경사입사후 저면에서 반사된 신호를 분석하기 때문에 수직투과법에 비하여 피로시험편에서 전체적으로 측정범위 내의 평균적인 피로 손상을 대표하기 때문으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 가동중인 원전 구조물의 열화를 모니터링 하기 위해서 구조적 특성상 동일면에서 송수신이 가능한 경사입사 초음파 비선형 계측 기법을 제안하고자 하였다.

초음파 비선형 계측을 위한 측정 방법에서 측정 결과에 영향을 줄 수 있는 외부 인자들을 최소화하며 수직투과법과 경사입사법을 이용한 초음파 비선형 파라미터 측정으로 재료의 피로 손상을 성공적으로 평가할 수 있었다. 측정 결과 수직투과법과 경사입사법을 비교해보았을 때 초음파의 전파거리와 위치에 따른 서로 다른 누적 피로 손상으로 인해 초음파 비선형 파라미터 변화는 경사입사법의 경우 다소 넓게 분포하였지만 이는 측정 범위 내의 평균적인 피로 손상을 나타내기 때문이다. 또한, 구조물의 구조적 특성에 덜 영향을 받으면서도 미세 열화에 민감한 초음파 비선형성을 구조물의 열화 모니터링에 활용할 수 있다는 점에서 본 연구에서 제안하는 경사입사 초음파 비선형 계측기법은 매우 효과적이라고 판단된다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2010-0018195)

참고문헌

- [1] K. C. Kim, H. Yamawaki, J. W. Park, H. S. Jang, H. J. Kim, W. H. Hwang and K. Y.

Jhang, "Research on the nondestructive measurement of nonlinear elastic modulus by using ultrasonic wave," JSME International Journal Series A, Vol. 44, No. 3, pp. 383-389 (2001)

- [2] H. Jeong, S. H. Nahm, K. Y. Jhang and Y. H. Nam, "Evaluation of fracture toughness degradation of CrMoV rotor steels based on ultrasonic nonlinearity measurements," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 16, No. 2, pp. 147-154 (2002)
- [3] J. Y. Kim, L. J. Jacobs and J. Qu, "Experimental characterization of fatigue damage in a nickel-base superalloy using nonlinear ultrasonic waves," Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 120, No. 3, pp. 1266-1273 (2006)
- [4] J. Y. Kim, L. J. Jacobs, J. Qu and J. W. Little, "Experimental characterization of fatigue damage in a nickel-base super alloy using non-linear ultrasonic waves," Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 120, No. 3, pp. 1266-1273 (2006)
- [5] K. Y. Jhang, "Applications of nonlinear ultrasonics to the NDE of material degradation," IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 47, No. 3, pp. 540-548 (2000)
- [6] J. H. Cantrell and W. T. Yost, "Nonlinear ultrasonic characterization of fatigue microstructures," International Journal of Fatigue, Vol. 23, No. 1, pp. 487-490 (2001)
- [7] J. H. Cantrell and W. T. Yost, "Acoustic harmonic generation from fatigue-induced dislocation dipoles," Philosophical Magazine A, Vol. 69, No. 2, pp. 315-326 (1994)
- [8] W. T. Yost and J. H. Cantrell, "Absolute ultrasonic displacement amplitude measurements with a submersible electrostatic acoustic transducer," Review of Scientific Instruments, Vol. 63, No. 9, pp. 4182-4188 (1992)
- [9] J. H. Cantrell and K. Salama, "Acoustoelastic characterization of materials," International

- Metals Reviews, Vol. 36, No. 4, pp. 125-145 (1991)
- [10] 장경영, 김경조, "'바이스펙트럼을 이용한 혈관의 비선형 맥동 전파 특성 계측에 대한 모의실험", 의공학회지, Vol. 16, No. 4, pp. 525-531 (1995)
- [11] 김경조, 장경영, "음속의 응력의존성을 이용한 재료 상태 평가에 대한 기초적 연구", 한국정밀공학회지, Vol. 13, No. 4, pp. 53-60 (1996)
- [12] 김경조, 장경영, "음향비선형 파라미터 추정을 위한 바이스펙트럼 해석법의 적용", 비파괴검사학회지, Vol. 19, No. 2, pp. 85-92 (1999)
- [13] 김경조, 장경영, Y. Hisashi, "초음파 비선형 전파특성을 이용한 부분 열화 재료의 평가", 비파괴검사학회지, Vol. 25, No. 2, pp. 214-219 (2001)
- [14] C. S. Kim, I. K. Park, K. Y. Jhang and N. Y. Kim, "Experimental characterization of cyclic deformation in copper using ultrasonic nonlinearity," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 28, No. 3, pp. 285-291 (2008)
- [15] 이태훈, 장경영, "초음파의 비선형 특성을 이용한 미세균열 평가", 비파괴검사학회지, Vol. 28, No. 4, pp. 352-357 (2008)
- [16] 남태형, 최성호, 장경영, 김정석, 이태훈, "협대역 레이저 여기 표면파의 음향비선형성을 이용한 Al6061 합금의 굽힘피로손상 평가", 비파괴검사학회지, Vol. 30, No. 2, pp. 139-145 (2010)
- [17] J. Qu, Y. H. Berthelot and L. J. Jacobs, "Crack detection in thick annular components using ultrasonic guided waves," ImechE Journal of Mechanical Engineering Sciences, Vol. 214, No. 9, pp. 1163-1171 (1999)
- [18] C. Pruell, J. Y. Kim, J. Qu and L. J. Jacobs, "A nonlinear-guided wave technique for evaluating plasticity-driven material damage in a metal plate," NDT & E International, Vol. 42, No. 3, pp. 199-203 (2009)
- [19] M. Deng and Junfeng Pei, "Assessment of accumulated fatigue damage in solid plates using nonlinear Lamb wave approach," Applied Physics Letters, Vol. 90, 121902 (2007)
- [20] M. Deng, P. Wang and X. Lv, "Experimental verification of cumulative growth effect of second harmonics of Lamb wave propagation in an elastic plate," Applied Physics Letters, Vol. 86, 124104 (2005)
- [21] A. N. Norris, "Symmetry conditions for third order elastic moduli and implications in nonlinear wave theory," Journal of Elasticity, Vol. 25, No. 3, pp. 247-257 (1991)
- [22] I. H. Lee, D. S. Son, I. H. Lee, T. H. Lee and K. Y. Jhang, "Development of pressure control system of contact transducer for measurement of ultrasonic nonlinear parameter," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 27, No. 6, pp. 576-581 (2007)