

피로균열시 발생하는 AE신호 분석

Evaluation of AE Signal caused by the Fatigue Crack

김재구*·구동식*·최병근†

JaeGu Kim, DongSik Gu and ByeongKeun Choi

Key Words : Acoustic Emission(음향방출), Signal Processing(신호처리), Crack Growth(크랙진전), Signal Waveform(신호파형)

ABSTRACT

The acoustic emission (AE) technique is a well-known non-destructive test technique, both in research and for industrial applications. It is mainly used to monitor the onset of cracking processes in materials and components. Predicting and preventing the crack phenomenon has attracted the attention of many researchers and has continued to provide a large incentive for the use of condition monitoring techniques to detect the earliest stages of cracks. In this research, goal is in grasping features of AE signal caused by crack growth. The envelope analysis with discrete wavelet transform (DWT) is used to find the characteristic of AE signal. To estimate feature of divided into three by crack length, the time waveform and the power spectrum were generated by the raw signals and the transferred signal processed by envelope analysis with DWT.

1. 서 론

AE(Acoustic Emission)는 변형에 민감하고, 동적으로 검출 할 수 있다는 장점을 가지고 있어, 재료 강도의 연구 수단뿐만 아니라 비파괴 검사의 측면에서도 다양하게 적용되고 있다. 또한 AE는 다른 비파괴 검사 방법과 달리 구조물이 운전 상태에서 결함의 성장 가능성을 검출 할 수 있고, 연속 감시가 가능하다는 장점으로 인하여 대형 구조물의 안정성 평가에 널리 응용되고 있다.⁽¹⁾

대부분의 강(steel) 구조물들은 오랜 기간동안 사용되기 때문에 시간이 지남에 따라 재료의 열화나 노화 현상, 피로파괴가 발생하게 된다. 특히, 강 교

량 부재들은 다양한 크기의 반복하중을 지속적으로 받고 있기 때문에, 재료들은 결과적으로 피로를 받게 된다. 또한, 대형 구조물 및 항공기 재료 등과 같은 구조물 및 재료들은 다양한 크기의 반복하중을 지속적으로 받는 경우가 많기 때문에 이들 재료에서의 피로균열 발생 및 성장은 대형사고를 야기할 수 있다.

최근 이러한 급작스런 파손을 예방하기 위하여 AE 기술이 피로균열을 검출하거나 감시하기 위한 시스템 역할로써 많이 이용되고 있다. 지금까지 AE 기술을 이용한 피로균열에 관한 연구는 대부분 응력 확대계수와의 상관관계에 초점을 맞춘 연구들이었다.⁽²⁾ 하지만 시간이 지남에 따라 진전되는 피로균열의 연구 방법들이 점차 진화되고 있다. 이러한 연구들 중에서도 취득한 신호를 진동 신호 분석법(파워 스펙트럼, 특징값(feature value) 분석, 포락처리, 웨이블릿 변환 등)을 적용한 신호처리(signal processing) 연구들이 활발히 진행 중이다.^{(3),(4)}

† 최병근; 정회원, 경상대학교 에너지기계공학과

E-mail : bgchoi@gnu.ac.kr

Tel : 055-772-9116, Fax : 055-772-9119

* 경상대학교 대학원

Table 1 Specification of the data acquisition system

2 channel AE system on PCI-board	18-bit A/D conversion 10M Samples/sec rate (on one channel, 5M Samples/sec on 2 AE channels)
AE sensor (Wideband type)	Peak Sensitivity V/(m/s); [V/ μ bar].....55[-62] dB Operation Frequency Range.....100 ~ 1000 kHz Resonant Frequency V/(m/s); [V/ μ bar].....125[650] kHz Directionality..... ± 1.5 dB
Preamplifier (20/40/60 dB gain)	Wide dynamic range < 90 dB Signal BNC 20/40/60 selectable gain

Table 2 Experimental parameters of AE testing

Parameter type	Setup Value
Threshold Value	30 dB
Preamplifier	40 dB
Peak Definition Time (PDT)	300 μ s
Hit Definition Time (HDT)	600 μ s
Hit Lockout Time (HLT)	1000 μ s
Sample Rate	5M Sample/sec
Pre-Trigger	100 μ s
Hit Length	40 μ s
Filter on Board (Low)	1 kHz
Filter on Board (High)	2 MHz

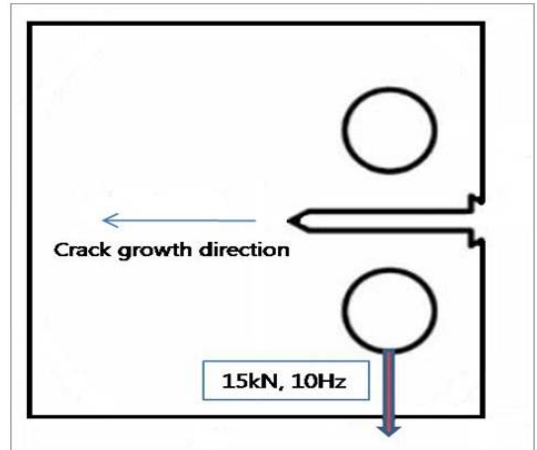


Fig. 2 Experimental condition (SM45C)

본 논문에서는 탄소강재로 비교적 널리 사용되는 SM45C강 시험편에 AE센서를 부착하여 피로균열 시 나타나는 AE신호를 취득하였으며, AE신호의 특징을 찾기 위해 이산웨이블릿 변환(DWT)을 사용하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 KS 규격 D 3752에 규정된 SM45C강을 사용하였으며, 실험에 사용된 신호취득 장비로는 PAC(Physical Acoustic Corporation)사의 AE 변환기, 증폭기, DAQ보드 및 분석 소프트웨어를 사용하였다. 증폭기는 20kHz ~ 1.2MHz의 범위를 가지며 40dB로 설정하였다. 본 실험에서 AE센서는 Table 1에서 나타난 것과 같이 100 kHz에서 1 MHz까지 주파수 범위를 가지는 광대역(wideband) 타입을 사용하였다.

Fig. 1과 같이 시험편의 균열진전 방향에 마그네틱 홀더를 이용하여 센서를 시험편에 부착하였는데, 센서와 시험편 사이의 신호전달 효율을 증대하기 위해 부동액을 센서 표면에 도포하여 부착시켰다. 피로균열진전실험은 Fig. 2에서 보는바와 같이 Servo hydraulic test system 시험기에서 부하 15 kN, 응력비 R=0.1에 따라 10 Hz의 정현파를 인가하여 대기 중에서 수행하였다. 그리고 신호취득을 위한 파라미터 설정은 Table 2와 같으며, 신호저장은 매 10초마다 5 MHz로 샘플링하여 저장하

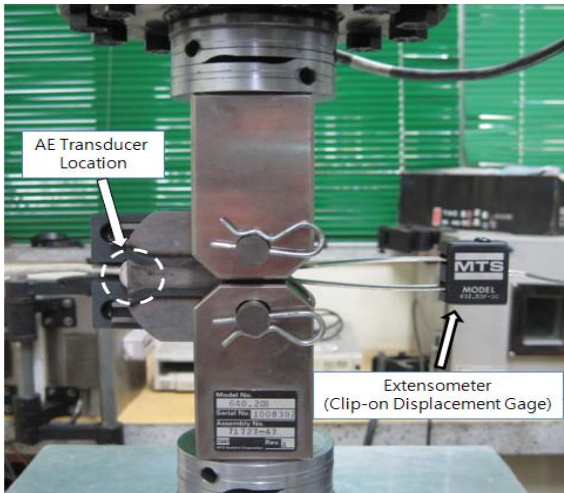


Fig. 1 Transducer location on the test specimen

였고 시험편 균열길이는 Extensometer(Clip-on Displacement Gage)를 사용하였다.

3. 신호처리

3.1 포락처리

포락처리는 진동 신호로부터 주기적으로 발생하는 충격 신호의 검출을 위해 널리 사용되고 있는 기법이다. 이는 진동 신호에 의해 가려진 에너지가 낮은 신호를 검출할 수 있는 이점을 가지고 있다.

포락처리는 (1)band-pass filter, (2)waveform rectification, (3)hilbert transform, (4)low-pass filter 및 power spectrum의 4단계를 거치게 되며, 포락처리를 위한 대역통과필터는 기계적 특성으로 발생하는 낮은 주파수의 높은 진폭을 가지는 진동 신호를 제거하는 역할을 하게 된다. 따라서 이 대역폭을 설정하는 것이 포락처리에서 가장 중요한 부분이라 할 수 있다.⁽⁵⁾

BPF의 범위는 다섯 구간으로 나누어 실험을 수행하였고 그 중 100kHz ~ 300kHz 구간의 신호 특성이 잘 표현되어 그 구간으로 결정하여 실험을 재차 수행하였다.

3.2 이산웨이블릿 변환

이산웨이블릿 변환(discrete wavelet transform)은 신호 내에 포함되어 있는 충격파를 찾는 데 효과적인 것으로 알려져 있다.

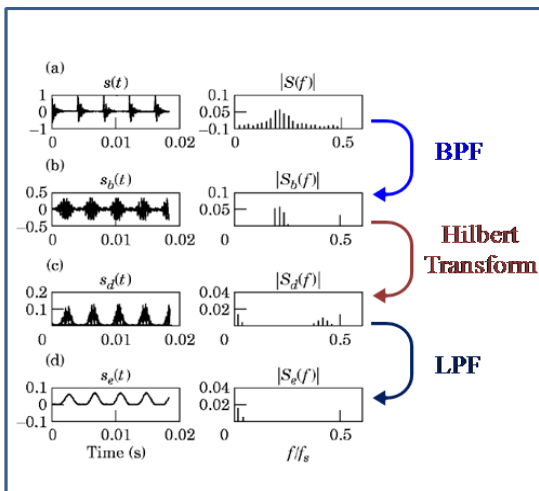


Fig. 3 Envelope analysis method

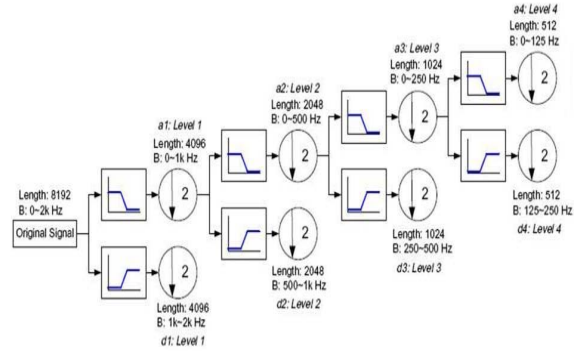


Fig. 4 Wavelet decomposition tree

이 연구에서 매트랩의 Wavelet tool box에 포함되어 있는 function을 사용하였으며, 사용된 이산웨이블릿 변환 함수는 도비치(Daubechies)를 사용하여 신호처리를 하였다. Wavelet tool box에서 수행되는 웨이블릿 변환은 Fig. 4와 같이 웨이블릿 레벨이 증가될 때 신호는 중심 주파수를 기준으로 저주파와 고주파로 나뉘게 된다.

4. 실험결과

실험에 사용된 시험편은 실험을 시작하지 약 150분 후에 파단 되었으며, 크랙의 진전될 때 시험편의 표면보다 내부에서 먼저 크랙이 진행된다. Fig. 5는 사이클당 크랙의 진전길이를 나타낸 그림이다.

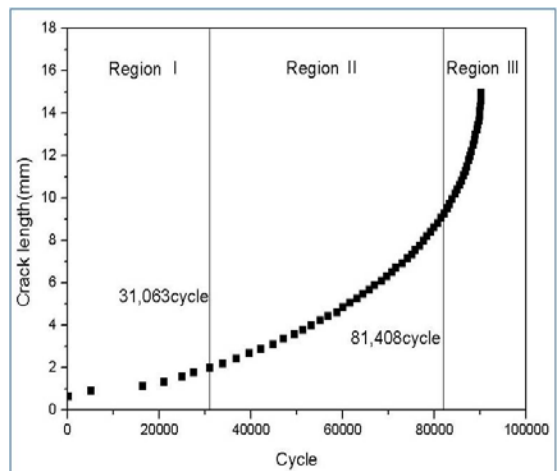


Fig. 5 Correlation of the cycle and the crack length

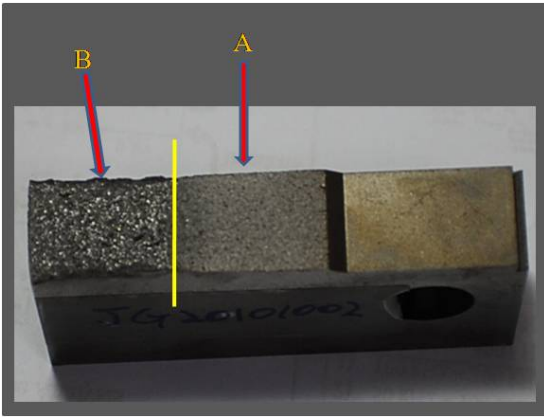


Fig. 6 Specimen surface after fractured
 A: Crack grown in a moment of time
 B: Specimen split

1단계 균열진전 길이는 1.5mm까지 진전될 때로 결정하였고, 2단계는 그 이후 8mm(1.5~9.5mm) 진전하였을 때이며, 3단계는 그 후 파단될 때까지로 결정하였다. 초반부에는 균열의 진전이 더디게 진행되었지만 점차 균열이 진행되어 가면서 균열의 진행속도가 점차 빨라지게 된다. 또한 파단된 시험편의 내부표면을 보면 균열이 진행되어 가다가 후반부에는 시험편이 찢어지는 것을 볼 수가 있다. 각 단계를 분류한 기준은 그래프의 기울기 즉, 진전 속도의 크기를 기준으로 한 것이며, 응력확대계수와 균열진전에 관한 연관성에 의해 분류하였다.

Fig. 7은 DWT를 포함하지 않은 시간과파형과 파워스펙트럼을 나타낸다. 첫 번째 단계(a)에서는 160kHz 성분의 진폭이 크게 나타나며, 두 번째 단계(b)에서는 160kHz성분의 진폭이 상승하였고, 그 근처 주파수들이 전체적으로 낮아지는 것을 알 수 있다. 세 번째 단계 (c)에서는 100~120kHz, 140~180kHz, 200~220kHz, 250~270kHz 구간에서 진폭이 크게 상승하였고, 160kHz는 크게 낮아지는 것을 알 수가 있다.

Fig. 8은 DWT를 포함한 파워스펙트럼을 나타낸 그림이다. 첫 번째 단계(a)에서는 9.54Hz성분이 19.07Hz성분보다 작게 나타나는 경향을 보이며 두 번째 단계(b)에서는 9.54Hz성분이 크게 증가하여 19.07Hz성분보다 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 세 번째 단계(d)에서는 다시 9.54Hz성분이 크게 감소하였다.

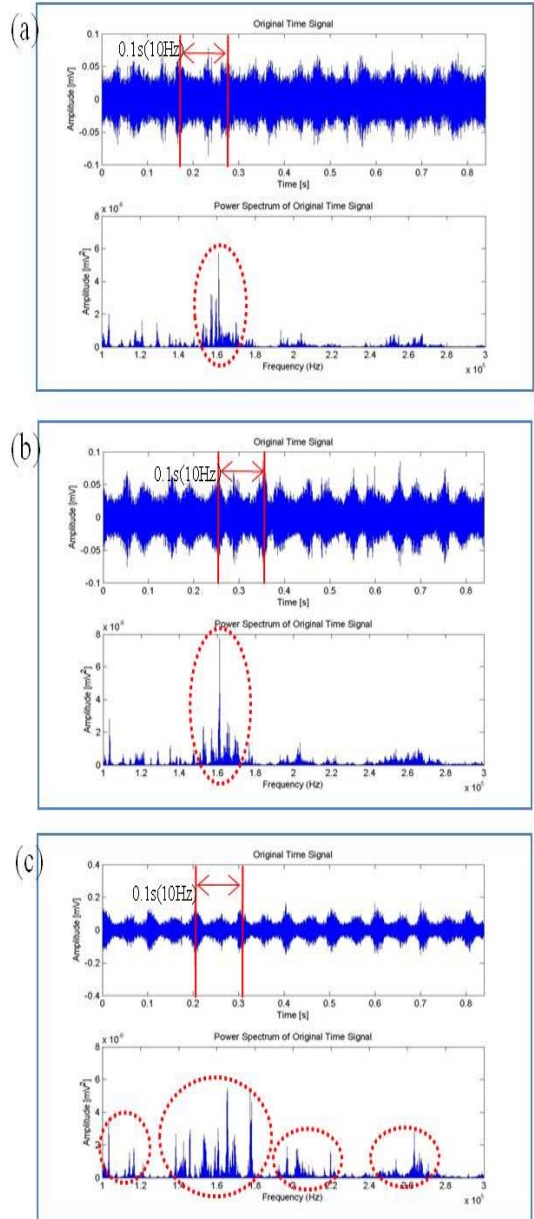


Fig. 7 Time waveform and power spectrum of the AE signal envelope analysis **without** DWT (100 ~300 kHz)

(a) Region 1, (b) Region 2, (c) Region 3

그 중 두 번째 단계에서 세 번째 단계로 넘어가는 과정에서 약 13분 동안 Fig. 8의 (c)와 같이 전혀 다른 패턴이 나타났다. 이것은 균열이 가속화 단계로 넘어가면서 생기는 현상으로 사료된다.

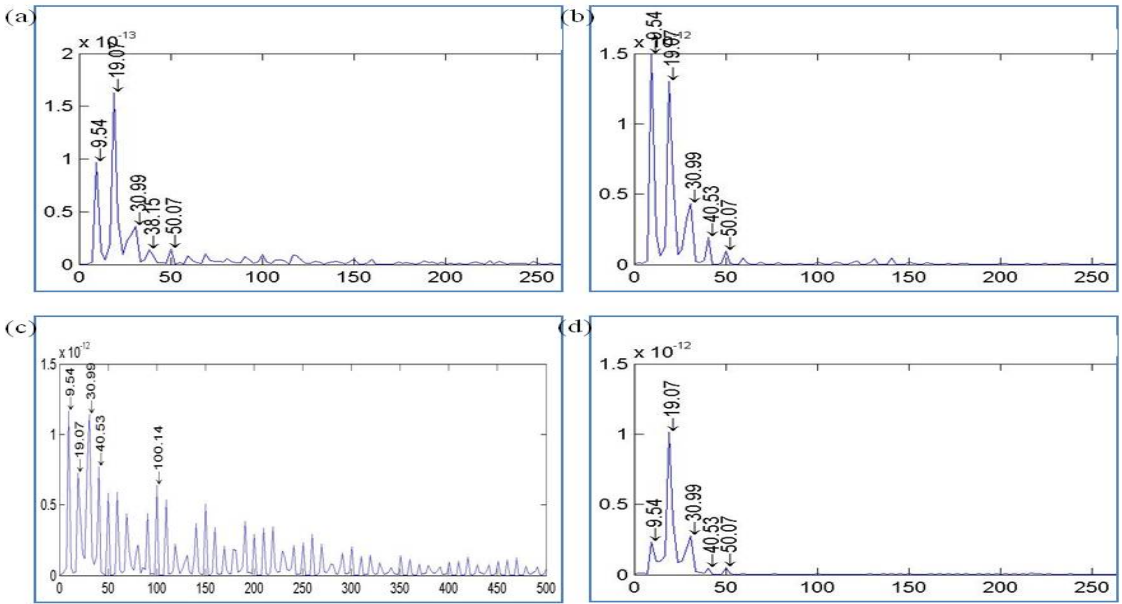


Fig. 8 Power spectrum of the AE signal envelope analysis **with DWT**
 region 1, (b) region 2,
 (c) another feature of 13 minutes in region 2(109 ~ 122minutes),
 (d) region 3

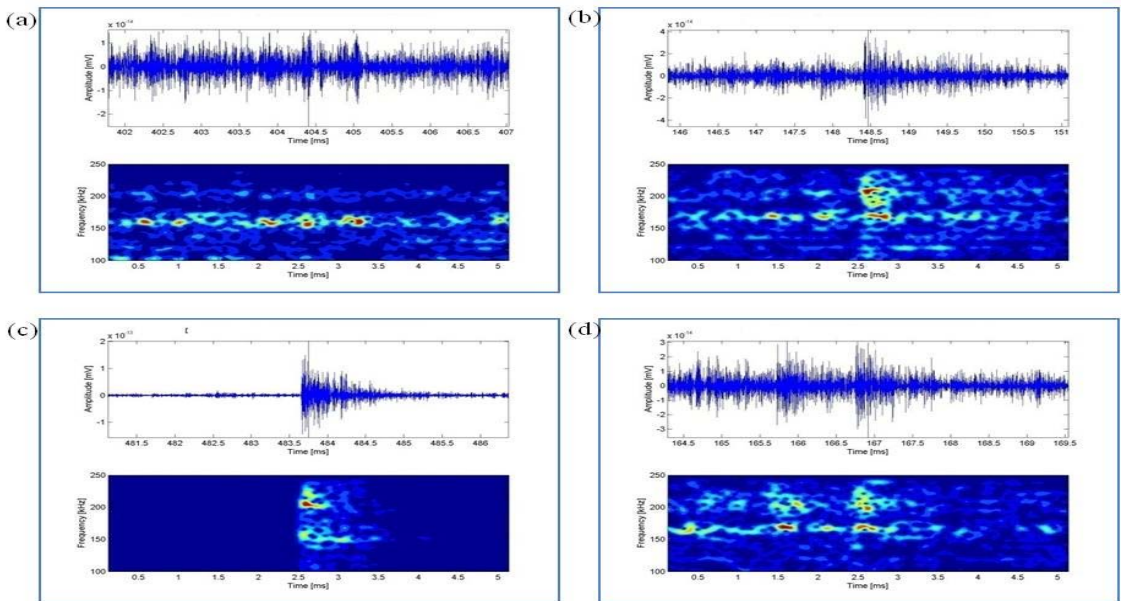


Fig. 9 Down sampling of the AE signal envelope analysis **with DWT**
 region 1, (b) region 2,
 (c) another feature of 14 minutes in region 2(109 ~ 122minutes),
 (d) region 3

Fig. 9는 DWT를 포함한 AE신호의 Down sampling한 그림이며, 저장된 신호파일에서 최대 피크에 대한 Short time FFT를 한 것이다. 신호처리에서 Down sampling은 신호의 sampling rate를 줄이는 과정이다. 그림과 같이 각 단계마다 경향을 나타내며 Fig. 9의 (c)는 Fig. 8의 (c)와 같이 특이한 경향을 나타낸다.

5. 결론

본 연구에서는 피로로 인한 균열이 발생하였을 때, AE기법을 사용하여 균열진전에 따른 특징들을 신호처리를 하여 살펴보았다.

DWT를 포함하지 않은 파워스펙트럼에서는 DWT를 포함한 파워스펙트럼보다 특징들을 찾아내는데 어려움이 있었다. 그리고 DWT를 포함하여 신호처리를 한 경우 포함하지 않았을 때 찾지 못했던 특징을 찾아낼 수 있어 장비 운용 중 피로균열에 대한 균열 검출에 유용한 방법 중 하나로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 BK21의 친환경냉열에너지기계연구사업팀의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

(1) KiWoo N. and SeonJin K., 1998, Signal Characteristics of Acoustic Emission from Fatigue Crack Propagation, KSME, Proceedings of the KSME Annual Autumn Conference, pp. 53~58

(2) 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, pp. 412.

(3) Ishida. Y., 2008, Cracked Rotors: Industrial Vibrations of a Cracked Rotor, Journal of Sound and Vibration, Vol. 269, pp. 33~60.

(4) Jun. O. S., 2008, Analysis of Harmonic

Vibration of Cracked Rotor, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 22, pp. 805~817.

(5) Gu, D. S., Kim, J. G. and Choi, B. G., 2010, Application of the AE Technique for The Detection of Shaft Crack with Low Speed, Korea Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 2, pp. 185~190