

응력확대계수와 음향방출 변수를 이용한 피로균열 거동 연구

Study on the Fatigue Crack Behavior by the Stress Intensity Factor and AE Parameters

윤동진*, 정중채*, 박휘립*, 김기복*, 이승석*

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

초 록 응력확대계수와 음향방출 발생 관계를 이용해 균열 길이 및 균열 검출 능력을 평가할 수 있는 새로운 접근 방법을 파괴역학적인 관점에서 제시하였다. 이를 위해 강 교량 부재인 SWS 490B 강의 피로 균열 활동도를 음향방출 시험을 통해 관찰하였다. 표준 CT 시편에 대한 피로균열 진전 시 AE 특성을 관찰하는 실험을 진행하였으며, 기존의 AE 파라미터 분석은 물론 응력확대계수와 AE 발생거동 사이의 관계를 논의하였다. CT 시편 실험 결과에서 균열 성장 길이, AE 최대진폭, AE 에너지, AE hit 발생을 등과 같은 특정 변수들은 응력확대계수 값이 증가함에 따라 이들 값도 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 피로사이클 수에 따른 AE 에너지의 변화는 균열진전에 대한 활동성을 평가 하는데 사용되는 효과적인 변수중의 하나임을 보여 주었으며, AE 에너지 분석은 균열 활동도와 AE 변수 사이의 관계를 평가하는데 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

주요 용어: 음향방출, 피로균열, 강구조물, 응력확대계수, 균열진전

Abstract By using the relation between stress intensity factor and AE parameter, new approach method for assessing the crack length and detectability of crack was proposed. Laboratory experiment was carried out to identify AE characteristics of fatigue cracks for compact tension specimen. The relationship between a stress intensity factor and AE signals activity as well as conventional AE parameter analysis was discussed. As a result, the features of specific parameters such as the length of crack growth, the AE energy, the AE peak amplitude, and the cumulative AE hits, showed the almost same trend in their increase as the number of fatigue cycle increased. From the comparisons of peak amplitude and AE energy with stress intensity factor, it was verified that the higher stress intensity factors generated AE signals with higher peak amplitude and a larger number of AE counts. If we can get more reliable database for the relation between AE parameters and stress intensity factor, this approach will provide a good information for evaluating both the existence of crack and the minimum detectable size of crack.

Keywords: acoustic emission, fatigue crack, steel structures, stress intensity factor, crack propagation

1. 서 론

대부분의 강(steel) 구조물들은 오랜 기간동안 사용되기 때문에 시간이 지남에 따라 재료의 열화나 노화 현상이 발생한다. 특히, 강 교량 부재들은 다양한 크기의 반복하중을 지속적으로 받고 있기 때문에, 재료들은 결과적

으로 피로를 받게 된다. 최근에는 강 구조물이나 교량의 부재들의 급작스런 파손을 예방하기 위하여 비파괴 시험법 중의 하나인 음향방출(acoustic emission: AE) 기술이 피로균열을 검출하거나 감시하기 위한 능동적인 경고 시스템 역할로써 많이 이용되고 있다. 이전의 연구에서는 음향방출기술에 의한 피로균열 전

파를 측정할 수 있는 가능성을 보여준 결과가 다소 있었으며[1-5], 1970년대 초기에는 AE를 이용한 피로균열의 연속적인 측정에 대한 연구가 진행되었다. 이 연구에서는 10^{-6} in/cycle의 매우 낮은 균열성장속도에서 피로균열을 측정하였으며, AE를 측정하기 위하여 장비의 이득(gain)과 센서의 주파수에 대한 고찰을 다루고 있다[1]. Wang[2-4] 등은 구조용 강 시편에서 다양한 피로균열 조건에 대한 AE 특성을 조사하였는데, 이들 연구에서 음향방출 카운트 수와 응력확대계수(stress intensity factor) 사이의 관계가 있다는 것이 밝혀졌고, 균열이 진전하는 동안의 AE 거동은 시편의 방향성에 의존하는 것을 알 수 있었다. 대부분 이전의 연구에서는 균열의 열림·닫힘 뿐만 아니라 피로균열의 발생과 진전에 대한 특성 연구가 주로 이루어 졌다[5-8]. 한편 피로균열 검출에 관한 또 다른 분야에서는 시편 및 실 구조물에서의 위치표정 기술에 대한 연구가 활발하였으며, 주로 파형의 모드(mode)나 도달시간차법(arrival time method)을 이용해 해석을 시도하였다[9-10]. 그러나 이전의 연구에서는 실 구조물에의 적용 면에서 피로균열 성장을 검출하는 방법이나 그에 따른 유익한 지침 등이 아직까지 제시되지 않고 있다. 따라서, 효율적으로 잡음 제거가 된 전제 조건 하에 피로균열로부터의 AE 신호를 실질적으로 검출하거나 모니터링하기 위해서는 균열진전에 대한 다양한 조건에서 발생하는 AE 신호의 특성을 찾아내는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다.

비파괴평가 기술로서의 AE는 균열 개시 및 진전은 물론 재료 내에서의 미시적인 거동을 검출하기 위해 사용하는 매우 고감도의 기술이며, 재료 물성 연구를 위한 유용한 도구로서도 사용된다. 본 연구에서는 AE 기술을 이용하여 소형인장(compact tension: CT) 시편의 피로균열 활동성을 검증하고자 하며, CT 시편의 피로균열에 대한 AE 특성을 관찰하고, 기존의 AE 파라미터 분석은 물론 응력확대계수와 AE 신호 활동성 관계를 논의 하고자 한다. 본 연구의 목적은 강 교량 구조물 부재에 존재하는 균열에서 발생하는 AE 신호를 특성화하고 정량화 하여, 기존의 교량 손상 평가법을 좀더 개선하고자 하는데 있으며, 본 연구의 결과는 새로운 교량 감시 기술로서의 AE 기법을 개발하는데 기초적인 자료로 활용하고자 한다. 또한 본 연구는 피로균열의 검출 능력을 결정하는데 필요한 가장 효과적인 AE 변수들을 설정하는 것에도 주안점을 두고 있다.

2. 응력확대계수와 AE

2.1. 균열 진전 및 AE 발생

비파괴시험을 이용하여 균열을 검출하는데 있어서 가장 중요한 문제 중의 하나는 검출 가능한 최소균열의 크기를 결정하는 검출능력이라 할 수 있다. 음향방출 기술은 이론적으로 미세 균열을 검출할 수 있는 가장 우수한 기술 중의 하나로서, 만약 잡음(noise) 신호가 완전히 차단될 수 있다면 원자 단위의 결합과 같은 미세한 균열까지도 검출이 가능하게 된다. 그러나, 현실적으로 잡음신호를 완전히 차단하는 것은 불가능하며, AE 기법에 의한 검출능력 한계는 일반적으로 주변 잡음수준(noise level)에 의해 설정되는 문턱값(threshold)에 의해 주어진다.

교량구조물이나 산업설비에서는 다양한 잡음원(noise source)이 존재하므로 상당히 높은 수준의 잡음신호를 포함하고 있다. 잡음신호를 제거하는 가장 기본적인 방법은 센서로부터 감지되는 AE 신호 진폭에 대하여 취득 한계인 문턱값을 설정하고 그 이상의 신호를 취득하는 것이다. 따라서, AE 기법을 이용한 균열 검출능력의 한계는 전적으로 실험자가 설정하는 문턱값에 의해 결정되는 것이다. 이 문턱값은 구조물의 조건이나 주위환경 및 장비의 설정 방법에 따라 변하기 때문에, 임의로 어떤 절대적인 문턱값을 설정할 수는 없으며, 실험자의 경험이 문턱값을 결정하는데 중요한 요인으로 작용한다.

균열로부터 발생하는 AE 균열 신호는 균열의 진전으로 인해 해방된 에너지의 일부가 탄성파(elastic wave)로 방출되는 현상이다. 이 사실로부터, 방출된 탄성과 에너지는 균열 진전시 발생하는 파괴 역학적 파라미터인 에너지 해방율에 직접 비례한다고 생각할 수 있다. Dunegan[11] 등은 누적 AE 카운트(count) N_{AE} 를 제안하였는데, N_{AE} 는 균열선단(crack tip)에서 소성영역 체적 V_p 에 직접 비례한다고 제안한 바 있으며 (식 1), Morton[12] 등은 알루미늄 재료에 대하여 N_{AE} 와 응력확대계수 범위(ΔK) 사이의 경험적인 관계식 (식 2)를 보고하였다.

$$N_{AE} = C \cdot V_p \tag{1}$$

$$\frac{dN_{AE}}{dN} = A \cdot \Delta K^l \tag{2}$$

여기서, C 와 A 및 l 은 실험 상수이다.

기본 개념적으로 설명하면, AE 신호의 에너지는 신호의 지속시간(signal duration)을 밑변으로 하고, 최대진폭(peak amplitude)을 높이로 하는 삼각형 면적으로 계산된

다. 따라서, 균열이 성장함에 따라 AE 신호 에너지가 증가한다면 최대 진폭뿐 아니라 AE 카운트 수가 증가한다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 이러한 개념을 바탕으로 AE 신호의 변수들과 파괴역학적인 변수들과의 상관관계를 도출하기 위하여 균열의 진전 상태에 따른 AE 신호의 발생 특성을 실험적으로 고찰하였다.

2.2. 에너지 해방율, 응력확대계수 및 균열성장속도

피로현상은 균열이 성장하는 메커니즘이다[13]. 피로균열은 허용응력 이하의 낮은 응력 상태에서 반복하중에 의해 발생하는 현상으로, 대부분의 수명을 균열의 발생 및 안정 균열 성장(subcritical crack growth) 영역에서 소모한다. 따라서, 강 구조물의 안전성을 고려한다면 피로균열을 발견, 감시해야 하는 시점은 바로 이 안정 균열 성장 영역에서 이루어져야 할 것이다.

피로균열의 성장과정은 피로균열 성장속도인 da/dN 변화에 의해서 3단계로 분류된다. 제 1단계는 초기균열 개시의 상태로 응력확대계수(K) 값은 피로한계부근(K_{th})의 낮은 값을 가지며, 균열 성장속도는 극히 낮은 상태이다. 제 2단계에서는 균열길이의 증가에 따라 균열성장 속도는 빨라지며, 응력확대계수와 균열성장속도가 선형적인 비례관계를 가지게 되는데 이는 Paris[14]의 식으로 널리 알려진 식 (3)과 같이 표현된다. 제 2단계에서 성장하는 균열조건을 일반적으로 안정 균열 성장이라 부른다. 마지막 제 3단계는 균열성장속도가 급격히 증가하여 부재가 파단에 이르는 시기로 이를 불안정 균열 성장이라 부른다. 제 2단계에서 제 3단계로 넘어가는 경계를 천이점(transition point) K_{tr} [15]라 하고 파단시의 응력확대계수를 파괴 인성치(fracture toughness) K_c 라 한다.

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad (3)$$

여기서, C 와 m 은 실험 상수이다.

탄성에너지 해방율 G 는, 즉 피로균열의 성장으로 인해 해방되는 에너지는 응력확대계수 K 에 대하여 식 (4)와 같은 관계가 성립한다. 응력확대계수는 균열선단 특이성(singularity)의 진폭으로 정의되며[16], 식 (5)에 나타난 것처럼 적용되어진 공칭응력(σ), 균열의 길이(a) 그리고 기하학적 함수(F)의 함수가 된다. 따라서, AE 신호 발생에 대한 변수들의 특성(최대진폭, 에너지, 발생을 등)이 응력확대계수와와의 관계로 나타낼 수 있다면 다양한 균열 길이 및 응력 범위를 추정할 수 있는 새로운 접근 방법

이 도출될 수 있을 것이다.

$$G = \frac{K^2}{E} \quad (4)$$

여기서, E 는 탄성계수이다.

$$K = F\sigma\sqrt{\pi a} \quad (5)$$

2.3. 응력확대계수와 AE 검출능력의 관계

만약, 응력확대계수의 변화에 따른 AE 신호 특성에 관한 충분한 데이터를 확보할 수 있다면, 검출능력 K_{AE} 는 주변 잡음수준에 의해 결정되어지는 문턱값으로부터 결정할 수 있게 되며, K_{AE} 가 결정되었다는 전제 하에 AE 기법을 이용한 피로균열 평가법이 제시될 것이다.

식 (6)과 (7)은 K_{AE} 와 식 (5)로부터 구해지며, 식 (6)은 적용된 대상체에 적용된 응력을 이는 경우 검출 가능한 균열 길이를 구하는 식을 제시할 수 있게 된다. 반면 식 (7)에서는 검출해야 하는 최소 균열의 길이가 주어진 경우 대상체에 적용시킬 하중의 크기를 구하는 식을 제시하고 있다. 즉 AE 발생 특성과 응력확대계수와와의 상관관계로부터 얻어진 K_{AE} 값을 이용해 미지의 값인 검출 가능한 균열의 길이 및 적용 응력의 값을 구할 수 있다는 것이다.

$$a_{AE} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K_{AE}}{F\Delta\sigma_{test}} \right)^2 \quad (6)$$

$$\Delta\sigma_{test} = \frac{\Delta K_{AE}}{F\sqrt{\pi a_{AE}}} \quad (7)$$

여기서, $\Delta\sigma_{test}$ 는 적용된 공칭응력 범위이고, a_{AE} 는 검출 가능한 균열의 길이이다.

또한, 추가적으로 식 (3)의 개념을 이용하면 검출 가능한 균열의 잔여수명(remaining life)도 예측할 수 있게 된다. 식 (8)은 Paris의 식을 수정하여 피로 문턱값의 영향을 고려한 Klesnil과 Lukas[17]의 공식이다.

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad (8)$$

식 (9)는 식 (8)로부터 유도할 수 있으며, 식 (9)에서 잔여 피로사이클의 수 N 을 얻을 수 있다.

$$N = \int_{a_{AE}}^{a_{cr}} \frac{da}{C(\Delta K_{eq}^m - \Delta K_{th}^m)} \quad (9)$$

여기서, ΔK_{eq} 는 등가 응력확대계수 범위이며, a_{cr} 은 파 단시 임계 균열 길이이다.

즉 식 (6), 식 (7), 식 (9)는 본 연구에서 제안한 식으로, AE 발생 특성과 응력확대계수와의 상관관계로부터 K_{AE} 값을 얻게 됨으로써 피로균열의 길이 및 검출능력을 평가하기 위하여 사용될 수 있는 기준이 될 것으로 생각된다.

3. 피로균열 진전에 대한 AE특성

3.1. 시 편

본 연구에 사용한 시편은 교량 구조물에 가장 많이 사용되는 구조용 용접강(SWS 490B)을 이용하였다. 표준 CT시편은 250mm 두께의 압연된 판재로부터 채취 및 가공하였으며, 두께변화에 대한 특성을 고찰하고자 3종류의 각기 다른 두께인 9, 12.5 및 20mm 시편을 제작하였다. 이들 두께의 선정은 전형적인 강판형교(steel plate girder bridge)에 사용되는 강판 두께의 기준으로부터 정하였다. Table 1에는 SWS490B 재료에 대한 화학적 조성 성분을 나타내었다. 또한 압연 방향에 대한 특성을 조사하기 위하여 각각의 두께 시편을 압연 방향과 관련하여 L-T와 T-L의 2가지 시편을 제작하였으나, 본 연구에서는 현재까지 L-T 시편에 대해서만 실험하였다. 균열이 시편 중심부부터 발생 진전되도록 노치(notch)의 중심에 5mm 길이의 셰브론(shevron) 노치를 가공하였으며, 각 시편을 실험하기 전 각기 다른 하중비를 주어 예비균열(pre-crack)을 만들었다. 각 시편에 대한 명칭 및 실험조건을 Table 2에 나타내었다.

3.2. 피로시험 및 AE 측정

피로실험은 유압식 MTS에서 수행하였으며, 1, 2, 4Hz의 3가지 피로 사이클(cycle) 수에 대해 일정한 진폭의 하중을 주면서 실험이 진행되었다. 하중이 가해지는 MTS 장치로부터 발생하는 유압에 의한 잡음을 제거하기 위해 상하 클래비스(clevis)에 잡음 차단재를 처리한 직경 40mm, 길이 200mm 봉을 추가로 연결하였다. 또한 시편을 클래비스에 고정할 때 사용하는 연결 핀(pin) 역시 잡음 차단재로 처리하였다. 본 실험에서는 이와 같은 잡음 차단 처리에 의해 약 10dB 정도의 잡음 수준을 줄일 수 있었다.

Table 1 Chemical composition of SWS490B steel

Composition	C	Si	Mn	P	S	Soluble Al
wt %	0.160	0.370	1.390	0.020	0.002	0.03

Table 2 Specimen and test condition

Name of Specimen	Rolling direction	Fatigue cycle	Thickness
LT-9/1 Hz	L-T	1 Hz	9 mm
LT-9/2 Hz		2 Hz	
LT-9/4 Hz		4 Hz	
LT-12/1 Hz	L-T	1 Hz	12.5 mm
LT-12/2 Hz		2 Hz	
LT-12/4 Hz		4 Hz	
LT-20/1 Hz	L-T	1 Hz	20 mm
LT-20/2 Hz		2 Hz	
LT-20/4 Hz		4 Hz	

보다 정확한 균열진전 속도 및 균열길이를 측정하기 위해서 CT 시편 한쪽 표면을 경면 처리한 후 1mm 간격으로 일정한 표시 선을 그었으며, 표면 균열진전 속도 및 길이 측정은 마이크로 줌렌즈를 이용하여 광학적으로 측정하였다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이 균열길이는 마이크로 줌렌즈에 장착된 CCD 카메라를 통해 관측용 비디오 모니터와 기록용 캠코더(camcorder)에 직접 연결하였으며, 균열 진전속도 및 길이 측정은 0.1mm 단위로 정밀하게 측정할 수 있었다.

AE 신호의 측정을 위해 다채널(multi-channel) 상용 AE 시스템인 MISTRAS 2001 (PAC)과 디지털 오실로스코프(LeCroy 9354A)를 사용하였다. 본 실험에서 AE 센서는 2개가 사용되었는데, 하나는 300kHz (R30, by PAC) 공진형 센서이며, 다른 하나는 100~1,000kHz 주파수 범위의 광대역형 센서(WD, by PAC)를 사용하였다. AE 센서의 배치가 끝난 후 하중이 작용하지 않고 잡음이 없는 조용한 상태에서 연필심 파괴 실험을 통해 센서의 감도를 확인하였다.

본 실험에서 문턱값은 32~48dB 범위에서 설정되었으며, 균열 진전 시 방출되는 균열신호를 프리앰프에서 60dB로

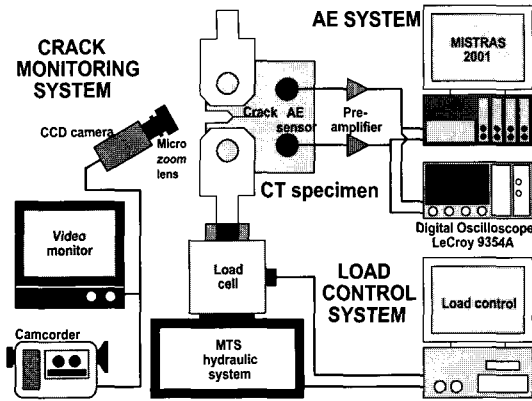


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

증폭시켰다. 프리앰프를 통하여 증폭 출력된 균열신호는 디지털 오실로스코프로 입력되었으며, 각 신호에 대한 파형은 2.5MHz의 샘플링 속도로 2,500개의 데이터로 디지털화하였다. 저장된 데이터는 실험이 끝난 후 파형과 주파수 분석을 위해 사용되었다. Fig. 1은 본 실험에 사용된 실험 장치의 개략도를 나타낸 것이다.

3.3. 결과 및 토의

Fig. 2는 대표적으로 LT-9/2Hz 시편에 대한 균열성장 속도와 응력확대계수 관계를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 2개의 직선은 이론적인 곡선을 나타내었는데, 하나는 표준 곡선이고 나머지 다른 하나는 97.5% 신뢰도를 갖는 곡선이다. 그림에 나타난 것처럼 실험결과는 주어진 상부 경계선 내에서 이론적인 결과와 잘 일치함을 알 수 있었으며, 여기서 나타내지는 않았지만 다른 실험 결과들 또한 이와 동일한 경향을 나타내었다. 식 (10)은 표준곡선에 사용된 식을 나타내며, 식 (11)은 97.5%의 신뢰도를 가진 상부한계선에 사용된 식을 나타낸다. 식 (10)과 식 (11) 모두 Klesnil과 Lukas 방정식에서 유도되었다.

$$\frac{da}{dN} = 1.54 \times 10^{-11} \times (\Delta K^{2.75} - 3.45^{2.75}) \quad (10)$$

$$\frac{da}{dN} = 2.69 \times 10^{-11} \times (\Delta K^{2.75} - 2.82^{2.75}) \quad (11)$$

Fig. 3과 Fig. 4는 피로 사이클 수에 대한 AE 최대진폭과 응력확대계수 범위를 동시에 나타낸 결과로서, 각각의 사이클 주파수(1, 2, 4 Hz)에 대해서 Fig. 3은 12.5mm 두께의 LT 시편의 결과를, Fig. 4는 20mm 두께의 LT 시편에 대한 결과를 나타내었다. 여기서 실선으로 보이는

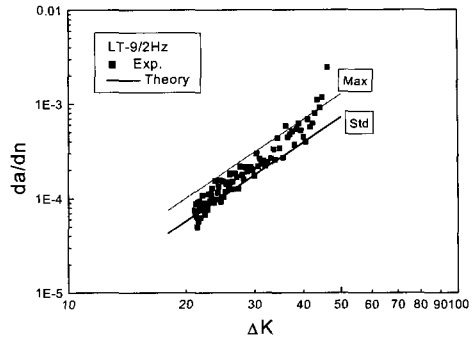


Fig. 2 Relation between crack growth rate and stress intensity factor range

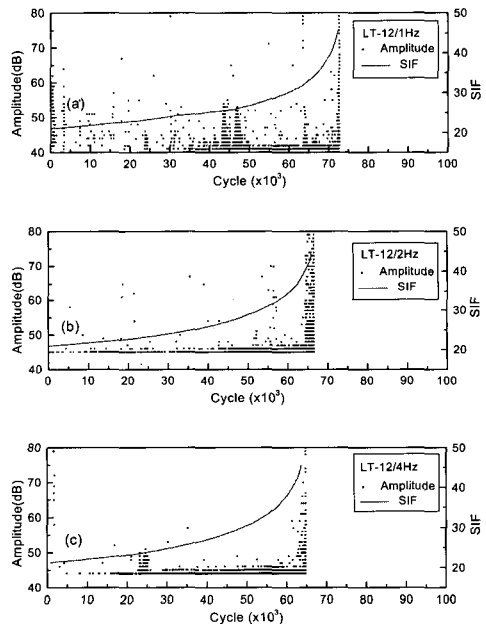


Fig. 3 AE peak amplitude and stress intensity factor range as a function of fatigue cycle (12mm thick)

것은 각 사이클에 해당하는 응력확대계수 값을 나타내며, 사이클 축에 따라 각 점으로 표시되는 것은 AE hit에 대한 각각의 최대진폭 값을 나타낸다.

그림에서 보는 것처럼 전체적으로 AE 최대진폭은 피로 사이클 수가 증가함에 따라 같이 증가하는 경향을 나타내었으며, 20mm 두께 시편의 최대진폭이 전체적으로 12.5mm 두께 시편보다 상대적으로 높게 나타남을 볼 수 있었다. 그러나 AE 최대진폭은 응력확대계수가 증가한다 해서 연속적으로 증가하지는 않았으며, 이와 같은 결과로

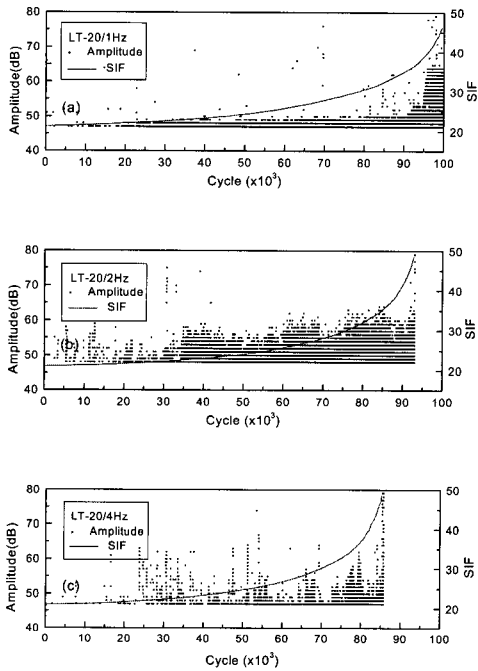
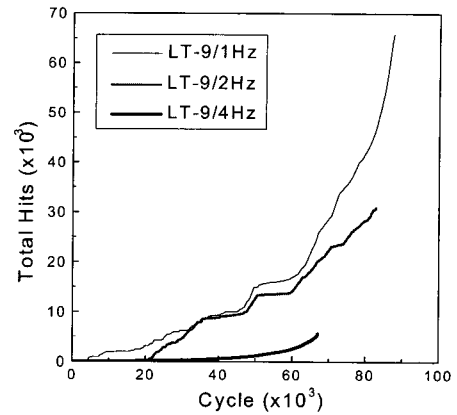
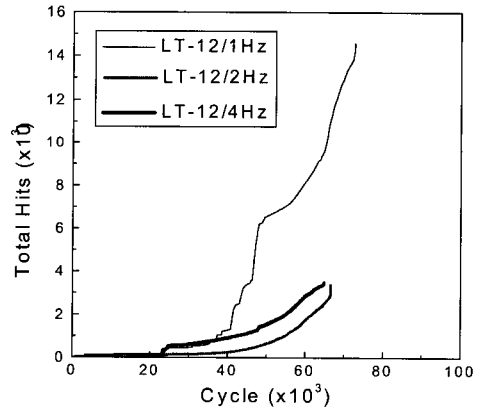


Fig. 4 AE peak amplitude and stress intensity factor range as a function of fatigue cycle (20mm thick)

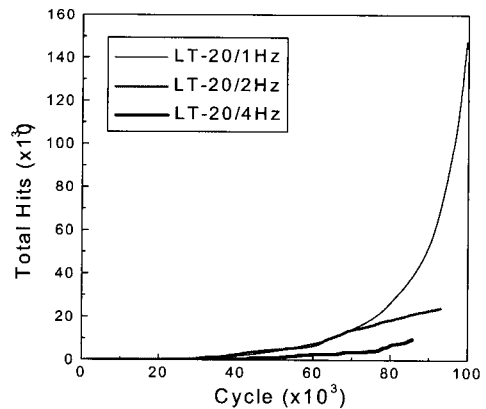
부터 최대진폭의 변화에서는 어떤 불규칙성이 존재하고 있음을 암시하는 것이라 할 수 있겠다. 다시 말해 균열길이의 증가 또는 사이클 수의 증가에 따라 AE 개개 신호의 최대진폭이 일률적으로 증가한다기 보다는 최대진폭이 작은 신호와 큰 신호가 병행하여 발생되었으며 전체적으로는 점차 증가하는 경향을 보이고 있었다. 즉, 이러한 경향은 개별 신호에 대해 응력확대계수와 비교 할 경우 AE 신호 검출능력을 평가하는데 잘못된 기준을 제시할 수 요인으로 작용할 수 있을지도 모른다. 따라서 이들의 상관관계를 통계학적인 다변량 해석법이나 인공지능 알고리즘을 도입하여 그 경향에 대한 분석 및 모델 개발을 시도한다면 더 좋은 결과를 얻을 수 있으리라 생각되며 현재 연구 진행 중이다. 그럼으로부터 AE 최대진폭은 대략 문턱값부터 80dB 사이에 분포되었으며, 균열진전으로부터 발생하는 AE 신호는 응력확대계수 22 이상에서 탐지될 수 있음을 알 수 있었다. 즉, 응력확대계수와 AE 최대진폭사이의 관계에 대한 정량적인 정보를 가지고 있다면, 검사 대상체에서 취득한 AE 사건을 분석함으로써 균열 진전의 여부를 평가하는 것이 가능하다는 것을 암시한다. 물론, 재료 특성이나 환경적인 조건들로 인해 예



(a) 9 mm thick



(b) 12 mm thick



(c) 20 mm thick

Fig. 5 Cumulative AE hit vs. Fatigue cycle

상치 못한 AE 활동이 있을지 모르기 때문에 이러한 접근이 절대적인 해답을 제시하는 것은 아니나, AE 최대진폭과 응력확대계수 사이의 관계에 대해서 보다 더 신뢰할 수 있는 자료들을 수집할 수 있다면, 앞서 제시한 접근 방법은 균열의 존재 및 검출 가능한 최소 균열의 크기를 평가하는데 중요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 5는 9, 12.5, 20mm 3종류 두께 시편에 대해 피로 사이클 수에 따른 누적 AE hit를 나타내 주고 있으며, 하중 사이클 변화(1, 2, 4Hz)의 3가지 다른 조건에 대한 비교를 함께 나타내었다. 그림에 나타난 것처럼 LT-12 시편을 제외한 나머지 시편에서 사이클 주파수가 낮아짐에 따라 누적 AE hit 수는 급격히 증가되는 경향을 나타내었다. 이론적인 관점에서는 AE hit 검출이 가능한 경우 AE hit는 매 번의 피로 사이클에서 발생할 것이라 예상된다. 이전의 연구에 따르면 하중 사이클 속도는 피로 균열로부터 발생하는 음향방출 발생에 영향을 미치지 않는다고 하였다[1]. 그러나, AE 측정 관점에서 본다면 AE는 모든 피로 사이클에서 반드시 발생하지는 않는다는 것이다. 즉 본 연구의 결과에서는 AE 활동은 사이클 속도에 따라서 다를 수 있다는 사실이 발견되었다.

또 하나의 흥미 있는 사실은 모든 실험에서 CT 시편이 파단될 때까지 피로시험이 계속 될 경우, 시편이 파단될 때의 최종 사이클 수가 Fig. 3에서 Fig. 5까지 나타낸 것처럼 사이클 하중의 주파수에 따라서 다르다는 사실이었다. 즉, 하중 사이클이 증가함에 따라 재료의 파단은 더 일찍 발생한다는 사실이 관찰되었으며, 상대적으로 고주기 피로시험의 경우에는 파단에 요구되는 피로 사이클 수, 즉 피로 수명이 훨씬 적을 것이라고 생각된다.

AE 에너지가 응력확대계수의 변화에 미치는 영향을 조사하기 위하여 피로사이클 수에 대한 AE 에너지와 응력확대계수를 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. 이들 결과는 최대진폭과 응력확대계수 사이의 관계를 보여주는 Fig. 3과 Fig. 4에 비교할 때 다소 다른 특징을 보여주고 있다. 즉, AE 에너지는 피로 사이클이 증가함에 따라 그 크기가 일정하게 증가한다는 사실을 알 수 있었다. 비록 각 AE hit에 대한 AE 최대진폭이 다른 크기를 가지고 있지만, 각각의 AE hit에 대한 전체 AE 에너지는 점차적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 이것은 피로균열이 진전하는 동안에 다른 진폭을 가지는 여러 종류의 AE hit가 존재한다는 것을 암시하는 것이다. 특히, LT-20/1 Hz 시편의 경우 Fig. 7 (a)에 나타난 바와 같이 다른 시편과 비교되는 큰 AE 에너지를 보여주고 있는데,

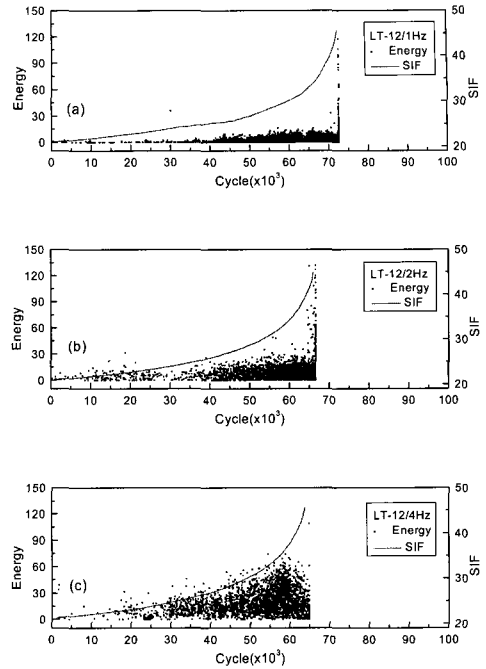


Fig. 6 AE energy vs. fatigue cycle (12 mm thick)

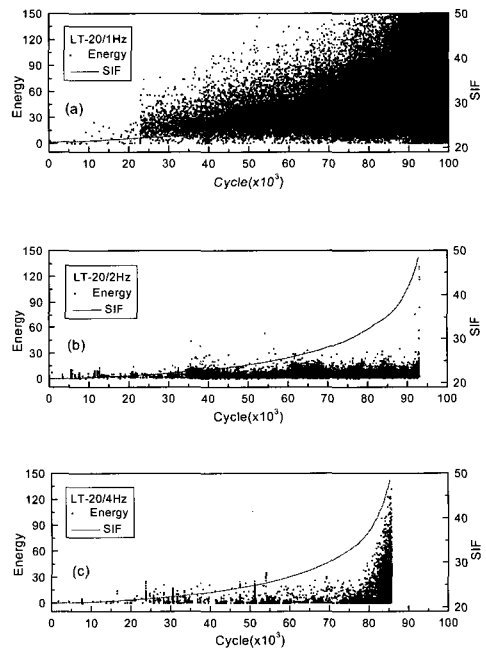
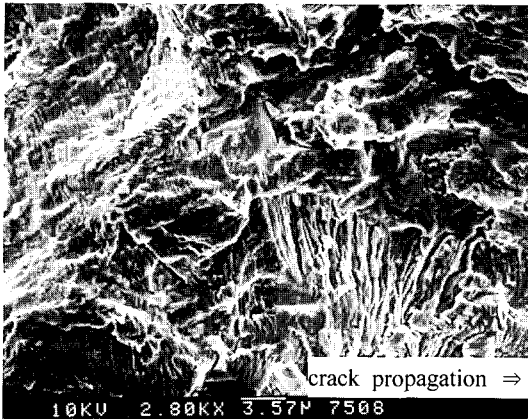


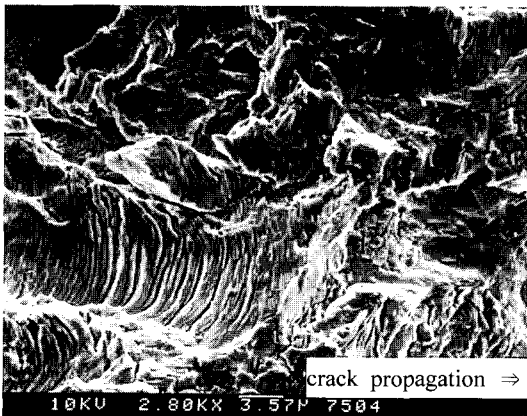
Fig. 7 AE energy vs. fatigue cycle (20 mm thick)

정확한 원인 규명은 밝히지 못하였지만 이 시편의 경우 상대적으로 신호의 양도 많았으며 큰 에너지를 가진 신호가 다량 발생된 것에 기인한다고 추정된다. AE 에너지는 피로균열 성장속도와 AE 발생 관계를 분석하기 위한 이전 연구에서 널리 사용하여 왔던 AE 카운트 수와 유사한 것이다. 즉, 이러한 분석은 AE 파라미터와 균열 활동성 사이의 관계를 평가하는데 사용될 수 있을 것이다. 결과적으로, 피로사이클에 대한 AE 에너지 변화는 균열 진전의 활동을 예측할 수 있는 중요한 변수로 작용함을 검증할 수 있었다.

Fig. 8은 AE 신호의 진폭이나 에너지 값이 균열진전 상태에 따라 달라지는 것에 대한 정보를 얻기 위해 각 시편의 피로균열진전 파단면을 주사전자현미경(SEM) 관



(a) early stage (crack length of 5 mm)

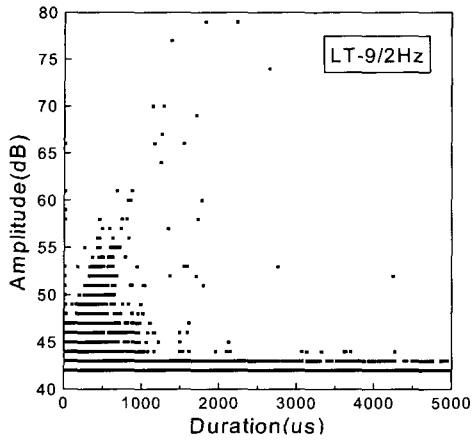


(b) final stage (crack length of 20 mm)

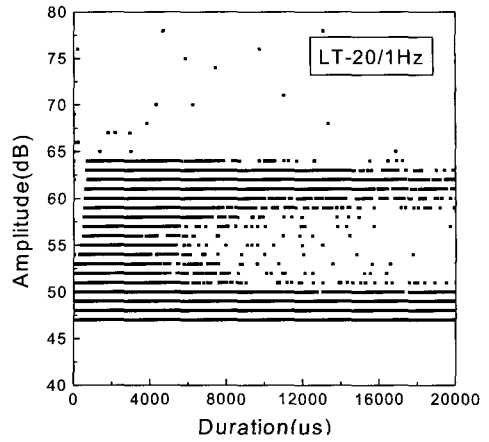
Fig. 8 Fractography for each stage

찰을 통해 조사한 결과를 보여 주고 있다. 관찰 부분은 균열진전 초기와 중간 부분 그리고 후반부인 파단전 부분으로 나누어 관찰하였다. Fig. 8(a)의 초기 부분은 균열 진전이 예비 균열(pre-crack) 끝단으로부터 본 실험이 시작되는 초기 부분으로써 균열진전 길이가 약 5mm이며, 응력확대계수 값이 약 22 정도에 해당된다. 그리고 Fig. 8(b)의 후반 부분은 파단전 부분으로써 균열진전 길이가 약 20mm이며, 응력확대계수 값이 약 45 정도에 해당된다. 초기 부분은 균열진전속도가 매우 느린 부분으로써 주로 그림의 왼쪽 상단에서와 같은 매우 조밀한 스트라이에이션(striation)을 관찰할 수 있었다. 즉 같은 단위 길이 당 피로 사이클 수가 많기 때문이며, 상대적으로 낮은 응력확대계수 값으로 인해 파단면도 전체적으로 부드러운 경향을 나타내었다. 반면, 후반부의 파면에서는 그림 중앙부에서 보듯이 균열진전 방향으로 굵직굵직한 스트라이에이션(striation)을 관찰할 수 있었으며, 전반적으로 파면의 모습이 응력확대계수 값이 큰 조건으로 인해 좀더 거칠은 파단면을 관찰할 수 있었다. 즉 이러한 피로 파괴 기구가 AE 신호의 진폭이나 에너지 등 신호의 형태에 영향을 미치게 되는 것으로 분석되어지나, 좀더 명확한 근거를 위해 파단면에 대한 추가적인 분석이 필요하다고 생각된다.

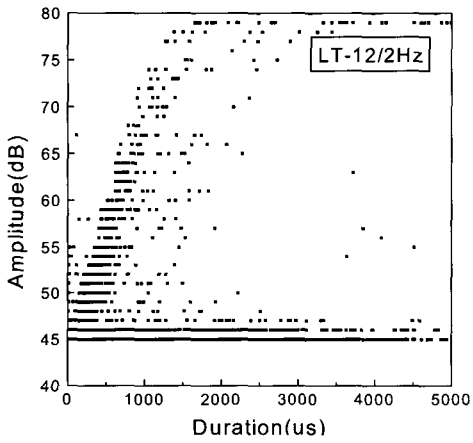
Fig. 9와 Fig. 10은 각 시편에 대한 AE 신호의 최대진폭과 지속시간(event duration)의 상호관계를 나타낸 것이다. 이 cross-plot은 신호 특성들을 구별하는 목적으로, 전체 AE 신호를 분석하는데 매우 유용한 방법으로 사용되어 왔다. 그림에서 각 점은 AE 신호특성을 나타내는 것으로 각 신호에 대한 진폭과 길이를 나타낸 것이다. Fig. 9는 두께 변화에 따른 2Hz 하중 사이클을 적용한 LT 시편에 대한 결과를 나타내며, Fig. 10은 하중 사이클의 변화에 따른 20mm 두께 LT 시편에 대한 결과를 나타낸 것이다. 전체적으로 cross-plot의 결과에서는 Fig. 9와 같이 시편 두께의 증가에 따라서 신호길이와 긴 신호들이 상대적으로 많이 발생하여 그림의 각 점들이 우측으로 이동하는 경향을 나타낸다. 또한 Fig. 10의 경우에는 하중 사이클의 변화에 따른 cross-plot 결과에서 사이클 주파수가 낮아질수록 신호길이와 훨씬 긴 신호들이 많이 발생함을 볼 수 있다. 즉 Fig. 10 (a)에 나타난 바와 같이 낮은 사이클 수에서는 고 진폭과 긴 지속시간을 가진 많은 AE 신호들이 관찰되었다. 이런 큰 에너지를 가진 AE 신호들은 Fig. 4 (a)에서 보는바와 같이 실험의 마지막 단계에서 발생하는 큰 신호들의 수에 기인한다고 보아진다. 이들 결과로부터 시편의 두께나 하중



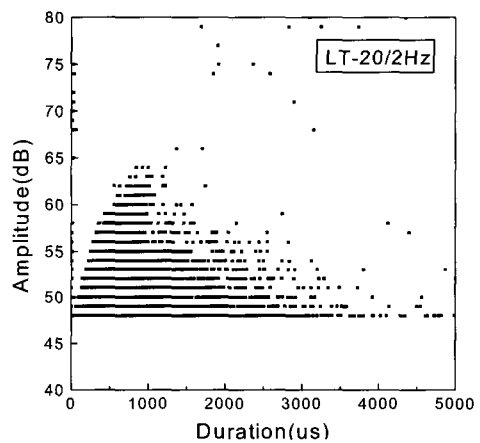
(a)



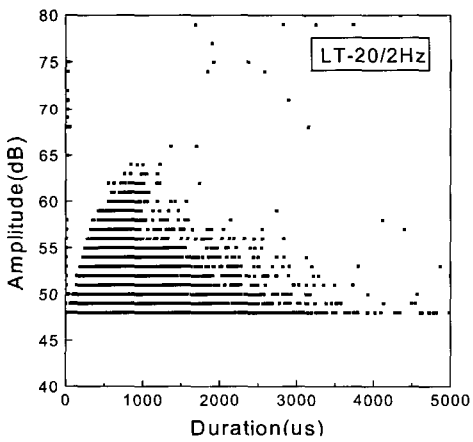
(a)



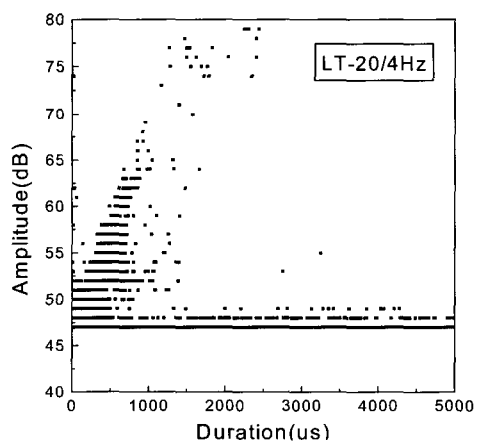
(b)



(b)



(c)



(c)

Fig. 9 Cross-plot of peak amplitude and event duration (2Hz cycle)

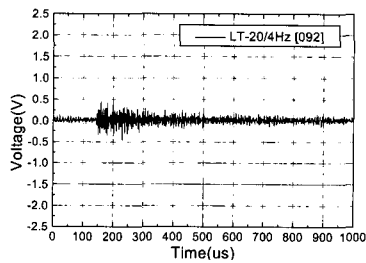
Fig. 10 Cross-plot of peak amplitude and event duration (20mm thick)

사이클 수에 따라서 균열진전 특성이 다를 수 있으며, 파괴역학적인 변수와 AE 신호 발생 사이의 관계에서 고려하여야 할 점임을 밝히고자 한다.

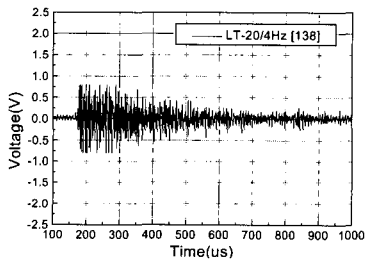
추가적인 검증 분석의 하나로써 AE 신호의 실제 형태를 확인하기 위하여, 디지털 오실로스코프에 저장된 AE 신호를 이용해 파형 분석과 주파수 분석을 수행하였다. 시간 축에서의 특성을 나타내는 AE 파형은 지속시간이나 최대진폭과 같은 AE 변수와 관련된 각 신호에 대한 특성을 나타낼 수 있다. Fig. 11은 각 실험 조건에서 얻어진 전형적인 AE 파형을 나타낸 것이고, Fig. 12는 이들 각 파형에 대해 FFT(fast Fourier transform) 분석을 통한 주파수 분석 결과를 나타낸 것이다. 각기 다른 진폭과 지속시간을 나타내는 다양한 형태의 파형이 발생되었

으나, 대부분 Fig. 11의 (a), (b), (c)에 나타난 것처럼 전체적으로 low, medium, high amplitude의 진폭을 가진 3 종류의 신호로 분류할 수 있었다. 이들 신호는 응력확대 계수 값이 낮은 부분, 즉 균열 길이가 짧은 부분에서는 대부분 low amplitude 신호가 발생되나 후반부에서는 이들 3 종류의 신호가 동시에 병행해서 발생됨을 알 수 있었다. 그러나 진폭이나 신호 지속시간 외에 이들 각각의 파형에 대한 차이점을 구별하는 것은 쉽지 않은 일이다. 따라서, FFT 결과를 분석하여 고찰을 시도하였다.

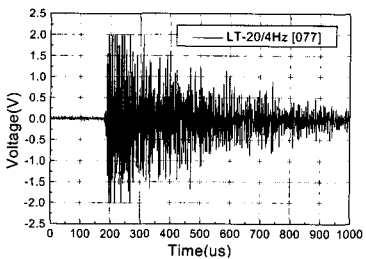
Fig. 12는 위의 각 신호에 대한 주파수 분석을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것처럼 주파수 분석 결과에서는 각 파형에 따른 균열진전 특성과 주파수 특성 사이의 관계에 명확한 차이점을 발견하기가 힘들었다. 전체적으로



(a)

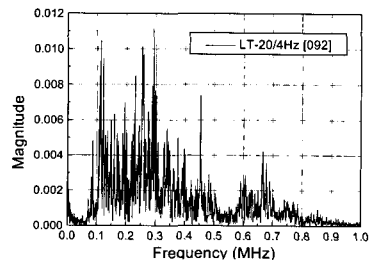


(b)

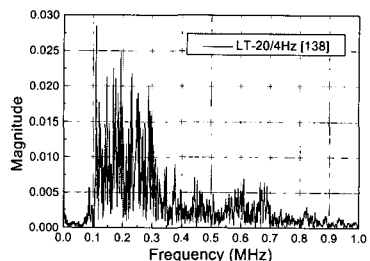


(c)

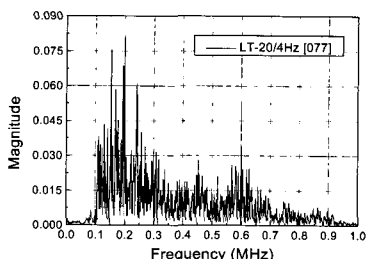
Fig. 11 Typical waveform obtained from fatigue crack propagation (20 mm thick, 4Hz)



(a)



(b)



(c)

Fig. 12 Result of frequency spectrum (FFT) of each above waveform

본 연구에 사용된 시편의 경우에는 100-300kHz 범위의 주파수 성분이 지배적이었으며, 600-700kHz 범위의 고주파수 성분이 2번째 주성분(secondary peak)으로 나타남을 관찰할 수 있었다. 결과적으로 광대역형 센서로부터 얻은 파형임에도 불구하고 균열길이가 다른 상황에서 발생한 피로균열 신호의 주파수 특성은 크게 차이가 없음을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 응력확대계수와 음향방출 발생 관계를 이용해 균열 길이 및 균열 검출 능력을 평가할 수 있는 새로운 접근 방법을 파괴역학적인 관점에서 제시하였으며, 이를 위해 강 교량 부재인 SWS 490B 강의 피로 균열 활동도를 음향방출 시험을 통해 관찰하였다. 기존의 AE 파라미터 분석은 물론 응력확대계수와 AE 발생거동 사이의 관계를 분석한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 응력확대계수와 AE 변수 사이의 관계에 관한 정보를 가지고 있다면, 본 연구에서 제시된 피로균열 진전상태 추정을 위한 접근 방법은 피 검사체의 측정 대상지역에서 AE를 측정함으로써 균열진전의 존재 유무에 대한 평가가 가능한 것을 의미한다. 즉, AE 최대진폭과 응력확대계수 사이의 관계에 관한 신뢰성 있는 많은 데이터베이스(database)를 수집할 수 있다면, 이러한 평가방법은 균열의 존재와 검출할 수 있는 최소한의 균열 크기를 평가하는데 매우 좋은 기준을 제공해 줄 것이다.

2) AE 최대진폭은 전체적으로 응력확대계수 값이 증가함에 따라 같이 증가하는 경향을 나타내었으나 연속적으로 증가하지는 않았으며, 이와 같은 결과로부터 최대진폭의 변화에서는 불규칙성이 존재하고 있음을 알 수 있었다. 다시 말해 균열길이의 증가 또는 사이클 수의 증가에 따라 AE 개개신호의 최대진폭이 일률적으로 증가한 다기 보다는 최대진폭이 작은 신호와 큰 신호가 병행하여 발생되므로 전체적으로는 점차 증가하는 경향은 보이고 있다. 따라서 이들의 상관관계는 통계학적인 다변량 해석법이나 인공지능 알고리즘을 도입하여 그 경향에 대한 분석이나 모델 개발을 시도한다면 더 좋은 결과를 얻을 수 있으리라 생각된다.

3) 피로사이클 수에 따른 AE 에너지의 변화는 균열진전에 대한 활동성을 평가하는데 사용되는 효과적인 변수 중의 하나임을 보여 주었으며, AE 에너지 분석은 균열 활동도와 AE 변수 사이의 관계를 평가하는데 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

4) 각 실험에서 발생된 AE 신호는 크게 3종류 형태의 파형으로 분류할 수 있었다. 주파수 분석 결과에서는 전체적으로 본 연구에서 사용된 시편의 경우 100-300kHz 범위의 주파수 성분이 지배적이었으며, 600-700kHz 범위의 고 주파수 성분 또한 발견할 수 있었다. 그러나 AE 신호의 파형과 주파수 분석에서 피로균열 진전의 각 단계에 따른 차이점은 발견할 수 없었다.

참고문헌

- [1] D. O. Harris and H. L. Dunegan, "Continuous Monitoring of Fatigue Crack Growth by Acoustic Emission," *Experimental Mechanics*, February, pp. 71-81, (1974)
- [2] Z. F. Wang, J. Li, W. Ke, and Z. Zhu, "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] D. W. Prine and T. Hopwood, "Detection of Fatigue Cracks in Highway Bridges with Acoustic Emission," *J. of Acoustic Emission*, Vol. 4, No. 2/3, (1985)
- [6] 이강용, "저주기 피로 파괴 하중하에서 AE수 변화율과 균열 성장률에 관한 연구," 대한기계학회 논문집, 제 13권, 제 2호, pp. 252-256, 1989.
- [7] A. Berkovits and D. Fang, "Study of Fatigue Crack Characteristics by Acoustic Emission," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 51, No. 3, pp. 401-416, (1995)
- [8] T. C. Lindley, I. G. Palmer, and C. E. Richards, "Acoustic Emission Monitoring of Fatigue Crack Growth," *Materials Science and Engineering*, Vol. 32, pp. 1-15, (1978)

-
- [9] T. Ohira and Y. H. Pao, "Microcrack Initiation and Acoustic Emission of A533B Steel in Fracture Toughness Tests," J. of Acoustic Emission, Vol. 4, No. 2/3, (1985)
- [10] A. K. Maji, D. Satpathi, and T. Kratochvil, "Acoustic Emission Source Location Using Lamb Wave Modes," J. of Engineering Mechanics, February, pp. 154-161, (1997)
- [11] H. L. Dunegan, D. O. Harris, and C. A. Tatro, "Fracture Analysis by use of Acoustic Emission," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 1, pp. 105-122, (1968)
- [12] T. M. Morton, S. Smith, and R. M. Harrington, "Effect of Loading Variables on the Acoustic Emission of Fatigue Crack Growth," Experimental Mechanics, pp. 208-213, (1974)
- [13] EUROCODE3: Chapter 9, Design of Steel Structure, Commission of the European Communities, (1990)
- [14] P. C. Paris, and F. Erdogan, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws," Journal of Basic Engineering, Vol. 85, pp. 528-534, (1960)
- [15] T. S. Rolfe, and J. M. Barsom, "Fracture and Fatigue Control in Structures Applications of Fracture Mechanics," Prentice-Hall Inc., (1977)
- [16] T. L. Anderson, "Fracture Mechanics Fundamentals and Applications," 2nd Ed, CRC Press, (1995)
- [17] M. Klesnil, and P. Lukas, "Influence of Strength and Stress History on Growth and Stabilization of Fatigue Cracks," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 4, pp. 77-92, (1972)