

초음파 감쇠 측정을 이용한 Al6061-T6 열화 평가

Degradation Assesment of Aluminum Alloy 6061-T6 Using Ultrasonic Attenuation Measurements

김훈희*, 강토*, 서무경*, 송성진*[†], 김학준*, 김경조**, 김용범**

Hun-Hee Kim*, To Kang*, Mu-Kyung Seo, Sung-Jin Song*[†], Hak-Joon Kim*,
Kyung-Cho Kim** and Young-Bum Kim**

초 록 열화 정도를 예측하기 위한 비파괴기법으로 초음파기법이 널리 적용되고 있다. 초음파 속도와 감쇠 특성은 일반적으로 금속재료의 물성 변화에 따라 변화하기 때문에 초음파 속도와 감쇠 특성을 이용하여 금속재료의 열화 정도를 간접적으로 예측할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 반복하중으로 인하여 피로파괴 발생 가능성이 높은 볼트, 리벳 접합의 구조용재 및 선박 차량에 사용되고 있는 Al6061-T6을 피로수명의 0%, 55%, 70%, 85%인 시험편을 제작하였고, 가공된 시험편의 감쇠 특성을 이용하여 측정된 열화 이미지로 Al6061-T6의 건전부와 열화부를 판단하였으며, 건전부와 열화부의 감쇠 특성 차이를 계산하여 Al6061-T6의 열화 진행 정도를 평가하였다.

주요용어: Al6061-T6, 감쇠, 초음파, 열화, 피로

Abstract Ultrasonic methods are widely used to degradation assesment. Remaining-life cycle of metal can be estimated by ultrasonic parameters because ultrasonic velocity and attenuation are affected by change of material properties with accumulated fatigue in the metal. Therefore, in this study, we will estimate overall change of material properties by 2D C-scan image. Fatigued aluminum alloy 6061-T6 samples from 0 to 85% were prepared for evaluating fatigue life cycle. Also, degraded image of materials using attenuation is proposed to estimate degree of material degradation for determining degraded area of fatigued samples. Finally, we will predicts process pf degradation with measured attenuation of fatigued aluminum alloy 6061-T6 samples.

Keywords: Al6061-T6, Attenuation, Ultrasonic, Degradation, Fatigue

1. 서 론

볼트, 리벳 접합의 구조용재, 선박, 차량, 육상 구조물 등에 사용되고 있는 Al6061-T6재료는 열처리 합금으로 내식성, 용접성이 뛰어나 널리 사용되고 있으나, 반복하중으로 인하여 피로파괴 발생의 위험성이 잔존하기 때문에 반복 응력으로 인하여 발생하는 피로파괴를 방지하기 위해서 구조물의 건전성을 확보할 필요성이 있다.

피로파괴를 예측하기 위하여 여러 가지 열화

평가기법들이 제안되었으며, 제안된 열화 평가 기법은 파괴기법, 비파괴기법이 있으며, 비파괴 기법 중에서는 초음파기법이 주로 적용되고 있다. 국내의 경우 열화 정도를 예측하기 위하여 파괴적인 방법이 주로 적용되고 있으며 [1,2], 비파괴기법을 이용한 열화 평가기법으로는 초음파, 음향방출시험 등이 적용되고 있으나 [3,4] 해외 연구와 비교하여 연구실 적이 미비한 편이다. 해외의 경우 비선형 초음파, 초음파 감쇠 특성, 음향방출시험, 와전류탐상시험 등 많은 비파괴기법

[접수일: 2012. 3. 14, 수정일: (1차: 2012. 12. 4, 2차: 2013. 2. 4) 게재확정일: 2013. 2. 7] *성균관대학교 기계공학부, **한국원자력안전기술원 †Corresponding Author: School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea (E-mail: sjsong@skku.edu)

을 이용하여 피로에 따른 열화 분포 및 열화의 진척 정도를 판단하는 기법들이 제안되어 있으나, 아직까지 피로 한도에 따른 열화를 영상화하는 기법에 관한 연구보고는 미흡하며, 영상화된 열화 이미지를 이용하여 열화 분포 및 열화의 진행 정도를 평가하는 기법은 학계에 보고된 적이 없다.

본 연구에서 적용되는 Al6061-T6의 경우 반복 응력을 받을 때 슬립띠가 발생하며, 슬립면에 국부적으로 전위 밀도가 증가하며 [5], 전위 밀도의 증가는 공공생성으로 이어지며, Al6061-T6의 파단면에는 많은 공공을 확인할 수 있다 [6]. 반복 피로에 의해서 발생하는 슬립띠 (slip-band)와 공공 (void)은 초음파 전파 특성에 영향을 줄 것으로 예상된다.

따라서, 본 연구에서는 초음파 감쇠 특성을 이용하여 Al6061-T6의 피로 정도를 확인할 수 있는 열화 영상화기법을 제시하였으며, 제안된 영상화 기법을 이용하여 Al6061-T6의 열화부와 건전부를 판단하고, 건전부와 열화부의 감쇠 특성 차이를 계산하여 Al6061-T6의 열화 진행 정도를 평가하였다.

2. 감쇠 이미지 모델

감쇠 이미지를 예측하기 위해서는 Fig. 1에서 첫 번째 저면 반사 신호 $V_0^{BS1}(\omega)$ 와 두 번째 저면 반사 신호 $V_0^{BS2}(\omega)$ 에 발생하는 감쇠를 계산하여야 한다. 하지만, 저면 반사 신호에는 빔 퍼짐, 시스템 계수, 매질간에 초음파가 전파함에 따라 투과, 반사되는 비율 등이 고려되어야 하며, 식(1)은 첫 번째 저면 반사 신호에 포함되는 초음파 전파 특성 정보를 나타내었다.

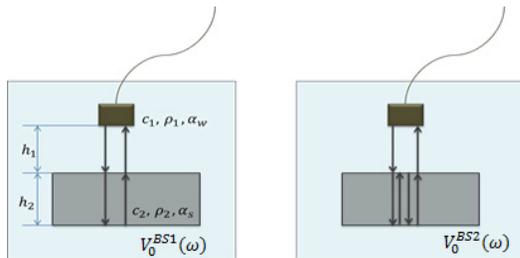


Fig. 1 A schematic diagram for measurement of attenuation coefficients

$$V_0^{BS1}(\omega) = \beta(\omega) T_{12} R_{21} T_{21} e^{2ik_1 h_1} e^{2ik_2 h_2} e^{-2\alpha_1 h_1} e^{-2\alpha_2 h_2} D_p \left(\frac{K_{P1} a^2}{2D_{BS1}} \right) \quad (1)$$

식(1)에서 $\beta(\omega)$ 는 시스템 효율계수이며, T_{12} , R_{21} 은 초음파가 매질간에 전파할 때 발생하는 반사와 투과계수를 나타낸 것이다. α_1 은 물에서의 감쇠계수, α_2 는 시험편의 감쇠계수를 나타내며, $D_p \left(\frac{K_{P1} a^2}{2D_{BS1}} \right)$ 는 빔 퍼짐을 나타낸다. 식(2)는 식(1)에서의 첫 번째 저면 반사 신호와 두 번째 저면 반사 신호를 이용하여 시험편에서의 감쇠계수를 나타낸 것이다.

$$\frac{1}{2h_2} \left| \frac{R_{21} D_p \left(\frac{k_{p1} a^2}{2D_2} \right) V_{BS1}(\omega)}{D_p \left(\frac{k_{p1} a^2}{2D_1} \right) V_{BS2}(\omega)} \right| \quad (2)$$

식(2)를 이용하여 시험편의 열화 의심 영역 포인트마다 감쇠계수를 측정하여 시험편의 감쇠 이미지를 나타낼 수 있다.

3. 실험

3.1. 시험재료

열화 정도를 평가하기 위해서, 다른 금속에 비해 경량이며, 고강도인 알루미늄 6061-T6을 본 연구에서 사용하였으며, 알루미늄 6061-T6은 내식성이 강하며 세계적으로 항공기나 선박, 철도 등의 수송수단의 구조물에 많이 사용되고 있다.

선정된 재료는 Fig. 2와 같이 시험편을 제작하였으며, 시험재료를 가공하기 위해 사용된 장비는 Fig. 3의 100 MPa급 Instron 8081 만능시험기를 사용하였다.

사용된 재료의 항복강도는 276 MPa이며, 평균 응력을 124 MPa로 0~248 MPa을 10 MHz 주기로 피로시험을 수행하였으며, 시험편은 신재, 피로 수명의 55%, 70%, 85%로 시험편을 제작하였다. Fig. 4는 제작된 시험편이다.

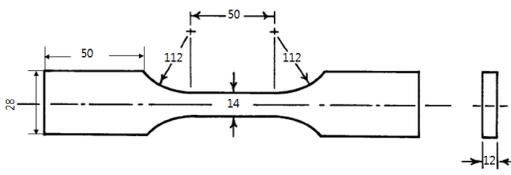


Fig. 2 A design of Al6061-T6 specimen



Fig. 3 Photo of Instron 8081 machine for fatigue testing



Fig. 4 Al6061-T6 specimen

3.2. C-Scan 실험장비

본 연구에서 초음파 감쇠 특성을 확인하기 위해서 C-scan 시스템을 이용하였으며, C-scan을 사용함으로써 실제 재료열화에 따른 초음파 인자 데이터들을 수천 개의 데이터를 취합함으로써 초음파 인자값의 신뢰성을 확보하였다. Fig. 5는 본

연구에서 사용한 C-scanner이다. 본 장비는 주파수 초음파 발생을 위하여 PR 5800 pulser / receiver (Panametrics, 최대주파수: 200 MHz)를 이용하였으며, 초음파 신호의 주파수 분석을 수행할 수 있고 충분한 분해능을 가진 고속 A/D 보드 (sampling frequency: 200 MHz)를 이용하였다.

Fig. 5에 보인 고주파수 초음파 실험장치의 제어 및 초음파신호 획득과 데이터 분석의 기초 자료인 C-scan image 데이터의 구현을 위한 프로그램 (사용언어: Borland C++, 사용 환경: Windows XP)을 사용하였다. 이러한 실험장치를 이용하여 각 시험편의 열화에 따른 신호를 획득하고, scanning 함으로써 실험을 실시하였다. 높은 분해능을 위해 중심주파수가 20 MHz, 직경 0.25 인치인 고주파 수침형 원형탐촉자를 사용하였으며, 본 탐촉자를 이용하여 초음파 감쇠 특성을 측정하였다.

피로시험편은 C-scan을 이용하여 시험편의 x, y축으로 0.5 mm 간격으로 초음파신호를 취득하였으며, 취득된 신호를 이용하여 image data 및 피로시험편의 감쇠 특성을 측정하였다. 이때 측정된 신호는 데이터의 신뢰성을 위하여 각 검사 포인트마다 여러 번의 실험값을 산술 평균하였으며, 샘플링 주파수를 125 MHz로 설정하였다.



Fig. 5 Photo of ultrasonic scanner system

4. 실험 결과 및 고찰

4.1. C-Scan 저면 반사 신호 이미지

Fig. 6은 C-scan을 이용하여 모재시험편의 Fig. 7의 첫 번째 저면 반사 신호를 이미지화해서 표

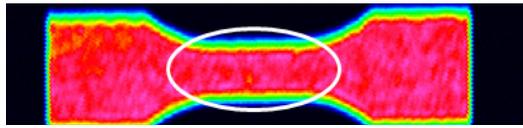


Fig. 6 C-scan image of intact specimen

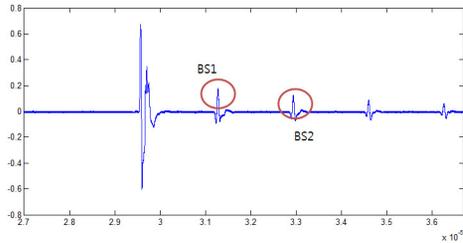


Fig. 7 Obtained measurement multiple reflection signal from the specimen

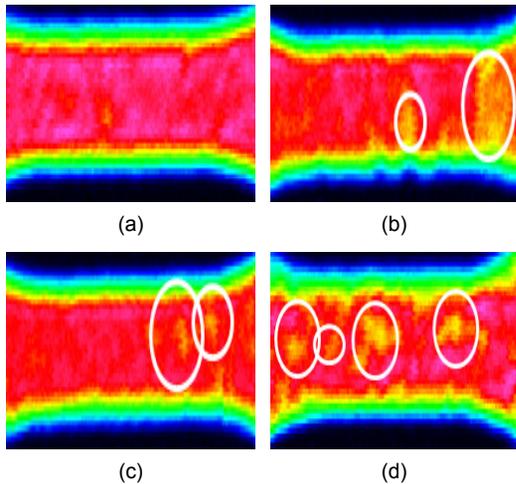


Fig. 8 C-scan image of fatigued specimen with various fatigue cycle (a) intact specimen (b) 32,000 cycle (c) 37,000 cycle (d) 50,000 cycle

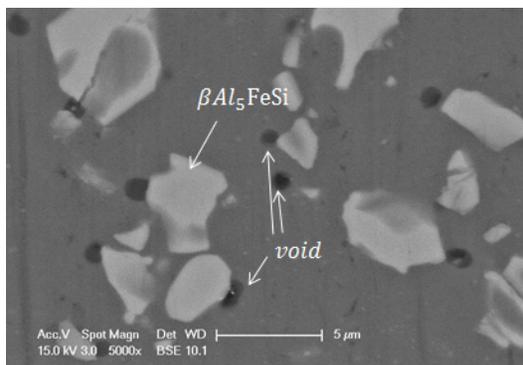


Fig. 9 SEM micrographs showing the voids in the fatigued specimens

현한 것으로, 저면 반사 신호에는 탐촉자 정보, 시험편의 표면 상태, 물과 시험편의 감쇠, 반사계수, 투과계수 등 여러 가지 인자들이 포함된 정보이다. 신재를 C-scan 저면 반사 신호를 이용하여 Fig. 6의 이미지로 나타낼 수 있으며, Fig. 6을 통하여 시험편 내의 감쇠 이미지로 예측할 수 있다. 이때 붉은부분은 감쇠가 적은 부분이며 노란부분은 감쇠가 큰 부분이다. 시험편 Fig. 6의 왼부분은 열화 발생 의심 영역으로 Fig. 8에서 열화 발생 의심 영역을 중점적으로 스캔하였다.

Fig. 8은 피로 사이클 수가 0, 32000, 37000, 70000에서의 C-scan 저면 반사 신호 이미지를 나타낸 것으로 사이클이 증가함에 따라 국부적으로 전위 밀도가 증가하고 고집성 슬립띠가 생성되며, 공공이 발생하게 되므로 [5,6] 국부적으로 감쇠 정도와 열화 의심부가 증가하는 경향을 보인다.

Fig. 8에서의 노란색 부분은 열화 의심부이고 그 이외의 영역은 건전부로 본 연구에서 평가하였다. 그리고 이 영역에서 Fig. 9의 SEM 분석 결과 그림과 같은 공공의 확인할 수 있었다.

하지만, Fig. 6, 8에서의 이미지 정보는 정량화 되어 있지 않기 때문에 신뢰성 확보를 위해 정량적인 평가가 필요하며, Fig. 8의 C-scan 저면반사 신호 이미지의 건전부와 열화부의 감쇠 차이 식(2)를 이용하여 평가하였으며, 사이클 수가 32000일 때의 건전부와 열화 의심부의 감쇠계수 차이는 약 2~4 Np/m 정도 차이가 났으며, 사이클 수가 50000일 때는 건전부와 열화 의심부의 감쇠계수의 차이가 약 8~12 Np/m 발생하였다. 이 결과를 이용하여 사이클 수가 증가함에 따라 건전부와 감쇠계수 차이도 증가하며, 실제 피로시험 시 재료는 부분적으로 열화가 진행됨을 예측할 수 있다.

4.2. 열화평가지수

본 연구의 4.1절에서 사이클 수가 증가함에 따라 부분적으로 감쇠계수가 증가함을 확인하였다. 따라서, 이를 명확하게 표현하기 위해서 4.2절에서는 열화평가지수를 제안하였으며, 첫 번째 제안한 열화평가지수 식(3)은 열화를 평가하는 전체 영역에서 감쇠계수의 상위 10%와 하위 10%를 비교하여 나타낸 식으로, 열화가 얼마나 심각하게 진행되었는가를 예측하는 식이다.

$$D1 = \frac{\sum_{Max=0}^{10\%} a_S}{\sum_{Min=0}^{10\%} a_S} \quad (3)$$

두 번째 제안한 열화평가지수 식(4)는 열화 발생 분포 및 열화 정도를 예측하는 식이다.

$$D2 = \sqrt{\sum_{n=0}^N \frac{a_n - a_m}{N}} \quad (4)$$

두 가지 제안식을 이용하여 열화 정도 예측 및 판단이 가능할 것으로 예측되며, 사이클 수 증가에 따라 측정된 감쇠계수를 식(3), (4)에 적용하였을 때 Fig. 10 Fig. 11의 결과를 보였으며, Fig. 10, 11에서 사이클 수가 증가함에 따라 급격히 열화지수가 증가함을 확인할 수 있다. Fig. 10의 경우 재료의 피로수명의 55% 이후에 제안한 열화평가지수 식(3)에서의 결과같이 급격히 증가함을 확인할 수 있다. 하지만, 신재 시험편과 피로수명 55%인 시험편 사이의 열화지수 값의 차이

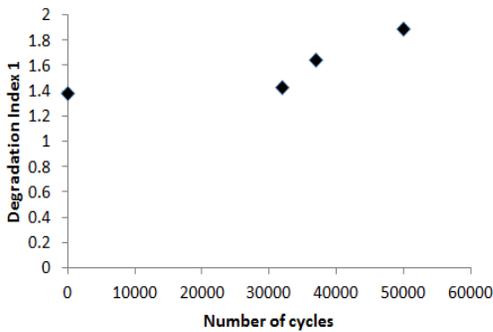


Fig. 10 Degradation progress index with various fatigued specimens

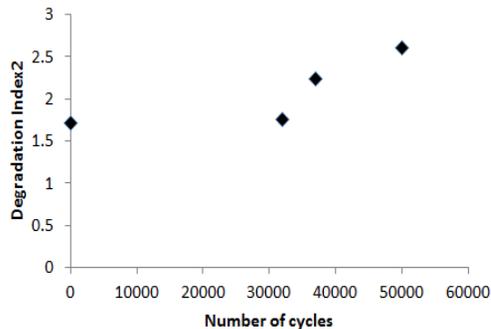


Fig. 11 Degradation dispersion index with various fatigued specimens

가 0.01이기 때문에 제안식(3)의 경우 재료의 피로수명 (0~55%) 구간에서의 적용성은 떨어질 것으로 보인다.

Fig. 11의 경우 사이클 수에 따라 변화의 폭이 일률적이기 때문에 피로수명 예측에 있어서 식(3)에 비해 적용성이 우수하며, 신재와 피로수명 85% 시험편과의 열화지수가 약 160% 차이가 나며 신재 시험편과 피로수명 55%인 시험편 사이의 열화지수 값의 차이가 0.1로 제안 식(3)에 비해 약 10배 가량의 지수 변화 차이를 확인할 수 있으므로, 초기 피로를 평가에 적절할 것으로 판단된다.

따라서, 식(3)과 비교하여, Fig. 10의 저면 반사 신호 이미지를 이용하여 열화 의심부와 건전부를 판단할 수 있으며, 식(3), (4)를 이용하여 열화 정도를 정량적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

C-scan을 이용하여 시험편 전 영역에 걸쳐 감쇠 특성을 측정할 수 있었으며, 측정된 감쇠 특성을 이용하여 피로수명에 따른 열화 이미지를 나타낼 수 있었다. 열화 이미지에서 열화부와 건전부를 판단할 수 있으며, 열화부의 경우 피로 사이클이 증가함에 따라 생성된 공공에 의해 재료 내에서 초음파 빔의 산란 및 회절이 증가하기 때문에 감쇠계수가 증가하는 경향을 보인다. 따라서, 초음파 감쇠 특성을 이용하여 제안된 식(3), (4)를 이용하여 재료의 열화부를 판단할 수 있으며, 감쇠 정도 및 분포에 따라 피로사이클에 따른 재료의 수명 예측의 가능성을 타진할 수 있다. 따라서, 본 연구를 바탕으로 향후 보다 다양한 종류의 시험편과 피로에 대해 열화평가지수를 활용하여 피로를 정량화하는 연구가 필요하며, 슬립피와, 공공 분포와의 감쇠계수 차이에 명확한 판단을 위하여 SEM을 이용하여 상관관계를 도출하는 연구가 진행되어야 할 것이다.

후기

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MEST) (No. 2012M5A4A1035227).

참고문헌

- [1] J.-H. Kwon and S.-Y. Joo, "Prediction of fretting fatigue life for lap joint structures of aircraft," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space*, 37, No. 7, pp. 642-652 (2009)
- [2] J.-H. Kwon and K.-J. Hwang, "Prediction of fretting fatigue life on 2024-T351 Al-alloy," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space*, Vol. 35, No. 7, pp. 601-611 (2007)
- [3] K.-W. Nam, S.-S. Park, S.-H. Ahn, J.-Y. Do and I.-D. Park, "Fatigue behavior of STS316L weldments and degradation characteristic evaluation by ultrasonic test," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 23, No. 2, pp. 156-164 (2003)
- [4] K.-W. Nam and S.-J. Kim, "Life prediction by retardation behavior of fatigue crack and its nondestructive evaluation," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 13, No. 3, pp. 36-48 (1999)
- [5] G. E. Dieter, "Mechanical Metallurgy," McGraw-Hill (1990)
- [6] Q. Y. Wang, "Fatigue voids in structural Al-alloys under high-frequency cyclic loading," *Journal of Materials Science*, Vol. 39, pp. 365-367 (2004)