

시간-주파수 해석법에 의한 5083 알루미늄의 피로균열 진전에 의한 음향방출 신호의 주파수특성

남기우* · 이건찬**

*부경대학교 재료공학과

**부경대학교 대학원

Frequency Characteristics of Acoustic Emission Signal from Fatigue Crack Propagation in 5083 Aluminum by Joint Time-Frequency Analysis Method

KI-WOO NAM* AND KUN-CHAN LEE**

*Dept. of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

**Graduate School, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Joint Time-Frequency Analysis Method 시간-주파수 해석법, Fatigue Crack Propagation 피로균열전파, Stress Ratio 응력비, Load Cycle 하중반복속도, Acoustic Emission 음향방출, Nondestructive Evaluation 비파괴평가

ABSTRACT: Acoustic emission (AE) signals, emanated during local failure of aluminum alloys, have been the subject of numerous investigations. It is well known that the characteristics of AE are strongly influenced by the previous thermal and mechanical treatment of the sample. Possible sources of AE during deformation have been suggested as the avalanche motion of dislocations, fracture of brittle particles, and debonding of these particles from the alloy matrix. The goal of the present study is to determine if AE occurring as the result of fatigue crack propagation could be evaluated by the joint time-frequency analysis method, short time Fourier transform (STFT), and Wigner-Ville distribution (WVD). The time-frequency analysis methods can be used to analyze non-stationary AE more effectively than conventional techniques. STFT is more effective than WVD in analyzing AE signals. Noise and frequency characteristics of crack openings and closures could be separated using STFT. The influence of various fatigue parameters on the frequency characteristics of AE signals was investigated.

1. 서 론

최근 컴퓨터 및 여러 계측 장비의 급속한 발전은 실시간적인 신호 검출 및 해석이 가능하게 되었으며, 이를 이용한 비파괴 평가법도 급속하게 발전하게 되었다. 특히 음향방출 (Acoustic Emission)과 초음파 신호에 대한 해석을 통하여 재료의 특성 평가와 신호가 가지는 여러 가지 정보를 분석하는 비파괴 평가 방법이 여러 연구자들에 의하여 소개되고 있다 (Musha and Kawaura, 1991; Kawashima and Fujii, 1993; Malik et al., 1996; Jin et al., 1996; Abbate et al., 1997; 남기우 등, 1997).

신호 처리 방법에 있어서 고전적인 푸리에 변환 방식이 가장 일반적으로 널리 사용되고 있다. 그러나 일반적인 신호의 주파수 성분들은 시간에 대하여 변화하는 시간함수이기 때문에, 고전적 푸리에 변환에서는 시간 영역과 주파수 영역의 신호를 동시에 해석할 수 없다.

따라서 최근 고전적인 푸리에 변환이 가지는 단점을 보완하여, 신호가 가지는 시간 영역과 주파수 영역의 정보를 시간과 주파수의 2차원 평면상에 동시에 표현할 수 있는 시간-주파수 해석법이 이용되고 있다(남기우 등, 2003; 남기우와 문창권, 2002). 레이더 신호, X선 회절, Sonar, Speech Processing, Image Processing 등 여러 신호 처리 분야에서 시간-주파수 해석법이 적용되고 있다. 이와 같은 시간-주파수 표현은 푸리에 변환과 같은 선형표현과 에너지 분포로 정의되는 2차 표현인 파워 스펙트럼으로 분류할 수 있다. 선형표현은 단시간 푸리에 변환(Short Time Fourier Transform:STFT), Gabor Expansion, Wavelet 등이 있으며, 에너지의 개념으로 사용되는 2차 표현은 위그너 빌 분포(Wigner-Ville Distribution; WVD)와 Choi-Williams Distribution(CWD) 등이 있다. 저자들은 신호 해석 분야에서 최근 주목받고 있는 시간-주파수 해석법 중에서 단시간 푸리에 변환법(STFT)과 위그너-빌 분포법(WVD)을 이용하여, 열화된 스테인리스강의 비파괴평가를 실시하였다(이건찬 등, 1999).

본 연구에서는 선박, 압력용기 등에 사용되는 A15083의 피로 파괴시 발생한 음향방출 신호의 특성을 시간-주파수 해석법으

제1저자 남기우 연락처: 부산광역시 남구 용당동 100

051-620-1640 namkw@pkpnu.ac.kr

로 분석하고, 해양구조부재의 피로 파괴에 대한 비파괴 평가 기법으로서의 적용 가능성을 검토하고자 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

실험에 사용한 재료는 선박, 자동차, 저온탱크 및 압력 용기 등의 용접 구조물에 사용되는 강도, 인성 및 내식성(내해수성)이 뛰어난 5000계열 알루미늄 합금이다. 시험재의 화학성분과 기계적 성질을 각각 Table 1과 Table 2에 나타내며, 시험편의 형상 및 치수는 Fig. 1에 나타낸다.

Table 1 Chemical compositions(%wt)

Si	Mn	Fe	Mg	Cr	Zn
0.1	0.61	0.2	4.34	0.17	0.019

Table 2 Mechanical properties

Tensile Strength (MPa)	Yield Stress (MPa)	Elongation %
289.1	145	22

피로 시험은 만능 피로 시험기를 사용하여 실온 대기중에서 실시하였다. 또한 시험시의 하중 제어는 정현파를 사용하고, 주파수는 1 Hz~10 Hz로 제어 하였다. 균열 진전시 균열 선단부와 균열 닫힘 현상에 의하여 발생하는 음향방출의 특성을 검토하기 위하여 응력비를 R=0.1과 R=0.8로 실시하였다. 그리고 음향방출 신호의 주파수 특성을 분석하기 위하여 광대역 센서를 사용하였다. 검출된 음향방출 신호는 AE system을 통해 PC와 인터페이스 된 고속 A/D 변환기를 이용하여 디지털화 시킨 후, 실시간적으로 주파수 분석을 하였다. Fig. 2는 본 실험에서 사용된 장비의 Block diagram이다.

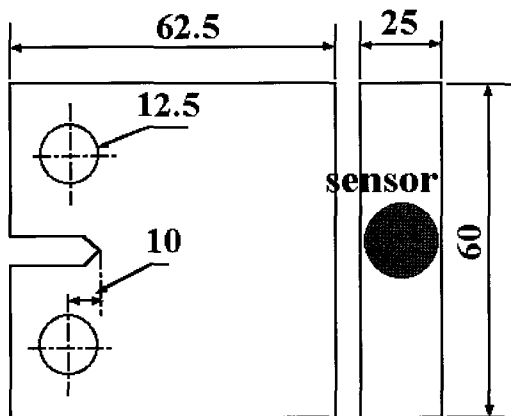


Fig. 1 Geometry and dimensions of specimen (unit: mm)

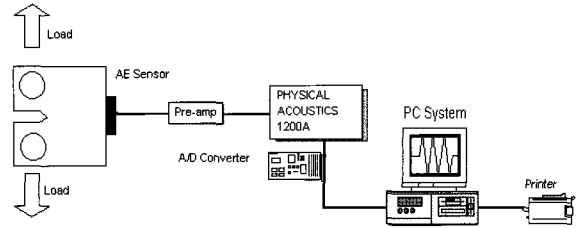
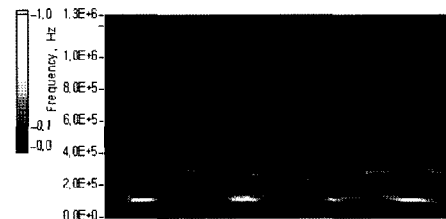


Fig. 2 Block diagram of experiment setup for acoustic emission measurement

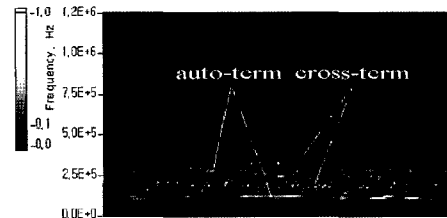
3. 결과 및 고찰

3.1 시간-주파수 해석법의 적용 가능성 검토

시간-주파수 해석법인 단시간 푸리에 변환(STFT)과 위그너 빌 분포(WVD)를 이용하여 음향방출 신호를 분석하고 주파수 발생원을 검출하였다. Fig. 3은 동일 음향방출 신호에 대한 (a) 단시간 푸리에 변환과 (b) 위그너 빌 분포에 의한 분석 결과이다. 위그너 빌 분포는 우수한 분해능과 빠른 연산속도를 가지고 있는 반면, cross-term이라는 간섭현상을 받기 때문에 신호 해석에 어려움이 많다. 반면 단시간 푸리에 변환의 경우에는 창 효과로 인하여 시간과 주파수 분해능을 동시에 높일 수 없다는 단점이 있다. 그러나, 위그너 빌 분포의 경우에는 auto-term 사이에 cross-term이 발생하여 정확한 분석에 어려움이 있는 반면 높은 분해능을 가지고 있다.



(a)



(b)

Fig. 3 Analytical results for the same acoustic emission signal obtained from fatigue crack propagation. (a) Short Time Fourier Transform, (b) Wigner-Ville Distribution

따라서, 위그너 빌 분포의 cross-term을 감소시키기 위하여 식(1)과 같이 weighting function을 이용하여 평활화 처리를 하였다. Fig. 4는 위그너 빌 분포의 평활화 처리 결과를 나타낸다.

평활화 처리후 cross-term은 다소 감소되었지만, 분해능이 상당히 낮아졌음을 알 수 있다.

$$WVD[i, k] = \sum_{m=-L/2}^{L/2} w[m]R[i, m]e^{j2\pi km/L} \quad (1)$$

($w[m]$: Gaussian window function)

이와 달리, 단시간 푸리에 변환은 다소 분해능은 떨어지지만 cross-term 현상이 발생하지 않는다. 그리고, 다소 불편한 점은 있지만 창함수의 크기를 조절함으로써 요구되는 영역의 분해능을 높일 수 있다. 따라서, 복잡한 주파수 성분을 가지는 음향방출 신호 해석에는 cross-term 현상이 발생하지 않는 단시간푸리에 변환(STFT)이 더 우수하다고 생각되어진다.

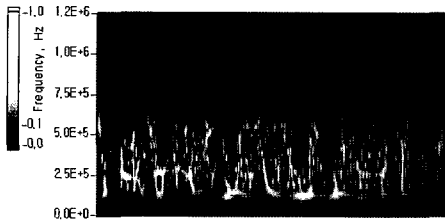


Fig. 4 WVD reduced cross-terms in AE signal

3.2 균열진전에 따른 음향방출의 신호 측정

Elber에 의하여 인장 반복하중을 받는 경우, 균열선단 부근에서 균열 닫힘(crack closure) 현상이 규명되었다(Elber, 1970; Lee et al., 1994). 그는 하중 부하시 균열 전체가 개구하는 응력에 대한 K_{Op} 이상의 K 의 변동 범위인 K_{eff} 가 실제 균열 성장에 기여한다고 하였다. 즉,

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op} = U \cdot \Delta K \quad (2)$$

$$U = 0.5 + 0.4R \quad (-0.1 < R < 0.7) \quad (3)$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{K_{min}}{K_{max}} \quad (\text{stress ratio}) \quad (4)$$

균열 닫힘 현상은 하중의 제하시 ΔK_{eff} 이하의 응력에서 일어나게 된다. 따라서, 반복하중 하에서의 균열부에서 발생하는 음향방출 신호는 균열 열림과 닫힘에 의한 혼합적인 형태로 발생할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 균열 열림과 균열 닫힘에 의한 음향방출 신호의 특성을 규명하기 위하여, 균열 열림과 닫힘이 일어나는 응력비 $R=0.1$ (주파수 1Hz)에서 발생하는 음향방출 신호를 검출하고 분석하였다. Fig. 5는 응력비 $R=0.1$ 에서 피로균열 진전시 방출되는 음향방출 신호를 단시간 푸리에 변환으로 분석한 결과이다. Fig. 5에서 3영역의 주파수 대역에서 에너지값들이 뚜렷하게 나타나고 있다. 이들 3영역의 주파수 성분 중에서 먼저 100 kHz~200 kHz 사이의 저주파수 영역의 성분은 시험편과 핀의 마찰에 의해 발생된 노이즈 성분이며, 균열 진전에 따라 A라고 표시된 200 kHz~400 kHz 사이의 주파수 영역과 B라고 표시된 400 kHz~600 kHz 사이의 주파수 영역이 나타나고 있다.

3.3 균열 닫힘에 의한 신호 검출

균열 닫힘 현상은 하중 제하시 균열 후방의 잔류 응력의 압축에 의해 발생하는 소성 유기 균열 닫힘, ΔK 의 감소에 따른 파단면의 fretting에 의한 산화물과 부식생성물에 의한 산화물 유기 균열닫힘 및 균열의 지그재그 진전에 따른 파면거칠기 유기 균열 닫힘 등의 여러 가지 인자에 의해 일어나게 된다.

본 연구에서는 균열 닫힘에 의한 음향방출 신호를 검출하기 위해 먼저 균열 닫힘 현상이 거의 배제될 것으로 예상되는 응력비 $R=0.8$ (주파수 3 Hz)에서 균열진전에 의한 음향방출 신호만을 검출하여 Fig. 6에 나타낸다. 이 그림에서는 응력비 $R=0.1$ 에서 분석된 결과와는 달리 200 kHz~400 kHz 사이의 주파수 영역과 100 kHz~200 kHz 사이의 노이즈 영역인 두 영역에서만 에너지값이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 Fig. 5의 응력비 $R=0.1$ 에서 분석된 400 kHz~600 kHz 사이의 주파수 영역은 균열 닫힘에 의한 신호로 생각되어진다. 그리고 쌍안 실체 현미경을 통한 균열 진전 양상을 관찰한 결과 균열의 지그재그 진전도 관찰되었으며, 이로 인한 균열 닫힘 현상이 있었을 것으로 판단된다.

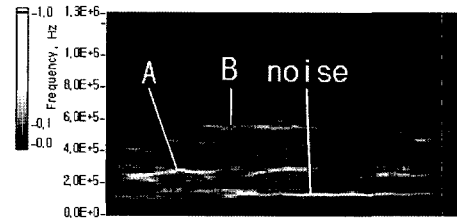


Fig. 5 STFT for crack specimen in R=0.1 (Pmax = 14.7 kN)

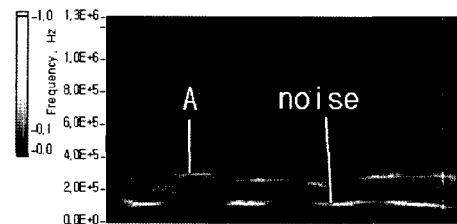


Fig. 6 STFT for crack specimen in R=0.8 (Pmax = 14.7 kN)

1 cycle에 대한 음향방출 신호와 파면의 SEM 사진을 Fig. 7에 나타낸다. (a)는 응력비 $R=0.8$ 에서의 균열 열림만 있을 때의 음향방출 신호이며, (b)는 응력비 $R=0.1$ 에서 균열 열림과 닫힘이 함께 일어날 때의 음향방출 신호이다. (b)의 음향방출 신호에는 항상 일정한 크기의 노이즈와 균열 열림과 닫힘에 의하여 발생된 음향방출 신호가 혼합된 형태를 나타내고 있다.

이와 같이 1 cycle에 대한 음향방출 신호를 관찰하여 피로 균열이 안정적으로 진전할 때 만들어지는 스트라이에이션과 연관시켜 분석한 결과, 균열 선단에서의 음향방출 메커니즘은

Fig. 8에서와 같이 하중의 부하와 제하에 따라 균열 선단의 스트라이에이션 형성기구와 관련이 있음을 알 수 있었다. 즉, Fig. 8의 (b)에서 하중의 부하시에 균열선단에서 음향방출 신호가 발생하기 시작하여 (c)에서 최대의 에너지가 발생한다. 그 후 제하 과정(d)에서 균열은 닫히기 시작하고, 둔화된 균열선단부분은 주름모양으로 접히면서 음향방출이 발생하게 되며, 이때 균열 닫힘에 의한 음향방출 신호도 동시에 발생된다. 따라서, 노이즈는 항상 일정한 크기로 발생한다. 더구나 하중 부하에 따라 균열 선단이 움직임으로써 스트라이에이션이 형성되고, 이때 발생하는 음향방출 신호와 제하시 발생하는 균열 닫힘에 의한 음향방출 신호가 함께 포함된 혼합된 형태의 음향방출 신호가 발생된다. 이와 같이, 응력비 $R=0.8$ 에서는 노이즈와 균열 열림에 의한 신호만이 검출되며, 응력비 $R=0.1$ 에서는 노이즈, 균열 열림 및 닫힘에 의한 신호가 함께 검출됨을 알 수 있다.

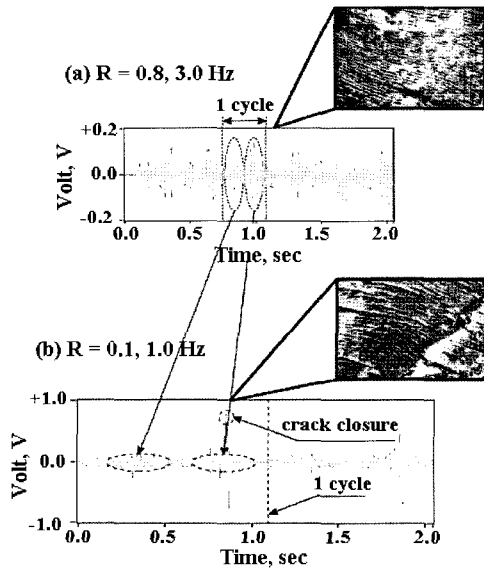


Fig. 7 AE waveform and SEM photograph

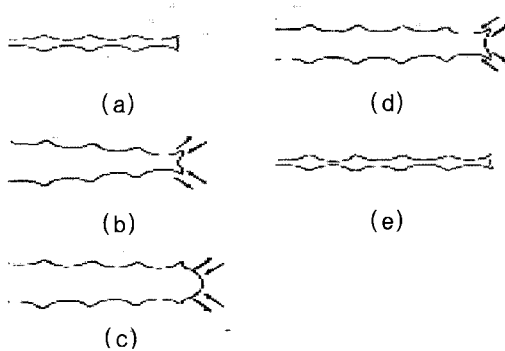


Fig. 8 Schematic diagrams of formation of striations in the stage II. (a) zero load, (b) small tension load, (c) maximum tensile load, (d) small compressive load, (e) maximum compressive load

또한, 피로 파면을 주사전자 현미경으로 관찰한 결과 피로 균열이 안정적으로 진전하는 단계인 IIb단계의 특징인 스트라이에이션이 관찰되었다. 응력비 $R=0.1$ 에서 형성되는 스트라이에이션과 응력비 $R=0.8$ 에서 형성되는 스트라이에이션을 비교해보면, 응력비 $R=0.8$ 에서의 것이 응력비 $R=0.1$ 에서 형성된 것에 비해 간격이 작으며, 이때 방출되는 에너지도 상당히 적음을 알 수 있다. 이것은 응력비 $R=0.8$ 에서의 하중진폭이 응력비 $R=0.1$ 에 비해 상당히 작기 때문에 발생하는 에너지도 적을 것으로 판단된다.

3.4 하중반복속도에 의한 음향방출 신호의 특성

하중반복속도에 따른 음향방출 신호 발생원들의 주파수 변화를 측정하기 위하여 응력비 $R=0.1$ 에서 1 Hz, 3 Hz, 5 Hz, 10 Hz로 하중반복속도를 변화시키면서 음향방출 신호의 주파수 특성을 측정하였다. 하중반복속도의 변화에 따른 음향방출 신호 분석 결과를 Fig. 9에 나타낸다. 발생한 음향방출 신호는 하중반복속도와는 거의 무관하게 일정한 영역에서 주파수 성분을 나타내고 있다. 따라서 10 Hz 이하의 하중반복속도 변화는 음향방출 신호 발생원의 주파수에 영향을 거의 미치지 않음을 알 수 있다.

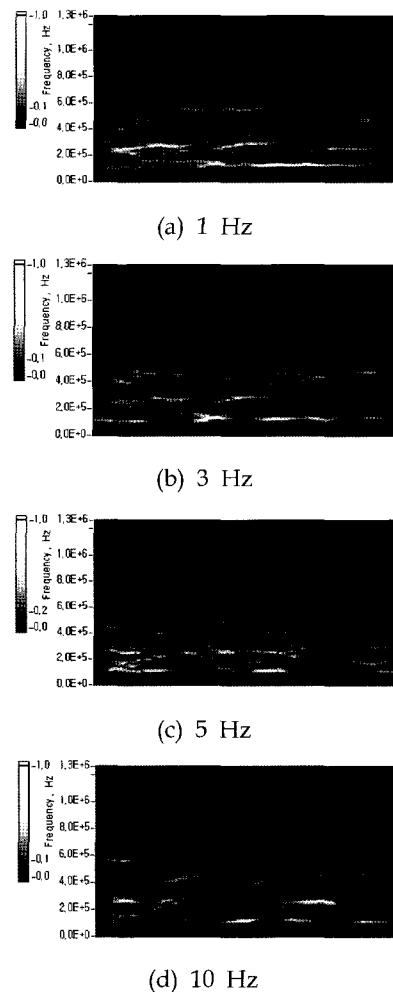


Fig. 9 Comparison of frequency component in each load cycle ($P_{max} = 14.7 \text{ kN}$)

3.5 하중변화에 의한 음향방출 신호의 특성

최대하중의 변화에 따른 음향방출 신호의 특성을 분석하기 위하여 최대하중을 11.8 kN, 14.7 kN, 17.7 kN으로 하여 응력비 $R=0.1$ (주파수 1 Hz)에서 발생하는 음향방출 신호를 분석하여 Fig. 10에 나타낸다. 이들 그림에서 최대하중 11.8 kN에서는 다른 두 조건에서 나타나지 않는 800 kHz 이상의 고주파수 영역에서 음향방출 신호가 발생하고 있다. 이것은 최대하중이 낮을수록 ΔK 의 감소에 따른 파면의 프래팅이 더 많이 발생하고, 이로 인하여 최대하중 14.7 kN, 17.7 kN에서 보다 더 높은 영역의 주파수 성분(800 kHz 이상)이 발생한다고 생각되어진다. 따라서, ΔK 의 변화에 따라 균열 닫힘 현상에 의해 발생하는 음향방출 신호의 주파수 성분은 다르게 나타나지만, 균열 선단부의 균열 열림에 의한 주파수 성분의 변화와는 무관한 것으로 판단된다.

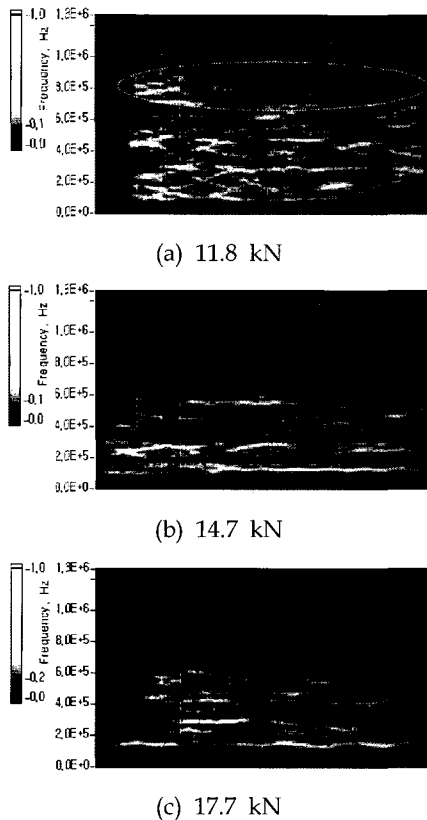


Fig. 10 AE signal analysis results by maximum load

4. 결 론

본 연구에서는 신호 해석 분야에서 최근 주목받고 있는 시간-주파수 해석법 중에서 단시간 푸리에 변환법을 이용하여 Al 5083의 피로 균열진전시 발생하는 음향방출 신호의 특성을 분석하고, 비파괴 평가 기법으로서의 시간-주파수 해석법의 적용 가능성을 검토하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 시간-주파수 해석법을 이용하여 피로 시험중 균열진전에 의해 발생하는 음향방출 신호 검출에 있어서 가장 문제

시 되고 있는 노이즈와 균열 진전에 의한 신호의 분류가 가능하였다.

- (2) 또한, 반복하중에 의한 균열 열림과 닫힘에 의해 발생하는 음향방출 신호의 주파수 성분의 분류가 가능하였다.
- (3) 시간-주파수 해석법을 이용하여 하중반복속도와 최대하중의 변화에 따른 음향방출 신호의 특성을 용이하게 분석할 수 있었다.
- (4) 시간-주파수 해석법중에서 음향방출 신호의 해석에는 단시간 푸리에 변환법이 위그너 빌 분포법에 비하여 더 효과적임을 알 수 있었다.
- (5) 시간-주파수 해석법을 이용하여 음향방출 신호의 해석 뿐만아니라, 초음파 신호해석등 여러 비파괴 평가법에 적용 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 남기우, 김선진, 이진찬, 오정환, 오세규, 이주석 (1997). "표면 균열재의 피로균열관통거동에 따른 어코스티에미션", 한국해양공학회지, 제11권, 제3호, pp 29-38.
- 남기우, 문창권 (2002). "CFRP적층 형태에 따른 파괴시 음향방출 신호특성", 한국해양공학회지, 제16권, 제2호, pp 67-71.
- 남기우, 박소순, 안석환 (2003). "STS316L-용접재의 표면파에 의한 잔류응력 측정과 균열진전시의 음향방출특성", 한국해양공학회지, 제17권, 제1호, pp 47-54.
- 이진찬, 오정환, 남기우, 이주석 (1999). "열화된 SUS316강의 시간-주파수 해석에 의한 비파괴평가", 비파괴검사학회지, 제19권, 제4호, pp 270-276.
- Abbate, A., Koay, J., Frankel, J., Schroeder, S.C. and Pankaj, D. (1997). "Signal Detection and Noise Suppression Using a Wavelet Transform Signal Processor: Application to Ultrasonic Flaw Detection", IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol 44, pp 14-26.
- Elber, W. (1970). "Fatigue Crack Closure under Cyclic Tension", Engng. Fract. Mech. Vol 2, pp 37-45.
- Jin, X.M., Malik, M.A. and Saniie, J. (1996). "Singular Value Decomposition of Wigner Distribution for Time Frequency Representation of Ultrasonic Echoes", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol 15, pp 762-772.
- Kawashima, K. and Fujii, I. (1993). "Comparison among Several Digital Methods of Measuring Time-of Flight of Ultrasonic Waves in Solids", JSME, Vol 59, pp 286-291.
- Lee, C.S., Rhyme, Y.M., Park, K.J. and Chang, Y.W. (1994). "Fatigue Crack Propagation and Crack Closure in Al-Li 890 Alloy", Proc. of the Eighth Conference on Mechanical Behaviors of Materials, Vol 10, pp 169-180.
- Musha, T and Kawaura, J. (1991). "Wigner Distribution

Function and its Application for the Ultrasonic
Nondestructive Evaluation", JSNT, Vol 40, pp 587-591.

Evaluation, Vol 15, pp 2089-2096.

Malik, M.A., Jin, X.M. and Sanjie, J. (1996). "Joint
Time-Frequency Processing of Ultrasonic Signals",
Review of Progress in Quantitative Nondestructive

2003년 3월 14일 원고 접수

2003년 4월 22일 최종 수정본 채택