

구조용 알루미늄 합금에서의 피로균열 열림 및 닫힘 시 AE 발생특성 연구

AE Characteristics of Fatigue Crack Opening and Closure in Structural Aluminum Alloy

정중채*, 윤동진*[†], 박휘립*, 김기복*, 이승석*

Jung-Chae Jeong*, Dong-Jin Yoon*[†], Philip Park*, Ki-Bok Kim* and Seung-Seok Lee*

초 록 피로균열 진전시 균열 열림 및 닫힘에 따른 음향방출 특성을 규명하고자 구조용 알루미늄 2024-T4와 6061-T6 재료에 대해 소형인장 시편에서의 피로균열 진전시 발생하는 AE 특성을 관찰하였으며, 기존의 AE 파라미터 분석은 물론 재료의 파단면 분석을 통해 재료특성에 따른 AE 발생거동 사이의 관계를 논의 하였다. 대부분의 음향방출 신호는 균열이 열리기 시작하는 위상과 균열이 완전히 닫히는 위상에서 많이 발생되었으며 하중을 최대로 받는 균열 완전 열림에서는 전반적으로 적게 발생됨을 알 수 있었다. 또한 재료에 따라서 균열 완전 열림 부분에서 발생하는 음향방출 특성은 달라졌으나 각 피로 사이클 주파수 변화(0.1, 0.2, 1.0Hz)에 따른 결과에서는 동일 재료일 경우 피로 사이클 주파수가 변화하더라도 각 사이클에서의 AE hit 발생 경향은 비슷하게 나타났다. 이와 같은 결과로부터 균열 열림 및 닫힘시 재료의 미세조직과 기계적 특성인 인장강도와 항복강도에 따라 AE 특성이 달라질 수 있음을 알 수 있었다.

주요용어: 음향방출, 균열 열림 및 닫힘, 피로균열, 알루미늄 합금

Abstract The objective of this study was to investigate the effect of crack opening and closure in the AE activities during fatigue test. Laboratory experiment using various materials and test conditions were carried out to identify AE characteristics of fatigue crack propagation. Compact tension specimens of 2024-T4 and 6061-T6 aluminum alloy were prepared for fatigue test. AE activities were analyzed based on the phase of the loading cycle. Generally, most of AE were generated when the crack begins opening and the crack closes fully, whereas a few in the pull opening of the crack. Also AE activity in the peak loading of cycle was different with each specimen. However, in the same material, AE activity was not affected by the change of cyclic frequency (0.1, 0.2, 1.0Hz). It was found that AE activities during crack opening and closure depend on material properties such as micro-structure, tensile strength and yield strength.

Keywords: acoustic emission, crack opening and closure, fatigue crack, aluminum alloy

1. 서 론

대형 구조물 및 항공기 재료 등과 같은 구조물 및 재

료들은 다양한 크기의 반복하중을 지속적으로 받는 경우가 많기 때문에 이들 재료에서의 피로균열 발생 및 성장은 대형사고를 야기할 수 있어 매우 치명적인 요소라 할

수 있다. 따라서 최근 이들 균열의 검출이나 감시를 위해 많은 노력을 기울이고 있는 실정이며, 음향방출 기술을 이용하여 피로균열을 검출하거나 감시하기 위한 연구 결과들이 발표되고 있다[1-5]. 특히 본 연구 이전 단계에서 SWS 490B 구조용 용접강에 대한 피로균열 진전시 음향방출 발생 특성과 응력확대계수와와의 상관관계를 다각도로 조사하였다[6-7]. 피로균열의 발생 및 진전은 일정한 허용응력 이하의 반복적인 하중 영향에 의한 균열의 열림 및 닫힘 현상을 통해 일어난다. 이 때 재료는 탄성 및 소성 변형의 과정을 거치게 되며, 이들 현상에 의해 균열 선단 지역에서 탄성파를 발생시키게 된다. 균열 열림은 최고하중일 때 균열이 가장 크게 열리는 현상으로 이 때 피로균열의 성장구동력은 증가하게 되는데, 이는 하중의 작용으로 응력이 상승하는 동안 국부적인 소성 미끄러움이 일어나 균열 진전이 일어나는 것이다. 반면 균열의 닫힘은 피로균열이 최소하중보다 높은 하중에서 일찍 닫히게 되는 현상으로서 이때는 피로균열의 성장구동력이 감소하게 되고, 따라서 균열 선단의 실질적인 응력상태는 응력확대계수 범위(ΔK)가 아닌 균열 닫힘의 영향을 고려한 유효응력확대계수(ΔK_{eff})로 표현된다. 이와 같이 균열의 열림과 닫힘 현상이 각기 다르기 때문에 AE 신호 또한 각기 다른 특성을 가지고 발생한다. 이전까지는 대부분 균열의 닫힘이나 열림에 대해 하나의 모드에 대한 균열신호를 AE 기법으로 검출하였으나, 균열의 열림과 닫힘에 대해 정량적인 분석 결과는 매우 적었다. Onof[8] 등은 2024-T4 알루미늄 합금에서 반복하중에 따라 발생하는 AE 균열 열림 및 닫힘 신호를 유형(pattern) 분류하였으며, Daniel[9] 등은 2024-T3 및 4340 탄소강 시편에 대해 균열 열림 및 닫힘에 따른 음향방출 발생 특성을 체계적으로 조사한 예가 있다. 또한 Jeong[10] 등은 항공기 구조용 합금인 Al 합금(2024-T4, 6061-T6, 7075-T6)과 교량 구조용 강(SWS 490B)의 균열 열림 및 닫힘에 대해 AE 상관관계를 분석 보고하였다. 그러나 이전 연구에서는 재료의 특성에 따른 균열 열림 및 닫힘 현상에 대한 뚜렷한 원인 규명이나 메커니즘이 분석되어 있지 않고 있으며, 파괴면에 대한 조직학적인 고찰과 AE 관계가 부족한 실정이다. 따라서 실 구조물에 발생하는 균열신호를 효율적으로 분석하기 위해서는 피로 균열 진전시 각 재료 특성에 따른 균열 열림 및 닫힘에 대한 AE 특성을 규명하는 것이 매우 중요함을 알 수 있다. 이 과정에서 피로균열 진전시 음향방출 신호의 발생과 균열의 열림·닫힘 등 발생 메커니즘과의 상관관계 및 AE 발생과 재

료의 기계적 특성에 대한 상관관계 필요성이 대두되었다. 따라서 본 연구는 구조용 알루미늄 합금인 2024-T4와 6061-T6의 피로균열 진전시 균열 열림 및 닫힘에 대한 AE 발생 특성을 규명하고, AE 파라미터 분석을 행하며 조직학적인 분석을 통해 재료의 특성과 AE 발생관계를 밝히는데 주안점을 두었다.

2. 균열 열림 및 닫힘과 AE 발생 메커니즘

Fig. 1은 균열 열림 및 닫힘 실험을 통하여 AE와의 상관관계를 규명하기 위한 균열의 열림 및 닫힘에 대한 개념을 나타낸 것이다. 피로균열 실험은 그림 (a)에 나타낸 바와 같이 반복하중에 의한 재료를 평가하는 것으로서 각각의 사이클로부터 균열 열림 및 닫힘시 AE 특성을 고찰하고자 그림 (b)와 같이 0° 에서 360° 까지 균열이 열리고 닫히는 과정을 위상(phase)에 대한 하중의 변화로 나타내었다. 차후 분석에서 사용되는 그림들은 피로시험 중 모든 반복 하중에 대한 AE 결과를 그림 (b)에 적용하여 나타내었고, 0° 와 360° 는 그림 (d)에 나타낸 바와 같이 균열이 완전히 닫힌 부분이며, 180° 에는 그림 (c)와 같이 균열이 완전히 열리는 지점을 나타낸다. 균열 열림은 재료에 가해지는 하중이 증가하는 0° 부터 180° 까지 균열이 열리는 위상을 나타내며, 균열 닫힘은 180° 지점으로부터 360° 지점으로 균열이 닫히기 시작해 완전히 닫히는 위상을 나타낸 것이다. 본 실험에서는 반복 하중시 응력이 증가할 때와 감소할 때 발생하는 탄성파를 AE 센서를 사용해 취득하였으며 각 위상에서 발생되어진 AE 신호를 분석하였다.

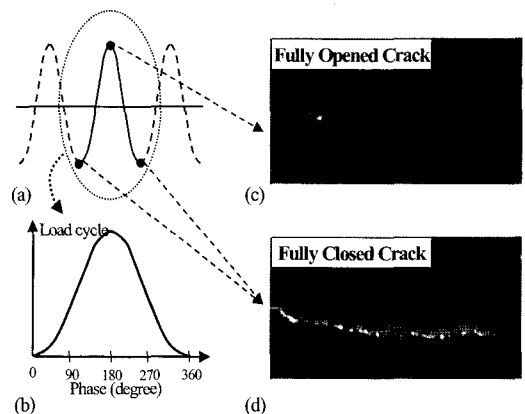


Fig. 1 Concept of crack opening and closure

3. 실험 방법

3.1. 시편

본 연구에서 사용한 시편은 항공기 구조용 재료로 널리 사용되는 알루미늄 합금(AI 2024-T4, AI 6061-T6)을 대상으로 하였으며, 피로균열 진전시 균열 열림 및 닫힘 실험을 위해 12.5mm 두께의 CT 시편으로 제작하였다. AI 2024-T4는 지름 100mm의 환봉으로부터, AI 6061-T6는 17mm 두께의 압연된 판재로부터 채취 가공하였다. AI 2024-T4는 균열진전 방향이 원주 압출 방향으로 수직인 LT 시편과 원주 압출 방향에 평행한 TL 시편 2가지를 제작하였으며, AI 6061-T6는 LT 방향의 시편만 제작하여 실험을 수행하였다. AI 2024-T4는 대표적인 석출경화형 합금으로서 항공기의 구조재 및 트럭차륜 등에 주로 사용되는 재료이며, AI 6061-T6는 내식성이 요구되며 높은 하중이 걸리는 구조물에 주로 사용되는 재료로서 항공기, 트럭, 선박 및 수압관 등에 주로 사용된다. 각 시편에 대한 명칭 및 실험조건을 Table 1에 나타내었다. 모든 시편은 먼저 웨브론 노치부에 pre-crack을 발생시켰는데 실험의 속도를 증가시키고자 실제 실험구간 적용하중보다 최소 하중을 25% 높게 설정하였다. 웨브론 구간은 균열을 빠르게 진전시키기 위해 4Hz로 하였고, 이후 예비균열 구역에 균열이 나타나기 시작하면 먼저 생성된 소성영역의 영향을 최소화하기 위해 각 실험 조건에 맞는 피로사이클로 변환시켰다.

3.2. 실험장치

피로 실험은 기계식 재료시험기 Instron(Model 8652)을 사용하였으며 피로균열 열림 및 닫힘 거동을 면밀히 관

찰하기 위해 0.1Hz, 0.2Hz 및 1.0Hz의 각기 다른 피로 사이클 주파수에 대해 일정한 진폭 하중에서 수행하였다. 이 때 모든 균열 열림 및 닫힘에 대한 실험 용력비(stress ratio)는 동일한 0.1이었다. 균열 진전시 보다 정확한 균열진전 속도 및 균열길이를 측정하기 위해 CT 시편 한쪽 표면을 정마한 후 1mm 간격으로 일정한 표시 선을 그었으며, 표면 균열진전 속도 및 길이 측정은 마이크로 증렌즈를 이용하여 광학적으로 측정하였다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 균열길이는 마이크로 증렌즈에 장착된 CCD 카메라를 통해 관측용 비디오 모니터에 직접 연결하였으며, 균열 진전속도 및 길이 측정은 0.1mm 단위로 매우 정밀하게 측정하였다. 균열이 진전하는 이미지를 보다 자세히 관찰하고자 이미지 캡처(image capture) 프로그램(NIP사, model: DT3155)을 사용하였으며, 각각의 반복 하중에 따른 균열 열림 및 닫힘과 AE 신호의 정확한 응답을 기하기 위해 기계식 피로 시험기에 clip on gage를 부착하여 사인(sine)과 하중에 따른 AE 발생을 기록하였다.

AE 신호의 측정을 위해 다채널(multi-channel) 상용 AE 시스템인 MISTRAS 2001 (PAC)과 디지털 오실로 스코프(LeCroy 9354A)를 사용하였다. 데이터 취득을 위한 AE 센서는 2개가 사용되었는데 하나는 실제 교량에 주로 사용되는 300kHz (R30, by PAC) 공진형 센서이며, 다른 하나는 AE 파형과 주파수 분석을 위해 100~1,000kHz 주파수 범위의 광대역형 센서(WD, by PAC)를 추가적으로 사용하였다. AE 센서의 배치가 끝난 후 하중이 작용하지 않고 잡음이 없는 조용한 상태에서 연필심 파괴 실험을 통해 센서의 감도를 확인하였다. 모든 실험에서 문턱값(threshold)은 30dB로 설정되었으며 균열진전시 방출되는 균열신호는 프리엠프에서 60dB로 증폭하였다. 프리엠프를 통하여 증폭 출력된 균열신호는 디지털

Table 1 Test conditions and mechanical properties of each specimen

Specimen Name	Rolling direction	Fatigue cycle	Material	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
A2-L/0.1 A2-L/0.2 A2-L/1.0	L-T	0.1 Hz 0.2 Hz 1 Hz	AI2024-T4	540	412	14
A2-T/0.1 A2-T/0.2 A2-T/1.0	T-L	0.1 Hz 0.2 Hz 1 Hz				
A6-L/0.1 A6-L/0.2 A6-L/1.0	L-T	0.1 Hz 0.2 Hz 1 Hz				

오실로스코프로 입력되었고 각 신호에 대한 파형은 2.5MHz의 샘플링 속도로 2,500개의 데이터로 디지털화하였으며, 저장된 데이터는 실험이 끝난 후 AE 파형과 주파수 분석을 위해 사용되었다.

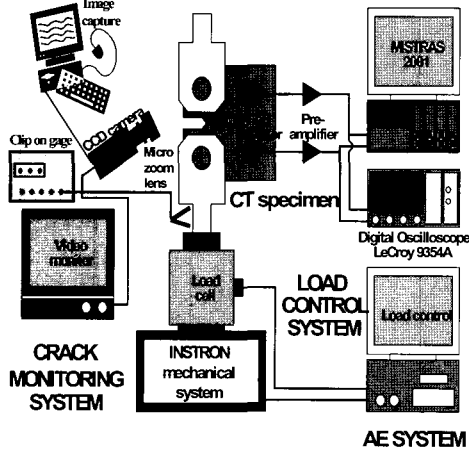


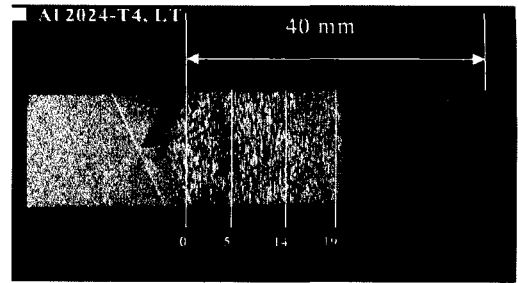
Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup for crack opening and closure

4. 결과 및 고찰

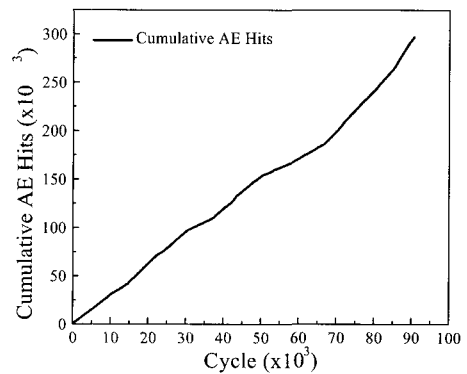
4.1. AI 2024-T4 방향성에 따른 균열 열림 및 닫힘 현상

4.1.1. LT 시편 특성

피로사이클 수가 증가함에 따라 발생하는 누적 AE hit와의 관계를 분석하고 각 지점에서의 균열 열림 및 닫힘에 대한 AE와의 상관관계를 규명하고자 하였다. Fig. 3에서 (a)는 AI 2024-T4-LT 시편 실험이 끝난 후 파단된 표면을 거시적으로 관찰한 것이며, (b)는 누적 AE hit와 피로사이클 관계를 나타낸 실험 결과이다. 먼저 (a)의 거시적인 관찰로부터 보는 바와 같이 실험구간에서 크게 3 구역 표면으로 나타남을 알 수 있었다. 피로균열 진전 구간은 약 20mm였으나 앞부분의 웨브로 노치 다음에 5mm까지는 예비균열 구간으로서 주 실험 부위인 5~20mm구간의 표면과 다르게 나타났다. 예비균열은 다른 구간과 달리 표면의 색상이 흑색으로 보였으며 표면 또한 거친 것으로 나타났다. 이는 예비균열의 균열 진전을 빠르게 하기 위해 하중 사이클 주파수를 고주파수 및 고하중으로 한 결과에 의한



(a)



(b)

Fig. 3 Photograph for investigation of fracture surface (a) and cumulative AE hit vs. fatigue cycle(b) for AI 2024-T4-LT specimen

응력 집중으로, 재료의 파단이 빠르게 일어난 결과에 의한 균열 진전 길이가 짧아 상·하 표면간의 마찰이 심하기 때문에 마찰열에 의한 산화 때문인 것으로 해석된다. 그림 (b)는 피로사이클 수에 따른 누적 AE hit를 나타낸 것으로서 거의 직선적으로 증가함을 나타내었다. 본 실험에서는 약 95,000 사이클까지 피로균열 진전 실험이 진행되었으며, 이 구간에서 각기 10,000 사이클씩 9단계로 분리하였다. AE 특성상 발생신호 데이터가 무수히 많기 때문에 각 단계로부터 1,000 사이클을 임의의 선택하여 반복하중에 따른 균열 열림 및 닫힘을 분석하였다.

Fig. 4는 Fig. 3 (b)에 나타낸 피로 사이클 수 변화에 따른 누적 AE 발생 수를 균열 열림 및 닫힘 현상으로 설명하기 위해 하중변화(0~360°)에 대한 AE hit를 히스토그램으로 나타낸 결과이다. 전반적으로 하중의 변화에 따라 각 사이클 과정(0~360° phase)에서 AE 발생이 존재하는 것을 관찰할 수 있었으며, 피로사이클 수가 낮은 균열 진전 초기(2,000~3,000 사이클)에는 균열이 열리기

시작한(0°) 위상과 균열이 완전히 닫히는(360°) 위상에 많은 AE 신호를 발생하였다. 그리고 33,000~34,000 피로 사이클 구간부터는 균열이 완전히 열리는(180°) 곳에서 균열신호가 집중적으로 나타나기 시작함을 관찰할 수 있었다. 이후로 피로사이클 수가 증가함에 따라 발생하는 균열 AE 신호는 균열이 완전히 열리는(180°) 위상으로 집중되었으며, 균열로부터 발생하는 AE 신호 또한 매우 많아졌다. SIF 값이 가장 큰 85,000~86,000 사이클의 경우 균열 신호가 45~230° 위상에 집중되어 있음을 보여주고 있으며, 특히 다른 지점에 비해 180° 위상에 많은 AE 신호가 나타남을 확인하였다. 균열진전 초기에는 진전된 균열 길이가 짧기 때문에 인장-인장의 경우 균열 선단부

근의 소성 영역이 활발하지 않아 탄성영역에 의한 파면간 접촉 마찰 신호가 균열이 완전 열림 부분보다는 닫힘 부분에 많기 때문에 추정된다. 그리고 균열 크기가 커지고 피로사이클 수가 증가함에 의해 재료의 소성변형도 심하게 일어나며, 균열 진전된 파면간의 접촉이 균열 초기보다 적기 때문에 균열이 최대로 열리는 위상에 많은 AE 신호를 발생시키게 되는 것으로 판단된다. 그러나 이러한 균열 열림 닫힘에 나타난 균열 신호만을 가지고 전체적인 AE 특성을 평가하기에는 무리가 있다. 따라서 균열의 열림 및 닫힘 부분에 대해 발생한 AE 신호뿐만이 아닌 최대진폭과의 관계를 고찰하고자 하였다.

Fig. 5는 Fig. 4에 나타난 피로 사이클 수 변화

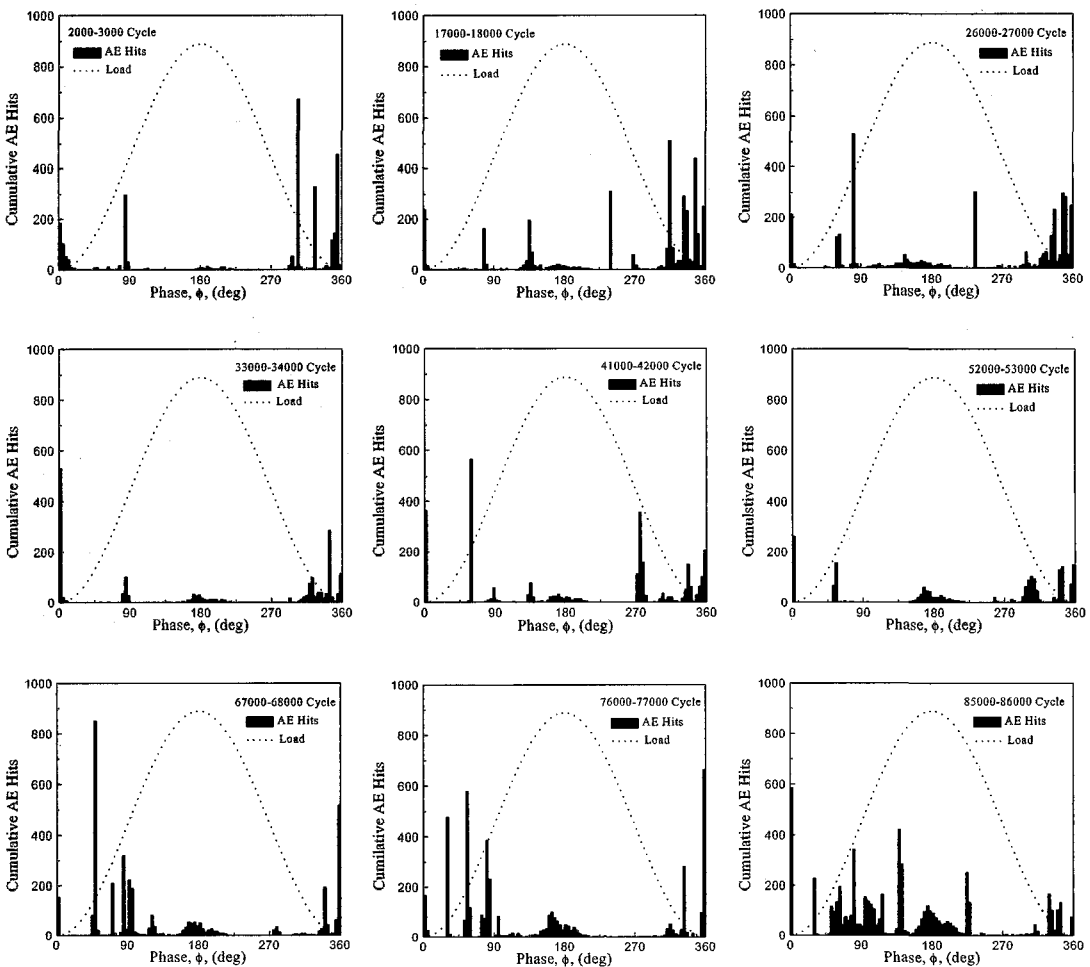


Fig. 4 Cumulative AE hits vs. loading phase of Al 2024-T4-LT specimen

(0~360°)에 따른 AE 최대진폭을 분석한 결과로서 전반적으로 균열 개시 및 완전 닫힘 위상에 비해 균열이 완전히 열리는 위상에서 보다 높은 진폭을 가지는 AE 신호가 생성됨이 관찰되었다. 즉, 균열진전 초기 AE 히스토그램은 균열 열림 및 닫힘 위상에 많이 발생하였지만 AE 최대진폭은 균열이 완전히 열리는 180° 위상에 고진폭의 AE가 발생하는 경향을 보였다. 그리고 피로균열이 점차 진전되어 피로 사이클 수가 증가될수록 고진폭의 AE 신호가 균열 열림 부분에 집중적으로 나타남을 85,000~86,000 사이클 그림을 통하여 관찰할 수 있다. 이와 같은 이유는 균열의 크기가 커짐에 따라 파면간 마찰에 의한 신호보다는 응력의 집중에 의한 균열 선단 소성구역 변형이 활발해짐에 의해 균열이 완전히 열리는 부분에서 고진폭의 AE 신호가 많이 생성되었기 때문으로 추정된다.

4.1.2. TL 시편 영향

시편의 압출 방향인 결정립의 성장 방향으로 피로균열이 진전되는 경우에 따른 균열 열림 및 닫힘과 AE 특성의 상관관계를 규명하고자 AI 2024-T4-TL 시편에 대해 실험을 진행하였다. Fig. 6은 피로 사이클 하중변화(0~360°)에 대해서 (a)는 누적 AE hit 히스토그램을 (b)는 AE 최대진폭을 나타낸 결과이다. (a)의 누적 히스토그램에서 대부분 각 사이클 과정(0~360° phase)동안 하중의 변화에 따라 전 과정에 AE 발생이 존재하는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 특징은 대부분의 모든 구간에 나타난 현상으로서 균열 개시 지점부터 균열이 완전히 열리기 직전까지의 AE hit 발생 수가 균열이 닫히기 시작하여 완전히 닫히는 부분에 비해 훨씬 많이 발생함을

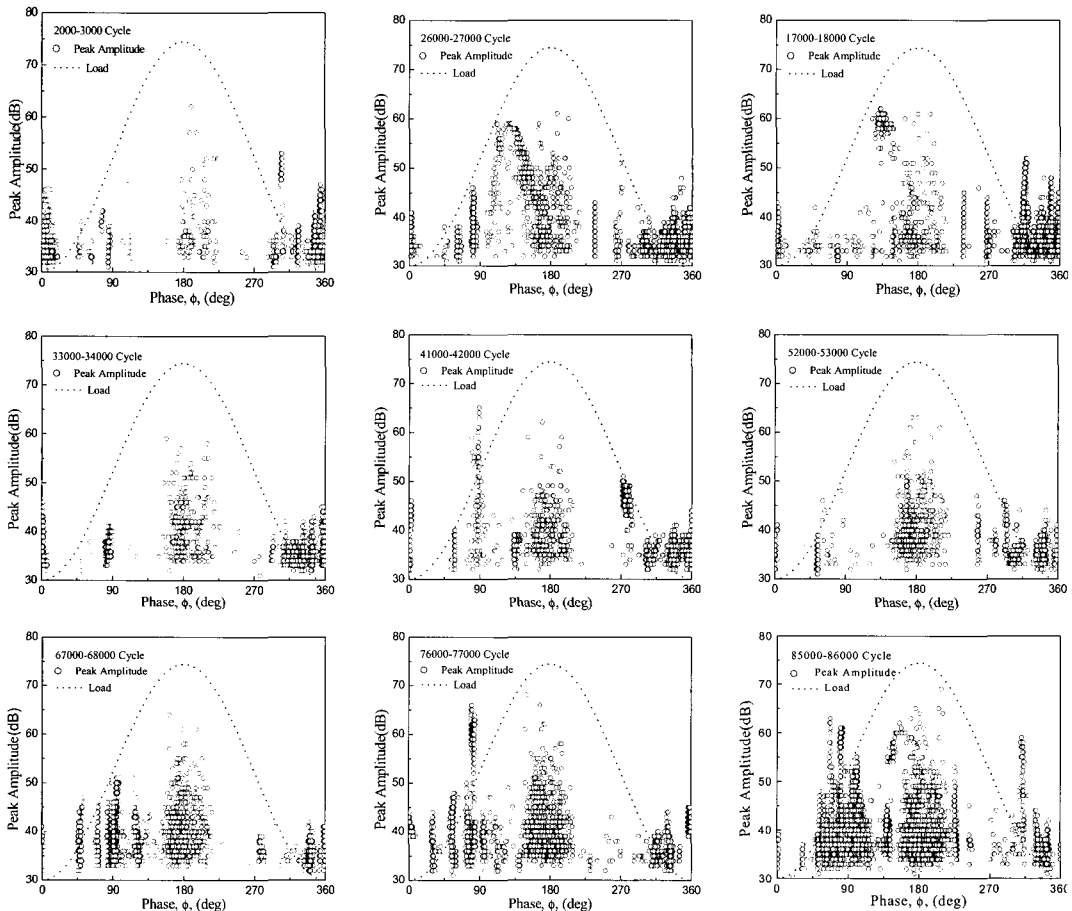


Fig. 5 Distribution of peak amplitude with loading phase for Al 2024-T4-LT specimen

나타내었다. 이는 균열이 닫힐 때의 소성 변형에 비해 균열이 열릴 때의 균열선단 소성변형이 훨씬 활발하다는 것을 나타낸다. 또한 피로사이클 수가 낮은 균열 초기(4,000~5,000 사이클)에는 균열이 열리기 시작한 위상(0~100°)과 균열이 닫히기 시작하는 위상(210~320°)에 많은 AE 신호를 발생하였다. 이러한 현상은 균열이 약 13mm 정도 진전한 36,000~37,000 사이클도 비슷한 결과를 보였으나, 균열 진전이 많이 일어난 균열길이 19mm(65,000~66,000 사이클)는 AE 발생 양상이 많이 다르게 나타난 것을 볼 때 피로사이클 수에 따라라도 AE 발생 경향은 다르게 나타남이 확인되었다. 균열 길이가 약 19mm인 지점은 다른 지점과 달리 하중변화 모든 구간에서 다양하게 AE hit가 발생되었으며, 균열이 최대로 열리는 180° 위상에서 그 발생 양이 크게 증가되었음을 알 수 있었다. 또한 전반적으로 균열이 증가함에 따라 AE hit

발생은 점차적으로 증가하여 파단 직전 부분에 가장 많은 발생량을 보여주고 있다. 이는 앞절의 LT 시편에서 언급한 것과 같이 피로 사이클 수가 증가함에 따라 균열의 크기가 커지고 재료의 소성변형도 심하게 일어나며, 균열 진전된 표면간의 접촉이 균열 초기보다 적기 때문에 균열이 최대로 열리는 위상에서 균열 열림 AE 신호를 많이 발생시켰기 때문이다. AE 발생량은 LT 시편에 비해 TL 시편에 많았음을 알 수 있는데 이는 결정립의 방향과 석출물의 방향성에 의한 것으로 해석할 수 있다. 즉, 석출물이 결정립계에 주로 분포되어 있는 계면에 응력이 집중되어 균열이 발생하게 되면 TL 시편의 경우 LT 시편에 비해 결정립의 방향 및 석출물의 배열 방향이 균열 진전 방향과 평행하기 때문에, 이러한 계면을 따라 균열이 진전되는 경우 계면 석출물들의 균열진전 방해에 의한 AE 발생이 많아진 것이다.

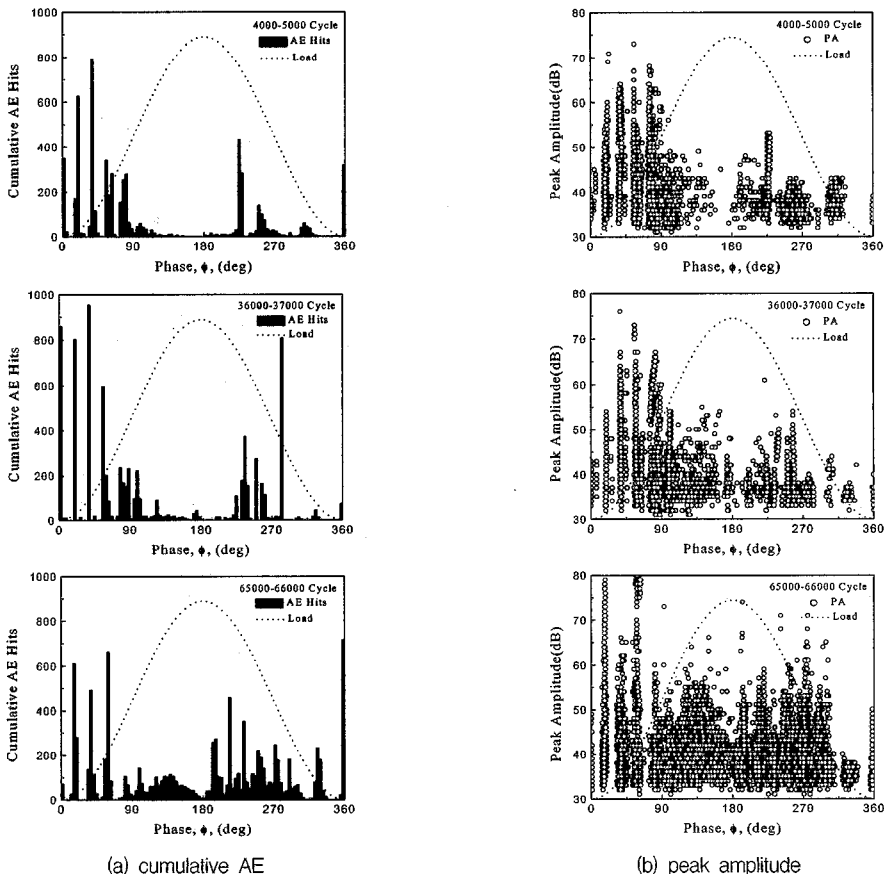


Fig. 6 Distribution of cumulative AE hits and peak amplitude vs. loading phase for Al 2024-T4-TL specimen

그림 (b)는 그림 (a)에 나타낸 피로 사이클 수 및 균열 진전 지점이 같은 곳에 대해 하중변화($0\sim 360^\circ$)에 따른 AE 최대진폭을 분석한 것이다. 최대진폭은 전반적으로 LT 시편과는 다른 양상을 나타내었는데 균열 개시 부분에서 고진폭의 AE 신호를 다량 발생시킴을 알 수 있었다. 그리고 균열 진전 중간 부분까지는 180° 위상에서 고진폭의 AE 신호가 나타나지 않았지만, 균열 길이 약 19mm 지점에서는 약 60dB의 크기를 갖는 많은 균열신호들이 나타남을 관찰되었다. 이는 균열의 크기가 커짐에 따라 파면간 마찰에 의한 신호보다는 응력 집중에 의한 균열 선단의 소성구역 변형이 활발해 지는 것에 의해 균열이 완전히 열리는 부분에 고진폭의 AE 신호가 많이 생성되었기 때문으로 추정된다. 또한 LT 시편에 비해 TL 시편에서 고진폭 AE 신호를 나타냄을 확인할 수 있었는데 이는 밴드 형상으로 길게 배열되어 있는 계면을 따라 균열이 진전되었기 때문으로 사료된다.

4.2. 알루미늄 6061-T6의 균열 열림 및 닫힘 현상

4.2.1. AE 파라미터 분석

Al 6061-T6-LT 시편의 균열진전은 약 21mm 까지 수행되었으며 약 45,000 사이클까지 피로균열 진전 실험이 진행되었다. 이 구간에서 각기 5,000 사이클씩 9단계로 정하였으며, 그 중 1,000 사이클을 선택하여 반복하중에 따른 균열 열림 및 닫힘을 분석하였다. 균열 초기인 500-1,500 사이클, 그리고 균열진전 중간부인 25,500-26,500 사이클과 파단 직전으로서 균열진전 마지막 지점인(균열길이 약 20mm) 43,500-44,500 사이클에 대한 3곳의 결과를 제시하였다.

Fig. 7은 피로 사이클 하중변화($0\sim 360^\circ$)에 대해서 (a)는 누적 AE hit를 히스토그램으로 나타내었으며, (b)는 최대진폭을 나타낸 결과로서 누적 AE hit 발생은 앞선

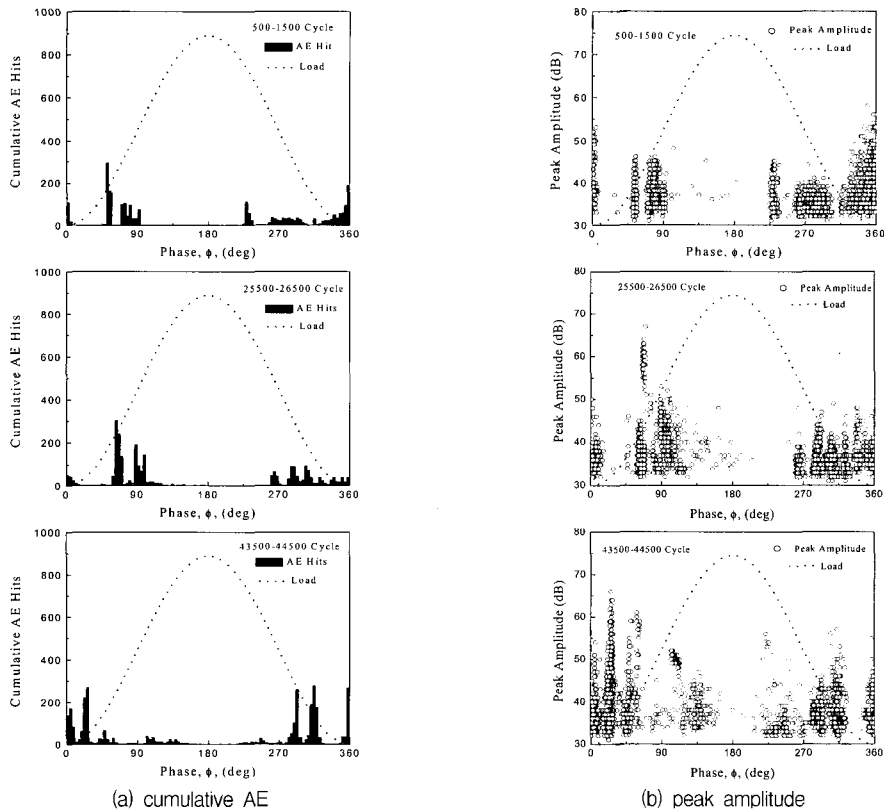


Fig. 7 Distribution of cumulative AE hits and peak amplitude vs. loading phase for Al 6061-T6-LT specimen

Al 2024-T4 합금에 비해 매우 적게 나타남을 확인하였다. 그림 중 (a)에 나타나듯이 전반적으로 균열의 열림 개시와 닫히는 위상 일부에만 AE 신호들이 발생되었으며, 균열이 완전히 열리는 180° 위상에는 균열 신호가 거의 나타나지 않았다. 이를 그림 (b)의 최대진폭으로 고찰하면 균열신호 생성지점에 대해 전반적으로 균열 개시 위상에서 70dB 정도 되는 고진폭의 신호가 일부 나왔을 뿐 다른 위상에서는 작은 진폭을 가진 AE 신호만이 생성되었음을 보여준다. Al 6061-T6의 경우 AE의 발생 개수가 Al 2024-T4 합금에 비해 현저하게 떨어짐이 관찰되었는데 이는 재료의 특성에 기인한 것으로, Table 1에 나타낸 바와 같이 Al 2024-T4 합금의 경우 인장강도 및 항복강도가 Al 6061-T6에 비해 매우 높게 나타난 것과 관련이 있음을 암시한다. 연성 조직과 취성 조직 차이에 의한 인장강도 및 항복강도의 영향에 의한 균열 열림 및 닫힘시 AE 신호의 형태가 매우 달라짐을 알 수 있었다. 그리고 낮은 진폭을 가진 AE 신호들은 전위들의 미세한 이동에 의한 소성변형의 결과에 의한 것이며, 높은 진폭을 가진 AE 신호들은 미세한 전위 이동에 의한 소성변형 영향을 받아 마이크로 균열 혹은 입계 분리(grain delamination)에 의한 결과로 추정된다.

4.2.2. 주사전자현미경 분석

Fig. 8은 균열 열림 및 닫힘에 대한 파단면의 정보를 얻고자, 또한 AE 신호 발생 수 및 최대진폭의 값이 균열진전 상태에 따라 달라지는 것에 대한 정보를 얻기 위해 Al 6061 시편의 피로균열진전 시험 후 파단면을 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 결과를 보여 주고 있다. 저배율과 고배율을 통해 관찰한 결과 균열진전 부위에 따라 파단면이 확연하게 달라짐을 알 수 있었는데 관찰 부분은 균열진전 중간 부분인 10mm, 그리고 후반부로서 파단전 부분인 20mm 부위로 나누어 관찰하였다. 균열길이 10mm 지점은 균열진전속도가 느린 곳으로서 주로 우측 그림과 같은 매우 조밀한 스트라이이션을 관찰할 수 있었는데, 이는 동일 단위 길이 당 피로 사이클 수가 많기 때문이며 상대적으로 낮은 응력확대계수 값으로 인해 파단면은 전체적으로 부드러운 경향을 나타내었다. 반면, 균열진전 후반부(균열길이 20mm)의 파면에서는 전체적으로 균열진전 방향으로 넓은 간격의 스트라이이션을 관찰할 수 있었으며, 파면의 모습은 응력확대계수 값이 큰 조건으로 인해 좀더 거친 파단면임을 알 수 있었다. 따라서 균열진전속도가 느

린 10mm에 비해 균열진전 속도가 빠른 20mm 지점에서 보다 많은 AE 발생 및 고진폭의 최대진폭을 나타내었다.

4.2.3. 투과전자현미경 분석

Fig. 9는 Al 6061-T6의 시편 중 각 지점에 대한 파단면의 전위 구조 변화 및 석출물의 형태를 나타내기 위해 투과전자 현미경으로 분석한 결과이다. 먼저 (a)는 응력을 전혀 받지 않은 지점을 관찰한 것이며, (b)는 균열진전 초기지점인 약 6mm, (c)는 균열진전 중반인 약 13 mm 지점 그리고 (d)는 피로균열 후반부인 약 20 mm 지점을 관찰한 결과이다. (a)에서는 작은 크기의 석출물들이 소량 균일하게 배열하고 있었으며 응력을 받지 않은 관계로 전위 양상은 나타나지 않았다. 그러나 피로균열이 진전됨에 따라 (b), (c) 및 (d)의 경우에는 전체적으로 전위가 점점 증가하는 양상을 보였으며, Mg₂Si₂의 석출물 또한 매우 증가하는 경향을 나타내었다. 이와 같이 피로균열이 증가함에 따라 석출물의 크기가 증가하는 것은 알루미늄 합금의 경우 낮은 온도에서 장시간 영향을 받게 되면 인공시효 현상이 발생하기 때문에 석출물의 성장이 일어나 과시효되는 것에 의한 것으로 추정된다. 전위의 성장은 가해지는 응력의 집중에 의한 현상으로 이러한 전위 발생 및 이동에 의하여 AE 발생원이 된다는 사실을 고려할 때[11] 본 시편의 AE 발생은 전위 발생·이동에 의한 슬립 현상 및 micro-crack에 의한 것임을 암시해준다. 이러한 결과들도 앞서 설명한 재료의 물성에 따른 균열진전 및 AE 발생 차이에 대한 근거를 뒷받침한다고 볼 수 있다.

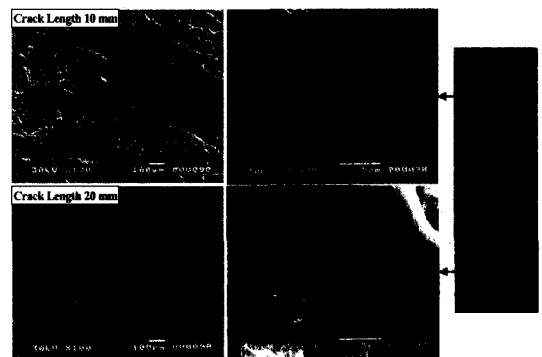
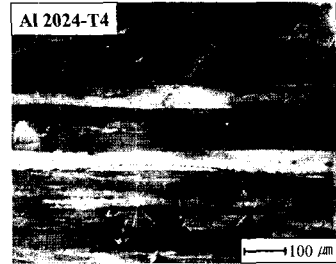
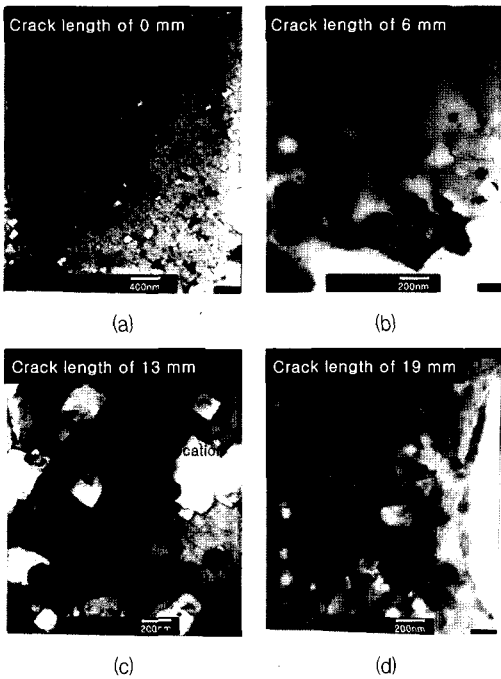
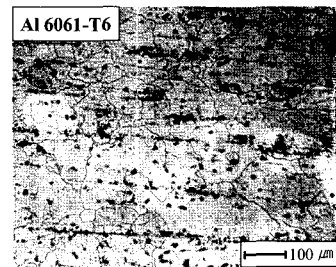


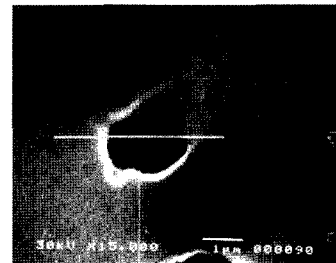
Fig. 8 Fractography of each stage for Al 6061-T6-LT specimen



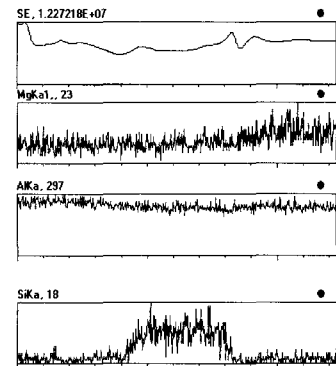
(a) Al 2024-T4 optical photograph



(b) Al 6061-T6 optical photograph



(c) Al 6061-T6 SEM photograph



(d) Al 6061-T6 EDS graph

Fig. 9 TEM micro-structures of specimen for Al 6061-T6-LT specimen

4.3. 시편의 미세 조직 분석

Fig. 10은 실험에 사용된 각 재료의 미세조직을 나타낸 것으로 광학현미경을 이용해 $\times 100$ 의 배율로 관찰한 결과이다. (a) Al 2024-T4의 경우 Al-Cu-Mg 합금으로 압출 방향으로 기다란 밴드 형상의 결정입내와 결정 입계로 구분되어 있으며, Al_2CuMg (black)의 석출물이 주로 결정립계에 분포되어 있음을 보여준다. 석출물은 기지 조직인 알루미늄에 비해 경도가 매우 높기 때문에 이 부분에 균열이 진전될 경우 AE 발생 경향은 기지재와 달라질 수 있을 것으로 추측된다. (b)부터 (d)까지는 Al 6061-T6 재료의 미세조직과 성분 분석을 나타낸 결과이다. (b)는 광학현미경 결과를 나타낸 것으로서 Al-Mg-Si 합금으로 준안정상인 Mg_2Si_2 석출물(black)이 입내에 주로 분포되어 있고 결정립은 압연 방향으로 $50\sim 150\mu m$ 크기의 불규칙한 형상을 가지고 있음을 알 수 있다. (c)는 (b)의 광학현미경 결과에서 보여지는 석출물에 대해 SEM으로 분석한 결과를 나타낸 것으로서 Mg_2Si_2 석출물들이 기지조직에 포함되어 있음을 보여준다. (d) 그림은 (c)에 보여지는 기지조직과 석출물에 대해 EDS(energy dispersive spectroscopy)로 라인

Fig. 10 Photographs of optical microscope for investigation of micro-structure and EDS analyser for inclusion investigation of aluminum alloy

분석한 결과 Al과 Mg 및 Si 상이 검출되는 것으로 볼 때 Mg_2Si_2 석출물을 이루고 있음을 확인하였다. 따라서 피로 균열 진전시 이런 석출물들과 균열이 만나게 되는 것에 의해 AE 발생 특성이 달라질 것으로 추정된다.

4.4. 피로 사이클 주파수 변화에 따른 균열 열림 및 닫힘 거동

Fig. 11부터 13은 각 재료의 CT 시편을 일정한 하중진폭에서 0.1Hz, 0.2Hz 및 1.0Hz의 각기 다른 피로사이클 주파수 변화에 따른 실험 결과로, 각 사이클 하중변화(0~360°)에 대해 (a)는 누적 AE hit를 나타내었으며, (b)는 최대진폭의 결과를 나타내었다. 본 실험은 18mm 이상 균열이 이미 진전된 것을 사용한 것으로 전체 피로의 80% 이상 영역에서 약 5분 정도 수행하였다. 따라서 0.1Hz의 경우 약 30 사이클, 0.2Hz는 150 사이클, 그리고 1.0Hz는 약 300 사이클동안 실험이 진행된 결과를 나타낸 것이다. 각각의 사이클 주파수 그림 중 (a)의 누적 AE 발생 수 고찰 결과, 동일재료에서는 피로사이클 주파수가 변화하더라도 각 사이클 하중변화(0~360°)에서 AE 발생 경향은 대부분 비슷하게 나타남을 관찰하였다. 사이클 주

파수가 낮은 0.1Hz, 0.2Hz는 균열 개시 및 닫힘 위상에서 많은 AE 신호가 발생하는 것이 관찰되었으며, 사이클 주파수가 빠른 1.0Hz에서는 Al 2024-T4 합금의 경우 균열이 최대로 열리는 위상에 많은 AE 신호가 나타남을 확인하였다. 그러나 Al 6061-T6의 경우 사이클 주파수 변화가 있더라도 균열 열림 및 닫힘 위상에서만 AE 신호가 나타났으며, 균열이 최대로 열리는 지점에서는 아주 미미하거나 전혀 발생하지 않았다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 재료의 인장강도, 항복강도, 연신율에 의한 연성 및 취성재료 차이점에 의한 재료의 조직 또는 물리적 특성과 밀접한 관계가 있음을 암시하는 것이며, 같은 Al 2024-T4 시편이라도 균열진전 방향성에 의한 차이점이 현저하게 달라짐을 확인할 수 있었다. 결과적으로 LT 시편보다는 TL 시편에서 보다 많은 AE hit 발생률을 나타내었으며, 특히 TL 시편은 하중변화 전구간(0~360°)에서 다량의 AE 신호를 발생시켰다. (b) 최대진폭 분석에서는 뚜렷한 차이점을 발견하기는 어려웠으나 대체적으로 균열이 최대로 열리는 180° 위상에 고진폭의 AE 신호가 발생하였다. 각 피로 사이클 주파수 변화에 따른 결과로부터 동일한 조직을 갖는 재료라면 사이클 주파수가 변화하더라도 AE hit 발생 경향은 거의 비슷하게 나타남을

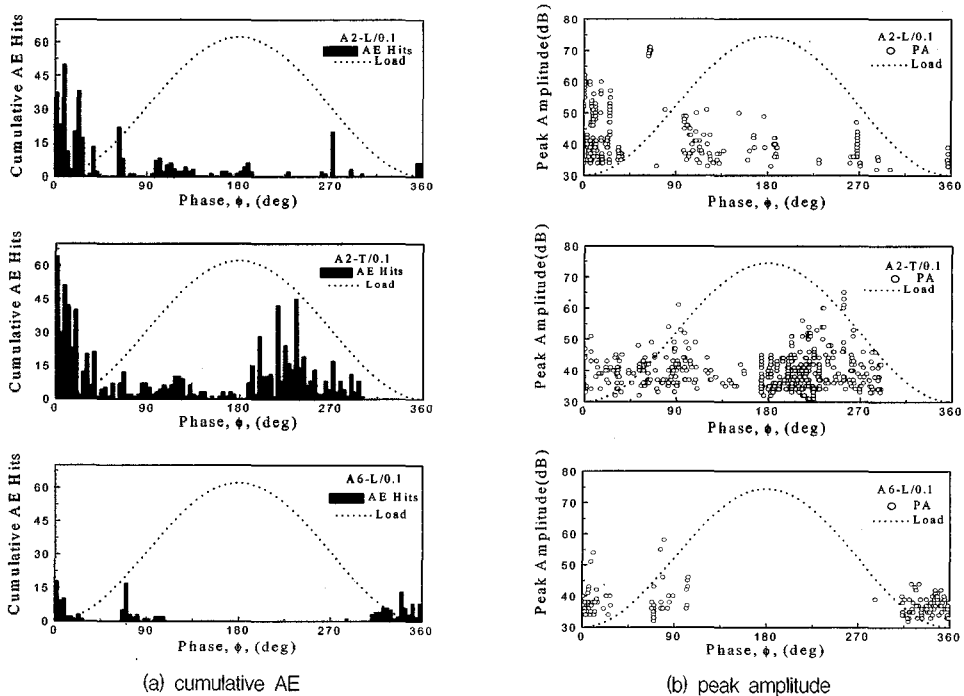


Fig. 11 Cumulative AE hits vs. loading phase (0.1Hz)

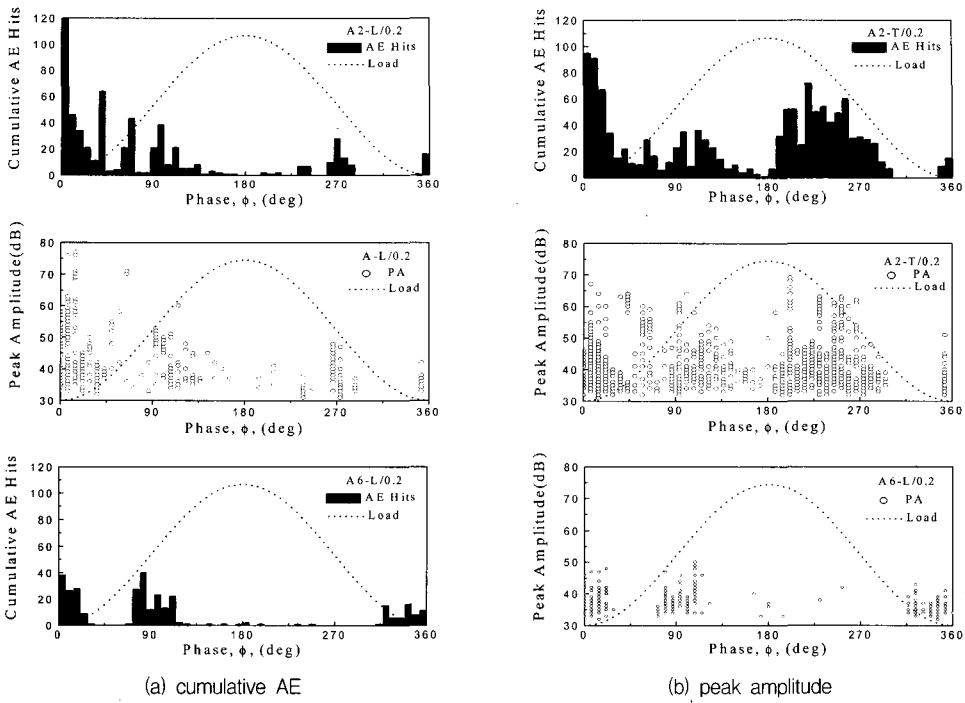


Fig. 12 Cumulative AE hits vs. loading phase (0.2Hz)

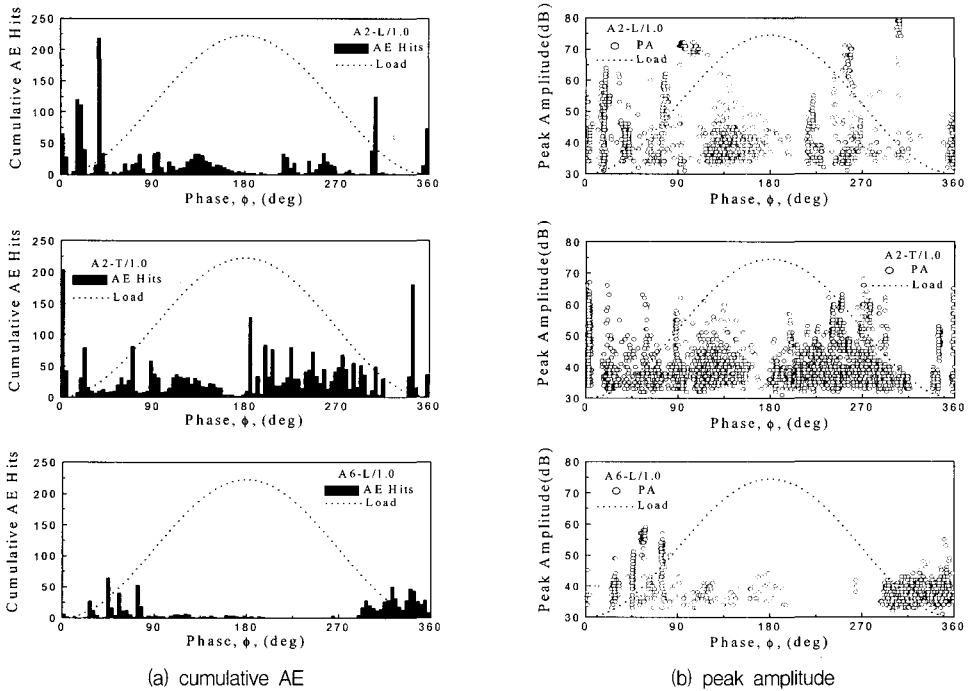
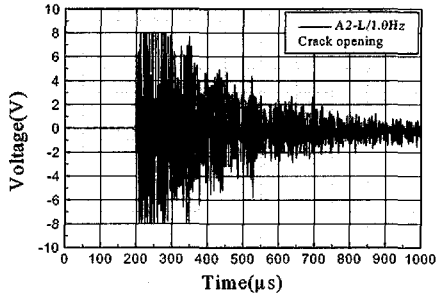
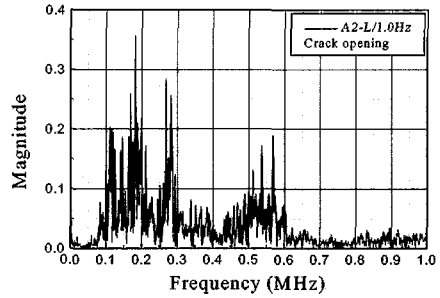


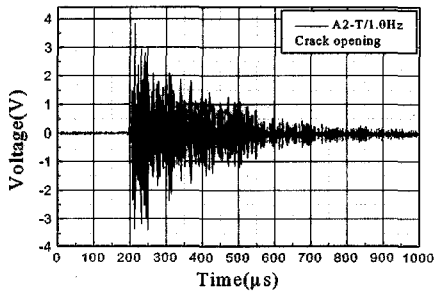
Fig. 13 Cumulative AE hits vs. loading phase (1.0Hz)



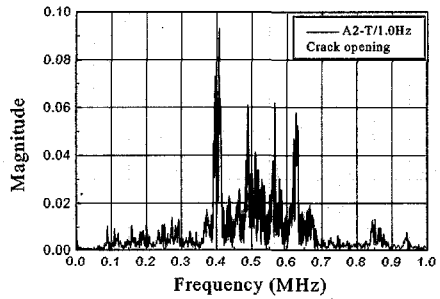
(a) AI 2024-LT



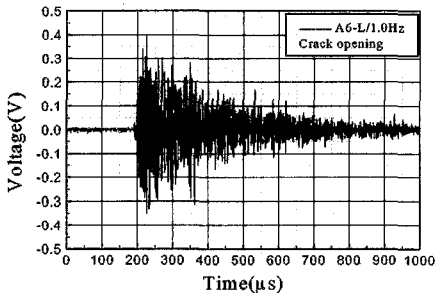
(b) AI 2024-LT



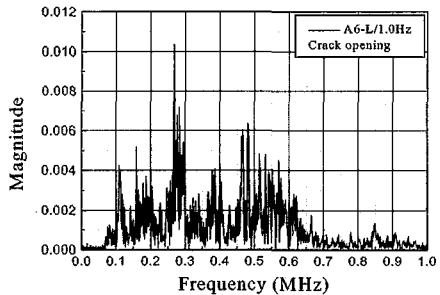
(c) AI 2024-TL



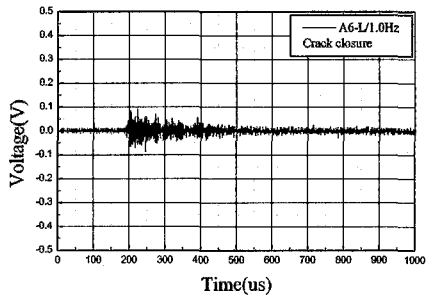
(d) AI 2024-TL



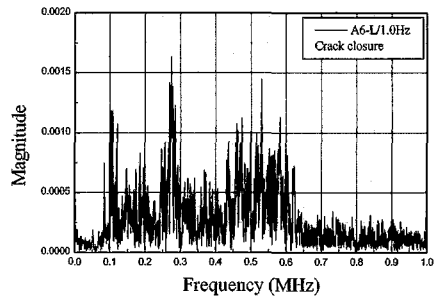
(e) AI 6061-LT



(f) AI 6061-LT



(g) AI 6061-LT



(h) AI 6061-LT

Fig. 14 Typical waveform obtained from fatigue crack propagation and frequency spectrum(FFT) for each specimen (1.0Hz)

암시하는 것이다. 그러나 각 재료에 따라서 균열 진전시 균열 열림 및 닫힘 거동에 따른 AE 발생 양상은 매우 다르게 나타났는데, 피로 균열 진전시 발생하는 AE 신호는 재료의 특성인 조직 형태나 물리적 특성 등에 크게 의존함을 알 수 있다

4.5. 균열 열림 및 닫힘 거동에 따른 AE 파형 분석

Fig. 14는 알루미늄 합금인 Al 2024-T4(LT 및 TL)와 Al 6061-T6 합금의 1.0Hz 시편에 대해 균열이 최대로 열리는 180° 위상에 나타난 AE 파형과 주파수 분석 결과를 나타낸 것이다. AE 파형을 나타낸 (a), (c), (e), (g) 모두 약 18~20mm 정도 균열이 진전된 지점에서 얻어진 신호들로서 각기 다른 크기를 지녔다. 우측에 나타낸 (b), (d), (f), (h)는 각 재료에 나타난 AE 파형들에 대한 주파수 분석 결과이다. (a), (c), (e)는 균열이 열렸을 때 발생한 신호이며, (g)는 Al 6061-LT에서 균열 닫힘시 발생한 파형을 대표적으로 나타낸 것이다. 전체적으로 균열 열림시 발생한 AE파형은 진폭이 컸으며, (g)와 같이 균열 닫힘시 발생한 AE파형은 상대적으로 진폭이 매우 작게 나타났다. 주파수 분석 결과 (b)와 동일한 시편에서는 대부분의 신호에서 상대적으로 100~300kHz의 저주파수 성분이 지배적으로 나타났으며, 500~600kHz의 고주파수 성분이 두 번째 성분으로 나타남을 확인하였다. (f)의 Al 6061-LT 시편은 300kHz의 주파수를 갖는 성분이 지배적이었으며, 500~600kHz의 2번째 성분 및 100~200kHz 주파수를 갖는 세 번째 성분이 분포하였다. AE 파형 진폭은 각기 달랐으나 균열 닫힘시 발생한 (h)의 경우도 균열 열림시 발생한 (f)와 동일한 주파수 성분이 나타남을 확인할 수 있다. 반면 (d)의 Al 2024-TL 주파수 분석에서는 다른 시편과 확연히 다른 모습을 나타내었는데, 다른 알루미늄 합금 대부분 100~300kHz의 주파수 성분이 지배적으로 나타났지만 균열진전 방향이 다른 TL 시편의 경우 400~600kHz 범위에서 주성분이 지배적으로 나타났다. 그리고 100~300kHz 범위에서 발생하는 주파수 특성은 아주 미약한 값을 나타냄을 확인할 수 있었다. AE 파형은 1 사이클의 반복시 보통 3~6개가 발생하였는데 각기 다른 진폭과 지속시간을 나타내었으며, 전체적으로 low, medium, high amplitude의 진폭을 가진 3 종류의 신호로 분류할 수 있었다. 이렇듯 크고 작은 진폭에 관계없이 AE 파형의 형태가 같다면 주파수 분석 결과 전체적으로 그림에 나타낸 것과 동일한 형상의 주파수 성분

을 나타내었다. 이와 같은 일련의 결과를 바탕으로 알루미늄 합금의 경우 균열 진전 방향에 따라 AE 파형의 주파수 성분이 다르다는 사실을 확인하였으며, 향후 동일 재료에 AE 적용시 센서를 선택하는데 있어서 참고 자료로 유용하게 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 요약

구조용 알루미늄 합금(2024-T4, 6061-T6) 재료의 피로 균열 진전시 균열 열림 및 닫힘 변화에 따른 AE 발생 특성을 분석하였다. 하중 사이클 반복응력에 의한 피로 균열 진전시 발생하는 AE 거동을 관찰 분석하여 아래와 같은 주요 결과를 얻었다.

- (1) 구조용 알루미늄 합금(Al 2024, Al 6061)의 피로균열 진전시 발생하는 균열 열림 및 닫힘 신호를 분석한 결과, 같은 재료에서는 피로 사이클 주파수(0.1Hz, 0.2Hz, 1.0Hz)가 변화하더라도 하중변화(0~360° phase)에서 균열 열림 및 닫힘시 AE hit 위치는 비슷하였다. 즉, 이러한 사실은 동일한 재료에 대해 피로 사이클 주파수가 변화하더라도 균열 열림 닫힘시 AE 발생 거동은 동일한 경향을 나타냄을 알 수 있었다.
- (2) 취성 조직을 가진 Al 2024-T4는 균열진전 초반에는 균열 개시 및 닫힘시 AE 신호가 많이 발생되었으나, 균열 길이가 증가함에 따라 180° 위상 근처에서(균열 열림) AE 신호들이 더 많이 나타남을 보여주었다. 반면 연성조직인 Al 6061은 피로균열 진전 전 구간에서 균열 개시 및 닫힘 신호만 발생되었는데, 이러한 결과는 AE 측정에 있어서 연성 및 취성 조직과 같은 재료의 물성 특성 등에 따라 AE 발생 거동이 달라짐을 고려하여야 한다는 사실을 알 수 있었다.
- (3) 구조용 알루미늄 합금 재료에 대한 피로균열 진전시 하중변화(0~360° phase)와 AE 발생 정도 및 최대진폭에 대한 상관관계를 확보한다면, 피로균열의 열림 및 닫힘에 대한 평가를 정량적으로 규명할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] D. H. Kohn, P. Ducheyne and J. Awerbuch, "Acoustic Emission during Fatigue of Ti-6Al-4V: Incipient Fatigue Crack Detection Limits and

- generalized Data Analysis Methodology," *Journal of Materials Science*, Vol. 27, pp 3133-3142, (1992)
- [2] "Characteristics of Acoustic Emission for A537 Structural Steel During Fatigue Crack Propagation," *Scripta Metallurgica*, Vol. 27, No. 5, pp. 641-646, (1992)
- [3] Z. F. Wang, J. Li, W. Ke, Y. S. Zheng, Z. Zhu, and Z. G. Wang, "Acoustic Emission Monitoring of Fatigue Crack Closure," *Scripta Metallurgica*, Vol. 27, No. 12, pp. 1691-1694, (1992)
- [4] Z. F. Wang, Z. Zhu, and W. Ke, "Behavior of Acoustic Emission for Low-Strength Structural Steel During Fatigue and Corrosion Fatigue," *Metallurgical Transactions A*, Vol. 22A, pp. 2677-2680, (1991)
- [5] Daining Fang and Avraham Berkovits, "Acoustic Emission during Fatigue of a Nickel Base Superalloy," *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 11, No. 2, pp. 85-94, (1993)
- [6] 윤동진, 정중채, 박휘립, 김기복, 이승석, "응력확대계수와 음향방출 변수를 이용한 피로균열 거동 연구", *비파괴검사학회지*, 제20권, 제5호, pp. 412-423, (2000)
- [7] 김기복, 윤동진, 정중채, 박휘립, 이승석, "주성분 회기분석 및 인공신경망을 이용한 AE 변수와 응력확대계수와의 상관관계 해석", *비파괴검사학회지*, 제 21권, 제 1호, pp. 80-90, (2001)
- [8] Kanji Ono and Jui-Yu Wu, "Pattern Recognition Analysis of Acoustic Emission from Fatigue of 2024-T4 Aluminum," *Progress in Acoustic Emission VIII the Japanese Society for NDT*, pp. 237-242, (1996)
- [9] I. M. Daniel, J. J. Luo, C. G. Sifniotopoulos, and H. J. Chun, "Acoustic Emission Monitoring of Fatigue Damage in Metals," *Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 14, pp. 71-87, (1998)
- [10] J. C. Jeong, D. J. Yoon, S. S. Lee and C. W. Won, "Behaviours of Fatigue Crack Opening and Closure Using Acoustic Emission," *Journal of the Korean Society for NDT Spring Conference*, pp 135-140, (2001)
- [11] H. N. G. Wadley and J. A. Simmons, "Non-destructive Testing Handbook," *American Society for Nondestructive Testing*, Columbus, OH, 5, pp. 63, (1981)