

균열 진전에 따라 발생하는 AE신호 특성 분석 AE Signal Characteristic Analysis caused by Crack Growth

김원철 · 김재구 · 구동식 · 김효중 · 최병근

W. C. Kim, J. G. Kim, D. S. Gu, H. J. Kim and B. K. Choi

(접수일 : 2010년 7월 13일, 수정일 : 2010년 11월 1일, 채택확정 : 2010년 11월 5일)

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

Abstract : Acoustic emission (AE) technique is a well-known non-destructive test technique. Fatigue crack growth test was performed using SM53C to check up the AE signal occurred by crack growth, so AE system was used to detect the crack signal. Features calculated by the AE signals were analyzed to evaluate the steps divided the crack growth into three. The steps, initiation, growth and breaking, were separated by velocity of the crack growth. Time waveform and power spectrum were created by the AE signal of each one of the steps and compared. In the feature domains, it was found that AE values changed rapidly as the velocity of the crack increasing.

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 교량 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 응력확대계수와와의 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)}

본 논문에서는 탄소강재로 비교적 널리 사용되는 SM53C 강에 고주파 유도가열 된 경화층 깊이 1 mm의 시험편을 사용하여 피로균열진전 시험을 수행하였다. 시험편에 AE센서를 부착하여 피로균열 시 나타나는 AE신호를 취득하였으며, 시간 파형 및 파워 스펙트럼을 분석하였다. Matlab을 이용하여 여러 가지 특징값을 계산하여 이를 토대로 균열이 진전되는 과정의 특성을 살펴보았다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 KS 규격 D 3752에 규정된 SM53C

최병근(교신저자) : 경상대학교 에너지기계공학과, 해양산업연구소

E-mail : bgchoi@gnu.ac.kr, Tel : 055-640-3180

김원철 : 경상대학교 기계시스템공학과

김재구, 구동식, 김효중 : 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

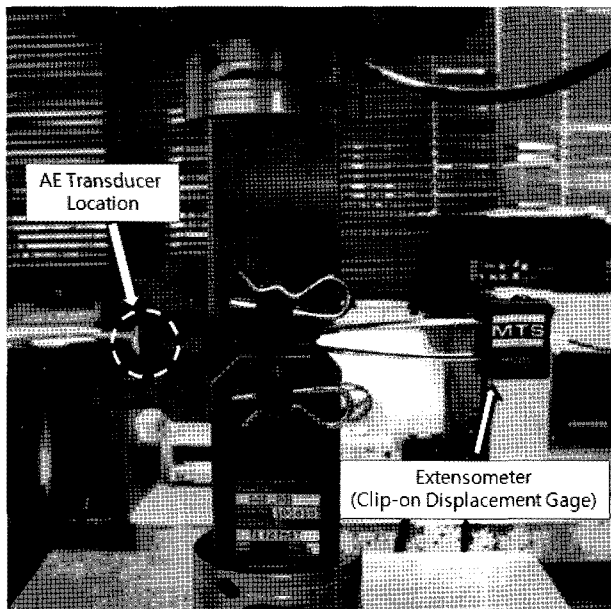


Fig. 1 Transducer location on the test specimen

강을 사용하였으며, 시험편에 고주파 유도 가열하여 경화층 1 mm를 주었다. 시험편의 균열진행방향을 미리 예측하기 위한 예비균열(Pre-crack)은 응력비 R=0.1 10 Hz의 정현파를 가하여 Fig. 2와 같이 3 mm 삽입하였다. 실험에 사용된 신호취득 장비로는 PAC(Physical Acoustic Corporation)사의 AE 변환기, 증폭기, DAQ보드 및 분석 소프트웨어를 사용하였다. 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, 신호 저장은 매 30초마다 5 MHz로 샘플링하여 저장하였다.

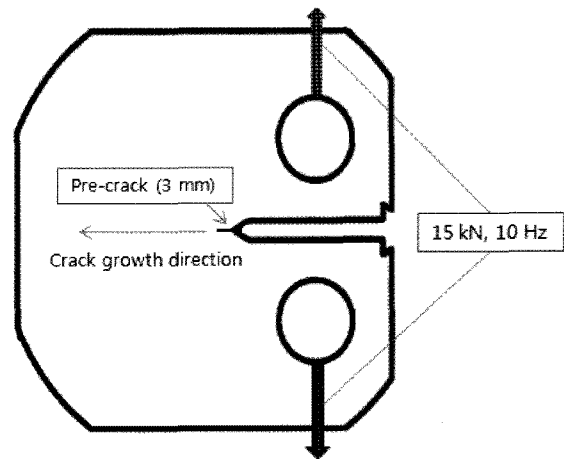


Fig. 2 Experimental condition and pre-crack location

3. 신호 처리

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)대역통과필터(band-pass filter), (2)파형 교정(waveform rectification), (3)힐버트 변환

(hilbert transform), (4)저역통과필터(low-pass filter) 및 파워 스펙트럼의 4 단계를 거치게 된다. 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⁾

대역통과필터 범위 선정은 총 5가지 범위(10 kHz ~50 kHz, 50 kHz~100 kHz, 100 kHz~300 kHz, 300 kHz~500 kHz, 500 kHz~800 kHz)를 사전 선정하여 수행하였으며, 그 중 100 kHz ~ 300 kHz의 범위에서 특징값을 나타내는 결과들이 잘 표현되어 주파수 범위를 100 kHz ~ 300 kHz로 선정하여 신호처리를 재차 수행하였다.

3.2 이산웨이블릿 변환

이산웨이블릿 변환(Discrete Wavelet Transform)은 기어결함을 검출하기 위한 연구에서 많이 사용되고 있는 방법으로, 신호 내에 포함되어 있는 충격파를 찾는데 효과적인 것으로 알려져 있다.⁶⁾

본 연구에서는 매트랩의 Wavelet tool box에 포함되어 있는 기능을 사용하였으며, 사용된 DWT함수는 도비치(Daubechies)로 그 레벨은 4로 설정하여 신호처리를 수행하였다. Wavelet tool box에서 수행되는 웨이블릿 변환은 레벨이 증가될 때 신호는 중심 주파수를 기준으로 저주파와 고주파로 나뉘게 된다. 따라서 본 연구에서는 특징값을 계산하기 위해 수행된 전처리 방법은 Fig. 3과 같이 포락처리에 DWT를 적용한 형태로 이루어졌다.

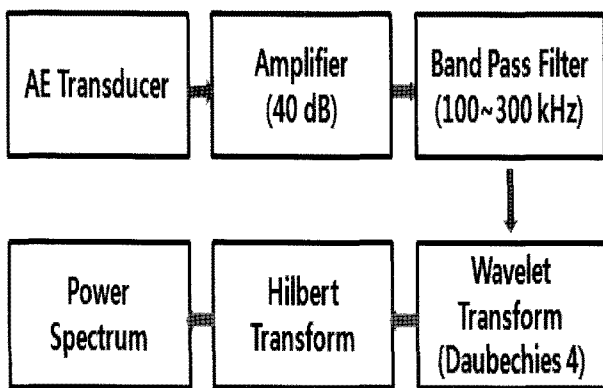


Fig. 3 Signal processing diagram

4. 실험 결과

4.1 시간파형 및 파워스펙트럼 분석

피로균열시험을 수행한 결과 균열의 진행은 표면보

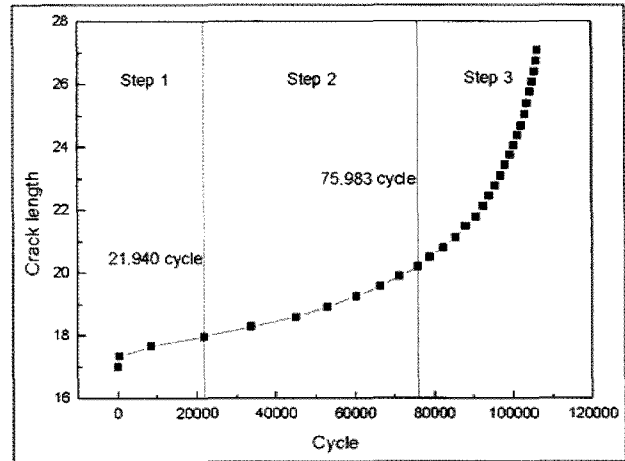
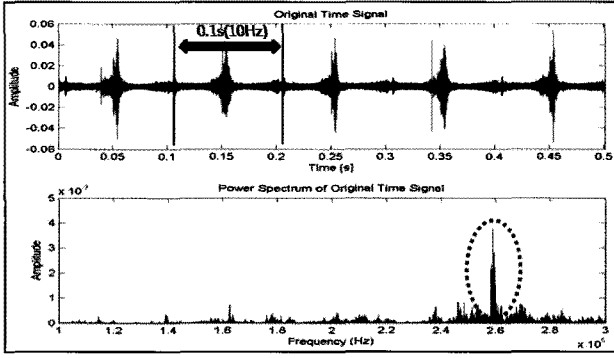


Fig. 4 Correlation of the cycle and the crack length

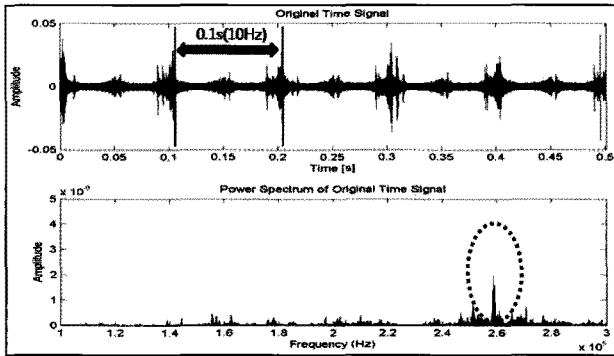
다 깊이방향으로 균열이 먼저 발생하여 진전하고, 그 후 표면으로도 확산되어 진전하게 됨을 알 수 있었고, 사이클 증가에 따른 균열의 성장 거동을 Fig. 4에 나타내었다. 균열진전속도의 변화에 따라 21,940과 75,983 cycle에서 단계를 구분지어 총 3구간으로 분류하였다. 이것은 그래프의 기울기 즉, 진전 속도의 크기를 기준으로 한 것이며, 응력확대계수와 균열진전에 관한 연관성에 의해 분류하였다. 분류된 구간에서 검출된 AE신호의 파형을 분석하기 위해 Fig. 5와 같이 AE 시간파형과 파워스펙트럼을 각 단계별로 나타내었으며, 다음과 같이 정리 할 수 있다.

- (1) Step 1에서는 260 kHz에서 진폭 값이 크게 나타난다.
- (2) Step 2에서는 Step 1과 비슷한 경향을 보이긴 했으나 260 kHz의 진폭 값이 줄어드는 것을 알 수 있다.
- (3) Step 3에서는 260 kHz와 그 주변의 주파수가 높게 나타났으며, 약 160 kHz의 진폭값이 크게 나타난다.
- (4) 크랙진전이 가속화 단계로 접어들었을 때 140 ~160 kHz와 180~220 kHz, 240~300 kHz의 진폭 변화가 크게 나타난다.

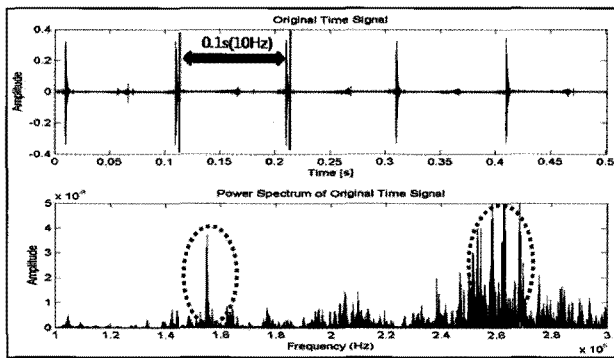
여기서 260 kHz성분이 단계가 진행될 때 줄어들다가 크랙 진전이 가속화 단계에서 다시 크게 나타나는 것을 볼 수가 있는데, 이것은 크랙이 진전 할수록 시험편의 강성이 줄어들면서 260 kHz성분이 변화하는 것으로 사료된다. 또한, 시간파형의 변화에서 마멸에 따른 기계적 느슨함이 발생하는 경우의 시간파형과 비슷한 유형으로 나타나는데⁷⁾, 이것 역시 크랙이 생



(a) Step 1



(b) Step 2



(c) Step 3

Fig. 5 Time waveform and power spectrum of each step signal (100 ~ 300kHz)

김으로 인해 시험편의 강성이 변화하면서 시간파형이 Step 3과 같이 변화하는 것으로 사료된다.

4.2 특징값 분석

Fig. 6은 신호처리를 거친 후 나타낸 6가지의 특징값(시간 영역 : RMS, Peak, Crest factor; 주파수 영역 : Frequency center, Root variance frequency; 엔트로피 영역 : Estimation error)이다. Crest factor는 다른 특징값들과는 달리 표현되었지만 역수를 취하면 유사한 경향을 나타내며, 분석 결과를 다음과 같이 정리하였다.

- (1) 시험 시작 후, 약 20분(12,000 cycle)에 높은 특징값이 나타난다.
- (2) 첫 번째 특징값이 나타난 후 약 133분 (79,800 cycle)까지 조금씩 낮아진다.
- (3) 약 133분에서 20분때의 특징값보다 더 높은 특징값이 나타난다.
- (4) 파단 되기 10분전(100,200 cycle)쯤에 한번 더 높은 특징값이 나타난다.

시험편의 파단까지는 총 177분이 소요되었으며, 이 상과 같이 균열이 진전되는 동안 4단계의 경향을 나타내고 있다. 4단계 중 마지막에 나타난 내용은 일반적인 결함에서 나타나지 않는 특징으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 피로로 인한 균열이 발생하였을 때, AE기법을 사용하여 균열진전에 따른 특징들을 살펴 보았고, 그 결과를 다음과 같이 정리하였다.

- (1) 3단계로 구분한 시간파형과 스펙트럼에서 균열이 진전해가면서 260 kHz 영역의 성분들이 낮아지다가 다시 높게 나타나는 특징을 알 수가 있다.
- (2) 균열의 진전에 따른 신호의 특성을 파악하기 위해 6가지의 특징값에 대한 경향을 분석한 결과, 서로 유사한 경향을 보였으며, 그 중 Crest factor는 역수를 취하면 다른 특징값들과 유사하게 나타난다.
- (3) 파단 되기 전에 한 번 더 높게 나타나는 특징값은 일반적인 결함에서 발생되지 않는 특이한 특성으로 사료된다.
- (4) Step 2에서 step 3으로 넘어갈 때의 진폭 변화와 약 133분(79,800 cycle)에서의 특징값 변화가 서로 연관성을 나타낸다.
- (5) 특징값 분석에서 나타나는 특징 구간들이 균열진전속도에 의해 나누어진 단계와 거의 일치하는 것을 알 수가 있음. 이것은 균열진전속도와 특징값과 밀접한 관련이 있는 것으로 사료된다.

따라서 이 논문에서 수행된 피로균열진전에 대한 결과는 균열 검출에 유용한 자료가 될 수 있을 것으로 사료된다.

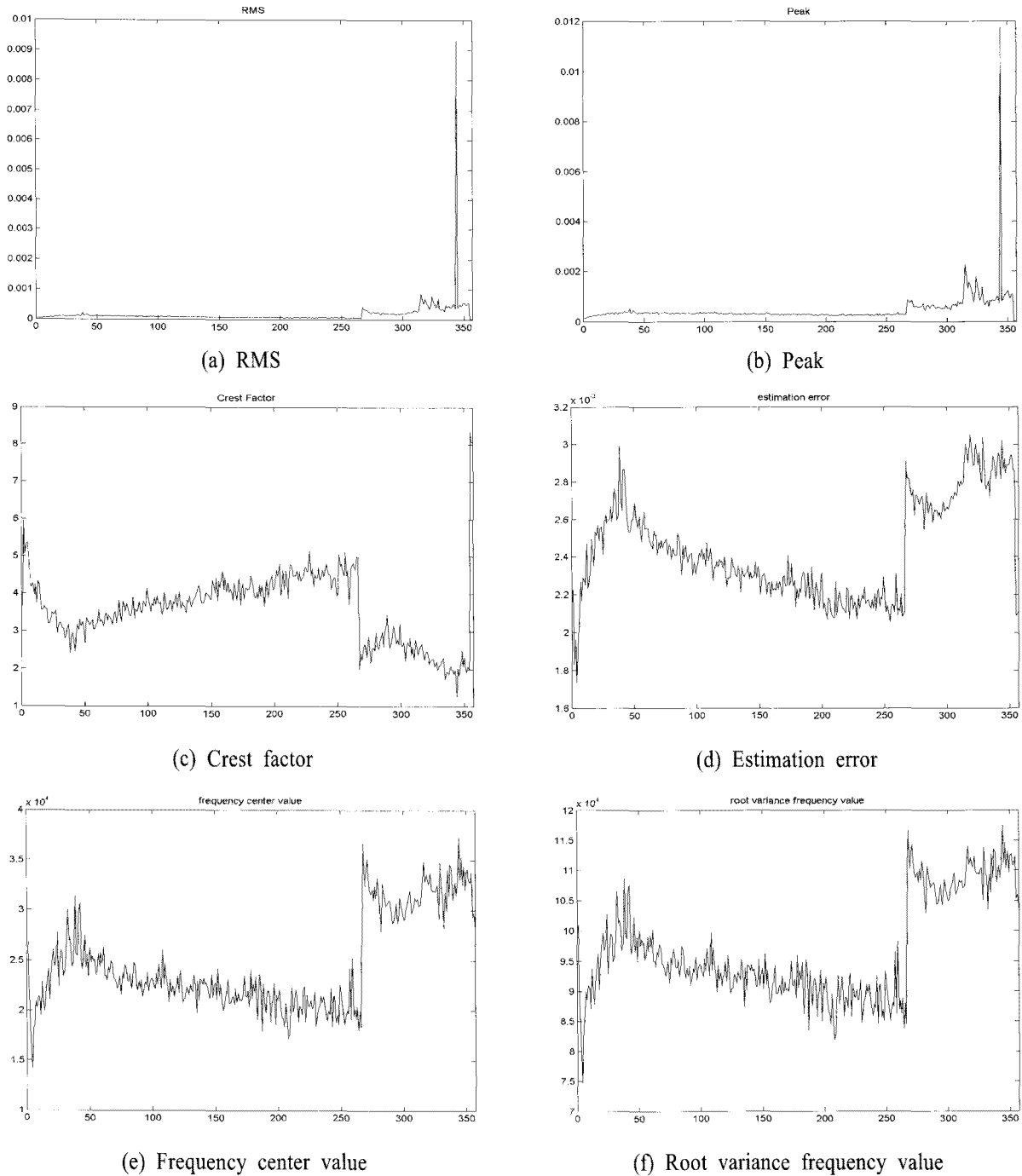


Fig. 6 Features of the pre-processed signals by discrete wavelet level 1

후 기

본 연구는 BK21의 친환경냉열에너지기계연구사업 팀의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. K. W. Nam and S. J. Kim, 1998, "Signal

Characteristics of Acoustic Emission from Fatigue Crack Propagation", KSME, Proceedings of the KSME Annual Autumn Conference, 53-58

2. D. J. Yoon, J. C. Jeong, P. Park, K. B. Kim and S. S. Lee, 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. Y. Ishida, 2008, "Cracked Rotors: Industrial

- Vibrations of a Cracked Rotor", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 269, pp. 33~60.
4. O. S. Jun, 2008, "Analysis of Harmonic Vibration of Cracked Rotor", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 22, pp. 805~817.
 5. J. J. Sunou, 2009, "Experimental Response and Vibrational Characteristics of a Slotted Rotor". *Common Nonlinear Sci. Numer. Simulate*, Vol. 14, pp. 3179~3194.
 6. C. Cempel, 1991, *Vibroacoustic Condition Monitoring*, Ellis Horwood, Chichester, UK.
 7. Mikael Johnson and Peter Gudmundson, 2000, "Broad-band Transient Recording and Characterization of Acoustic Emission Events in Composite Laminates", *Composites Science and Technology* 60, 2803~2818
 8. S. K. Lee, J. Y. Do, K. W. Nam, C. Y. Kang and S. H. Ahn, 2000, "Crack Propagation Behavior of 316L Stainless Steel and Frequency Characteristics of its Acoustic Emission", *KSPSE*, Vol. 4, No. 2, pp. 52~57