

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.2.145

초음파의 비선형 특성을 이용한 SUS316L 재료의 피로 열화 평가에 관한 연구

최익황* · 백승현* · 이태훈* · 장경영**

* 한양대학교 기계공학부

Evaluation of Fatigue Degradation in SUS316L Using Nonlinear Ultrasonics

Ikhwang Choi*, Seunghyun Baek*, Taehun Lee* and Kyung-Young Jhang**

* School of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.

(Received August 5, 2009 ; Revised December 28, 2009 ; Accepted December 28, 2009)

Key Words: Ultrasonic Wave(초음파), Nonlinear Parameter(비선형 파라미터), Degradation Evaluation (열화평가), Rotary Bending Fatigue(회전굽힘피로), Tensile Fatigue(인장피로)

초록: 본 논문에서는 비선형 초음파 기법을 이용하여 SUS316L 재료 시편에서의 피로열화를 평가한 연구의 결과를 보고한다. 초음파의 비선형성은 입사 주파수 성분의 크기와 2차 고조파 성분의 크기 비로 정의되는 상대적 비선형 파라미터에 의해 측정된다. 실험을 위해 접촉식 탐촉자를 이용한 계측시스템을 구성하였으며, 안정된 비선형 파라미터의 측정이 가능하도록 계측시스템 자체에서 발생하는 고조파 성분을 억제하고 계측 조건이 일관되게 유지되도록 하였다. 시편으로는 SUS316L 재료의 두 가지 피로열화 시편이 사용되었다. 하나는 봉형으로 회전굽힘피로를 가한 시편이고, 다른 하나는 판형으로 인장피로를 가한 시편이다. 피로조건은 모두 고주기 피로에 해당한다. 전자는 피로가 누적되는 과정에서 비선형 파라미터가 어떻게 변화하는지를 관측하는데 이용되었고, 후자는 피로를 가한 후 피로응력이 집중되는 위치와 그 외 위치에서의 비선형 파라미터의 차이를 관측하는데 이용되었다. 측정결과 비선형 파라미터는 두 가지 시편 모두에서 피로도와 강한 상관성을 갖는 것으로 나타났다.

Abstract: This study evaluated the fatigue degradation in a SUS316L specimen using the nonlinear ultrasonic method. The nonlinearity of the ultrasonic wave was estimated by a relative nonlinear parameter defined as the ratio of the amplitudes for the fundamental wave to the second harmonic wave. In the experiment, a measurement system with contact transducers was constructed; reliable measurements were assured by keeping measurement conditions consistent and reducing extra harmonics generated in the measurement system. Two types of SUS316L specimen were used in experiments; a rotating bar fatigue specimen and a tensile fatigue specimen. The fatigue condition used was high cycle fatigue. The former specimen had a cylindrical shape and was used to observe the change in the nonlinear parameter after fatigue accumulation in a specimen. The latter was a plate-shaped specimen and was used to confirm the change in the nonlinear parameter at the position where the fatigue stress was concentrated. The measured nonlinear parameter showed a strong correlation to the damage level in both fatigue tests.

1. 서 론

초음파의 비선형적 거동은 부식, 피로 등 열화에 의한 재료의 미시구조적 변질을 평가할 수 있는 인자로 주목받고 있다.⁽¹⁻⁷⁾ 탄성과 비선형성의 특징적 현상은 탄성파가 재료를 통해 전파하면서 기본주파수 성분 이외에 고조파 성분이 발생하는 것이며, 따라서 비선형성은 전파된 신호의 기본

주파수 성분과 2차 고조파 성분의 크기의 비율로부터 측정할 수 있는데 이 비율을 상대적인 비선형파라미터 β' 로 정의한다.^(2,7)

이론적인 비선형 파라미터는 재료에 의해 발생하는 고조파 성분만이 고려되어야 하지만 실제에서는 재료에 의한 고조파 성분뿐만 아니라 측정 시스템 등에 의해 발생된 고조파 성분까지 포함된다. 따라서 실제로 측정되는 비선형성은 순수 재료의 비선형성보다 과다하게 평가될 수 있으며, 일반적으로 재료의 비선형성에 의해 발생되

† Corresponding Author, kyjhang@hanyang.ac.kr

는 고조파의 크기가 매우 작기 때문에 측정결과에 큰 영향을 미칠 수 있다.^(6,8)

본 연구에서는 일반적으로 초음파 비파괴검사에 사용되는 접촉식 탐촉자를 이용하는 경우를 고려하여 측정시스템에서 발생하는 고조파성분을 줄이고자 하였다. 시스템 인자에는 접촉압력, 인가전압 그리고 진폭분해능 등이 고려될 수 있는데, 접촉압력과 인가전압에 대해서는 이미 연구되어진 바 있다.^(6,8) 따라서 여기서는 진폭 분해능에 의한 영향을 추가적으로 검토하였다. 또 이를 바탕으로 개선된 비선형파라미터 측정 시스템을 구성하였다.

한편 초음파의 비선형 특성은 재료의 격자구조나 전위와 같은 미시구조나 소성변형 등과 관련되며, 재료의 피로가 증가할수록 비선형파라미터가 커진다는 것이 알려져 있다.^(9,10) 본 연구에서는 개선된 측정시스템을 이용하여 SUS316L 재료를 대상으로 음향 비선형성과 피로와의 상관성을 분석하고자 하였다. 이를 위해 인위적으로 피로를 가한 SUS316L 피로시험편을 제작하여 피로에 따른 비선형파라미터의 변화를 분석하였다.

SUS316L은 연신율이 좋고 충격에 강하며, 부식 저항이 크기 때문에 원자력 설비 등 고압 환경이나, 해수 접촉부품 등으로 널리 사용되고 있다. 하지만 가혹한 환경 조건에 의해 지속적인 피로가 발생하고 이로 인한 파손이 산업분야 뿐만 아니라 인명에도 큰 위협이 될 수 있기 때문에 안전 관리를 위해서 이 재료의 피로손상평가가 중요하다.

그런데 저주기 피로에서는 비선형파라미터의 변화가 뚜렷한데 반해 고주기 피로에서는 그 변화가 미미하다고 알려져 있다. 이는 상대적으로 큰 응력을 받는 저주기 피로에서는 재료에 큰 변형이 생기지만 작은 응력을 받는 고주기 피로에서는 그렇지 않기 때문이다. 본 연구에서는 개선된 측정시스템을 이용하여 이런 고주기 피로열화에 대한 평가를 시도하였다. 개선된 측정시스템에서는 시스템 의존적 고조파 성분의 발생을 최대한 억제하였으므로 고주기 피로에 의한 비선형파라미터의 미미한 변화도 측정할 수 있을 것으로 기대되기 때문이다.

그리고 피로에 의한 손상은 피로 횟수에 따른 손상의 누적과 재료의 형상에 따른 국부적인 손

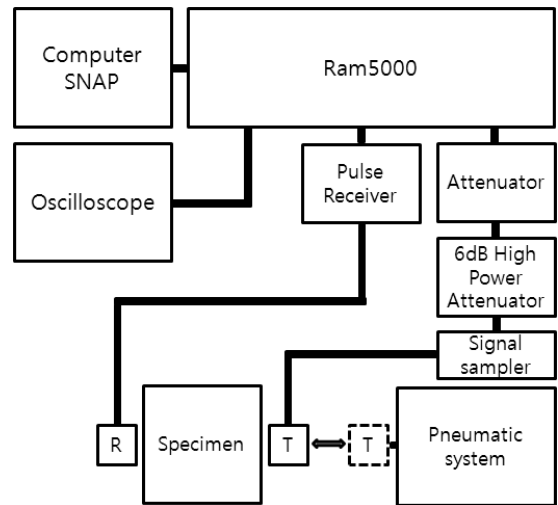


Fig. 1 Block diagram of the nonlinear parameter measurement system

상의 집중으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 회전굽힘피로시험편과 인장피로시험편의 두 가지 형태의 피로시험편을 준비하였다. 회전굽힘피로시험편에서는 동일 시험편에 피로를 중첩시키면서 피로 횟수에 따른 비선형파라미터의 변화를 측정하였고, 인장피로시험편에서는 형상에 따른 응력의 차이에 의한 위치별 손상과 비선형파라미터의 변화 관계를 분석하였다.

2. 실험방법

본 논문에서는 실험 중 발생할 수 있는 외부 인자의 영향을 줄이고 안정적으로 재료의 비선형파라미터를 측정하기 위해서 Fig. 1과 같이 시스템을 구성하였다. 신호의 송신을 위해 RAM5000(미국, RITEC)을 사용하였다. 탐촉자는 시험편의 크기에 따라 두 가지 조합을 사용하였다. 먼저 회전굽힘피로시험에서는 송신에는 2.25 MHz, 수신에는 10 MHz의 중심주파수를 가지는 직경이 6.35 mm인 탐촉자를 이용하였고, 송신 탐촉자에는 2.5 MHz 10 주기의 고전압 톤버스트(tone-burst) 신호를 인가했다. 그리고 인장피로시험에서는 송신에는 5 MHz, 수신에는 10 MHz의 중심주파수를 가지는 직경이 9.5 mm인 탐촉자를 이용하였고, 송신 탐촉자에는 5 MHz 10 주기의 고전압 톤버스트(tone-burst) 신호를 인가했다. 또 탐촉자와 시험편 사이의 접촉압력을 일정하게 유지시키기 위하여 공압조절장치를 이용하였다.⁽⁶⁾

신호처리 기법으로는 FFT와 RAM5000에서 제공하는 수퍼헤테로다인법을 사용하였다. 두 측정 기법으로부터 수신된 신호의 기본 주파수 성분의 진폭과 2차 고조파 성분의 진폭을 측정하고 이로부터 다음과 같이 정의 되는 β' 을 구하였다.⁽¹⁻⁶⁾

$$\beta' = \frac{A_2}{A_1^2} \quad (1)$$

여기서 A_1 은 기본주파수 성분의 크기이고 A_2 는 2차 고조파 성분의 크기이다. 상대적인 비선형 파라미터 β' 은 이용된 초음파의 전파거리와 주파수가 동일한 경우 그 변화량으로부터 재료의 상대적인 변질 정도를 평가할 수 있다. 단, 이 경우 측정조건이 동일해야 한다. 그렇지 않을 경우 측정되는 β' 은 재료의 변질에 의해서만이 아니라 측정조건에 의존하는 변화를 포함하게 되어 β' 의 변화로부터 재료의 변질을 1:1로 평가할 수 없게 된다.

그런데 기존의 연구에서 β' 의 측정에 영향을 미치는 주요 측정조건으로 탐촉자 인가전압과 탐촉자와 시편과의 접촉압력에 대해서 분석한 바 있다.⁽⁸⁾ 본 연구에서는 그 결과를 활용하여 적정 인가전압과 접촉압력을 인가하였다. 본 연구에서는 추가적으로 디지털화 과정에서의 진폭분해능에 대해서 검토하였다. 그 결과는 다음 절에서 별도로 분석하였으며, 결과적으로 수신장치의 가용 최대 분해능을 사용하여 분해능에 의한 고조파의 유실을 억제하였다.

3. 진폭분해능의 영향 분석

수신신호의 디지털화 과정에서 진폭분해능에 의해 여분의 고조파가 발생할 수 있다. Fig. 2는 아날로그 신호의 디지털화 과정을 예시한 것이다. 분해능보다 작은 신호의 변화는 검출되지 않기 때문에 신호의 유실이 발생한다. 만일 측정하려는 고조파의 크기가 진폭 분해능에 비해 작은 경우 디지털화 과정에서 생긴 신호의 유실로 인해 측정되는 고조파 성분의 크기가 달라질 수 있다. 따라서 비선형 평가 과정에서 수신 장치의 진폭분해능에 의한 비선형성 변화가 고려되어야 한다. 본 연구에서는 시뮬레이션과 실험을 통해 진폭분해능이 비선형성 측정에 미치는 영향을 검증하였다. 시뮬레이션을 위해 기본주파수가 5

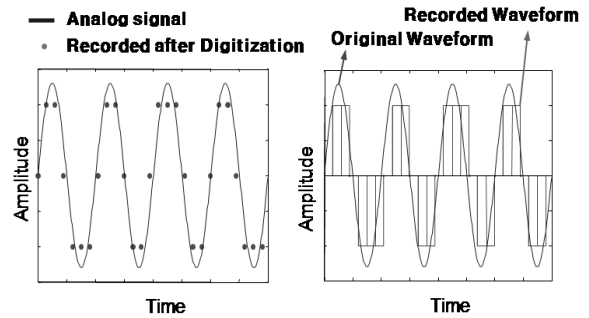


Fig. 2 Example of signal distortion in the digitizing process

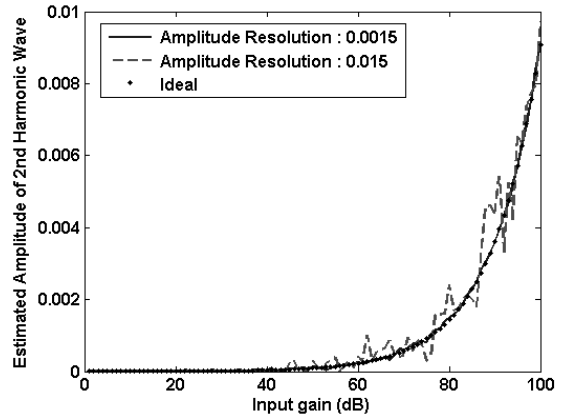


Fig. 3 Estimated amplitudes of the second harmonic wave for different amplitude resolution when the input gain varies

MHz, 고조파가 10 MHz인 신호를 생성하여 사용하였다. 기본 주파수의 크기는 0부터 1까지 변화하며, 고조파의 크기는 기본주파수의 제곱의 1/100로 생성되었다.

Fig. 3은 동일한 신호에 대해 진폭분해능을 달리하여 측정한 시뮬레이션 결과이다. 분해능은 각각 실선이 0.0015, 파선이 0.015이다. 점 표식은 분해능에 영향을 받지 않는 이론값이다. 시뮬레이션 결과 분해능이 낮은 파선이 A/D 변환시 신호의 왜곡이 크기 때문에 측정된 고조파 크기의 변동 폭이 크고, 분해능이 높은 실선에서 변동이 작은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 임의의 시편에 대해 수신장치의 분해능을 달리하여 측정한 실험 결과이다. 분해능은 각각 실선이 0.06 V, 파선이 0.015 V이다. 시뮬레이션 결과에서 예측하였듯이 실험결과에서도 분해능이 낮을수록 변동폭이 크고, 분해능이 높을수록 변동폭이 작다.

이로부터 A/D 변환의 진폭분해능이 비선형 파

Table 1 Mechanical properties of SUS316L

Mechanical property	Young's Modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Fatigue strength (MPa)	Elongation (%)
value	193	485	170	170	40

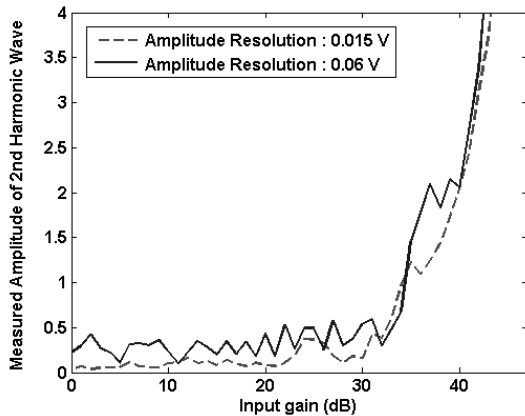


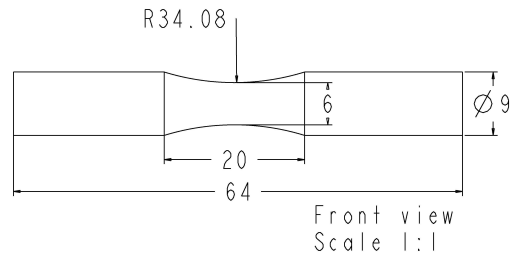
Fig. 4 Measured amplitudes of the second harmonic wave for different amplitude resolution when the input gain varies

라미터의 측정에 영향을 미칠 수 있으며, 진폭분해능이 높을수록 그 영향이 작다는 것을 확인할 수 있다. 추가적인 시뮬레이션 분석결과 적어도 고조파 성분의 크기가 진폭분해능의 5배 이상일 때 비선형 파라미터의 측정 신뢰도가 보장될 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 이것은 하나의 참고 사항이며 실제 사용 실험장치나 환경에 따라 달라질 수 있다. 본 연구에서는 가용 최대분해능을 사용함으로써 진폭분해능의 영향을 최대한 억제하였다.

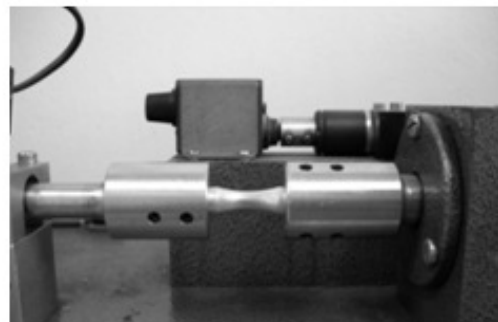
4. 초음파 비선형 특성을 이용한 SUS316L 시험편의 회전굽힘 피로 평가

4.1 회전굽힘피로시험

이 실험에서는 시험편에 회전굽힘피로를 가하고 피로에 따른 비선형성을 측정하여 피로도와 비선형성과의 관계를 실험적으로 검증하고자 하였다. 기존의 각 시험편에 피로를 다르게 가하여 비선형파라미터를 측정하던 실험들과 달리⁽⁷⁾ 동일 시험편에 피로를 누적시키며 측정하는 방법을 택하였다. 단, 피로 시험기에서 시험편을 탈부착 하는 과정을 반복해야 하기 때문에 탈부착시 피로의 조건이 달라질 수 있다. 따라서 탈부착시 비교적 일정한 조건을 유지하기 편리한 회전굽힘피로시험을 선택하였다. 또 초음파



(a) Specimen



(b) Fatigue test machine

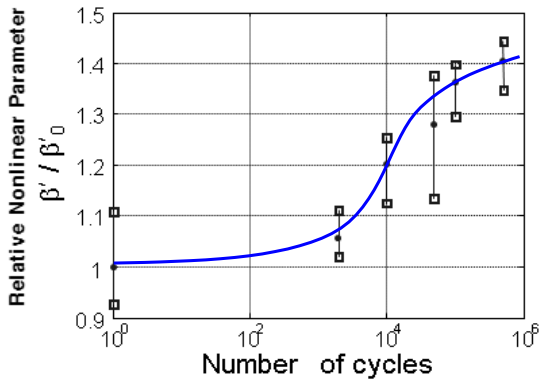
Fig. 5 Rotating bar bending fatigue testing

측정에서 시편형상의 영향을 적게 받을 수 있는 환상면체형 시험편을 준비하였다.

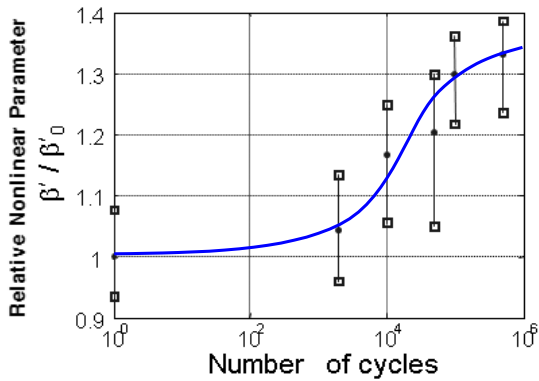
Table 1은 SUS316L의 물성을 나타낸다.⁽⁸⁾ 시편의 형상은 Fig. 5(a)와 같이 가운데가 라운드형이다. 회전 굽힘 피로를 받기 때문에 전 방향으로 인장과 압축이 반복작용하며 피로를 유발하고 표면으로 갈수록 큰 응력을 받는다. 시험 규격은 KS B ISO 1143을 따랐으며 시험기는 Fig. 5(b)의 회전바 굽힘 시험기를 사용하였다.

로드는 시편의 왼쪽에 결합된 축에 작용하며, 120 Hz의 회전속도로 작동시켰다. 피로시험기의 로드는 고주기 피로를 가하기 위해 25 N을 주었는데, 이때 시편 중앙부의 축방향 표면 최대응력은 176 MPa이다. 그리고 0, 2×10^3 , 10^4 , 5×10^4 , 10^5 , 5×10^5 의 반복횟수에서 비선형파라미터를 측정하였다.

비선형 파라미터는 시편의 좌우 양단에서 초음파를 투과시켜 측정하였다.



(a) Measured by using FFT method



(b) Measured by using heterodyne method

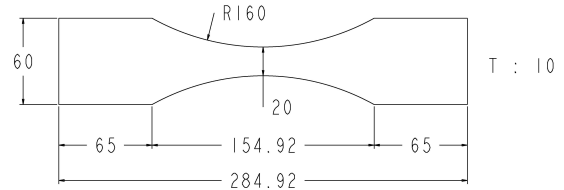
Fig. 6 Nonlinear parameter measured by two methods at different fatigue cycles

4.2 실험 결과

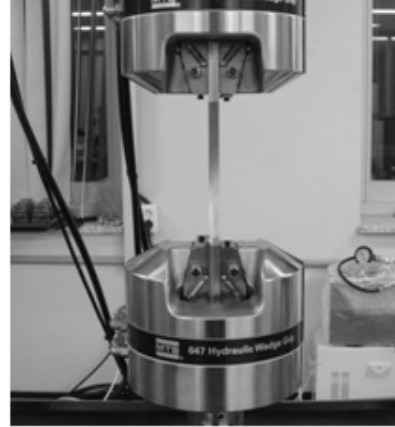
실험결과는 Fig. 6에 보여주는데, 피로를 가하지 않은 초기상태에서 측정된 비선형 파라미터값 β'_0 를 기준으로 상대적인 변화율을 나타내고 있다. (a)는 FFT를 이용한 측정결과이고, (b)는 수퍼헤테로다인법을 이용한 측정결과이다. 두 측정결과는 유사하며, 비선형파라미터가 피로가 중첩될수록 증가하는 것을 볼 수 있다. 초기 값과 최종 값의 크기를 비교해 보면 약 40% 정도 증가하였음을 알 수 있다.

또 작은 응력으로 피로시험을 했으므로 변형이 서서히 일어나게 되었고, 따라서 비선형파라미터가 서서히 증가하고 있으며, 이는 기존의 고주기 피로에서의 비선형파라미터 경향과 일치한다.⁽⁴⁾

한편 FFT 측정결과가 헤테로다인법에서 보다 적은 변동을 나타내었다. 이는 FFT를 이용하는 방법에서는 수신신호의 A/D변환시 진폭분해능을 인위적으로 제어할 수 있지만, 헤테로다인법은 고조파 성분의



(a) Specimen



(b) Fatigue test machine

Fig. 7 Tensile fatigue testing

크기를 하드웨어적으로 검출하고 그 결과를 장치내부에서 정해진 진폭분해능으로 읽어내기 때문에 진폭분해능의 영향을 제어할 수 없었던 때문으로 사료된다.

5. 초음파 비선형 특성을 이용한 SUS316L 시험편의 인장피로 평가

5.1 인장피로시험

위치에 따른 피로와 비선형성의 상관성을 측정하기 위하여 판재형 시험편을 준비하였다. 시험편의 형상은 Fig. 7(a)와 같이 가운데가 라운드형 모양이다. 따라서 시험편의 중앙부에 최대 응력을 받게 되고 좌우 끝단으로 가면서 위치별로 다른 손상을 받게 될 것이다.

피로시험 규격은 ASTM E 466을 따랐으며 시험기는 Fig. 7(b)의 인장피로 시험기를 사용하여 10 Hz의 주기, 0.1의 응력비로 작동시켰다. 피로하중은 응력 집중부에서의 최대 응력이 200 MPa이 되도록 하였다. 앞의 실험과 마찬가지로 고주기 피로로써 1.5×10^6 횟수까지 피로를 가하였다.

Fig. 8은 시험편의 형상 정보와 SUS316L의 물성을 이용하여 1.5×10^6 의 피로사이클에서 시험편내의 상대

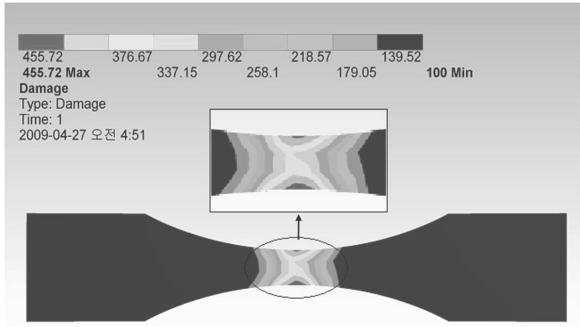
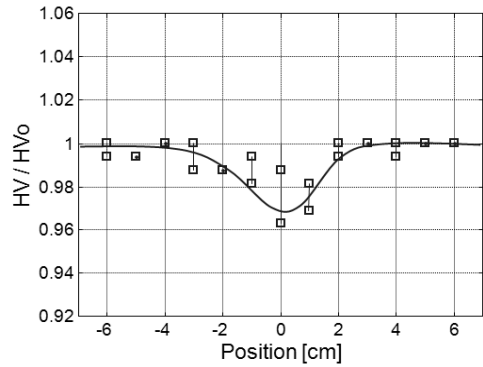
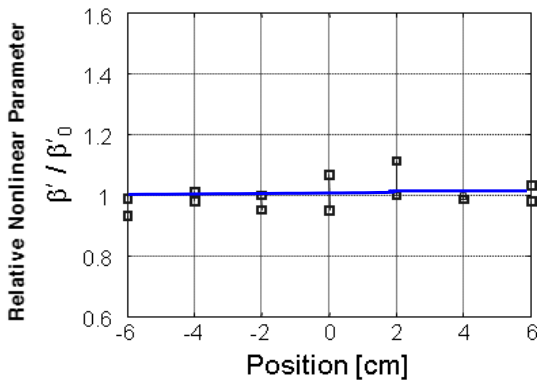


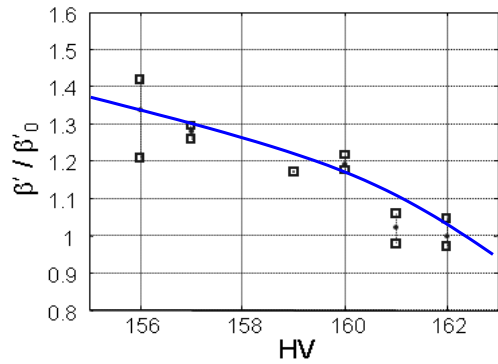
Fig. 8 FEA analysis of damage deviation



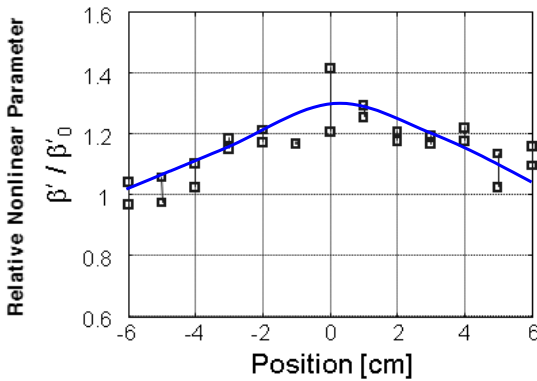
(a) Vickers hardness distribution



(a) None fatigued specimen



(b) Hv vs. nonlinear parameter



(b) 1.5×10⁶ cycle fatigued specimen

Fig. 9 Relative nonlinear parameter measured at different positions before and after the fatigue test

적 피로손상분포를 FEA 해석한 결과이다. 응력 집중부에서 손상이 집중적으로 발생하는 것을 예상할 수 있다. 이와 같은 차이가 비선형 파라미터 측정에서도 나타나는지를 확인하기 위해 동일 시편 내에서 위치별 비선형 파라미터를 측정하였다. 비선형 파라미터는 각 측정위치에서 시편 두께 방향으로 초음파를 투과시켜 측정하였다.

Fig. 10 Hardness measured at different positions of the fatigued specimen and its correlation with the measured nonlinear parameter

5.2 실험결과

Fig. 9는 피로를 가하지 않은 시편과 피로를 가한 시편에서 시편의 중앙으로부터 좌우 6 cm까지 1 cm 간격으로 위치를 달리하며 비선형 파라미터를 측정한 결과이다. 피로를 가하지 않은 초기 시편의 가장자리에서 측정된 비선형 파라미터값 β'_0 를 기준으로 측정 위치별 상대적인 변화율을 나타내고 있다.

피로를 가하지 않은 시편은 시편의 전 구간에 걸쳐 위치와 무관하게 비슷한 비선형 파라미터를 갖는다. 이는 Fig. 9(b)의 피로를 가한 시편에서 손상을 거의 받지 않는 가장자리 부분의 비선형 파라미터와 비슷한 값으로써 재료가 손상 받지 않은 상태에서의 비선형 파라미터 값이다. Fig. 9(b)에서는 시편의 중심으로 갈수록 비선형 파라미터가 크게 나타난다. 중심부와 가장자리의 비선형 파라미터의 차이는 약 30% 정도이다. 시편의 위치에 따라서 비선형 파라미터가 차이를 보이는 것은 Fig. 8의 FEA 시뮬

레이션에서 예측한 것과 동일하게 응력 집중부에서 재료의 피로열화 손상이 크기 때문이다.

다음으로 위치에 따른 물성변화를 확인하기 위해 비커스 경도를 측정하였다. 그 결과는 Fig. 10에 시편 가장자리의 경도값을 기준으로한 상대적인 변화율로 나타낸다. (a)는 시편내 위치별 경도 측정결과로 중심부에서 경도가 작아지는 것을 볼 수 있다. 이는 고주기 피로에서는 미세구조 변질에 의해 슬립이 발생하고 조대화되면서 강도특성이 나빠지며, 경도가 작아진다는 연구결과와 일치한다.^(10,11)

Fig. 10(b)는 경도와 비선형 파라미터와의 상관관계를 보여준다. 강한 상관관계를 보여주고 있으며, 비선형 파라미터를 이용하여 고주기 피로열화도 평가할 수 있음을 확인시켜 준다. 또 경도는 최대 5% 정도까지 변화하였는데, 비선형파라미터는 30% 정도까지 변화하였다. 따라서 비선형파라미터가 수배 더 민감하다고 할 수 있다.

6. 결 론

이 논문에서는 SUS316L 재료의 고주기 피로손상과 초음파의 비선형특성과의 상관성을 연구하였다. 이를 위한 측정시스템이 구축되었으며, 피로손상시편을 회전굽힘 피로시편과 인장피로시편의 두 가지 형태로 준비하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 일반적으로 재료의 고주기 피로에 따른 비선형 파라미터의 변화는 미미하며, 따라서 이를 정밀하게 측정하기 위해서는 재료와는 무관하게 발생하는 측정시스템 의존적 고조파 성분을 최대한 억제할 필요가 있다. 본 연구에서는 이와 같은 측정시스템 의존적 요소 중 기존의 연구에서 밝혀진 인가전압과 탐촉자 접촉압력 외에 진폭분해능의 영향을 분석하였으며, 진폭분해능이 높을수록 정밀한 비선형 파라미터의 측정이 가능함을 알 수 있었다.

(2) 회전바 굽힘피로시험에 의해서 시편에 피로를 중첩시키면서 피로의 증가에 따른 비선형 파라미터의 변화를 실험한 결과 비선형파라미터가 서서히 증가하는 경향을 나타내었으며, 이는 기존의 타 재료에 대한 연구결과와 유사하였다. 비선형 파라미터는 본 연구에서 사용된 피로시험 조건에서 초기보다 약 40% 증가하였다.

(3) 시편내 손상분포가 다르게 만들어진 인장피

로시편에 대한 실험 결과에서는 응력이 집중되는 중앙부에서 비선형 파라미터가 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 FEA 해석에 의한 손상분포 경향과 일치하였다. 중앙부에서의 비선형 파라미터는 외곽부에 비해 약 30% 정도 증가하였다. 또한 비커스경도 측정결과를 측정된 비선형파라미터와 양호한 상관성을 보였으며, 따라서 비선형 파라미터의 변화가 재료의 열화에 따른 물성의 변화를 잘 반영한다는 것을 확인할 수 있었다.

후 기

이 연구는 한국 과학기술부의 원자력연구개발과제의 일환인 미세열화손상 진단 신기술 개발과제의 후원으로 이루어졌습니다. (2009-0062438)

참고문헌

- (1) Na, J. K., Cantrell, J. H. and Yost, W. T., 1996, "Linear and Nonlinear Ultrasonic Properties of Fatigued 410Cb Stainless Steel," *Rev. of Prog. in QNDE*, Vol. 15, pp.1347~1351.
- (2) Jhang, K. Y., 2000, "Applications of Nonlinear Ultrasonics to the NDE of Material Degradation," *IEEE UFFC*, Vol. 47, No. 3, pp.540~548.
- (3) Jhang, K. Y., Kim, K. C. and Yamawaki, H., 2001, "The Evaluation of Partially Degraded Material using Nonlinear Propagation Characteristics of Ultrasonic Wave," *KSME Journal A*, Vol. 25, No. 2, pp. 214~219.
- (4) Jeong, H., Nahm, S. H., Jhang, K. Y. and Nam, Y. H., 2002, "Evaluation of Fracture Toughness Degradation of CrMoV Rotor Steels based on Ultrasonic Nonlinearity Measurements," *KSME International Journal*, Vol. 16, No. 2, pp. 147~154.
- (5) Choi, Y. H., Kim, H. M., Jhang, K. Y. and Park, I. K., 2002, "Application of Nonlinear Acoustic Effect for Evaluation of Degradation of 2.25Cr-1Mo Steel," *Journal of KSNT*, Vol. 22, No. 2, pp. 170~176.
- (6) Lee, I. H., Son, D. S., Choi, I. H., Lee, T. H. and Jhang, K. Y., 2007, "Development of Pressure Control System of Contact Transducer for Measurement of Ultrasonic Nonlinear Parameter,"

- Journal of KSNT*, Vol. 27, No. 6, pp.575~580.
- (7) Kim, J. Y., Laurence J. Jacobs, Qu, J. and Littles, J.W., 2006, "Experimental Characterization of Fatigue Damage in a Nickel-Base Superalloy Using Nonlinear Ultrasonic Waves," *J. Acoust. Soc. Am*, Vol. 120, Issue. 3, pp.1266~1273.
- (8) Jhang, K. Y., Choi, I., Lee, J. and Kwon, G., 2008, "Effect of System Dependent Harmonics in the Measurement of Ultrasonic Nonlinear Parameter by Using Contact Transducers," *Journal of KSNT*, Vol. 28, No. 4, pp.358~363.
- (9) Cantrell, J. H. and Yost, W. T., 2001, "Nonlinear Ultrasonic Characterization Of Fatigue Microstructures," *International Journal of Fatigue*, Vol. 23, pp.487~490.
- (10) Oruganti, R.K., Sivaramanivas, R., Karthik, T.N., Kommareddy, V., Ramadurai, B., Ganesan, B., Nieters, E.J., Gigliotti, M.F., Keller, M.E. and Shyamsunder, M.T., 2007, "Quantification of Fatigue Damage Accumulation Using Non-linear Ultrasound Measurements," *International Journal of Fatigue*, Vol. 29, Issue. 9-11, pp.2032~2039.
- (11) Ye, D. Y., Wang, D. J. and An, P., 1996, "Characteristics of the Change in the Surface Microhardness During High Cycle Fatigue Damage," *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 44, pp179~181.