

리벳 구멍을 가진 알루미늄 박판구조의 피로손상 탐지를 위한 음향방출의 활용

Detection of Fatigue Damage in Aluminum Thin Plates with Rivet Holes by Acoustic Emission

김정찬*, 권오양**[†], 김성진*

Jung-chan Kim*, Oh-Yang Kwon**[†] and Sung-Jin Kim*

초 록 항공기 구조를 모사하여 일련의 리벳 구멍을 갖는 AA2024-T3 박판 구조를 대상으로 피로하중에 의한 단균열(short crack)의 발생시점과 성장거동을 음향방출(AE)을 위주로 한 측정으로 평가하였다. AE 위치표정에 의해 단균열의 좌표를 정확하게 결정하였으며, 이동식 현미경으로 균열의 크기를 측정하였다. 누적 AE 발생수 곡선은 단균열의 발생과 성장에 따라 일정한 간격을 두고 급격히 증가하는 양상을 보임으로써 여러 차례의 계단식 곡선을 형성하였다. AE 위치표정에서는 리벳 구멍을 중심으로 파괴역학에 근거한 관심영역(ROI)을 설정하였으며, 웨이블릿변환 잡음제거 방법을 사용하여 위치표정의 정확도를 향상할 수 있었다. 실제로 탐지된 신호의 대부분이 단균열의 발생 및 성장과 관계없는 외부 잡음신호로 나타났으며, ROI 내에서 발생한 AE 발생원의 위치도 구조의 기하학적 특징이나 신호대잡음비의 영향에 의해 왜곡될 수 있음을 알 수 있었다.

주요용어: 피로 단균열, 음향방출, 위치표정, 관심영역(ROI), 신호대잡음비, 웨이블릿변환 잡음제거

Abstract The initiation and growth of short fatigue cracks in the simulated aircraft structure with a series of rivet holes was detected by acoustic emission (AE). The location and the size of short cracks were determined by AE source location techniques and the measurement with traveling microscope. AE events increased intermittently with the initiation and growth of short cracks to form a stepwise increment curve of cumulative AE events. For the precise determination of AE source locations, a region-of-interest (ROI) was set around the rivet holes based on the plastic zone size in fracture mechanics. Since the signal-to-noise ratio (SNR) was very low at this early stage of fatigue cracks, the accuracy of source location was also enhanced by the wavelet transform de-noising. In practice, the majority of AE signals detected within the ROI appeared to be noise from various origins. The results showed that the effect of structural geometry and SNR should be closely taken into consideration for the accurate evaluation of fatigue damage in the structure.

Keywords: short fatigue crack, acoustic emission, source location, region-of-interest, signal-to-noise ratio, wavelet transform de-noising

1. 서 론

대형 구조물, 선박, 항공기 등과 같은 구조물 및

재료들은 각기 다양한 크기의 반복하중을 지속적으로 받기 때문에 이들 구조에서는 사용 중에 피로균열이 발생, 성장하고 있으며, 임계크기 이상의 균열

의 성장은 곧 대형사고를 야기시킨다. 따라서 균열의 검출이나 감시를 위해 많은 연구가 계속 진행 중에 있고, 그 중 음향방출(AE)기술을 이용한 피로 균열의 탐지는 여러 연구자들에 의해서 발표되었다 [1-7].

한편 피로손상의 초기단계는 국부적인 소성변형에 이어지는 미소균열의 발생이라 할 수 있는데, 수 μm 이상의 탐지 가능한 크기가 되었을 때 단균열 또는 소균열(small crack)로 부른다. 단균열은 소성역이나 소성변형장의 크기보다 작은 균열로 정의되고, 통상 1 mm이하의 균열에 해당한다. 단균열의 특징은 성장속도가 매우 빠르고, 통상적인 피로 균열과 비교하여 매우 다른 성장거동을 보이며, 예측이 어렵다[8,9]. 가스터빈 디스크나 항공기 구조처럼 매우 작은 피로균열에도 위험한 부재나 구조들은 보통 크기의 피로균열을 바탕으로 얻어진 데이터를 구조설계에 적용한다면 결과적으로 피로수명을 과대평가하는 잘못을 범할 수 있다[10]. 이런 이유로 단균열의 조기 탐지는 매우 중요하다.

연구의 대상으로 설정한 항공기 구조는 대표적인 박판 구조이며 균열이 표면에서 관찰될 수 있는 확률이 높다. 그러나 날개나 동체를 이루는 구조는 수많은 fastener로 연결되어 있으며 그 중에서도 가장 많은 것이 리벳 구멍이다. 리벳구멍 주위에서 동시에 여러 군데에서 발생하는 다발손상(multiple site damage; MSD) 문제로서 오래 전부터 파괴역학적 관점에서 연구의 대상이 되어왔다.

단균열의 존재와 크기를 측정하는 데는 다양한 방법들이 보고된 바 있으나[11], 발생 위치를 실시간으로 결정할 수 있는 방법으로는 AE 방법이 거의 유일하다. 다만 지금까지는 피로하중 아래서 극심한 외부 잡음으로 인하여 신호가 탐지가 어려웠으며, 특히 실험대상과 같은 박판에서 균열 발생 초기에는 신호대잡음비(SNR)가 낮아서 거의 불가능하였다. 그러나 선행연구의 결과에서 웨이블릿 변환(wavelet transform; WT)에 의한 잡음제거는 이렇게 오염된 신호라도 충분히 복원할 수 있음을 입증하였으며, SNR이 개선된 만큼 도달시간 측정 등 신호처리의 정확도도 향상되므로, 웨이블릿 변환으로 노이즈를 제거한 후 위치표정을 행하면 위치표정의 정확도가 향상될 수 있음을 보였다[12]. 웨이블릿 변환은 신호의 시간-주파수 분석방법 중의 하나로 시간영역과 주파수영역에서 신호의 정보를 동시에 정확히 제공해주는 도구로 웨이블릿(wavelet)이라

불리는 유한길이의 기저함수(basis function)를 기본 패턴으로 하여 그것을 이동(shifting) 또는 수축·팽창(scaling)시켜 임의의 파형으로 표현한 것이다.

다만 실제 측정 시에는 재료 내부의 불균일성으로 인하여 균열 외에도 다양한 AE 발생원이 존재하며, 균열의 발생과 탐지 가능한 AE 신호의 발생이 서로 필요충분조건도 아니다. 따라서 AE 방법에 의해 균열의 발생을 실시간으로 감시하면서 동시에 traveling microscope 등 가능한 모든 방법을 동원하여 균열 발생과 AE 발생 시점 사이에 일대일 대응을 이끌어 내고자 하였다. 즉, 선행연구의 결과를 토대로 음향방출을 이용하여 리벳구멍을 가진 알루미늄합금 AA2024-T3 박판구조에서 피로 단균열의 발생 및 성장거동을 규명하고, 정확한 균열의 발생 위치를 실시간으로 탐지할 수 있는 기술을 개발하는 것을 연구의 목표로 설정하였다.

2. 실험

실험용 재료는 항공기 구조에 흔히 사용되는 2024-T3 알루미늄이고 폭 350 mm, 길이 276 mm, 두께 1.6 mm의 박판 중앙에 직경 3.2mm의 리벳구멍을 20 mm 간격으로 3개 뚫었으며, 표면에 4개의 AE센서를 사각형으로 배치하였다. 리벳 구멍은 방전가공하였으며 그 주위는 폴리싱으로 스크래치를 최대한 제거하여 배율 100배의 traveling microscope로 균열을 관찰하기에 용이하게 하였다. 피로시험기는 Saginomiya사에서 제작한 10ton 용량의 유압 서보식 시험기이고 인장-인장 피로하중에 의한 원거리 최대응력은 92.4MPa, 응력비(R)는 0.2, 하중주파수는 5Hz로 하였다. Fig. 1은 실험에 사용된 대상체와 센서의 배치를 개략적으로 보여준다.

AE 측정은 Digital Wave의 2채널 신호처리모듈(FTM4000) 2개와 PC에 있는 A/D보드(CS225; Gage)를 사용하였고, 여기에 사용된 PZT 센서(B1025; Digital Wave)는 50 kHz~2 MHz 대역에서 비교적 flat response를 보여주는 광대역형이다. 실험에서 문턱값(threshold)은 0.1V로 설정하였고, 피로시험기에서 발생하는 잡음을 고려하여 trigger gain을 18 dB 증폭하였다. 또한 탐지된 AE신호는 우선 프리앰프에서 40 dB 증폭하고 메인앰프에서 21 dB 추가로 증폭하여 총 79 dB 증폭한 다음 위치표정 기능에 의해 균열의 발생위치를 예측하는데 이용하였다. AE신호 파형은 5 MHz의 샘플링 속도

로 2,048개의 데이터로 디지털화하여 저장하였다.

균열의 관찰 및 길이 측정을 위해서 traveling microscope를 사용하였고, CCD 카메라와 연결하여 관찰 및 기록을 용이하게 하였다. 균열사진의 기록에는 이미지 캡처프로그램(PowerVCR II)을 사용하였다. Fig. 2는 전체적인 실험장치의 구성도를 보여준다.

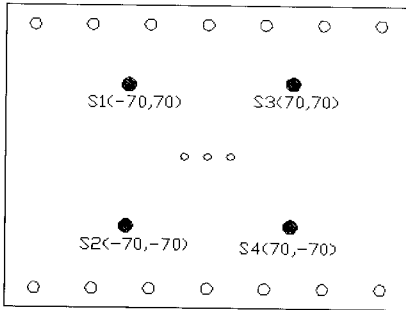


Fig. 1 Geometry of the specimen with a rectangular array of AE sensors

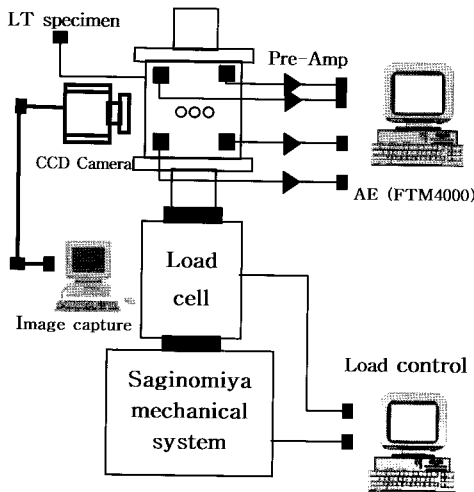


Fig. 2 A schematic diagram of experimental setup

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 피로 단균열의 발생 및 성장거동

Fig. 3에서 보는 것처럼 실험 시작 후 약 190,000 사이클에서 가운데 구멍의 왼쪽(9시 방향)선단에서 가장자리에서 균열 길이 0.58mm의 단균열이 발생하였고, 다른 리벳 구멍에서도 각각 균열 길이

1.06 mm, 0.91 mm의 단균열이 발생하였다. 관찰해야 할 위치가 구멍 하나당 2개씩 모두 6개소이므로 이를 동시에 추적하기는 힘들고, 가장 짧은 길이의 단균열의 발생을 확인한 0.58 mm의 경우를 중심으로 성장거동을 계속적으로 관찰하였다.

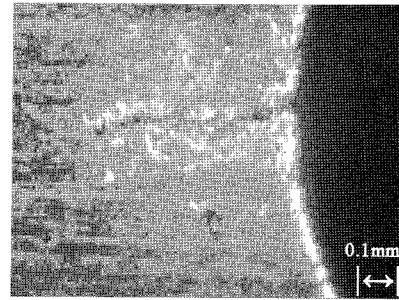


Fig. 3 Photograph of a fatigue crack by traveling microscope

Fig. 4는 길이 0.58 mm인 단균열에 대해서 피로 사이클의 진행에 따른 균열의 성장곡선을 나타낸 것이다.

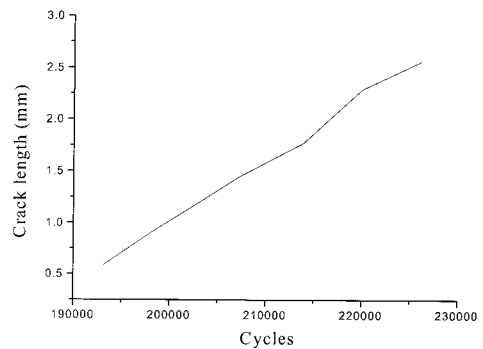


Fig. 4 Crack length vs. fatigue cycles

피로균열의 성장거동을 나타내는 식으로 잘 알려진 Paris의 식은 사이클당 균열전파속도(da/dN)와 응력확대계수범위(ΔK)의 관계를 보여주는 실험식이다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \tag{1}$$

여기서 C와 m은 재료 상수이다.

리벳 구멍에서의 응력확대계수 K는 식 (2)와 같다[13].

$$K_I = 3\sigma\sqrt{\pi a}F(a/w) \quad (2)$$

여기서 계수 3은 리벳구멍에서의 응력집중계수이고, $F(a/w)$ 는 식 (3)과 같다.

$$F(a/w) = [1 - 0.025(a/w)^2 - 0.06(a/w)^4] \sqrt{\sec \frac{\pi a}{2w}} \quad (3)$$

여기서 $2a$ 는 균열의 총 길이이고, $2w$ 는 시편의 폭이다. 이 식을 이용하여, (da/dN) - ΔK 와의 관계를 그려보면 Fig. 5와 같다. 데이터는 잘 알려져 있는 바와 같이 직선적인 비례관계를 보여주고 있으나, 단균열에 해당하는 1 mm 이하의 균열길이에서는 Paris의 식으로 예측할 수 있는 값보다 높은 균열성장속도를 나타낸다. 이는 단균열이 갖는 전형적인 특징 중 하나이다[8].

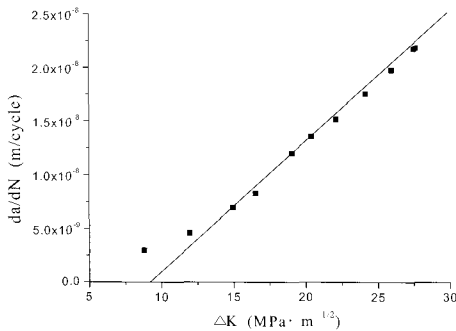


Fig. 5 Fatigue crack growth as a function of stress intensity factor range

3.2. 균열길이와 음향방출 발생수

사이클에 따른 균열길이와 음향방출 신호의 누적개수를 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 균열의 성장은 지수 함수적으로 연속적으로 나타났지만 이에 수반하는 음향방출의 발생은 어떤 특정한 균열길이에 집중되어 계단식 곡선을 나타내었다. 160,000 사이클 이하에서 탐지된 신호들은 모두 피로시험기에서 발생하는 주기적인 잡음이었으며, 피로균열에 의한 신호는 160,000 사이클부터 탐지되었다. 160,000~200,000 사이클 사이에서는 주로 단균열의 발생에 의한 신호인 것으로 추정되나 현재로서는 확인하기 어려우며, 200,000 사이클 이후 본격적인 균열성장에 의한 음향방출의 발생이 계단식으로 나타남을 알 수 있었다. 여러 가지 합금

에서 피로균열의 성장에 따른 AE 발생이 간헐적으로 또는 계단식으로 나타난다는 사실은 이미 알려진 바 있다[2,5,6]. 다만 본 연구에서 탐지하고자 하는 대상은 단균열이므로 이미 충분히 성장하여 단균열의 범위를 벗어난 230,000 사이클 부근에서 실험을 종료하였다.

3.3. AE 위치표정

사용하는 탄성파의 파장과 두께가 비슷하거나 보다 얇은 박판구조에서는 탄성파가 판파(Lamb wave)로 전파되며 가장 큰 특징은 전파거리에 따른 분산이다. 따라서 발생원에서 센서까지의 거리가 멀어질수록 파형의 왜곡이 심해진다. 이러한 현상에 기인하는 AE 신호의 도달시간차 측정오차를 최소화하기 위해 탐지된 AE 신호에 대하여 웨이블릿 디노이징(wavelet de-noising)을 먼저 행한 다음 위치표정을 하였다. 웨이블릿 디노이징은 웨이블릿 변환에 의해 얻어진 신호들의 진폭에 레벨을 설정하여 잡음이라고 간주한 신호를 제거하고 원래의 신호는 잡음의 영향만큼 축소시키거나 유지하여 재구성하는 방법이다. 그리고 피로손상이 집중될 것으로 예측할 수 있는 리벳구멍을 중심으로 ROI를 설정하여 AE 측정장비에 내장된 기능에 의해 이루어진 위치표정의 결과를 필터링하고, 디노이징 이후의 위치표정 결과와 비교하였다. 여기서 AE장비에 의한 위치표정은 4개의 센서에 도달하는 3개의 도달시간차를 가지고 이루어졌으나, 웨이블릿 디노이징을 위해 취득한 파형은 4개의 센서에 들어오는 각각의 파형을 모두 고려한 것이 아니라 그중 2, 3, 4번 센서에 도착한 신호의 파형만을 이용하였다.

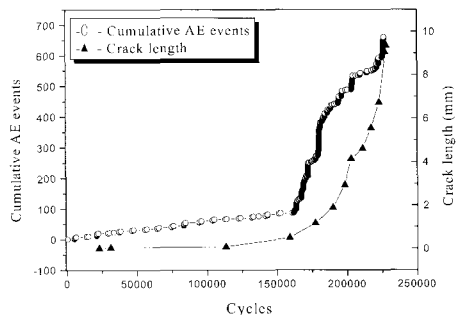


Fig. 6 Cumulative AE events and the crack length vs. number of fatigue cycles

3.3.1. 센서배열과 ROI 설정

4개의 센서로 하나의 사각형을 만들었다. 2차원 위치표정의 알고리즘은 최소한 3개의 센서로 이루어진 배열을 필요로 하지만 네 번째 센서는 알고리즘에 의해 발생하는 2중 위치표정의 오류를 보정하기 위해 선택되었다. 그후, 발생원으로부터 발생한 신호가 각각의 센서에 도달하는 시간차를 이용하여 AE 발생원 위치추정을 실시하였다.

센서의 위치는 센서간 거리를 140 mm로 하는 사각형으로 구성하였고, 가운데 리벳구멍의 중심을 원점(0,0)으로 잡았다. 센서의 좌표는 Table 1과 같다. 그리고 정확한 2차원 AE 위치표정을 위해서는 실제구조에서 음속을 정확히 측정하여 계산하는 것이 가장 바람직하다. Fig. 7에서처럼 실제 시편에서 연필심(JSDNI-006; ϕ0.5) 파괴에 의한 모의 음향방출원을 10회 발생하여 평균을 구함으로써 실제 구조에서의 음속을 3030 m/s로 측정하였다.

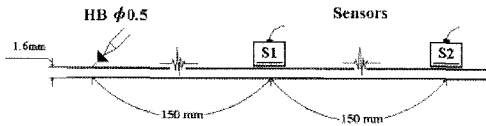


Fig. 7 One-dimensional source location for the actual velocity measurement

Fig. 8은 AE 측정장비에 내장된 소프트웨어의 위치표정 기능에 의해 위치표정한 결과이다. 연필심 파괴를 통한 모의 발생원에 의한 AE 측정과는 다르게 실제 피로실험에서는 재료내부의 불균일성과 소성변형으로 인한 전위움직임, 쌍정변형, 개재물 등의 여러 AE 발생원들이 존재한다. 따라서 리벳구멍을 내어 응력집중을 유도했는지라도 상용 AE 측정장치의 기능에 의해 위치표정된 결과는 리벳구멍 주위뿐만 아니라 시편 전체에 발생원이 산재해 있는 것처럼 보인다. 또한 피로시험 환경에서는 극심한 기계적 잡음으로 신호탐지가 어렵고 특히 균열 발생 초기에는 SNR이 낮으므로 전통적인 문턱값 통과 방법에 의한 이러한 위치표정 결과에는 상당한 오차가 존재할 확률이 높다.

본 연구의 목적은 단균열의 발생과 위치 및 크기의 파악에 있으며 응력집중의 결과 피로균열은 리벳구멍 주위에 집중됨을 확인하였다. 따라서 리벳

Table 1 Nominal coordinates of AE sensors

Sensor No.	Position (x, y)
1	(-70, 70)
2	(-70, -70)
3	(70, 70)
4	(70, -70)

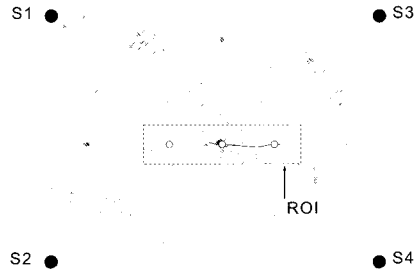


Fig. 8 Result of source location by AE instrumentation with 2-D source location software

구멍 가장자리에 단균열이 존재하는 경우의 소성역 크기에 근거를 둔 ROI를 설정하여 ROI 밖의 위치 표정 결과는 균열과 무관한 것으로 간주하여 제외하였다.

평면응력(plane stress)상태에서는 미소균열 또는 단균열이 일반적으로 소성역(plastic zone) 이내에서 형성된다고 알려져 있다[14]. 소성역의 크기는 균열 선단에 압축항복응력을 작용시켜 모델링한 Dugdale의 스트립항복모델(strip yield model)을 이용하여 구하였다.

$$r_p = \frac{\pi}{8} \left(\frac{K_I}{\sigma_{YS}} \right)^2 \tag{4}$$

식 (4)에서 r_p 는 소성역의 길이이고, σ_{YS} 는 r_p 에 작용하는 항복강도이다. 시편이 두께가 1.6mm인 박판이므로 평면응력(plane stress) 상태이고 위 식에서 $K_I = K_C$ 이어야 한다. ASTM Standards NASA/ FLAGRO 2.0 Materials Constants로부터 K_C 대신 K_{Ieff} (K_{eff} at mode I) = 49.5MPa√m, $\sigma_{YS} = 365.4$ MPa를 사용하여 계산한 결과 $r_p = 7.2$ mm를 얻었다. 이렇게 구한 소성역의 크기를 충분히 고려하여 설정한 ROI를 Fig. 8에 나타내었다. ROI는 가로와 세로가 각각 60 mm, 20 mm인 직사각형으로 소성역을 충분히 포함한다. 즉, 3

개의 리벳구멍 중 왼쪽과 오른쪽 리벳구멍 선단에서부터 ROI 경계까지는 수평·수직 방향으로 8.4 mm로서 소성역의 크기보다 크다.

3.3.2. 웨이블릿 변환 잡음제거와 위치표정

박판에서 판파(Lamb wave)의 특징은 전파거리에 따른 분산이며, 팽창파(extensional wave) 성분과 굽힘파(flexural wave) 성분의 상대적인 진폭이 문제가 되어 센서에 도달하는 시간차를 이용하는 위치표정의 정확도에 지대한 영향을 준다. 그런데 실제 피로시험환경에서는 기계적 잡음까지 더해져 위치표정을 더 어렵게 한다. 이러한 문제점을 극복하고 위치표정의 정확도를 향상시키기 위해 위치표정에 앞서 웨이블릿 변환을 이용한 잡음제거처리를 하였다. Fig. 9는 탐지된 신호의 파형과 디노이징(de-noising)한 신호의 전형적인 파형을 보여주고 있다. 탐지된 신호의 파형을 보면, 전체적으로 극심한 잡음이 존재하여 균열에 의한 신호와 잡음으로 인한 성분의 경계를 식별하기 어렵다. 그러나 이 신호를 디노이징한 파형에서는 잡음이 상당히 제거되었다.

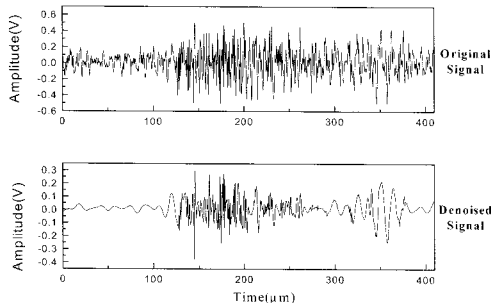


Fig. 9 Effect of wavelet transform de-noising on the arrival time measurement

앞에서 언급한 방식으로 설정한 ROI 이내에는 AE 측정장비에 의해 Fig. 10 (a)와 같이 61개의 신호가 위치표정되었는데, 그 중에서 12개의 파형은 피로균열이 성장하면서 발생한 신호로 간주되고 49개의 신호는 잡음으로 간주하여 제외하였다. 잡음으로 추정된 49개의 신호들은 우선 파형이 impulse에 가깝고 도달 시간차를 비교한 결과 4개의 채널에 신호들이 모두 거의 동시에 도착하였기 때문이다. 이에 따라 ROI 이내에서 신호로 간주되

어 위치표정된 12개의 신호들을 웨이블릿변환 잡음제거 처리를 한 후 다시 위치표정한 결과를 Fig. 10 (b)에 나타내었다. Fig. 10에서 리벳구멍으로부터 대략 수평 방향으로 실선으로 표시한 것은 230,000 사이클까지의 균열전과경로를 나타낸다.

Table 2는 AE 측정장비에 내장된 기능에 의한 전통적 문턱값 통과방법과 웨이블릿변환 잡음제거 이후에 다시 실시한 위치표정 결과를 비교하여 보여주고 있다. Fig. 10(b)와 Table 2에서 별표(*)한 항목은 디노이징 처리에 실패한 신호들이다. 이들은 기록된 waveform의 앞부분에 amplitude가 매우 크고 신호와 유사한 특성을 가진 잡음 성분이 섞여 있어 웨이블릿변환 잡음제거 처리를 했음에도 불구하고 도달시간차에 거의 변화가 없는 경우에 해당한다.

Table 2에 나타난 웨이블릿변환 잡음제거 이후에 다시 위치표정을 한 결과를 Fig. 10(b)에서 확인해보면, 3개의 리벳구멍 중 왼쪽 구멍에서 왼쪽 아래 부분에 위치표정된 1, 2번 신호와 가운데 구멍의 왼쪽에 위치표정된 3번 신호는 잡음제거 후에는 가운데 구멍의 바로 아래지역으로 위치표정되었다. 그리고 가운데 구멍의 바로 아래에 위치표정된 4, 5번 신호는 잡음제거 후에도 위치표정의 변화가 거의 없었다. 그러나 4, 5번 신호와 비슷한 좌표를 갖는 6번 신호는 잡음제거 후 가운데 구멍의 아래에서 윗쪽으로 이동하여 y좌표가 다소 많이 변화하였다. 가운데 구멍의 오른쪽에서 윗쪽 방향으로 가장 멀리 떨어져 있는 7번 신호는 잡음제거 후 균열전과경로에 매우 근접하였다. 그리고 가운데 구멍과 오른쪽 구멍의 가운데쯤에 위치한 8번 신호는 균열전과경로에서 약간 멀어졌다. 가운데 구멍과 오른쪽 구멍사이의 아래방향으로 가장 멀리 떨어진 9, 10번 신호는 1, 2, 3번 신호와 마찬가지로 가운데 구멍 바로 아래로 위치표정되었다.

이렇게 리벳구멍 선단부근이나 균열전과경로 부근으로 위치표정이 집중되는 것은 균열전과경로를 중심으로 소성역 내에서 알루미늄 합금에 존재하는 개재물(Mg₂Si)들과 피로균열의 상호작용 때문이라고 알려져 있다[15]. 즉, 피로균열이 진전하면서 균열선단 주변에 국부적인 소성변형 또는 슬립이 발생하는데 이것이 주변의 개재물과 연결되면서 AE 신호를 발생시킨다.

Table 2에서 보는 바와 같이 탐지된 신호 자체로는 균열전과경로로부터 위·아래로 ±7.2 mm 범위

에 위치표정 되었고, 웨이블릿변환 잡음제거 처리한 후의 신호는 균열전파경로로부터 위·아래로 ± 4.2 mm 범위에 위치표정되었다. 즉, 웨이블릿변환 잡음제거 처리한 후 위치표정 결과가 리벳구멍 주변이나 균열전파경로에 더 접근했음을 알 수 있다. 따라서 단균열의 탐지와 같이 SNR이 낮은 신호처리에는 웨이블릿변환 잡음제거에 의해 SNR을 개선한 후 AE 위치표정을 행함으로써 정확도를 향상할 수 있다.

Table 2 Result of AE source location before and after WT de-noising

Source #	Location(x, y)	
	As-detected	De-noised
1	(-29.9, -2.4)	(-3.5, -3.4)
2	(-26.8, -3.2)	(0.6, -4.2)
3	(-6.4, 0)	(0.2, -3.4)
4	(-1.3, -2.1)	(-1.7, -1.9)
5	(0, -4.3)	(-0.2, -4.1)
6	(0.4, -3)	(-0.6, 3.9)
7	(7.3, 7.2)	(13.6, -0.2)
8	(7.5, 0.5)	(6.6, 2.7)
9	(12.9, -5.2)	(3, 3.4)
10	(13.1, -7.1)	(0.7, -2.1)
11	(-7.4, 6.5)	-(*)
12	(-0.4, 2.1)	-(*)

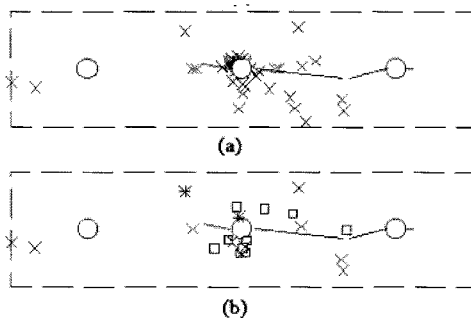


Fig. 10 Comparison of the results of source location within ROI: (a) location by AE instrumentation and (b) location before(\times) and after(\square) de-noising

4. 결론

항공기 구조를 모사하여 리벳 구멍을 가진 AA2024-T3 박판에서 음향방출을 이용하여 단균열의 발생 및 성장거동을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 하나의 리벳구멍에서 단균열이 발생한 전후에 인접한 리벳구멍에서도 균열이 동시 다발적으로 발생하였다. 누적 AE 발생수 곡선은 균열이 성장함에 따라 간헐적으로 급격히 증가하여 계단식 곡선을 나타내었다.
- (2) Dugdale의 스트립항복모델(strip yield model)에 근거한 소성역 크기를 충분히 고려하여 설정한 관심영역(ROI)을 설정함으로써 리벳 연결부를 가진 박판구조에서 발생하는 피로손상의 탐지와 감시에 유력하게 활용될 수 있는 방법임을 보였다.
- (3) 실제 박판 구조에서 피로손상에 의해 발생하는 AE 신호는 SNR이 매우 낮으므로 웨이블릿변환에 의해 디노이징 처리한 다음 위치표정함으로써 구조의 기하학적 특징이나 외부 잡음에 의해 왜곡될 수 있는 위치표정의 정확도를 향상할 수 있다.

후 기

본 연구는 2001년도 한국과학재단의 학술연구비에 의하여 지원되었음. (R01-2000-000-00295-0)

참고문헌

- [1] D. H. Kohn, P. Ducheyne and J. Awerbach, "Acoustic Emission during Fatigue of Ti-6Al-4V: Incipient Fatigue Crack Detection Limits and Generalized Data Analysis Methodology," *J. of Materials Science*, Vol. 27, pp. 3133-3142, (1992)
- [2] D. M. Granata, P. Kulowitch, W. R. Scott and J. Talia, "Acoustic Emission Waveform Acquisition during Fatigue Crack Growth," *Review of Progress in QNDE*, Vol. 12, pp. 2183-2190, (1993)
- [3] A. Berkovits and D. Fang, "Study of Fatigue Crack Characteristics by Acoustic Emission,"

- Engineering Fracture Mechanics, Vol. 51, pp. 401-416, (1995)
- [4] K. Ono and J. Y. Wu, "Pattern Recognition Analysis of Acoustic Emission from Fatigue of 2024-T4 Aluminum," Progress in Acoustic Emission VIII, Japanese Society for NDI, pp. 237-242, (1996)
- [5] I. M. Daniel, C. G. Sifniotopoulos and J. J. Luo, "Analysis of Acoustic Emission Output from Propagating Fatigue Crack," Review of Progress in QNDE, Vol. 17, pp. 579-586, (1998)
- [6] Z. Shi, J. Jarzynski, S. Bair and L. J. Jacobs, "Study of Acoustic Emission from Incipient Fatigue Failure," Review of Progress in QNDE, Vol. 18, pp. 395-401, (1999)
- [7] 정중채, 윤동진, 박휘립, 김기복, 이승석, "구조용 알루미늄 합금에서의 피로균열 열림 및 닫힘시 AE 발생특성 연구," 비파괴검사학회지, 제 22권, 제2호, pp. 155-169, (2002)
- [8] S. Suresh, "Fatigue of Materials," Cambridge University Press, 2nd Edition, pp. 544-555, (1998)
- [9] V. V. Bolotin, "Mechanics of Fatigue," CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 1-65, (1999)
- [10] 권오양, "피로손상과 비파괴평가," 비파괴검사학회지, 제20권, 제1호, pp. 54-61, (2000)
- [11] ASTM E647-95a, "Standard Test Methods for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01, ASTM, pp. 606-614, (2000)
- [12] 이경주, 권오양, 주영찬, "웨이블릿 변환 노이즈 제거에 의한 AE 위치표정," 비파괴검사학회지, 제20권, 제6호, pp. 490-499, (2000)
- [13] R. W. Hertzberg, "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials," Fourth Edition, pp. 329-330, (1996)
- [14] T. Ohira and Y. H. Pao, "Microcrack Initiation and Acoustic Emission during Fatigue Toughness Tests of A533B Steel," Metallurgical Transactions A, 17A, pp. 843-851, (1986)
- [15] S. L. McBride and Y. Hong, "Acoustic Emission from Crack Growth in 7050 Aluminum and 7075 Aluminum as a Function of Temperature and Heat Treatment," Progress in Acoustic Emission VI, Japanese Society for NDI, pp. 521-528, (1992)