〔논 문〕 - 비파괴검사학회지
Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing
Vol. 27, No. 1 (2007. 2)

리벳구멍을 가진 알루미늄 패널에서 피로균열의 탐지와 균열길이 측정

Detection and Sizing of Fatigue Cracks in Thin Aluminum Panel with Rivet Holes

김정찬*, 권오양**,†

Jung-chan Kim* and Oh-Yang Kwon**,†

초 록 항공기 구조를 모사하여 일련의 리벳구멍을 갖는 AA2024-T3 박판 구조를 대상으로 음향방출(AE)을 이용하여 피로균열을 탐지하고, 표면초음파(SAW)를 이용하여 균열길이를 측정하였다. 누적 AE 발생수 곡선은 단균열(short crack)의 발생과 성장에 따라 일정한 간격을 두고 급격히 증가하는 계단식 형태로 나타났으나 피로균열의 성장은 지수함수적인 증가를 보였다. SAW를 이용한 균열길이 측정은 균열길이가 다른 13개의 균열에 대하여 실시하였고, 측정된 데이터를 이동식 현미경으로 측정한 결과와 비교하였다. 그 결과 1 mm 이하의 단균열의 크기를 표면초음파 방법으로 측정하는 것은 거의 불가능하였으나, 1 mm 이상의 균열에서는 비교적 높은 신뢰도로 균열길이 측정이 가능함을 확인함으로써 실용적인 측면에서 이 방법이 유효하게 사용될 수 있는 영역이 존재함을 알 수 있었다.

주요용어: 음향방출, 피로 단균열, AE 위치표정, 표면초음파, 균열길이 측정

Abstract The initiation of fatigue cracks in a simulated aircraft structure with a series of rivet holes was detected by acoustic emission(AE), then the crack length was determined by surface acoustic wave(SAW) technique. With the initiation and growth of fatigue cracks, AE events increased intermittently to form a stepwise incremental curve of cumulative AE events whereas the crack length increased more or less monotonically. With the SAW technique employed, the crack sizing for 13 different cracks including some short cracks was performed. With the reference to the measurement by traveling microscope, cracks in the range of 1~8 mm long were reliably sized by the SAW technique. Although it was impossible to size the short fatigue cracks in the range shorter than 1 mm, the SAW technique still appeared practically useful for a range of crack lengths often found in aircraft structures.

Keywords: Acoustic Emission(AE), Short Fatigue Crack, AE Source Location, Surface Acoustic Wave(SAW), Crack Sizing

1. 서 론

항공기 구조에서 균열은 특정한 방향으로 배열된 리벳구멍 주위에 광범위분포 피로손상에 따른 다중 균열의 형태로 발생한다. 이는 동체 또는 날개와 같은 1차구조물에 치명적인 위협이 되므로 끊임없는 감시의 대상이 되어왔다. 알루미늄 박판구조에서 균열 발생을 탐지하거나 균열의 전파를 감시하는 다

(접수일: 2006. 12. 19, 심사완료일: 2007. 1. 31) * 인하대학교 대학원 기계공학과, ** 인하대학교 기계공학부, † Corresponding author: Department of Mechanical Engineering, Inha University, 253 Younghyun-dong, Inchon 402-751 (E-mail: okwon@inha.ac.kr)

양한 방법에 관하여 많은 연구가 계속 진행 중에 있고, 이 중 음향방출(AE)기술을 이용한 피로균열의 탐지는 여러 연구자들에 의해 발표되었다[1-3]. 또한 알루미늄이 아닌 다른 재료에서도 AE를 이용하여 균열을 탐지하는 연구도 다수 보고되었다[4-6].

한편 가스터빈, 항공기 구조 등 작은 균열에도 위험한 부재나 구조에서 단균열의 탐지와 크기 평가는 매우 중요하다. AE는 피로손상 초기단계에 발생하는 단균열을 탐지할 수 있으나 균열의 크기 측정은 불가능하다. 균열의 크기측정에는 와전류 탐상법, 누설자속 탐상법 그리고 초음파 방법 등이 이용되고 있다. 초음파 방법 중 표면초음파(surface acoustic wave; SAW)는 파의 에너지 대부분이 표면에 집중되고, 고체 표면을 따라서 잘 전달되는 특성을 가지고 있어서[7-8], 재료의 표면결함 탐지 및 균열길이 측정에 효과적이다[9-12].

선행연구에서 AE신호의 노이즈를 웨이블릿 변환을 이용하여 제거한 후, 파괴역학에 근거한 관심영역(region of interest; ROI)을 설정하여 위치표정의 정확도를 향상할 수 있었다[13-14]. 본 연구에서는 선행연구의 결과를 토대로 리벳구멍을 가진 알루미늄합금 AA2024-T3 패널에서 피로균열의 발생을 음향방출을 이용하여 탐지하고, 표면초음파를 이용하여 균열길이를 측정하였다.

2. 실 험

2.1. 피로시험과 균열 발생 탐지

실험용 재료는 항공기 구조에 흔히 사용되는 AA2024-T3 알루미늄이고 폭 350 mm, 길이 276 mm, 두께 1.6 mm의 박판 중앙에 직경 3.2 mm의 리벳 구멍을 20 mm 간격으로 5개 뚫었으며, 표면에 4개의 AE센서를 사각형으로 배치하였다. 리벳 구멍은 방전가공 하였으며 그 주위는 폴리싱으로 스크래치를 최대한 제거하여 배율 100배의 traveling microscope(PRM-D, Pika Seiko LTD., Japan)로 균열을 관찰하기에 용이하게 하였다. 피로시험기(Servopac-10, Saginomiya Seisaku, Japan)는 10 ton 용량의 유압 서보식 시험기이고 인장-인장 피로하중에 의한 원거리 최대응력은 110 MPa, 응력비(R)는 0.2, 하중주파수는 5 Hz로 하였다. Fig. 1은 실험에 사용된 대상체와 센서의 배치를 개략적으로 보여준다.

AE 측정은 Digital Wave의 2채널 신호처리 모듈(FTM4000, US) 2개와 PC에 내장된 A/D보드(CS225; Gage, Canada)를 사용하였고, 여기에 사용된 PZT 센서(B1025; Digital Wave, US)는 50 kHz ~2 MHz 대역에서 비교적 flat response를 보여주는 광대역형이다. 실험에서 문턱값(threshold)은 0.1 V로 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 속도로 2,048개의 데이터로 디지털화하여 저장하였다.

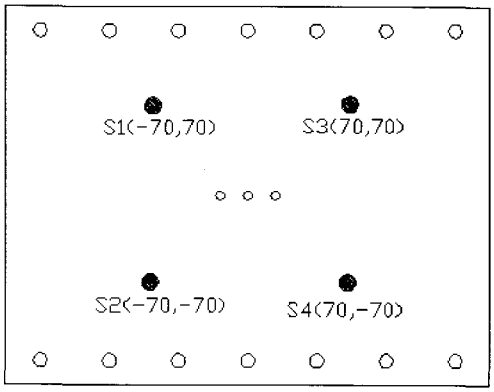


Fig. 1 Geometry of the specimen with a rectangular array of AE sensors

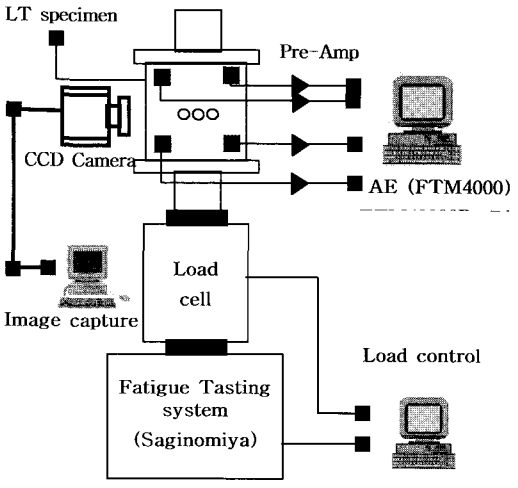


Fig. 2 A schematic diagram of experimental setup

균열의 관찰 및 길이 측정을 위해서 traveling microscope를 사용하였고, CCD 카메라(SDC-4304, Samsung Aerospace, Korea)와 연결하여 관찰 및 기록을 용이하게 하였다. 균열사진의 기록에는 이미지캡쳐 프로그램(PowerVCR II)을 사용하였다. Fig. 2는 전체적인 실험장치의 구성도를 보여준다.

2.2. 균열 크기 측정

SAW를 이용한 균열길이의 측정은 피로시험을 수행하여 균열이 발생한 4개의 AA2024-T3 알루미늄 시편을 대상으로 하여 실시하였다. 균열 측정에 사용한 탐촉자(MSWQC 226-590, Krautkramer, Germany)는 직경 0.25″이고, 중심 주파수는 10 MHz이다. 탐촉자는 90° 웨지를 사용하여 부착하였으며, 한 개의 탐촉자로 송·수신하였다. 송·수신 장치는 펄서리시버(UPR-035, C&M Tech, Korea)를 사용하여 탐촉자에서 SAW를 발생시키고, 반사되어 돌아온 SAW를 59 dB 증폭하였다. Digital oscilloscope(1502L, Yokogawa-Electric, Japan)는 증폭된 SAW 신호를 화면에 나타내주고, 증폭된 SAW 신호의 중점 관찰지점(균열 발생지점)은 zoom기능을 이용하여 관찰, 기록하였다. 그 후 파형관찰 소프트웨어(DL-wave)로 기록된 파형을 증폭하여, 지정한 두 지점의 시간차를 계산하였다. Fig. 3은 실험장치의 구성을 보여준다.

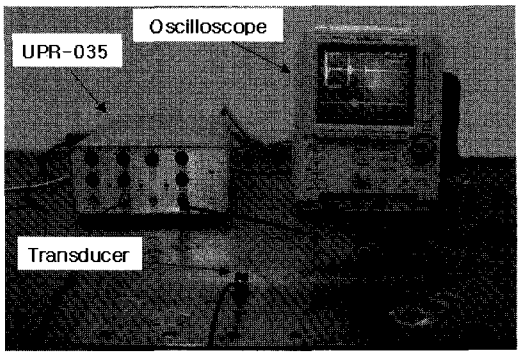
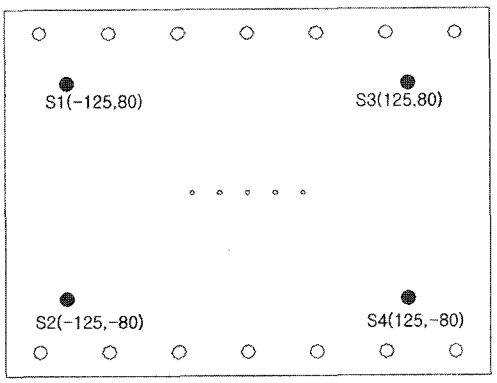


Fig. 3 Experimental setup for crack sizing

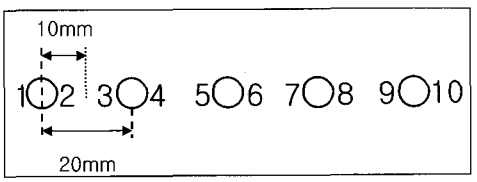
3. 실험결과 및 고찰

3.1. 균열길이와 음향방출(AE) 발생수

피로시험 시편과 센서의 배치는 Fig. 4(a)에 개략적으로 나타내었다. 피로시험 시편에 5개의 리벳구멍이 있고 균열은 구멍 좌우에서 발생하게 되므로 최대 10개가 발생할 수 있다. 균열이 발생할 것으로 예상되는 위치에 Fig. 4(b)에서 보는 것과 같이 번호를 붙였다. 피로시험 중에 탐지된 음향방출(AE) 수는 총 5196개이다. 이 중 균열이 발견되기 이전의 AE 발생수가 약 550개이고, 균열이 발견된 이후에 약 4450개가 탐지되었다. 탐지된 신호는 AE 측정 장비에 내장된 소프트웨어의 위치표정 기능을 이용하여 발생위치를 결정하였다. 신호처리는 탐지된 AE신호들 중 피로시험기에서 발생된 전기적 잡음, 유압펌프에 의한 잡음, ROI를 벗어나서 위치표정 된 신호를 제외하고 수행하였다. Fig. 5는



(a)



(b)

Fig. 4 (a) geometry of the specimen with a rectangular array of AE sensors, (b) crack numbers

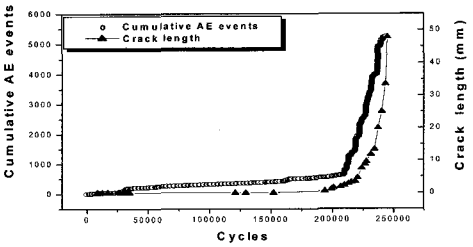


Fig. 5 Cumulative AE events and the total crack length vs. number of fatigue cycles

피로하중 사이클에 따른 균열길이와 탐지된 AE 신호의 수를 비교하여 나타낸 것으로, 피로균열 성장은 지수 함수적인 연속형으로 나타났지만 이에 수반된 AE의 발생은 어떤 특정한 균열길이에서 집중되어 계단식 곡선으로 나타났다.

피로균열은 피로시험 시작 후 193000사이클 부근에서 길이가 0.47 mm인 균열이 6번 위치에서 처음 발견되었다. 이후 1번(200100사이클), 5번(220000사이클), 9번(223500사이클), 10번(224000사이클) 위치의 순서로 균열이 발생하였다.

Fig. 6(a)는 traveling microscope로 최초로 균열을 발견하기까지 탐지된 음향방출 신호를 위치표정한 결과이다. Fig. 6(a)를 보면, 5번에서는 아직 균열을 관찰할 수 없었음에도 불구하고 음향방출이 발생했음을 알 수 있다. 이는 주로 단균열의 발생에 의한 AE신호로 추정할 수 있다. Fig. 6(b)는 193000~224000사이클에서 성장한 균열들과 AE 발생수를 나타낸 것이다. 균열길이가 긴 5, 6번에서는 AE가 다른 위치에서 보다 많이 발생하였다. 그러나 9, 10번의 경우 균열길이가 각각 2.34 mm, 2.66 mm이지만 AE 발생이 없었다. Fig. 6(c)는 224000~245000사이클에서 발생한 AE 수와 균열길이를 보여준다. Fig. 6(c)는 Fig. 6(b)보다 짧은 사이클 진행 동안 균열이 빠르게 성장하였다. 그 이유는 균열이 성장함에 따라서 구조의 하중지탱 능력은 감소하는 반면 균열선단의 응력확대계수는 증가하기 때문이다[1]. 끝으로 Fig. 6(d)에는 피로시험 시작부터 종료 때까지의 각 위치별로 AE 발생수와 균열길이를 나타내었다.

3.2. SAW를 이용한 균열길이 측정

SAW를 이용한 균열길이 측정은 다음과 같이 3단계에 거쳐서 실시하였다. 제1단계로 피로시험을

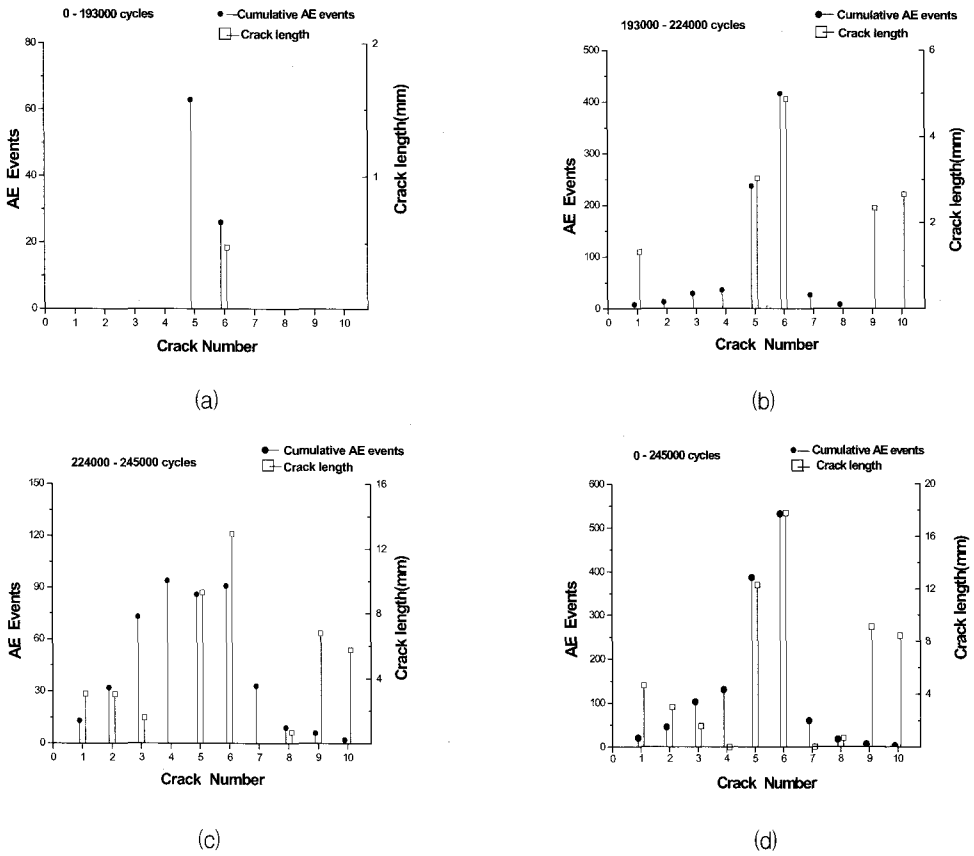


Fig. 6 Cumulative AE events and the incremental crack propagation at each site; (a) during 0~193000 cycles, (b) during 193000~224000 cycles, (c) during 224000~245000 cycles, (d) during the entire fatigue test

실행하지 않은 시편(가공시편)에서 리벳구멍의 크기를 sizing하였고, 제2단계로 피로시험을 실행한 시편(피로시편)에서 리벳구멍 주변에 균열의 존재 여부를 확인하였으며, 마지막 제3단계로 균열의 길이를 sizing하였다.

3.2.1. 제1단계 : 가공시편에서 SAW를 이용한 Hole Sizing

리벳구멍의 크기를 sizing하기 위한 예비 작업으로 SAW의 전파속도를 구하고 측정에 가장 효과적인 탐촉자의 위치를 결정하였다.

1) 탐촉자의 위치결정

시편의 리벳구멍의 중앙선에서 탐촉자를 위·아래로 이동시키며 SAW신호를 관찰한 결과 리벳구멍의 중앙으로부터 15 mm 떨어진 지점에서 오실로스코프 화면에 SAW신호가 가장 용이하게 관찰되었다. 이에 따라 탐촉자는 구멍의 중앙으로부터 15 mm 떨어진 지점에 위치시켰고, 구멍의 좌·우로 이동시키며, 리벳구멍 주변을 검사하였다.

2) 시편에서 SAW의 속도측정

SAW의 속도는 시편의 끝에서 50 mm 떨어진 지점에 탐촉자를 위치시킨 후, 탐촉자에서 발생된 SAW와 반사되어 탐촉된 SAW의 도달시간차($\triangle t$)를 구하여 식 (1)과 같은 관계로부터 속도를 계산하였다. 도달시간차는 탐촉자에서 발생된 SAW신호의 첫 번째 peak과 반사되어 탐촉된 SAW신호의 첫 번째 peak을 기준으로 구하였다.

$$v = \frac{l}{\triangle t} \tag{1}$$

송·수신된 SAW의 시간차는 32.50 μs이고, SAW의 이동거리(l)는 100 mm 였으며, 따라서 SAW의 속도(v)는 3077 m/s로 결정하였다.

3) 리벳구멍의 sizing

리벳구멍의 크기는 탐촉자와 구멍의 최단 거리에서 반사된 신호(SAW-①)와 구멍의 양 끝단에서 반사된 신호(SAW-②)의 시간차를 이용하여 리벳구멍의 직경(d)을 sizing하였다. Fig. 7은 가공시편에서 리벳구멍의 중앙에서 SAW의 이동 경로와 오실로

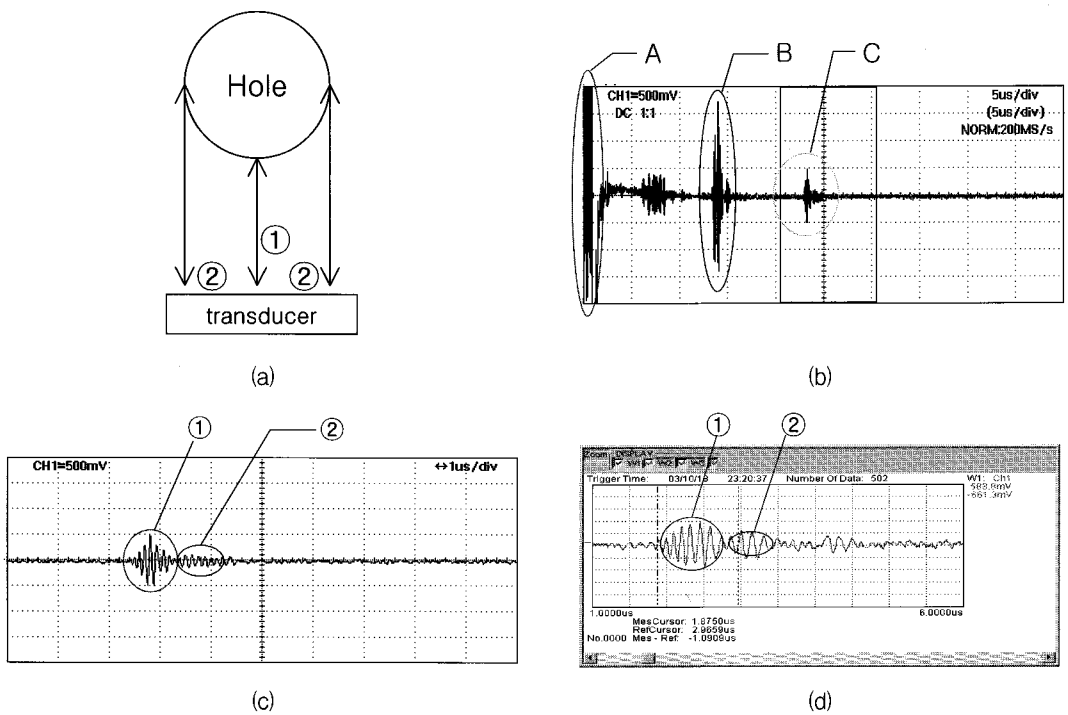


Fig. 7 A test result of hole sizing using SAW; (a) schematics of different paths of reflected SAW's, (b) reflected SAW signals detected with oscilloscope, (c) a zoomed detail of part C of Fig. 7(b), and (d) a zoomed detail of part C with the DL-wave software

스코프에 기록된 SAW신호를 보여준다.

Fig. 7(a)에 SAW의 이동경로를 단순화시켜 나타내었고, SAW-①과 SAW-②의 이동거리차이는 리벳구멍의 직경과 같다. Fig. 7(b)에서 A는 탐촉자와 웨지의 계면에서 발생하는 반사파이고, B는 웨지와 시편의 계면에서 발생하는 반사파이며, C는 리벳구멍에서 반사된 반사파이다. Fig. 7(c)는 오실로스코프의 zoom기능을 이용하여 C구역을 확대하여 나타낸 것으로 SAW-①신호와 SAW-②신호를 표시하였다. Fig. 7(d)는 Fig. 7(c)를 DL-wave 소프트웨어로 더 확대한 것으로, SAW-①신호와 SAW-②신호의 시간차를 정확히 측정하기 위한 것이다. Fig. 7(d)에 기록된 SAW-①, SAW-② 신호의 시간차는 1.09 μs이다. SAW의 속도는 3077 m/s이므로 리벳구멍의 직경은 d=1.09(μs)×3077(m/s)=3.35 mm로 sizing되었다. Fig. 7은 피로 시험편에서 리벳구멍 주위에 발생하는 균열의 탐지 및 크기 측정에 있어서 기준 data로 활용하였다.

3.2.2. 제2단계 : 피로시편에서 리벳 구멍 주변의 균열존재 여부 검사.

피로시편에서 균열이 없는 리벳구멍과 균열이 있는 리벳구멍을 검사하여 Fig. 8에 그 결과를 나타내었다.

Fig. 8의 (a)와 (b)는 균열이 없는 구멍과 균열이 있는 구멍에서 반사되는 SAW의 이동 경로를 단순화시켜서 나타낸 그림이다. Fig. 8의 (c)와 (d)에는 오실로스코프에 기록된 SAW를 나타내었고, 반사된 SAW-①, SAW-②신호의 위치를 표시하였다. Fig. 8(c)를 보면 2개의 SAW가 발생하였다. 2개의 SAW가 리벳구멍의 어느 위치에서 반사되어 탐촉된 것인지 분석하기 위해서 기준 data(Fig. 7(b))와 비교하였다. Fig. 8(c)에서 먼저 도달한 SAW-①신호가 기준 data의 SAW-①신호와 동일한 위치에서 발생하였으므로, Fig. 8(c)의 SAW-①신호는 리벳구멍과 탐촉자의 최단거리에서 반사된 SAW이다. 또한 Fig. 8(c)에서 나중에 도달한 SAW-②신호는 기준 data의 SAW-②신호와 동일한 위치에 있으므로, 리벳구멍의 양 끝단에서 반사된 SAW이다. 동일한 방법으로 Fig. 8(d)와 기준 data를 비교하면, SAW-①신호는 리벳구멍과 탐촉자의 최단거리에서, SAW-②신호는 hole의 끝단에서 반사된 SAW임을 알 수 있다. 그리고 Fig. 8의 (c)와 (d)를 비교해보면 동일한 위치에서 반사된 SAW-②신호의 에너지의 크기가 다르다는 것을 알 수 있다. SAW-②의 위치에서 탐촉된 에너지의 크기가 다르다는 것은 리벳구멍의 끝단에서 어떠한 변화가 발생했음을 의미한다. 리벳구멍 주위에 균열이 존재함에 따른 신호 에너지의 크기 변화를 알아보기 위하여 균열이 없는 리벳구멍과 균열이 있는 리벳구멍에서 에너지 크기를 비교하여 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 9의 (a)에는 균열이 없는 리벳구멍에서 반사된 SAW신호를 나타내었고, (b)에는 균열이 있는 구멍에서 반사된 SAW신호를 나타내었다. 여기서는

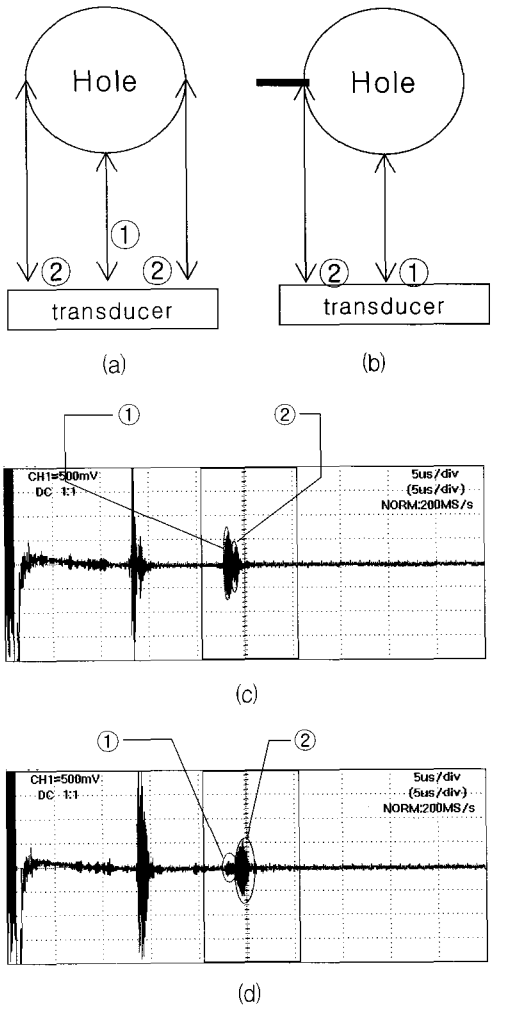


Fig. 8 A test result of crack detection at holes; (a) and (c) signals detected from around the hole with no crack, (b) and (d) signals detected from around the cracked hole

Fig. 8에서와 달리 SAW-①신호가 발생되지 않도록 제한된 범위 내에서 탐촉자를 이동시키면서 측정하였다. 그 결과 (a)와 (b)에서 한 개씩의 SAW신호만 탐촉되었고, 기준 data와 비교해보면 SAW-②만 발생했음을 알 수 있다. 그리고 균열이 없는 리벳구멍과 균열이 있는 구멍에서 반사된 SAW-②의 탐촉된 위치가 (a)와 (b)에서 동일하였다. 그 이유는 피로시험에서 발생하는 균열은 수직하중방향에 의해 모두 리벳구멍의 양쪽 끝단에서 수평방향으로 발생하여 성장하므로 리벳구멍의 끝단과 균열은 동일 선상에 있기 때문이다. 그러나 균열이 존재하는 (b)의 경우에 균열이 없는 (a)보다 큰 에너지가 탐촉되었다. 탐촉된 SAW-②신호의 위치에서 큰 에너지가 탐지되면 리벳구멍의 주위에 균열이 존재하고 있음을 알 수 있다. 따라서 피로시편에서 리벳구멍의 주위를 검사하여 균열의 발생여부를 판단하는 방법은 위에서 설명한 것처럼 SAW-②신호의 위치에서 큰 에너지가 탐지되면 균열이 발생한 것으로 판단할 수 있다.

3.2.3. 제3단계 : 피로시편에서 균열 길이 Sizing

균열의 sizing은 4개의 시편에 있는 길이가 다른 13개의 균열에 대하여 실시하였다. Fig. 10(a)는 탐촉자에서 발생된 SAW의 이동경로를 나타낸다. SAW-①는 탐촉자에서 발생한 SAW가 리벳구멍과

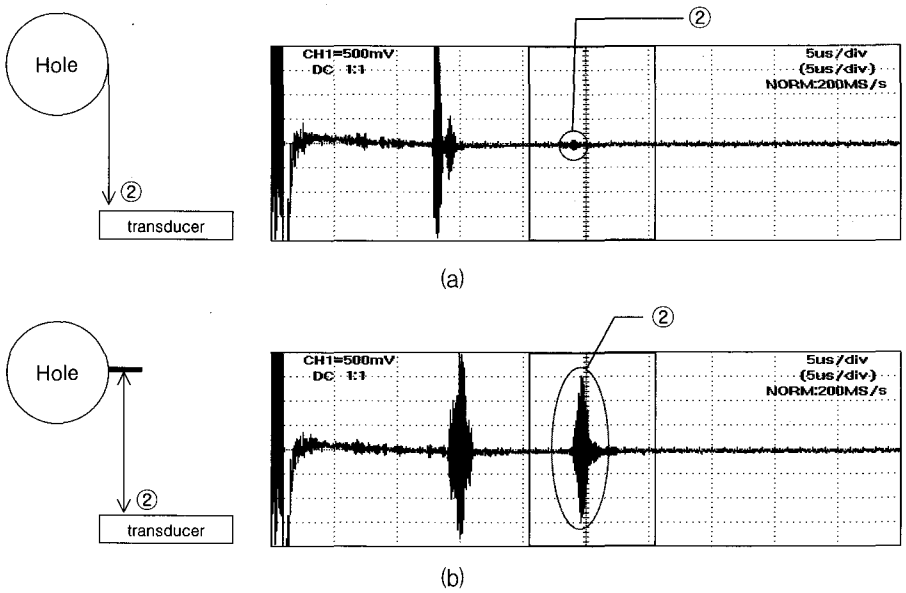


Fig. 9 Comparison of detected signals from the hole with no crack and from the cracked hole; (a) the detected signal from hole edge and (b) the detected signal from crack surface

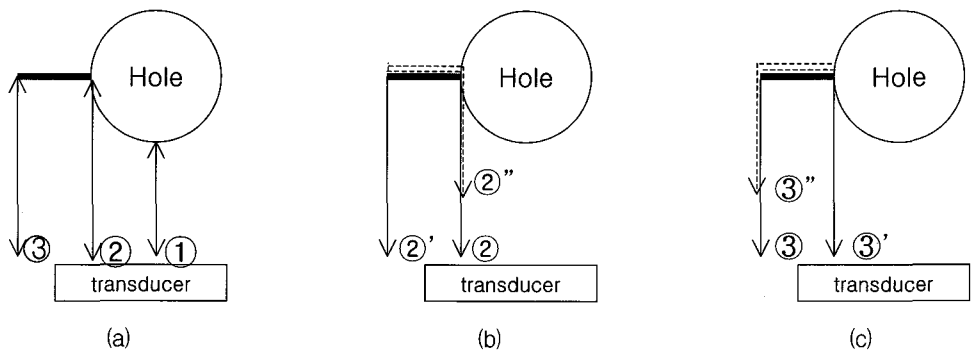


Fig. 10 Simplification of reflected SAW paths; (a) different paths of reflected SAW's, (b) various path of SAW-②, and (c) various path of SAW-③

탐촉자의 최단거리에서 반사되는 SAW이고, SAW-②는 리벳구멍의 끝단에서 발생한 균열에서 반사되는 SAW, SAW-③은 균열선단에서 반사되는 SAW이다. Fig. 10(b)에 SAW-②의 이동경로를 나타내었다. SAW-②'는 균열 시작지점(②지점)에서 균열 선단까지 이동한 후 탐촉된 SAW이다. 따라서 SAW-②와 SAW-②'의 이동거리 차이가 균열길이(a)라 할 수 있다. SAW-②는 균열선단에서 반사되어 다시 균열 시작지점으로 되돌아오고 이때 반사된 SAW를 SAW-②''라 명명한다. 그러므로 SAW-②와 SAW-②''의 이동거리 차이는 $2a$가 되고 SAW-②'와 SAW-②''의 이동거리 차이는 a가 된다. 이와 같은 방법에 따른 측정결과는 Fig. 11과 같으며, 각각의 SAW신호(②, ②', ②'')의 도달시간차로부터 계산한 결과 균열의 길이는 4.79 mm로 sizing되었다.

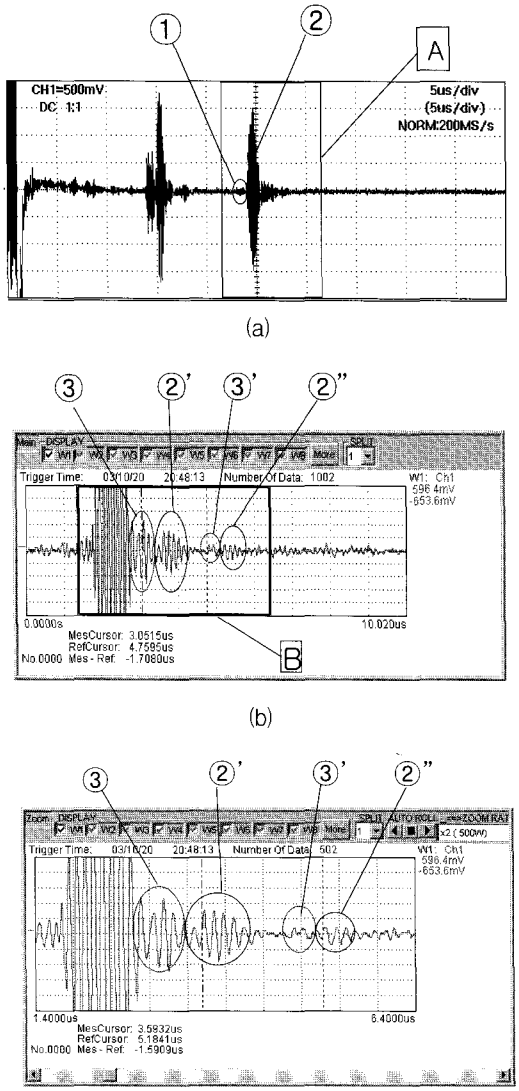


Fig. 11 A test result of crack sizing; (a) a detected signal of reflected SAW's with oscilloscope, (b) a zoomed detail of part A of Fig. 11(a), and (c) a zoomed detail of part B of Fig. 11(b)

Fig. 11(a)의 SAW-①신호는 리벳구멍과 탐촉자의 최단거리에서 반사된 SAW이고, SAW-②신호는 균열에서 반사된 SAW이다. Fig. 11(a)에서 탐촉된 신호를 분석해 보면 SAW-②신호 위치에서 기준 data보다 높은 에너지가 탐촉되었으므로 리벳구멍 주위에 균열이 발생했음을 알 수 있다. A부분을 확대하여 Fig. 11(b)에 나타내었고, SAW-③신호는 Fig. 10(a)에서 나타낸 것처럼 균열선단에서 반사된 SAW이다. Fig. 11(c)는 Fig. 11(b)의 B부분을 확대하여 보여준다. Fig. 10과 마찬가지로 SAW의 이동경로를 단순화시키면 SAW-②'와 SAW-②''의 이동거리 차이는 균열길이 a가 되고, SAW-③와 SAW-③'의 이동거리 차이 또한 균열길이 a가 된다.

Fig. 11(b)에서 측정된 SAW-③신호와 SAW-③'신호의 도달시간차(Δt)는 1.70 μs이다. 균열길이(a)는 식(2)를 이용하여 구한다.

$$a = v \times \Delta t \tag{2}$$

SAW의 속도는 3077m/s이고 SAW-③을 이용한 시간차는 1.70 μs이므로 균열길이는 5.23 mm로 sizing되었다. 한편 Fig. 11(c)에서 SAW-②'신호와 SAW-②''신호의 도달시간차는 1.59 μs로 측정되어 SAW-②를 이용한 균열길이는 4.98 mm로 sizing되었다. SAW-③를 이용한 sizing이 더 큰 오차를 보이는 이유는 SAW-②신호와 SAW-③신호가 중첩되어 SAW-③의 발생시점을 정확하게 구분하기 어려웠기 때문이다. 반면에 SAW-②을 이용한 sizing은 SAW-②'신호의 발생시점과 SAW-②''신호의 발생시점 구분이 비교적 명확하여 오차가 적게 sizing을 할 수 있었다.

Table 1에 SAW를 이용하여 sizing한 결과와 이동식 현미경을 이용하여 측정한 균열길이를 비교하여 나타내었다. 10 MHz 탐촉자를 이용한 균열 sizing은 균열의 길이가 3~5 mm 일 때, 균열에서 반사되어 탐촉되는 SAW-②와 SAW-③의 구별이

Table 1 Results of crack sizing by SAW technique in comparison with the measured by traveling microscope

Crack No.	SAW(mm)	Microscope(mm)
1	*	0.30
2	*	0.60
3	*	0.62
4	1.47	1.17
5	1.39	1.20
6	1.57	1.21
7	1.22	1.26
8	2.06	2.12
9	2.65	2.48
10	3.57	3.50
11	4.98	4.97
12	5.42	5.11
13	7.46	7.28

잘 되어 sizing의 정확도가 높았다. 반면 1~2 mm로 균열의 길이가 짧은 경우에는 반사되는 SAW의 에너지가 약하여 SAW-②와 SAW-③의 구별이 어려웠으며, 균열길이가 충분히 긴 7.28 mm에서는 반사되는 SAW의 에너지는 크지만, SAW-② 및 SAW-③ 이외에 다른 SAW가 탐촉되어 sizing의 정확도가 오히려 저하하였다. 그리고 최초에 연구목표로 설정하였던 1 mm이하 단균열에서는 반사된 SAW의 에너지는 너무 미약하여 잡음과 구별이 되지 않는 수준이어서 sizing이 사실상 불가능하였다. 1 mm 이하의 단균열을 sizing하기 위하여 15 MHz 및 25 MHz 탐촉자를 사용하여 sizing을 시도하였으나, 위와 동일한 이유로 sizing이 불가능하였다

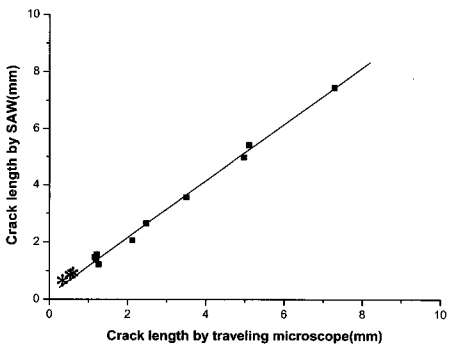


Fig. 12 Comparison of the crack lengths estimated by SAW technique with the measured by traveling microscope

Fig. 12은 Table 1의 결과를 그림으로 나타낸 것으로 균열번호 4에서 13까지의 data로부터 최소자승법으로 구한 직선의 기울기는 0.9975, 절편값은 0.1584이고 RMS오차는 0.1505이다. 이 결과로부터 SAW에 의한 피로균열의 sizing은 항상 실제보다 다소 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그림에서 *는 sizing이 불가능했던 균열길이를 현미경에 의한 측정치에 맞추어 직선상에 표시한 것이다.

4. 결 론

항공기 구조를 모사하여 리벳구멍을 가진 AA2024-T3 박판에서 음향방출을 이용하여 피로균열을 탐지하고, SAW를 이용하여 균열의 크기를 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 피로균열 성장은 지수함수적인 연속형 곡선으로 나타나지만 이에 수반하는 누적 AE 발생수 곡선은 특정한 균열길이에서 간헐적으로 급격히 증가하는 계단식으로 나타난다.

(2) 리벳구멍 주변의 균열탐지는 피로시편에서 반사되어 돌아오는 SAW의 위치와 에너지의 크기를 기준 data와 비교하여 균열의 발생여부를 판단할 수 있다. 따라서 SAW를 이용하여 리벳구멍 주위의 균열탐지가 가능하다.

(3) 중심주파수 10 MHz인 탐촉자를 사용하여 1~8 mm길이의 균열에 대하여 SAW를 이용한 sizing이 가능하다. 특히 균열길이가 3~5 mm일 때 탐촉된 SAW신호의 분석이 가장 용이하였고, sizing한 결과의 오차가 최소로 나타났다.

(4) 1 mm이하의 단균열에 대한 sizing은 균열에서 반사되는 SAW신호의 에너지가 너무 미약하여 잡음과 구별이 되지 않는 수준이므로 불가능하였다.

후 기

본 연구는 2002년도 한국과학재단의 학술연구비에 의하여 지원되었음.(R01-2000-000-00295-0)

참고문헌

[1] 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)

[2] 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)

[3] 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)

[4] 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)

[5] 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)

[6] A. Berkovits and D. Fang, "Study of fatigue crack characteristics by acoustic emission," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 51, pp. 401-416, (1995)

[7] J. and H. Krautkramer, "Ultrasonic testing of materials," Springer-Verlag, Berlin, Germany, pp. 304-307, (1990)

[8] Don E. Bray and Don Mcbride, "Nondestructive testing techniques," John Wiley & Sons, Canada, pp. 255-256, (1992)

[9] S. Vanlanduit, P. Guillaume and G. Van Der Linden, "On-line monitoring of fatigue crack using ultrasonic surface waves," NDT & E International, Vol. 36, pp. 601-607, (2003)

[10] W. Hassan and W. Veronesi, "Finite element analysis of Rayleigh wave interaction with finite-size, surface-breaking cracks," Ultrasonics, Vol. 41, pp. 44-52, (2003)

[11] S. Baby, T. Balasubramanian and R. J. Pardikar, "Ultrasonic sizing of embedded vertical cracks in ferritic steel welds," Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 40, pp. 145-151, (2003)

[12] S. Grondel, C. Delebarre and J. Assaad, "Fatigue crack monitoring of riveted aluminium strap joints by Lamb wave analysis and acoustic emission measurement techniques," NDT & E International, Vol. 35, pp. 137-146, (2002)

[13] K. J. Lee, O. Y. Kwon and Y. C. Joo, "An improved AE source location by wavelet transform de-noising technique," J. KSNT, Vol. 20, No. 6, pp. 490-500, (2000)

[14] J. C. Kim, O. Y. Kwon, S. J. Kim, "Detection of fatigue damage in aluminum thin plates with rivet holes by acoustic emission," J. KSNT, Vol. 23, No. 3, pp. 246-253, (2003)