

## SWS 490B와 Al 7075-T6 합금의 피로균열 열림 및 닫힘시 음향방출 특성 분석

윤동진<sup>†</sup> · 정중채\* · 이승석\* · 원창환\*\*

(2002년 9월 18일 접수, 2003년 4월 10일 심사완료)

### AE Characteristics of Fatigue Crack Opening and Closure in SWS 490B and Al 7075-T6 Alloy

Dong-Jin Yoon, Jung-Chae Jeong, Seung-Seok Lee and Chang-Whan Won

**Key Words:** Acoustic Emission(음향방출), Crack Opening(균열열림), Crack Closure(균열닫힘), Fatigue Crack(피로균열), Structural Steel(구조용 강)

#### Abstract

The objective of this study is to investigate the effect of AE activities in the crack opening and closure during the fatigue test. The laboratory experiments for various materials and test conditions were carried out to identify AE characteristics of fatigue crack propagation. Compact tension specimens of SWS 490B and Al 7075-T6 alloy were prepared for fatigue test. AE activities were analyzed based on the phase of the loading cycle. In case of SWS 490B, the most of AE was generated when the crack began opening and the crack closed fully, whereas a few in the full opening of the crack. On the other hand, in case of Al 7075-T6, a distinct AE activity was observed during crack opening process. 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, 1.0 Hz). It was found that AE activities during crack opening and closure depend on material properties such as micro-structure, yield strength and elongation.

#### 1. 서론

대형 구조물 및 항공기 재료 등과 같은 구조물 및 재료들은 다양한 크기의 반복하중을 지속적으로 받는 경우가 많기 때문에 이들 재료에서의 피

로균열 발생 및 성장은 대형사고를 야기할 수 있다. 따라서 최근 이들 균열의 검출이나 감시를 위해 음향방출(acoustic emission : AE) 기술을 이용한 사례들이 발표되고 있다.<sup>(1~5)</sup> 특히 이전 연구에서는 SWS 490B 구조용 용접강의 피로균열 진전시 음향방출 발생 특성과 응력확대계수와와의 상관관계를 다각도로 조사하였다.<sup>(6,7)</sup> 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

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국표준과학연구원 비파괴계측그룹

E-mail : djyoon@kriss.re.kr

TEL : (042)868-5332 FAX : (042)868-5639

\* 회원, 한국표준과학연구원 비파괴계측그룹

\*\* 충남대학교 급속응고신소재연구소

균열선단 지역에서 탄성파를 발생시키게 된다. 균열 열림은 최고하중으로 증가할 때 균열이 열리는 현상으로 이 때 피로균열의 성장구동력은 증가하게 되는데, 이는 하중의 작용으로 응력이 상승하는 동안 국부적인 소성 미끄럼에 의해 균열 진전이 발생되는 것이다. 반면 균열의 닫힘은 피로균열이 최소하중보다 높은 하중에서 일찍 닫히게 되는 현상으로서 이때는 피로균열의 성장구동력이 감소하게 되고, 따라서 균열 선단의 실질적인 응력상태는 응력확대계수 범위( $\Delta K$ )가 아닌 균열 닫힘 영향을 고려한 유효응력확대계수( $\Delta K_{eff}$ )로 표현된다.<sup>(8~10)</sup> 이와 같이 균열 열림과 닫힘 현상이 각기 다르기 때문에 AE 신호 또한 각기 다른 특성을 가지고 발생한다. 이와 관련된 연구로서 Ono<sup>(11)</sup> 등은 2024-T4 알루미늄 합금에서 반복하중에 따라 발생하는 AE 균열 열림 및 닫힘 신호를 유형(pattern) 분류하였으며, Daniel<sup>(12)</sup> 등은 2024-T3 및 4340 탄소강 시편에 대해 균열 열림 및 닫힘에 따른 음향방출 발생 특성을 체계적으로 조사한 예가 있다. 또한 Jeong<sup>(13,14)</sup> 등은 항공기 구조용 합금인 Al 합금(2024-T4, 6061-T6, 7075-T6)과 교량 구조용 용접강(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.<sup>(15,16)</sup> 따라서 실 구조물에 발생하는 균열신호를 효율적으로 분석하기 위해서는 피로 균열 진전시 각 재료에 따른 균열 열림과 닫힘에 대한 AE 특성을 규명하는 것이 매우 중요하다. 이 과정에서 피로균열 진전시 음향방출 신호 발생과 균열 열림·닫힘 등 발생 메커니즘의 상관관계 또는 AE 발생과 재료의 기계적 특성에 대한 상관관계의 고찰 필요성이 대두되었다. 본 연구에서는 SWS 490B와 알루미늄 합금인 7075-T6의 피로균열 진전시 균열 열림 및 닫힘에 대한 AE 발생 특성을 규명하고자 하였다. 그리고 AE 파라미터 분석과 조직학적인 분석을 통해 재료의 특성에 따른 AE 발생관계를 밝히는데 주안점을 두었다.

## 2. 균열 열림 및 닫힘과 AE 발생 메커니즘

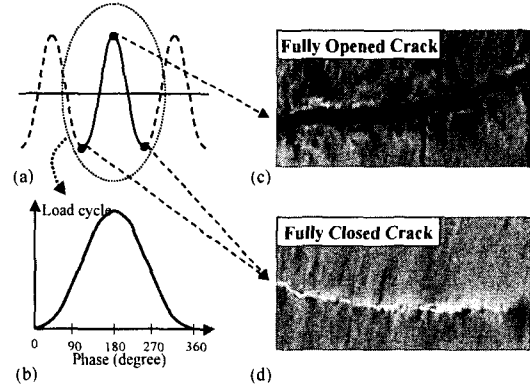


Fig. 1 Concept of crack opening and closure

Fig. 1은 균열 열림 및 닫힘 시 AE와의 상관관계를 규명하기 위한 균열의 열림 및 닫힘에 대한 개념을 나타낸 것이다. 피로균열 실험은 그림 (a)에 나타낸 바와 같이 반복하중에 의해 재료를 평가하는 것으로서 각 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 나타내었다. 여기서 0°와 360°는 그림 (d)에 나타낸 바와 같이 균열이 완전히 닫힌 부분이며, 180°는 그림 (c)와 같이 균열이 완전히 열리는 지점을 나타낸다. 균열 열림은 재료에 가해지는 하중이 증가하는 0°부터 180°까지 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.

## 3. 실험방법

### 3.1 시편

본 연구에 사용한 시편은 교량 구조물에 가장 많이 사용되는 구조용 용접강(SWS 490B)과 항공기 구조용 알루미늄 합금인 Al 7075-T6를 대상으로 하였다. SWS 490B 표준 소형인장 CT

**Table 1** Test conditions and mechanical properties of each specimen

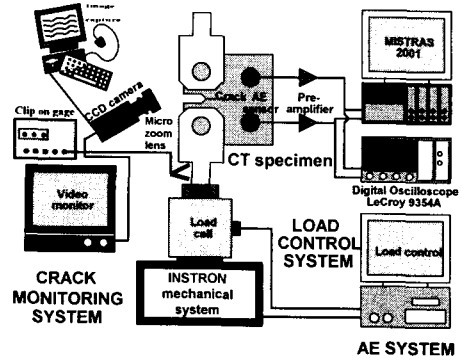
Material	Specimen Name	Rolling Direction	Fatigue Cycle (Hz)	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
SWS 490B	S-L/0.1	L-T	0.1	532	383	27
	S-L/0.2		0.2			
	S-L/1.0		1.0			
Al 7075-T6	A7-L/0.1	L-T	0.1	585	554	9
	A7-L/0.2		0.2			
	A7-L/1.0		1.0			

(compact tension)시편은 25 mm, Al 7075-T6는 17 mm 두께의 압연된 판재로부터 채취 및 가공하였으며, 모든 시편은 압연 방향에 대해 균열진전 방향이 수직인 LT 형태인 두께 12.5 mm 시편으로 가공하였다. 각 시편에 대한 명칭 및 실험조건을 Table 1에 나타내었다. 모든 시편은 먼저 쉐브론 노치부에 pre-crack을 발생시켰는데 실험의 속도를 증가시키고자 실제 실험구간 적용하중보다 최소 하중을 25 % 높게 설정하였다. 또한 쉐브론 구간은 균열을 빠르게 진전시키기 위해 유압식 시험기를 사용해 4 Hz로 하였고, 이후 예비 균열 구역에 균열이 나타나기 시작하면 각 실험 조건(0.1 Hz, 0.2 Hz, 1.0 Hz)으로 변환시켜 주었다.

**3.2 실험장치**

피로 실험은 기계식 Instron (Model 8652)을 사용하였다. 피로균열 열림 및 닫힘 거동을 면밀히 관찰하기 위해 0.1 Hz, 0.2 Hz 및 1.0 Hz 의 각기 다른 피로 사이클 주파수에 대해 일정한 진폭 하중에서 수행하였으며, 이 때 실험 응력비(stress ratio)는 모두 0.1로 동일하게 하였다.

균열 진전시 보다 정확한 균열진전 속도 및 균열길이를 측정하기 위해 CT 시편 한쪽 표면을 정마 한 후 1 mm 간격으로 일정한 표시 선을 그었으며, 표면 균열진전 속도 및 길이 측정은 마이크로 줌렌즈를 이용하여 광학적으로 측정하였다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 균열길이는 마이크로 줌렌즈에 장착된 CCD 카메라를 통해 관측용 비디오 모니터에 직접 연결하였으며, 균열 진전속도 및 길이 측정은 0.1 mm 단위로 정밀 측정하였다. 각각의 반복 하중에 따른 균열 열림 및 닫힘과 AE 신호의 정확한 응답을 기하기 위



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

해 기계식 Instron에 clip on gage를 부착하여 정현파(sine wave) 하중에 따른 AE 발생을 기록하였다.

AE 신호의 측정을 위해 다채널(multi-channel) 상용 AE 시스템인 MISTRAS 2001 (PAC)과 디지털 오실로스코프(LeCroy 9354A)를 사용하였다. 데이터 취득을 위한 AE 센서는 2개가 사용되었는데 하나는 300 kHz (R30, PAC) 공진형 센서이며, 다른 하나는 AE 파형과 주파수 분석을 위한 100~1,000 kHz 주파수 범위의 광대역형 센서(WD, PAC)를 추가적으로 사용하였다. 모든 실험에서 문턱값(threshold)은 30 dB로 설정되었으며 균열진전시 방출되는 균열신호는 프리앰프에서 60 dB로 증폭하였다. 프리앰프를 통하여 증폭 출력된 균열신호는 디지털 오실로스코프로 입력되었고 각 신호에 대한 파형은 2.5 MHz의 샘플링 속도로 2,500개의 데이터로 디지털화하였으며, 저장된 데이터는 실험이 끝난 후 AE 파형과 주파수 분석을 위해 사용되었다.

**4. 결과 및 고찰**

**4.1 SWS 490B의 균열 열림 및 닫힘 현상**

**4.1.1 AE 파라미터 분석**

피로사이클 수가 증가함에 따라 발생하는 누적 AE hit와의 관계를 분석하고, 각 지점에서의 균열 열림 및 닫힘에 대한 AE와의 상관관계를 규명하였다. Fig. 3에서 (a)는 SWS 490B 시편에 대해 실험이 끝난 후 파면을 거시적으로 관찰한 것이며,

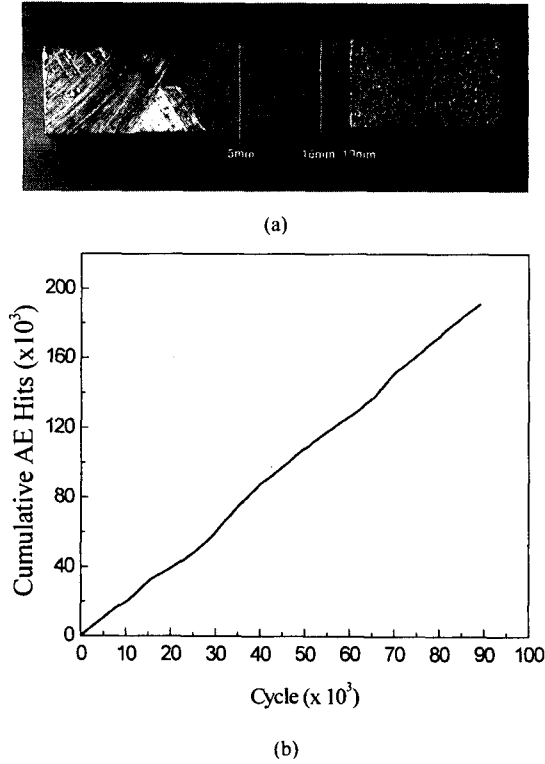


Fig. 3 Photograph for investigation of fracture surface(a) and cumulative AE hit vs. fatigue cycle(b) for SWS 490B specimen

(b)는 누적 AE hit와 피로사이클 관계에 대해 나타낸 결과이다. 누적 AE hit는 그림 (b)에 나타낸바와 같이 피로사이클 수에 대해 선형적인 증가 양상을 나타내었다. 각 실험은 약 90,000 사이클까지 피로균열 진전 실험이 진행되었으며, 이 구간에서 각기 10,000 사이클씩 9단계로 구간을 나눠 분석하였다. AE 특성상 발생신호 데이터가 무수히 많기 때문에 각 구역으로부터 대표성을 나타내는 1,000 사이클을 선택하여 반복하중에 따른 균열 열림 및 단합을 분석하였으며, 이는 균열진전의 초반, 중반, 후반부에 각각 해당이 된다.

Fig. 4(a)는 피로 사이클 하중변화(0~360° phase)에 대해 AE hit 발생 결과 히스토그램으로 나타내었으며, (b)는 동일 구간에 대해 각 AE hit에 대한 최대진폭 값을 나타낸 것이다. AE hit 발생을 전 구간에서 관찰한 결과 전반적으로 일부 균열개시 위상과 균열이 50% 이상 닫힌 270~360° 위상에서 AE 신호가 주로 발생됨을 확인하였다. 또한 SWS 490B의 균열 발생 개수가 AI

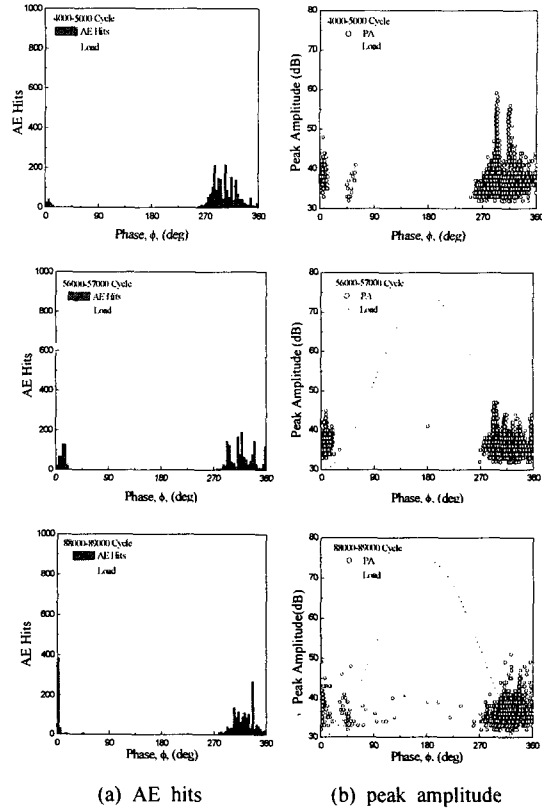


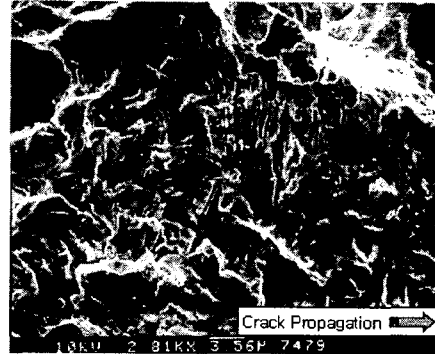
Fig. 4 AE hits and peak amplitude vs. loading phase for SWS 490B specimen

7075-T6 합금에 비해 현저하게 떨어짐이 관찰되었고, 균열이 완전히 열리는 180° 위상에서는 AE 신호가 거의 나타나지 않았으며 균열 열림보다는 단합시 많은 AE 신호가 나타남을 알 수 있었다. 이러한 경향은 선행 연구에서 언급한 6000계열 알루미늄 합금과 비슷한 경향을 나타내었다.<sup>(13,14)</sup> 그림에 모두 나타내지는 않았지만 대부분 균열진전 초기 열림 위상(0~90° phase) 보다는 균열 닫힘 위상(270~360° phase)에서 AE 신호가 집중적으로 발생하였음을 알 수 있었다. 이는 균열길이 13 mm까지는 인장-인장 피로사이클 하중이라 할지라도 균열 선단부근의 소성 영역이 활발하지 않음에 따라 탄성영역에 의한 파면간 접촉 마찰 신호가 균열 완전 열림 위상에 비해 단합 위상에 많았기 때문으로 사료된다. 그러나 균열길이 13 mm(72,000 cycle) 이후에는 균열진전속도가 급격하게 증가함에 따라 완전 소성 변형 구역으로 변화되기 때문에 파면간의 마찰 신호에 의함보다는 균열선단의

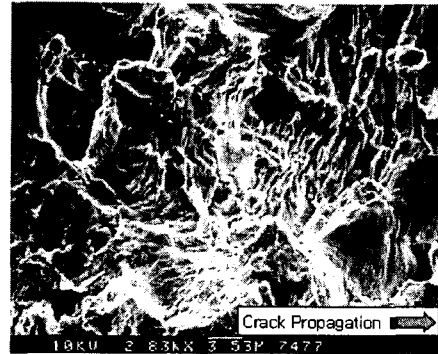
복잡한 소성구역 역할에 의해 닫힘 신호가 발생한 것으로 사료된다. 그러나 이러한 균열 열림 및 닫힘시 나타난 AE hit 발생수 만을 가지고 전체적인 AE 특성을 평가하기에는 다소 미흡한 면이 있다. 따라서 균열의 열림 및 닫힘 부분에 대해 발생된 개개 AE hit의 최대진폭 변화를 고찰하고자 하였다. Fig. 4 (b)는 사이클 하중변화(0~360°)에 따른 AE 최대진폭을 분석한 결과로서, 균열이 개시되는 위상에 비해 균열 닫힘 위상에서 상대적으로 높은 진폭을 가진 AE 신호가 일부 관찰되었는데 이는 응력의 집중에 의한 균열 선단의 소성구역 변형이 활발해짐에 따라 균열선단에서 고진폭의 AE 신호가 많이 생성되었기 때문으로 추정된다.

#### 4.1.2 주사전자현미경 분석

Fig. 5는 균열 열림 및 닫힘에 대한 파단면의 정보와 AE 신호 발생 개수 및 최대진폭 값이 균열 진전 상태에 따라 달라지는 것에 대한 정보를 얻기 위해 SWS 490B 시편의 피로균열진전 시험 후 파단면을 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 결과이다. 저배율과 고배율을 통해 관찰한 결과 균열 진전 부위에 따라 파단면이 확연하게 달라짐을 알 수 있었는데, Fig. 5(a)는 균열진전 초기인 균열길이 6 mm, 그리고 Fig. 5(b)는 파단 직전 지점인 균열길이 18 mm 파단면을 나타낸다. 파단 양상을 관찰한 결과 피로균열 진전 위치에 따른 초기 부위(6 mm)의 균열진전 속도는  $0.0357 \mu\text{m}/\text{cycle}$  정도로 매우 느리게 진전한다. 이와 같이 균열진전 속도가 매우 느린 구간은 주로 (a) 그림과 같이 매우 조밀한 스트라이에이션(striation)을 관찰할 수 있었으며, 결정 입내 부분에 스트라이에이션이 발생한 것으로 미루어 입내파괴도 동시에 발생한 것이다. 이와 같이 조밀한 스트라이에이션과 입계 및 입내 파괴를 나타낸 이유는 단위 길이 당 피로사이클 수가 많기 때문이다. 즉, 상대적으로 낮은 응력확대계수 값으로 인해 파단면은 부드러운 경향을 나타낸 것으로 볼 수 있다. 그러나 그림 (b)와 같이 응력확대계수 값이 큰 균열 진전 후반부(18 mm)의 균열진전 속도는 매우 빨라져  $0.80 \mu\text{m}/\text{cycle}$ 의 균열진전속도를 나타낸다. 이 부분은 균열진전 방향으로 넓은 간격의 스트라이에이션을 관찰할 수 있었으며, 전반적으로 파면의 모습이 응력확대계수가 큰 조건으로 인해 거친 파단면을 나타내었다. 따라서 이 부분은 고진폭과 긴 지속시간을



(a) 6mm of crack length



(b) 18mm of crack length

Fig. 5 Fractography of each stage for SWS 490B

갖는 AE 신호들이 많이 생성되는 것으로 추정할 수 있지만 실험 결과적으로는 Fig. 4와 같이 진폭에 있어 큰 변화는 찾을 수가 없었다.

이와 같은 이유는 균열진전 후반으로 갈수록 응력 집중으로 소성변형 구역이 활발해지며, 이로 인해 전위밀도가 증가하게 되어 오히려 재료에 피로 연화현상을 가져왔기 때문으로 추정된다. 재료가 연화되면 경화된 재료에 비해 AE 신호는 소량 발생하며, 낮은 진폭과 짧은 지속시간을 가진 AE 파형을 만들어 내는 결과에 의존하는 까닭이다. 전반적으로 파단면 사진에서 나타나듯이 스트라이에이션은 피로균열 진전 방향(좌측 → 우측)으로 생성되고 있으나 방향성은 변화되었다. 어느 결정립 내에서는 약 20-40°의 방향을 가지고 각기 상반된 방향으로 전파가 됨을 고찰할 수 있는데 이는 전위들의 움직임에 따른 슬립선의 미끄럼 방향 변화에 의한 것으로 추정된다.

## 4.2 AI 7075-T6의 균열 열림 및 닫힘 현상

Fig. 6의 (a)는 AI 7075-T6 시편에 대해 피로 사이클 하중변화(0~360°)에 대해 AE hit 발생을 히스토그램으로 나타낸 결과이며, (b)는 각 AE hit에 대한 최대진폭을 나타낸 결과이다. 먼저 Fig. 6(a)에서 대부분 각 사이클 과정(0~360° phase)에서 하중의 변화에 따라 전 과정에 AE 발생이 존재하는 것을 관찰할 수 있었다. 피로사이클 수가 낮은 균열 초기에는 균열이 열리기 시작한(0~45°) 위상과 균열이 닫히는(270~360°) 위상에서 AE 신호가 집중적으로 발생하였다. 이는 균열진전 초기의 경우 진전된 균열 길이가 짧기 때문에 인장-인장의 피로 사이클 하중이라 할지라도 균열 선단부근의 소성 영역이 활발하지 않음에 따라 탄성영역에 의한 파면간 접촉 마찰 신호가 균열의 완전 열림 부분보다는 닫힘 부분에 많기 때문이다. 45,000~46,000 피로 사이클 구간부터는 균열이 완전히 열리기 직전(100~180°)에 균열신호가 보다 집중되어 나타나기 시작하였다. 이후로 피로 사이클 수가 증가함에 따라 발생하는 균열 AE 신호는 균열이 완전히 열리는(180°) 위상으로 집중되었으며, 균열진전으로부터 발생하는 AE 신호 또한 매우 많아짐을 확인하였다. 특히 균열 진전 후반부인 87,000~88,000 사이클의 경우 균열 신호가 45~90°, 170~220° 및 290~360° 위상에 집중 분산되어 있음을 보여주었다. 특히 사이클 수가 증가할수록 다른 지점에 비해 180° 위상에 많은 AE 신호가 나타났다. 이는 균열 크기가 커지고 피로사이클 수가 증가함에 의해 재료의 소성변형도 심하게 일어난 결과이다. 또한 균열 진전된 파면간의 접촉이 균열 초기보다 적기 때문에 균열이 최대로 열리는 부근에 많은 AE 신호를 발생시키게 된다.

Fig. 6 (b)는 (a)에 나타낸 피로 사이클 하중변화(0~360°)에 대해 AE 최대진폭을 분석한 것으로서, 전반적으로 균열 개시 및 닫힘 부위에 비해 균열이 완전히 열리는 부위에서 높은 진폭을 가지는 AE 신호가 생성됨이 관찰되었다. 균열진전 초기 AE 히스토그램은 균열 열림 및 닫힘 구역에 많이 발생하였지만 균열이 완전히 열리는 180° 위상에 고진폭의 AE 신호가 발생한 것이다. 그리고 피로균열이 점차 진전되어 피로 사이클 수가 증가될수록 고진폭의 AE 신호가 균열 열림 위상에 집중적으로 나타남을 87,000~88,000 사이

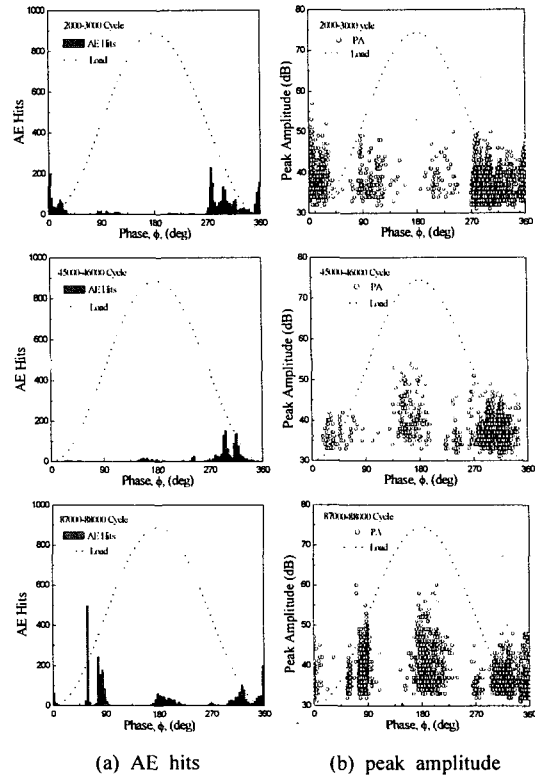


Fig. 6 AE hits and peak amplitude vs. loading phase for AI 7075-T6 specimen

클 그림에서 관찰할 수 있다. 이는 균열의 크기가 커짐에 따라 파면간 마찰에 의한 신호보다는 응력의 집중에 의한 균열 선단 소성구역 변형이 활발해짐에 의해 균열이 완전히 열리는 위상에서 고진폭의 AE 신호가 많이 생성되었기 때문이다.

AI 7075-T6는 SWS 490B에 비해 AE hit가 다량 발생되었으며 균열의 개시 및 닫힘 뿐 아니라 균열이 완전히 열린 180° 위상에 많은 고진폭의 AE 신호가 나타났다. 그러나 SWS 490B는 진폭의 크기가 작은 신호가 주를 이루었으며, 주로 균열 개시 부분과 균열 닫힘 부분에서 AE 신호가 발생되었을 뿐 균열이 완전히 열리는 부위에서 AE 신호는 나타나지 않거나 매우 미미하였다. 이러한 이유로 Table 1에 나타낸 바와 같이 AI 7075-T6 합금의 경우 SWS 490B와 인장강도는 비슷한 값을 나타내지만 항복강도가 매우 높고 연신율은 약 3배 정도 낮은 것과 관련이 있음을 암시한다. 이는 재료의 기계적 성질 차이에 의한 것으로서 연성의 조직과 취성 조직의 차이에 의

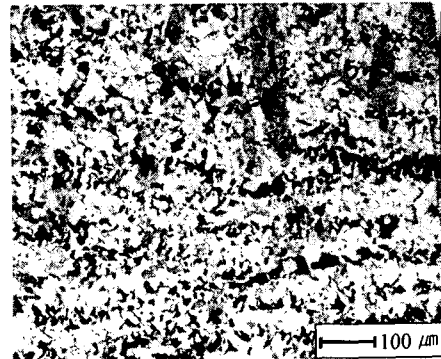
해 균열 열림 및 닫힘시 AE 신호의 형태가 매우 달라짐을 알 수 있었다. 그리고 낮은 진폭을 가진 AE 신호들은 전위들의 미세한 이동에 의한 소성변형 결과에 의한 것이며, 7075-T6에 나타나는 높은 진폭의 AE 신호들은 미세한 전위 이동에 의한 소성변형 영향을 받아 미세 균열, 석출물과 기지 조직의 입계 분리 등에 의한 결과로 사료된다.

#### 4.3 시편의 미세 조직 분석

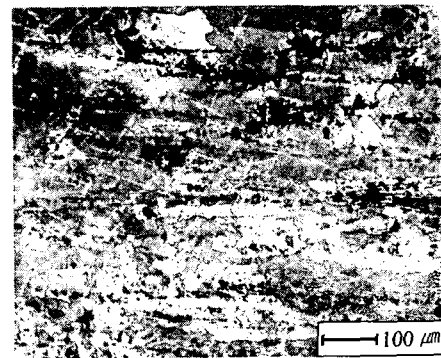
Fig. 7은 실험에 사용된 각 재료의 미세조직을 나타낸 것으로 광학현미경을 이용해  $\times 100$ 의 배율로 관찰한 결과이다. (a) SWS 490B의 경우 전형적인 탄소강으로서 흰색의 성분은 초석 웨라이트며 검은색은 퍼얼라이트 조직을 나타낸다. 전체적으로 압연 방향으로(좌  $\rightarrow$  우)  $1\sim 30\ \mu\text{m}$  크기의 불규칙한 퍼얼라이트 조직이 길다란 밴드 형상을 볼 수 있다. (b)의 Al 7075-T6는 Al-Zn-Mg-Cu 합금으로서  $\text{MgZn}_2$ (black)의 석출물이 압연방향으로 결정립계에 다량 분포하고 있으며 그 양상은 매우 불규칙적이다. 퍼얼라이트 탄화물과  $\text{MgZn}_2$  석출물은 기지 조직인 웨라이트 및 알루미늄에 비해 경도가 매우 높기 때문에 이 부분에 균열이 진전될 경우 AE의 발생 경향은 기지재와 달라질 수 있다.

#### 4.4 피로사이클 주파수 변화

Fig. 8부터 10은 각 시편에 대해 일정한 하중진폭하에서 0.1 Hz, 0.2 Hz 및 1.0 Hz의 각기 다른 피로사이클 주파수로 실험한 결과이다. 각 사이클 하중변화( $0\sim 360^\circ$  phase)에 대해 (a)는 AE 발생 수(AE hits)를 히스토그램으로 나타내었으며, (b)는 최대진폭의 결과를 나타낸 것이다. SWS 490B는 피로수명의 20% 이하 영역인 균열진전 초기상태에서 약 5분 정도 수행하였으며, 반면 Al 7075-T6는 18 mm 이상 균열이 이미 진전된 것을 사용함으로써 전체 피로수명의 80% 이상 영역에서 발생한 결과이다. 각각의 사이클 주파수 그림 중 (a)의 누적 AE 발생 수 고찰 결과, 동일재료에서는 피로사이클 주파수가 변화하더라도 각 사이클 하중변화( $0\sim 360^\circ$ )에서 AE 발생 경향은 대부분 비슷하게 나타남을 관찰하였다. 사이클 주파수가 낮은 0.1 Hz, 0.2 Hz는 균열 개시 및 닫힘 위상에서 많은 AE 신호가 발생하는



(a) SWS 490B



(b) Al 7075-T6

Fig. 7 Photographs of optical microscope for investigation of micro-structure

것이 관찰되었으며, 사이클 주파수가 빠른 1.0 Hz에서는 Al 7075-T6 합금의 경우 균열이 최대로 열리는 위상에 많은 AE 신호가 나타남을 확인하였다. 그러나 SWS 490B의 경우 사이클 주파수 변화가 있더라도 균열 열림 및 닫힘 위상에서만 AE 신호가 나타났으며, 균열이 최대로 열리는 위상에서는 전혀 발생하지 않았다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 재료의 인장강도, 항복강도 및 연신율에 의한 연성 및 취성재료 차이점에 의한 재료의 조직 및 물리적 특성과 밀접한 관계가 있음을 암시하는 것이다. Fig. 8(b)의 최대진폭 분석에서는 Al 7075-T6의 경우 대체적으로 균열이 최대로 열리는  $180^\circ$  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 암시하는 것이다. 결론적으로 각 재료에 따라서 균열 진전시 균열 열림 및

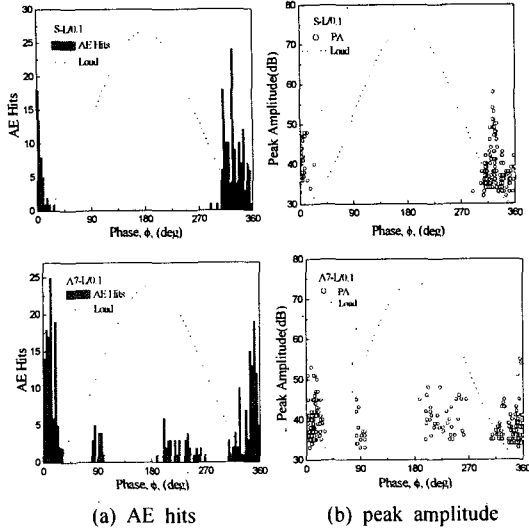


Fig. 8 AE hits vs. loading phase (0.1 Hz)

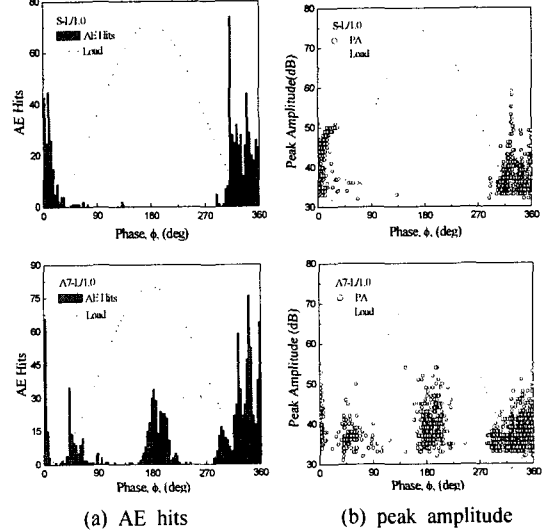


Fig. 10 AE hits vs. loading phase (1.0 Hz)

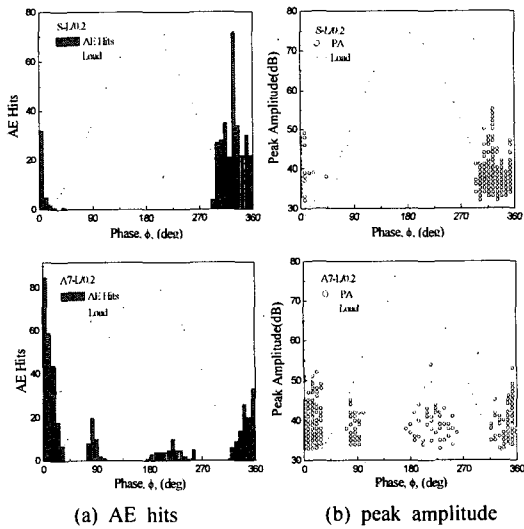


Fig. 9 AE hits vs. loading phase (0.2 Hz)

단립 거동에 따른 AE 발생 양상은 매우 다르게 나타났으며, 이는 피로 균열 진전시 발생하는 AE 신호는 재료 특성인 조직 형태나 물리적 특성에 크게 의존하는 것으로 설명할 수 있다. 또한 균열 닫힘시 AE 발생원이나 거동에 있어서 상하 표면의 접촉에 의한 fretting이나 그로 인한 균열 선단부에서의 산화물 생성, 인장 잔류응력 등이 영향을 미칠 것으로 판단되며, 응력비나 균열진전 속도 등 실험조건에 따라서도 많은 영향을 받을 것으로 사료된다.

### 5. 결론

구조용 용접강인 SWS 490B 및 구조용 알루미늄 합금인 7075-T6 재료의 피로균열 진전시 균열 열림 및 닫힘 변화에 따른 AE 발생 특성을 분석하였다. 하중 사이클 반복응력에 의한 피로균열 진전시 발생하는 AE 거동을 관찰 분석하여 아래와 같은 주요 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 취성 조직인 AI 7075-T6는 균열진전 초반에 균열 개시 및 닫힘시 AE 신호가 많이 발생되었으나, 균열 길이가 증가함에 따라 180° 위상 부근에서(균열 열림) AE 신호들이 더 많이 나타남을 보여주었다. 반면 연성조직인 SWS 490B는 피로균열 진전 전 구간에서 균열 개시 및 닫힘 신호만 발생되었다. 즉 연성 및 취성 조직과 같은 재료의 물성 특성 등에 따라 균열 열림 및 닫힘시 AE 발생 거동도 달라짐을 알 수 있었다.

(2) 동일 재료에서는 피로 사이클 주파수(0.1 Hz, 0.2 Hz, 1.0 Hz)가 변화하더라도 하중변화(0-360° phase)에서 균열 열림 및 닫힘시 AE hit 발생 양상은 비슷하였다. 즉, 이러한 사실은 동일한 재료에 대해 피로 사이클 주파수가 변화하더라도 균열 열림 닫힘시 AE 발생 거동은 유사한 경향을 나타낸다고 볼 수 있다.

(3) 구조용 알루미늄 합금 재료에 대한 피로균열 진전시 하중변화(0-360° phase), AE 발생 경향 그리고 최대진폭 등 각각에 대한 상관관계를 확



보한다면, 음향방출을 이용한 균열진전 모니터링 및 평가시 좋은 지표가 될 것으로 판단된다.

### 참고문헌

- (1) Kohn, D. H., Ducheyne, P. and Awerbuch, J., 1992, "Acoustic Emission during Fatigue of Ti-6Al-4V: Incipient Fatigue Crack Detection Limits and generalized Data Analysis Methodology," *Journal of Materials Science*, Vol. 27, p. 3133.
- (2) Wang, Z. F., Li, J., Ke, W. and Zhu, Z., 1992, "Characteristics of Acoustic Emission for A537 Structural Steel During Fatigue Crack Propagation," *Scripta Metallurgica*, Vol. 27, p. 641.
- (3) Wang, Z. F., Li, J., Ke, W., Zheng, Y. S., Zhu, Z. and Wang, Z. G., 1992, "Acoustic Emission Monitoring of Fatigue Crack Closure," *Scripta Metallurgica*, Vol. 27, p. 1691.
- (4) Wang, Z. F., Zhu, Z. and Ke, W., 1991, "Behavior of Acoustic Emission for Low-Strength Structural Steel During Fatigue and Corrosion Fatigue," *Metallurgical Transactions A*, Vol. 22A, p. 2677.
- (5) Fang, D. and Berkovits, A., 1993, "Acoustic Emission during Fatigue of a Nickel Base Superalloy," *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 11, pp. 85~94.
- (6) Yoon, D. J., Jeong, J. C., Park, P., Kim, K. B. and Lee, S. S., 2000, "Study on the Fatigue Crack Behavior by the Stress Intensity Factor and AE Parameters," *Journal of the Korean Society for NDT*, Vol. 20, p. 412.
- (7) Kim, K. B., Yoon, D. J., Jeong, J. C., Park, P. and Lee, S. S., 2001, "Analysis on Correlation between AE Parameters and Stress Intensity Factor using Principal Component Regression and Artificial Neural Network," *Journal of the Korean Society for NDT*, Vol. 21, p. 80.
- (8) Rhyim, Y. M., Jeong, H. D., Jeon, J. C. and Lee, C. S., 1994, "Precise Measurement of Crack Closure Loads during Fatigue Crack Propagation," *J. of the Korean Inst. of Met. & Mater.*, Vol. 32, p. 1338.
- (9) Shim, D. S., Kim, K. B., Kim, J. K., 2000, "Fatigue Life Prediction for High Strength Al-alloy under Variable Amplitude Loading," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 24, pp. 2074~2082.
- (10) Lee, J. K., Yoon, H. K., Lee, J. H., 2002, "Nondestructive Evaluation on Strength Characteristics and Damage Behavior of Al 7075/CFRP Sandwich Composite," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 26, pp. 2328~2335.
- (11) Ono, K. and Wu, J. Y., 1996, "Pattern Recognition Analysis of Acoustic Emission from Fatigue of 2024-T4 Aluminum," *Progress in Acoustic Emission VIII*, p. 237.
- (12) Daniel, I. M., Luo, J. J., Sifniotopoulos, C. G. and Chun, H. J., 1998, "Acoustic Emission Monitoring of Fatigue Damage in Metals," *Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 14, pp. 71~87.
- (13) Jeong, J. C., Yoon, D. J., Lee, S. S. and Won, C. W., 2001, "Behaviours of Fatigue Crack Opening and Closure Using Acoustic Emission," *Proceeding of the Korean Society for NDT Spring Conference*, p. 135.
- (14) Jeong, J. C., Yoon, D. J., Park, P. L., Kim, K. B. and Lee, S. S., 2002, "AE Characteristics of Fatigue Crack Opening and Closure in Structural Aluminum Alloy," *Journal of the Korean Society for NDT*, Vol. 22, p. 155.
- (15) Shim, D. S., Kim, J. K., 1998, "A Stochastic Analysis on Variation of Fatigue Crack Propagation due to Thickness Effect," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 22, pp. 1523~1532.
- (16) Kim, C. H., Cho, S. Y., Bae, D. H., 2001, "Evaluation of Fatigue Crack Growth Characteristics Considering Crack Closure Phenomenon in Weldment of Multi-Pass Welded Pipe," *Transactions of the KSME, A*, Vol., pp. 797~804.