

알루미늄 5083의 피로균열 진전에 따른 수명예측 및 비파괴평가

남 기 우
부경대학교 재료공학부

Life Prediction of Fatigue Crack Propagation and Nondestructive Evaluation in 5083 Aluminum Alloy

KI-WOO NAM

Division of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

KEY WORDS: Leak before break 파단전누설, Life prediction 수명예측, Acoustic emission 음향방출, Joint time-frequency analysis method 시간-주파수 해석법, Fatigue crack propagation 피로균열진전, Stress ratio 응력비, Load cycle 하중 사이클, Nondestructive evaluation 비파괴평가

ABSTRACT: Fatigue life and nondestructive evaluation were examined experimentally using surface crack specimen and compact tension specimen of 5083 aluminium alloy. Acoustic emission signals emanated during local failure of aluminum alloys has been the subject of numerous investigations. Possible sources of AE during deformation have been suggested as the dislocations, fracture of brittle particles and debonding of these particles from the alloy matrix. Fatigue life and penetration behavior of long surface crack can be evaluated quantitatively using K values proposed by authors. The influence of stress ratio on the frequency characteristics of AE signals were investigated.

1. 서 론

가동중인 압력용기, 발전플랜트 및 화학플랜트의 배관에서 파단사고가 발생하는 경우 파손된 구조물은 주변의 구조물에 손상을 주지 않고 제 기능을 유지하도록 양단순간파단을 고려하여 구조물 및 지지물을 설계하고 있다. 이러한 구조물은 파단전누설이 성립하면 철거가 가능한 것으로서, 많은 연구자들은 배관의 급격한 파단보다는 파단전누설을 확보하기 위하여 연구를 실시하고 있다. 이와 관련하여 판 두께 관통까지의 연구(IMCO, 1975; ASME, 1987), 3차원 표면 균열이 관통하여 완전한 2차원 균열로 성장하기 까지의 연구(남, 1991·1994; Ando, 1987; Nam, 1988·1994·1993·1992)등을 통하여 파단전누설이 성립함을 규명하였다. 그러나 구조물의 균열을 비파괴적인 방법으로 검출가능 하면 구조물의 내용물이 누설하기 전에 대응할 수 있으리라 생각한다. 이와 같은 균열 진전을 검출할 수 있는 방법으로는 음향방출법이 있다. 이것은 재료 내부의 소성변형, 균열 진전에 의한 탄성에너지의 해방을 검출할 수 있어, 재료 강도의 연구 수단 뿐만 아니라 비파괴검사의 한 방법으로도 확립되고 있다(남 등, 1997·1999; Nam, 1999). 또한 음향방출은 구조물의 가동 상태에서 결함을 검출할 수 있고, 연속 감시가 가능하므로 안전성 및 경제성 확보를 위하여 매우 중요하다. 최근에는 음향방출 신호를 단시간푸리에 변환법을 이용한 시간-주파수 해석법으로 신호의 특성을 분석하고 있다(김 등, 2000; 이 등, 1999; Malik, 1996).

따라서 본 연구에서는 5083 알루미늄을 사용하여 피로 균열

진전과 관통 수명을 평가하고, 균열진전에 따라 발생하는 음향방출 신호를 시간-주파수법으로 특성을 분석하였다. 이 때 균열 진전과 관통 거동은 긴 표면 균열에 대하여 실시하였고, 음향방출 신호의 주파수 특성은 관통균열에 적용하여 응력비에 의한 영향을 검토하였다.

2. 재료 및 시험편

시험 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 나타내었다. 그리고 시험편의 형상 및 치수는 Fig. 1에 나타내며, (a)는 수명평가를 위한 긴 표면균열을 갖는 시험편이고, (b)는 시간-주파수 해석을 위한 소형인장 시험편이다. Table 3(a)는 표면균열 시험편의 치수와 응력조건을 나타내고, (b)는 소형인장 시험편을 나타낸다.

피로 시험은 만능 피로 시험기를 사용하여 실온 대기중에서 실시하였다. 또한 시험시의 하중 제어는 정현파를 사용하여, 주파수는 1Hz~12Hz로 제어 하였다. 표면균열 시험편의 노치를 가공한 측(앞면)과 균열이 관통한 측(뒷면)의 균열길이는 쌍안 실체현미경으로 측정하였다. 그리고 표면균열 시험편의 균열 깊이는 비치마크법에 의하여 파단후에 측정하였다.

소형인장 시험편의 피로균열 진전에서 검출된 음향방출 신호는 AE system을 통해 PC와 인터페이스 된 고속 A/D 변환기를 이용하여 디지털화 시킨 후, 실시간적으로 주파수 분석을

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

Table 3 Specimen geometries and stress conditions

(a) Surface crack specimen

Spec. No.	Specimen geometries				stress condition $\Delta \sigma$ (MPa)	stress ratio R
	t(mm)	W(mm)	a_0 (mm)	b_0 (mm)		
AS-1	18	50	5	5	49.0	0.1
AS-2	18	50	10	5	54.4	
AS-3	18	60	15	5	49.0	
AS-4	18	75	35	5	42.8	
AS-5	18	75	45	5	36.3	

(b) Compact tension specimen

Spec. No.	t (mm)	W (mm)	a_0 (mm)	P_{max} (kN)	R
AC-1	25	50	10	14.7	0.1
AC-2	25	50	10	14.7	0.8

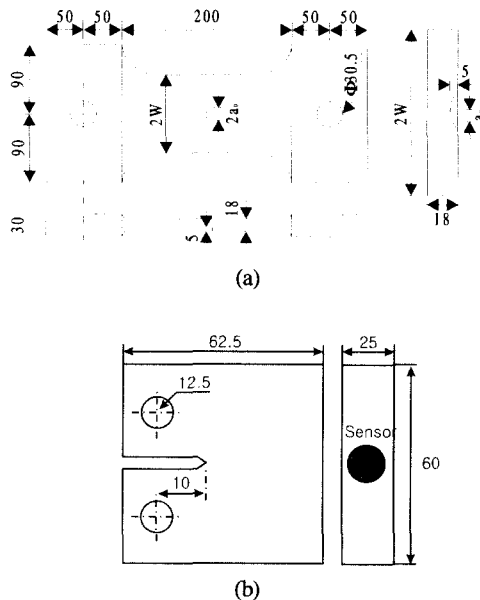


Fig. 1 Dimensions of specimens in mm
 (a) Surface crack specimen for life prediction
 (b) Compact tension specimen for acoustic emission inspection

하였다. 이 때 센서는 주파수 특성을 분석하기 위하여 광대역을 사용하였다. Fig. 2는 음향방출 시험에 사용된 장비의 미속도이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 표면균열 진전 거동에 따른 수명예측

실험에서 얻어진 피로균열 전파곡선의 일례를 Fig. 3에 나타내었다. 이것은 AS-2 시험편에서 얻어진 결과로서, 균열 발생 수명 등의 영향을 고려하여 앞면에서의 균열길이가 1.3mm 진전하였을 때의 반복수를 0으로 하였다. 앞면에서의 균열전파 거동(기호○)은 균열이 뒷면에 관통한 후에도 특별히 큰 변화는 없고, 거의 연속적인 거동을 보이고 있다. 그러나 뒷면에서는 극히 빠른 균열성장거동(기호△)을 나타내고 있다. 또 그림중의 실선은 표면균열이 관통하기 전까지 평가하는 Newman-Raju에 의한 응력확대계수식(Neman and Raju, 1981)과 표면균열이 관두계를 관통한 후 평가하는 저차 등의 응력확대계수식(Ando, 1987) 및 Fig. 4에 나타내는 피로균열전파법칙등을 사용하여 얻어진 a-N곡선이다. 계산결과는 실험결과에 비교하여 약간 장수명이 되어 있지만, 전체적으로는 우수한 경향을 보이고 있다.

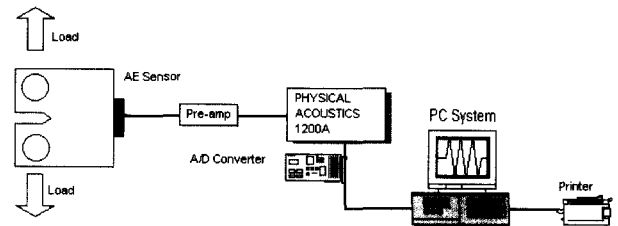


Fig. 2 Block diagram of experiment setup for acoustic emission inspection system

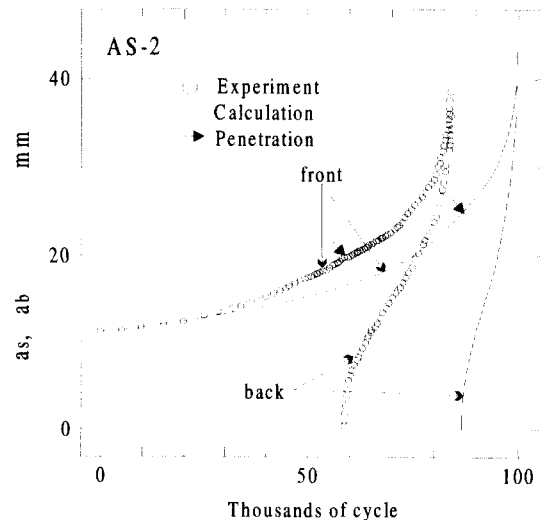


Fig. 3 Comparison of experimental with calculated values of crack growth (AS-2 specimen, $a_0 = 5$ mm)

Fig. 3과 같은 a-N곡선으로 부터 얻어진 피로균열전파속도 da/dN와 Newman-Raju의 식 및 저자 등의 식으로 평가한 ΔK와의 관계를 Fig. 4에 나타낸다. 그림에서 AS-1, 2, 3 시험편은 관통전후의 결과이고, AS-4, 5 시험편은 관통후의 결과만을 나타내고 있다. 이 그림에서 da/dN와 ΔK사이의 관계는 초기 표면균열 길이에 관계없이 관통전후는 식(1)과 같이 정리 될 수 있다는 것을 알았다.

$$da/dN = 1.99 \times 10^{-8} (\Delta K)^{3.65} \quad (1)$$

균열 관통 후 뒷면의 전파거동을 검토하기 위하여 Fig. 3과 같은 a-N곡선에서 관통한 부분을 확대하여 Fig. 5에 나타내었다. 그림중의 실선은 Fig. 4에 나타난 피로균열전파법칙과 저자

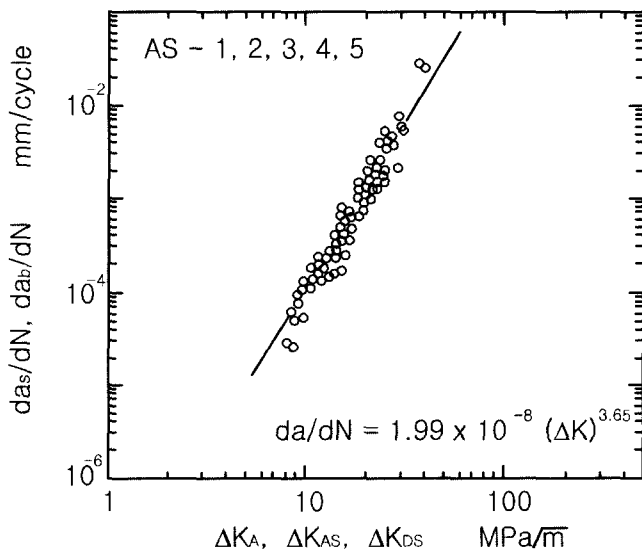


Fig. 4 Crack growth rate versus stress intensity factor range at the front and back sides of a plate

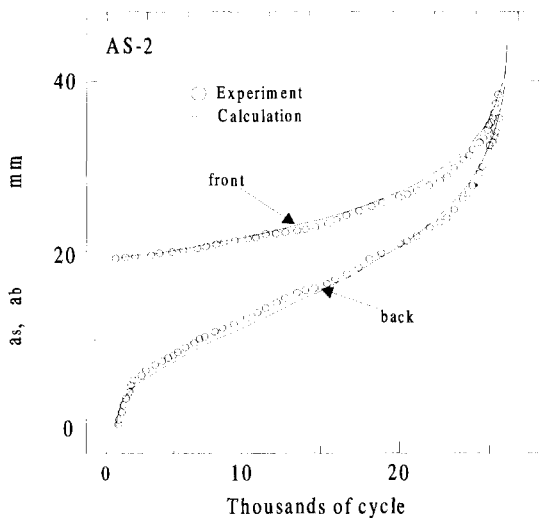


Fig. 5 Comparison of experimental with calculated values of crack growth after penetration (AS-2 specimen, a₀ = 5mm)

등의 식에서 얻어진 a-N곡선이다. 이것은 실험에서 얻어진 관통시의 앞면 균열길이를 대입하고, 반복수를 0으로 하였다. 이 결과 저자 등이 제안한 식에 의하여 긴 표면균열을 갖는 시험편의 관통후 균열전파 거동을 평가할 수 있다고 생각된다.

앞면에서 피로균열이 성장하여 뒷면에 관통하기 까지의 하중반복수(N_L)와 균열 관통후 뒷면 균열 길이가 15mm(AS-1, 2, 3) 및 30mm(AS-4, 5)에 도달하기 까지의 하중반복수(N_{ab})의 실험치와 계산치를 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 피로균열 관통수명(N_L)은 실험치와 계산치가 좋은 일치를 보이고 있으며, N_{ab}도 전체적으로 좋은 일치를 보이고 있다고 말할 수 있다. 이것으로부터 저자들이 제안한 반원형 표면 균열재에 대한 평가식으로 긴 표면균열재의 피로수명과 균열 관통거동을 정량적으로 평가할 수 있다고 생각된다.

3.2 균열진전에 의한 음향방출 신호의 시간-주파수 해석

재료의 구조적인 변형으로 급속하게 발산하는 에너지에 의하여 생성되는 음향방출은 고체내의 전위의 이동이나 균열의 생성과 성장 등이 대표적인 발생원으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 응력비가 다른 시험편의 피로균열 진전에 따라 발생하는 음향방출 신호를 검출하여 주파수를 분석하고자 하였다. 3차원 균열인 표면균열은 균열진전 상태가 복잡하므로 발생하는 신호도 다양하리라 생각된다. 그러므로 여기서는 우선 2차원 균열인 관통균열의 모드 I 진전에 대한 신호를 검출하여 분석하였다.

Elber(Elber, 1970)에 의하여 인장 반복하중을 받는 경우, 균열선단 부근에서 균열 닫힘(crack closure) 현상이 규명되었다. 이는 하중 부하시 균열 전체가 개구하는 응력에 대한 K_{op} 이상의 유효응력확대계수 K_{eff}(effective stress intensity range-범위)가 실제 균열 성장에 기여한다고 하였다. 즉,

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

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

$$R = \sigma_{min} / \sigma_{max} = K_{min} / K_{max} \quad (4)$$

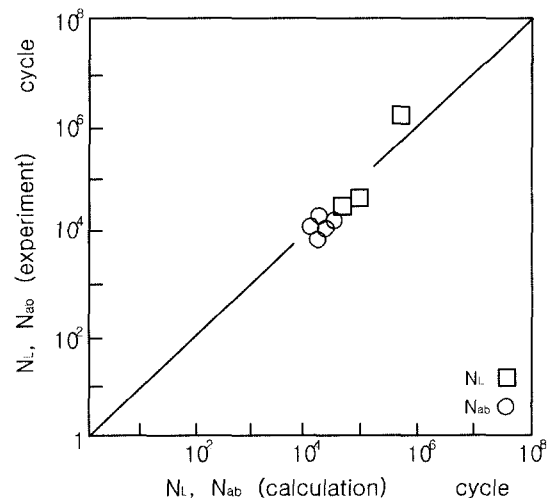


Fig. 6 Comparison of experimental with calculated values of N_L and N_{ab}

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

본 연구에서는 균열 열림과 균열 닫힘에 의한 음향방출 신호의 특성을 규명하기 위하여, 균열 열림과 닫힘이 일어나는 응력비 $R=0.1$ 에서 발생하는 음향방출 신호를 검출·분석하여 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7의 (a)와 (b)는 단시간 푸리에 변환을 사용하여 분석한 결과로서, (a)는 2차원 (b)는 3차원으로 표현한 것이다. (a)에서 3영역의 주파수 대역에서 에너지값들이 뚜렷하게 나타나고 있으며, (b)에서도 3개의 큰 피크들을 나타내고 있다. 이들 3영역의 주파수 성분 중에서 200kHz 이하 저주파수 영역의 성분은 기계적인 노이즈에 의한 주파수 성분이다 (김 등; 2000). 그리고 균열 진전에 따라 A라고 표시된 200kHz~400kHz 사이의 주파수 영역과 B라고 표시된 400kHz~600kHz 사이의 주파수 영역이 나타나고 있다.

균열 닫힘 현상은 하중 제하시 균열 후방의 잔류 응력의 압축에 의해 발생하는 소성 유기 균열 닫힘, ΔK 의 감소에 따른 파단면의 프레팅에 의한 산화물과 부식생성물에 의한 산화물 유기 균열 닫힘 및 균열의 지그재그 진전에 따른 파면거칠기 유기 균열 닫힘으로 나눈다. 균열 닫힘에 의한 음향방출 신호를 검출하기 위하여, 균열 닫힘 현상이 거의 배제될 것으로 예상되는 응력비 $R=0.8$ 에서 균열진전에 의한 음향방출 신호만을

검출하여 Fig. 8에 나타내었다. 이 그림에서는 응력비 $R=0.1$ 에서 분석된 결과와는 달리 200kHz 이하와 200kHz~400kHz 주파수 영역에서만 에너지값이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서, Fig. 7의 응력비 $R=0.1$ 에서 분석된 400kHz~600kHz 사이의 주파수 영역은 균열 닫힘에 의한 신호로 생각된다.

이와 같이 1cycle 에 대한 음향방출 신호를 관찰하여 피로 균열이 안정적으로 진전할 때 만들어지는 스트라이에이션(striation)과 연관시켜 분석한 결과, 균열 선단에서의 음향방출 기구는 하중의 부하와 제하에 따라 균열 선단의 스트라이에이션(striation)의 형성기구와 관련이 있음을 알 수 있었다. 즉, 하중의 부하시에 균열선단에서 음향방출 신호가 발생하기 시작하여 최고 하중에서 최대의 에너지를 발생시킨 후 계속해서 제하 과정에서 균열은 닫히기 시작하고, 둔화된 균열선단 부분은 주름모양으로 접히면서 음향방출이 발생하게 된다. 이때 균열 닫힘에 의한 음향방출 신호도 동시에 발생된다. 따라서, 노이즈는 항상 일정한 크기로 발생한다. 더구나 하중 부하에 따라 균열 선단이 움직임으로써 스트라이에이션(striation)이 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 노이즈(200kHz 이하)와 균열 열림에 의한 신호(200kHz~400kHz)만이 검출되며, 응력비 $R=0.1$ 에서는 노이즈와 균열 열림과 닫힘에 의한 신호(400kHz~600kHz)가 함께 검출됨을 알 수 있었다.

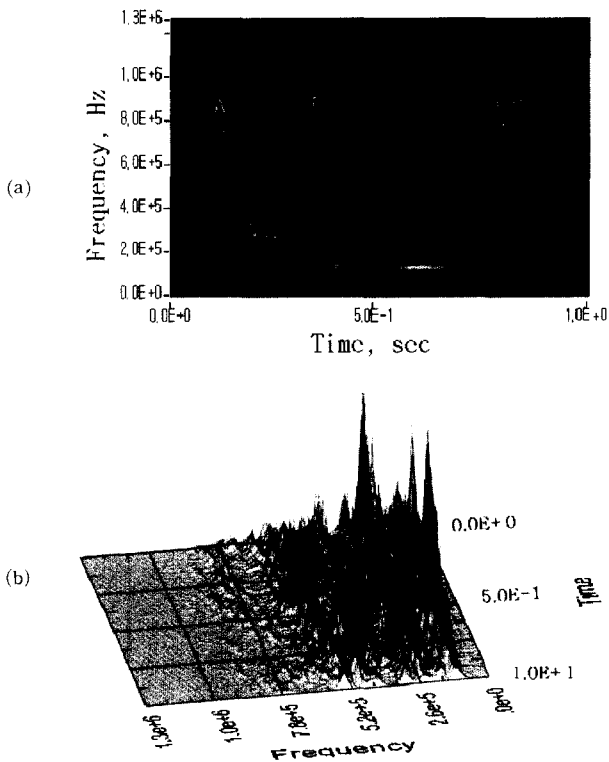


Fig. 7 Short time Fourier transform for acoustic emission signal in $R=0.1$ (AC-1, 1Hz)

(a) 2D representation, (b) 3D representation

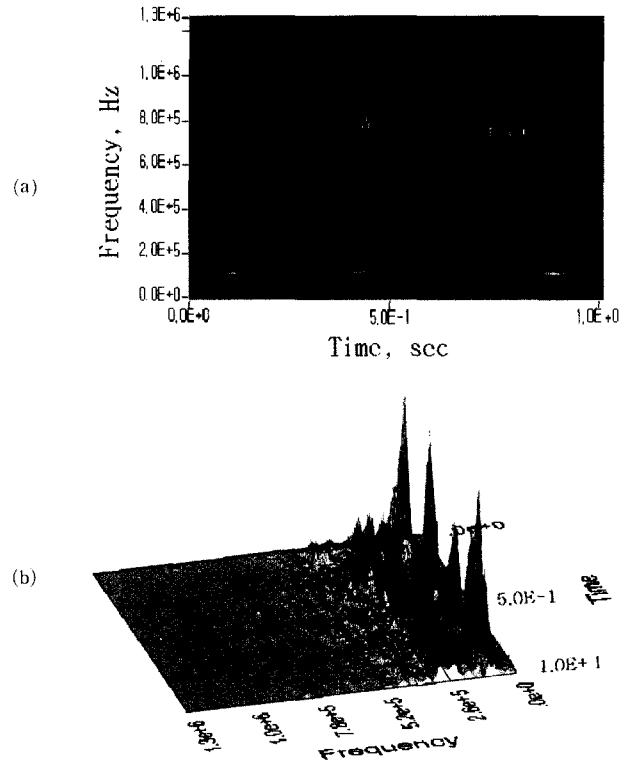


Fig. 8 Short time Fourier transform for acoustic emission signal in $R=0.8$ (AC-2, 1Hz)

(a) 2D representation, (b) 3D representation

4. 결 론

본 연구에서는 AI 5083의 표면균열 시험편을 사용하여 피로 수명을 예측하고, 소형인장 시험편을 사용하여 균열진전에 따른 음향방출 신호를 검출·분석하여 응력비에 의한 영향을 검토하였다.

(1) 반원형 표면 균열재에서 제안된 응력확대계수 평가식으로 긴 표면균열재의 피로수명과 균열 관통거동을 정량적으로 평가할 수 있었다.

(2) 피로 균열 진전에 의해 발생하는 음향방출 신호를 시간-주파수 해석법으로 분석한 결과, 응력비0.1에서는 균열 진전에 의한 200kHz~400kHz와 균열 닫힘 현상에 의한 프레팅으로 400kHz~600kHz의 주파수 영역이 검출되었다. 그러나 응력비 0.8에서는 균열 닫힘 현상이 발생하지 않으므로 균열 진전에 의한 200kHz~400kHz의 주파수 영역만 검출되었다. 이것으로 음향방출 신호를 시간-주파수 해석법으로 분석함으로써 구조물에 작용하는 응력 조건을 파악할 수 있음을 알았다.

후 기

“이 논문은 1997년도 부경대학교 연구년교수지원에 의하여 연구되었음”

참 고 문 헌

- 김현수, 강창룡, 남기우(2000). “고강도 구조용 내화강의 피로특성 및 음향방출 신호의 시간-주파수 해석”, 대한금속·재료학회지, 제38권 제11호, pp 1478~1482.
- 남기우(1991). “고장력강의 피로수명과 균열관통거동에 관한 연구”, 대한기계학회논문집, 제5권 제6호, pp 1990~2001.
- 남기우(1994). “인장 굽힘피로를 받는 부재의 피로수명과 균열관통”, 한국해양공학회지, 제8권 제1호, pp 41~49.
- 남기우, 김선진(1999). “피로균열의 지연거동에 따른 수명예측 및 비파괴평가”, 한국해양공학회지 제13권 제3호, pp 36~48.
- 남기우, 김선진, 이진찬, 오정환, 오세규, 이주석(1997). “표면균열재의 피로균열관통거동에 따른 어코스틱에미션”, 한국해양공학회지 제11권 제3호, pp 29~38.
- 이진찬, 오정환, 남기우, 이주석(1999). “열화된 SUS316강의 시간-주파수 해석에 의한 비파괴평가”, 비파괴검사학회지 제19권 제4호, pp 270~276.
- Ando, K., Fujibayashi, S., Nam, K. W., Takahashi, M. and Ogura, N.(1987). “The Fatigue Life and Crack Through-Thickness Behaviour of a Surface-Cracked Plate (for the Case of Tensile Load)”, JSME Int. J. Vol. 30, pp 1898~1905.
- ASME(1987). “Boiler and Pressure Vessel Code. Sec. XI”.
- Elber(1970). “Fatigue Crack Closure under Cyclic Tension”, Engng. Fract. Mech. Vol. 2, pp 37~45.
- IMCO resolution A 328(IX)(1975). “Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk”.
- Nam, K.(1999). “Acoustic Emission from Surface Fatigue Cracks in SS41 Steel”, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. Vol. 22, pp 1103~1109.
- Nam, K. W., Fujibayashi, S., Ando, K. and Ogura, N.(1988). “The Fatigue Life and Crack Through-Thickness Behaviour of a Surface-Cracked Plate (Effect of Stress Concentration)”, JSME Int.J. Vol. 31, pp 272~279.
- Nam, K.W., Ando, K., Ogura, N. and Matui, K.(1994). “Fatigue Life and Penetration Behaviour of Surface-Cracked Plate under Combined Tension and Bending”, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. Vol. 17 No. 8, pp 873~882.
- Nam, K. W., Ando, K. and Ogura, N.(1993). “The Effect of Specimen Size on the Behaviour of Penetration Fatigue Cracks”, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. Vol. 16, pp 767~779.
- Nam, K. W., Ando, K., Sakai, Y. and Ogura, N.(1992). “Leak-Before-Break Conditions of Plates and Pipes under High Fatigue Stresses”, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. Vol. 15, pp 809~824.
- Newman, J. C. Jr and Raju, I. S.(1981). “An Empirical Stress Intensity Factor Equation for the Surface Crack”, Engng. Fract. Mech. Vol. 15, pp 185~192.
- Malik, M. A., Jin, X. M. and Saniie, J.(1996). “Joint Time-Frequency Processing of Ultrasonic Signals”, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 15, pp 2089~2096.

2001년 3월 14일 원고 접수

2001년 5월 2일 수정본 채택