

● 論 文

피로균열의 지연거동에 따른 수명예측 및 비파괴평가⁺

남 기 우* · 김 선 진**

(99년 3월 9일 접수)

Life Prediction by Retardation Behavior of Fatigue Crack and its Nondestructive Evaluation

Ki-Woo Nam and Seon-Jin Kim

Key Words : Leak before Break(LBB, 파단전누설), Fatigue(피로), Crack Penetration Behavior(균열관통거동), Retardation Behavior(지연거동), Signal Characteristics(신호특성), Acoustic Emission(음향방출), Waveform(파형), Power Spectrum(파워 스펙트럼)

Abstract

Fatigue life and crack retardation behavior after penetration were experimentally examined using surface pre-cracked specimens of aluminium alloy 5083. The Wheeler model retardation parameter was used successfully to predict crack growth behavior after penetration. By using a crack propagation rule, the change in crack shape after penetration can be evaluated quantitatively. Advanced, waveform-based acoustic emission (AE) techniques have been successfully used to evaluate signal characteristics obtained from fatigue crack propagation and penetration behavior in 6061 aluminum plate with surface crack under fatigue stress. Surface defects in the structural members are apt to be origins of fatigue crack growth, which may cause serious failure of the whole structure. The nondestructive analysis on the crack growth and penetration from these defects may, therefore, be one of the most important subjects on the reliability of the leak before break (LBB) design. The goal of the present study is to determine if different sources of the AE could be identified by characteristics of the waveforms produced from the crack growth and penetration. AE signals detected in four stages were found to have different signal per stage. With analysis of waveform and power spectrum in 6061 aluminum alloys with a surface crack, it is found to be capabilities on real-time monitoring for the crack propagation and penetration behavior of various damages and defects in structural members.

+ 본 연구는 '97년도 교육부 학술연구조성비(기계공학ME97C-09)에 의하여 연구되었음

* 종신회원, 부경대학교 재료공학부

** 종신회원, 부경대학교 기계·자동차공학부

1. 서론

파단전누설(LBB) 설계법에 있어서는 표면에 발생한 미소 균열이 성장해서 판 두께를 관통하기까지의 수명과 관통 시의 균열 형상 또는 균열이 관통한 직후부터 앞면과 뒷면에서의 균열 길이가 같은 2차원 균열로 성장하기까지의 성장 특성을 평가할 필요가 있다. 이와 같은 관점에서, 판 두께를 관통하기까지의 균열 성장 거동에 관해서는 많은 연구자들에 의해 연구가 실시되었다¹⁾⁻³⁾. 그리고, 3차원 표면 균열이 관통해서 완전한 2차원 균열로 성장하기까지의 거동에 관해서는 저자들에 의하여 많은 연구가 실시되어 왔다⁴⁾⁻⁹⁾.

피로 하중을 받는 구조물에는 X선탐상법, 초음파탐상법 등을 통하여 검출된 결함에서 파괴역학적으로 안전성을 평가하여 왔다. 최근에는 재료 내부의 소성변형, 균열 진전에 따르는 탄성에너지의 해방인 음향방출(Acoustic Emission)은 변형에 민감하고, 동적으로 검출할 수 있다는 장점을 가지고 있어, 재료 강도의 연구 수단뿐만 아니라 비파괴검사의 측면에서도 새롭고 유력한 수법이 되고 있다^{10),11)}. 음향방출은 다른 비파괴검사방법에 비교하여, 구조물 중의 결함이 가동 상태에서 성장할 가능성이 있는 것을 검출할 수 있고, 연속 감시가 가능하다는 장점으로 인하여 대형 구조물의 안전성 평가에 널리 응용되고 있다. 이러한 장점 때문에 음향방출을 사용한 피로 균열 진전에 대한 평가가 많이 실시되어져 왔지만, 대부분의 연구는 2차원 균열의 피로 균열 진전에 대한 것이고^{12),13)}, 파단전누설 설계법의 기초적인 연구로서 3차원 균열의 균열 진전과 관통 거동에 관한 것은 전무한 실정이다. 또한 이러한 연구는 누적 카운트를 사용한 연구이다. 따라서 대형 플랜에 있어서 표면 균열이 피로 하중에 의하여 성장하여 판 두께를 관통하는 경우에 있어서, 파단전누설 거동의 관점에서 음향방출을 사용한 연속 감시가 가능하다면 균열이 발생하여 기기의 점검시 발견하지 못하는 치명적인 경우는 없을 것으로, 안전성 및 경제성 확보를 위하여 매우 중요한 것이다.

본 연구에서는 5083알루미늄 판을 사용하여 피로균열 진전과 관통후 지연거동을 검토하였고,

6061알루미늄판을 사용하여 피로 균열 진전과 관통에서 발생하는 음향방출 신호를 검출하였다. 그리고, 검출된 음향방출 신호는 균열 진전영역을 각 단계별로 나누어서 파형과 파워 스펙트럼 형태를 비교 검토하였다.

2. 실험재료 및 실험방법

피로균열 관통과 지연 거동을 평가하기 위한 5083 알루미늄 시험편의 형상과 치수는 Fig. 1(a)에 나타내었다. 초기 노치형상은 방전가공($a_0=5\text{mm}$)과 기계가공($a_0=35\text{mm}$)에 의하여 만들었다. 노치의 깊이 b_0 는 두 시험편에서 5mm로 하였다. 피로실험은 용량 0.245MN의 유압피로시험기를 사용하여 대기 중 실온에서 하중제어로 실시하였다. 실험은 사인파를 사용하여, 주파수 10Hz, 응력비 $R=0.1$ 로 하였다. 특히, 균열관통 후 지연거동을 평가하기 위하여 초기 노치길이 $a_0=35\text{mm}$ 인 경우는 뒷면의 균열 길이 $a_b=8\text{mm}$ 에서 작용하중을 감소시켰다. 이때 하중 감소비(지연후 최대 반복하중/지연전 최대반복하중) 0.6으로 하였다.

피로 균열진전과 관통에서 발생하는 음향방출 신호를 검출하기 위해서 사용한 6061 알루미늄 시험편의 형상과 치수는 Fig. 1(b)에 나타낸다. 여기서 표면균열이 두께를 관통한 후, 파단까지 음향방출 신호 검출을 실시한 시험편을 AT1으로 표시하였다. 한편, 뒷면의 균열이 어느 정도 성장한 후, 지연현상에 의하여 발생하는 음향방출 신호를 검출하기 위한 시험편은 AT2로 하였다. 두 시험편의 노치는 방전 가공 ($a_0=4.4\text{mm}$, $b_0=2.4\text{mm}$)에 의하여 시험편의 중앙에 가공하였다. 피로시험은 용량 0.098MN의 유압피로시험기(INSTRON model 8500)을 사용하여 실온 대기중에서 하중제어로 실시하였다. 파형은 사인파, 주파수는 2Hz, 응력비는 $R=0.1$ 로 하였다. 피로응력의 변동폭은 두 시험편에서 모두 $\Delta\sigma=128\text{MPa}$ 이다. 음향방출의 검출은 Fracture Wave Detector (model F-4000 Digital Wave Corp., Englewood, Co.)를 사용하여 실시하였다. FWD는 실시간에 전 음향방출 파형을 디지털화 하여 저장한다. 디지털화 속도는 각 채널에 대하여 1024

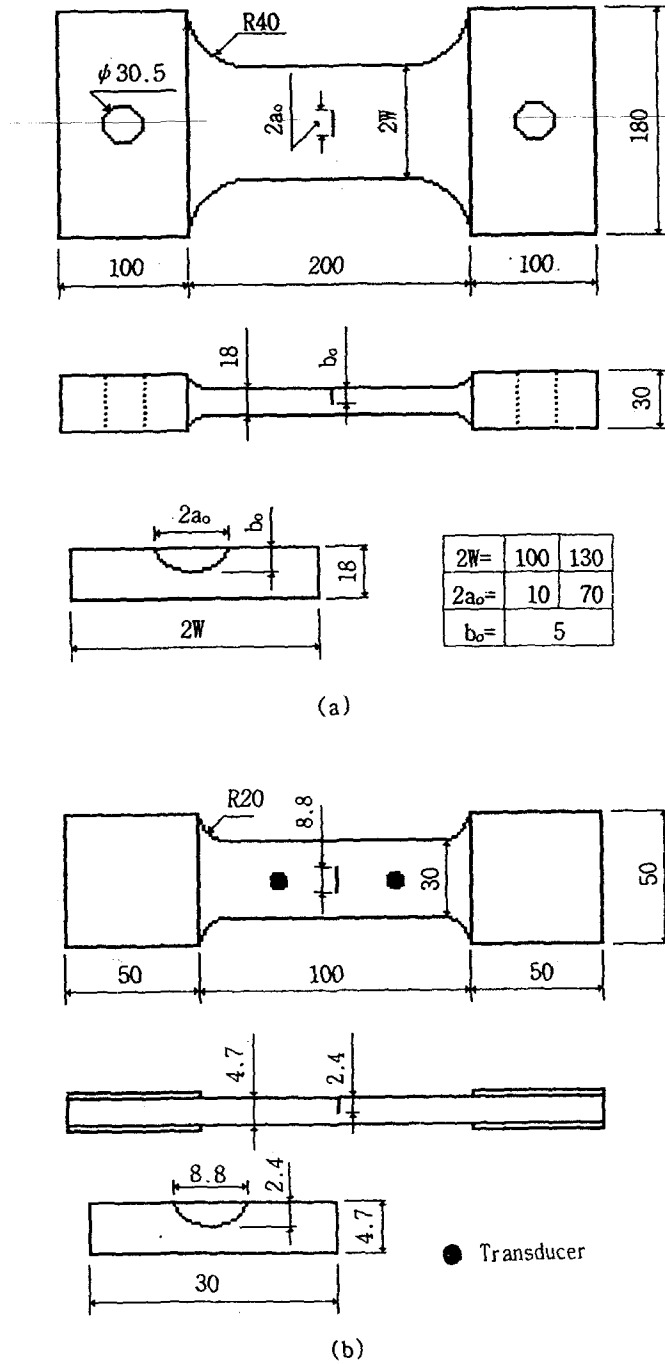


Fig. 1 Dimensions of specimens ; all dimensions in mm
 (a) 5083 aluminum, (b) 6061 aluminum

point gate length를 갖는 12.5MHz로 하였다. 두 개의 센서는 Fig. 1(b)에 나타내듯이 노치를 중심으로 같은 거리인 대칭위치에 설치하였다. Preamplifier (AET140B)는 30kHz~2MHz plug-in filter를 갖는 40dB로 두 개를 사용하였다. 실험에 있어서, 음향 방출 신호와 노이즈의 구별은 매우 심각한 문제이다. 실험동안 발생하는 노이즈는 유압 신호, 전기적 신호 또는 기계적 신호일 수 있다. 본 실험에서는 노이즈를 제거하기 위해서 다양한 방법을 시도하였다. Fig. 1(b)에서와 같이 그림 부분에 예폭시 수지를 사용하여 얇은 알루미늄 보강판을 부착하여 기계적인 노이즈를 줄였다. 또한 실험시에는 시험기의 지그 부분에 진흙을 사용하여 시험기로부터 시험편에 유입되는 노이즈를 감소시켰다. 또한 FWD에는 threshold filtering(0.2V)을 사용하여 노이즈를 감소시켰다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로균열 성장과 관통 후 지연거동

응력확대계수 평가는 균열이 관통하기 전에는 식 (1)에 나타내는 Newman-Raju의 식¹⁴⁾을 사용하여 평가하였다.

$$K = (\sigma_m + H\sigma_b)\sqrt{\pi b}/Q \cdot F \quad (1)$$

여기서 σ_m 은 인장응력, σ_b 는 굽힘응력, b 는 균열 깊이, H 와 F 는 보정계수, a 는 표면균열길이, $Q=1+1.464(b/a)^{1.65}(b/a \leq 1)$ 이다.

또한, 피로 균열이 판 두께를 관통한 후의 앞면과 뒷면에서의 응력확대계수는 安藤⁴⁾ 등이 제안한 식(2)와 식(3)으로 평가하였다.

$$K_{a_s} = \delta(a_s)/\delta(a_b) \cdot \sigma\sqrt{\pi a_s} \cdot F(\eta_s) \quad (2)$$

$$K_{a_b} = \delta(a_s)/\delta(a_b) \cdot \sigma\sqrt{\pi a_b} \cdot F(\eta_b) \quad (3)$$

여기서, a_s 와 a_b 는 각각 표면균열길이, 뒷면균열길이, a_e 는 판 두께 중앙에서의 균열길이 $\{0.5(3a_s^2 + a_b^2)^{0.5}\}$ 이다. $\eta_s = a_s/W$, $\eta_b = a_b/W$, $F(\eta) = (1 - 0.5\eta + 0.370\eta^2 - 0.044\eta^3)/(1 - \eta)^{1/2}$ 이며, $\delta(a) = 4\sigma$

$a(1 - \nu^2)/E \cdot V(\eta)$ 이다. ν 는 포아손 비, E 는 종탄성계수, $V(\eta) = -0.071 - 0.535\eta + 0.169\eta^2 + 0.020\eta^3 - 1.071(1/\eta)\log(1 - \eta)$

한편 관통후 균열성장애 있어서 지연거동은 다음과 같은 Wheeler model¹⁵⁾을 사용하여 평가하였다.

$$da/dN = C_p \cdot C \cdot (\Delta K)^m \quad (4)$$

여기서 C , m 은 재료상수이고,

$$C_p = [R_y/(a_p - a)]^n; a + R_y < a_p$$

$$C_p = 1; a + R_y \geq a_p$$

R_y ; 부하 하중하의 소성역 범위

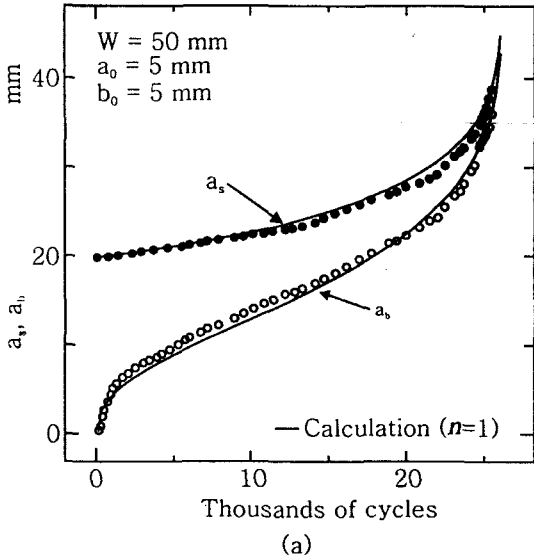
$a_p - a$; 균열선단에서 탄소성 경계까지의 거리

n ; 지연형상계수로서, 소형인장시험편에서 실험적으로 결정된 값이다. 여기서 소성역의 크기는 식(2), (3)에서 알 수 있듯이 앞면과 뒷면에서의 값이다.

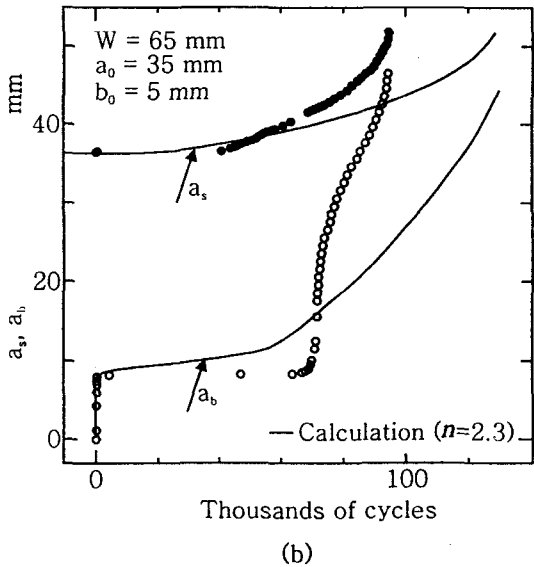
LBB설계에 있어서, 판두께를 관통한 후의 지연거동은 매우 중요하다. 5083 알루미늄에서 얻어진 관통후 앞면과 뒷면의 균열전파 거동의 실험과 계산 결과를 Fig. 2(a), (b)에 나타내었다. 그림(a)는 초기 노치 길이가 반원형인 $a_0=5\text{mm}$ 의 결과로서, 실험과 계산의 결과는 좋은 일치를 나타내었다. 한편, 그림(b)는 초기 노치길이 $a_0=35\text{mm}$ 에서 얻어진 실험 결과이다. 이때 관통후의 지연거동을 보기 위하여 뒷면의 균열길이 $a_b=8\text{mm}$ 일 때 하중을 감소시켰다. 그림 (a), (b)에서 실선은 식(2), (3)과 (4)를 사용한 계산 결과이다. 여기서 식(4)의 지연지수는 $a_0=5\text{mm}$ 일 때 1이고, $a_0=35\text{mm}$ 일 때 2.3이다. 그리고, C 와 m 은 1.99×10^{-8} 와 3.65를 사용하였다. 이때 da/dN 는 mm/cycle이고, ΔK 는 MPa \sqrt{m} 이다. 이 결과로부터 저자들이 제안한 응력확대계수 식을 사용하여, 초기 표면 균열이 관통한 후의 지연거동에 대한 수명예측을 평가할 수 있으리라 생각한다.

3.2 피로균열의 성장거동과 음향방출

6061 알루미늄판을 사용하여 피로 균열 진전과 관통에서 발생하는 음향방출 신호를 검출하였다. 본 연구에서 실시한 시험편과 같은 노치형상에서



(a)



(b)

Fig. 2 Comparison of experimental with calculated crack propagation behavior after penetration of 5083 aluminum specimen with a surface crack

- (a) $W=50\text{mm}$, $a_0=5\text{mm}$, $b_0=5\text{mm}$
- (b) $W=65\text{mm}$, $a_0=35\text{mm}$, $b_0=5\text{mm}$

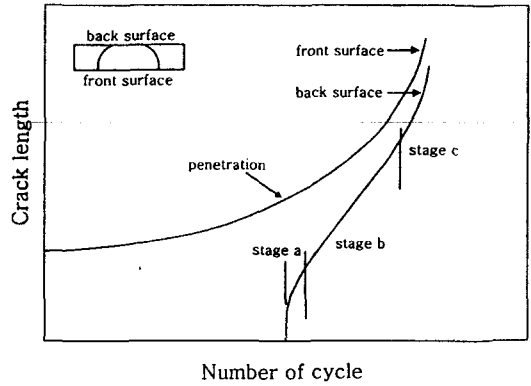


Fig. 3 Schematic diagram of crack propagation behavior in surface crack

성장하는 균열의 성장 거동의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 이러한 균열성장특성은 저자들⁴⁻⁹⁾에 의하여 보고되어 있다. 그림에서, 앞면에서 발생한 균열 전파 거동은 균열이 뒷면에 관통한 후에도 큰 변화는 없고, 연속적인 거동을 나타내고 있다. 이것에 대하여 뒷면에서는 매우 빠른 균열 성장 거동을 나타내고 있다. 뒷면에서의 균열 전파특성은 다음과 같이 대략 나눌 수 있었다. 'a'영역은 관통직후의 부분으로서, 매우 빠른 균열 성장을 나타낸다. 'b'영역은 일정한 균열 길이에 도달할 때까지 거의 일정한 속도로 성장한다. 이 영역을 정속도 영역이라 하였다. 'c'영역은 뒷면의 균열길이가 앞면의 균열길이에 접근하여 파단에 이르는 영역이다.

본 연구에서는 균열 진전에 따라 검출된 음향방출은 '관통전', 관통후 'a', 'b', 'c'의 4영역으로 나누어서 평가하였다.

균열 성장에 따른 무차원 누적 음향방출과 무차원 하중 사이클과의 관계를 Fig. 4에 나타낸다. ●는 시험편AT1의 결과이며, ○는 시험편AT2의 결과이다. 이것은 얻어진 신호에서 노이즈신호를 제외하고, 두센서에 동시에 검출된 신호만을 정리한 것이다. 두 시험편은 관통전 영역(stage 'before penetration')에서 하중 사이클의 증가와 함께 신호의 발생은 완만한 발생을 보이고 있다. 그러나 시험편AT1은 표면균열이 성장하여 두께 방향으로

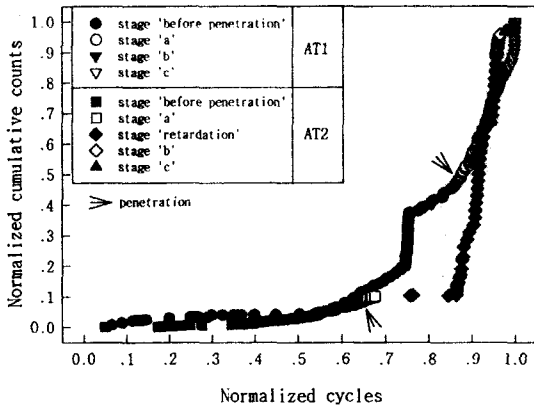


Fig. 4 Relationship of cumulative counts and load cycles obtained from 6061 aluminum specimen

진점함에 따라서 신호의 발생은 급격하게 나타나고 있다. 신호의 발생은 판두께 관통전에 피크치를 나타낸 후, 발생이 둔화하여 두께를 관통하고 있다. 이렇게 신호가 급격하게 발생하고 하강하는 부분이 평면변형 상태에서 평면응력 상태로 천이하는 영역¹⁶⁾이라고 생각한다. 이것은 SS41을 사용한 연구 결과와 유사한 경향¹⁷⁾이다.

한편, 관통후 시험편AT1에서 a, b, c 영역(stage 'a', 'b', 'c') 신호발생은 하중사이클의 증가와 함께 급상승하여 파단이 이르고 있다. 관통후 지연영역(stage 'retardation')에서 하중의 저하로 인한 시험편AT2는, 하중저하 직후에서는 신호의 발생이 둔화되어 있다. 이것은 고하중에 의하여 균열 선단에 형성된 소성 변형으로 균열의 닫힘 현상¹⁸⁾이 나타나지 않았기 때문이라고 생각한다. 그 후 반복되는 하중에 의하여 고하중에 의한 소성 잔류응력이

제거되고, 저하중의 작용으로 파면에 fretting이 나타남으로서 많은 신호가 나타나고 있다. 그 후 고하중을 받는 b, c영역(stage 'b', 'c')에서는 시험편 AT1과 같은 거동을 나타내고 있다.

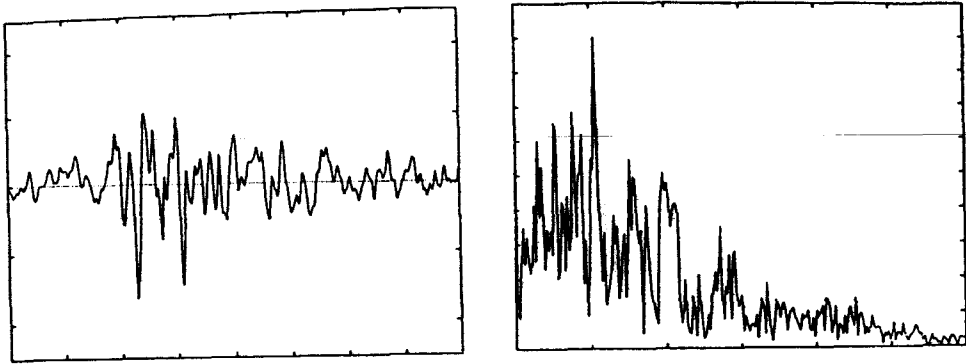
3.3 신호특성

본 실험에서와 같이 두께가 두꺼운 시험편에서는 표면균열 길이가 균열 깊이 보다 긴 경우, 깊이 방향의 응력확대계수 값이 더 크다. 따라서 균열 진전시 표면보다 깊이방향으로 균열의 진전이 먼저 발생하여 진전한다. 그 후 균열은 표면에서도 발생하여 진전하면서 관통한다. 6061 알루미늄 시험편 AT1과 AT2의 균열 진전 과정에서 얻어진 신호는 Fig. 3의 균열 진전 거동의 모식도에 따라서 '관통전', 'a', 'b', 'c' 영역으로 구분하여, 파형과 파워스펙트럼 형태에 의하여 각각 5가지 형태로 분류할 수 있었다. 그리고, 시험편 AT2는 지연현상에 의하여 발생한 신호를 한가지 더 분류하였다. 시험편 AT1에서 얻어진 '관통전' 영역의 대표적인 신호 형태를 Type-I, Type-III, Type-IV로 분류하여 Fig. 5에 나타내었다. 'a'영역의 것은 Type-I, Type-II, Type-V로 Fig. 6에, 'b'영역의 것은 Type-II, Type-III, Type-V로 Fig. 7에, 'c'영역의 것은 Type-I, Type-V로 Fig. 8에 나타내었다. 그리고, 시험편 AT2의 지연영역에서 얻어진 신호형태는 Type-II, Type-VI로 분류하여 Fig. 9에 나타내었다. 두 시험편의 각 영역에서 얻어진 신호의 형태는 같은 재료에서는 유사한 신호가 발생한다는 것을 알 수 있었다. 두 시험편의 음향방출 신호에서 얻어진 백분율을 Table 1에 나타낸다.

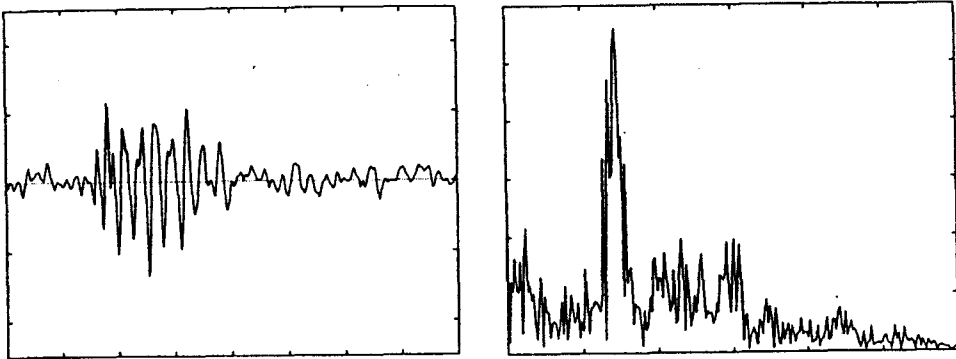
두 시험편의 각 영역에서 얻어진 Type-I~

Table 1 Signal types per stage by crack propagation of surface crack plate

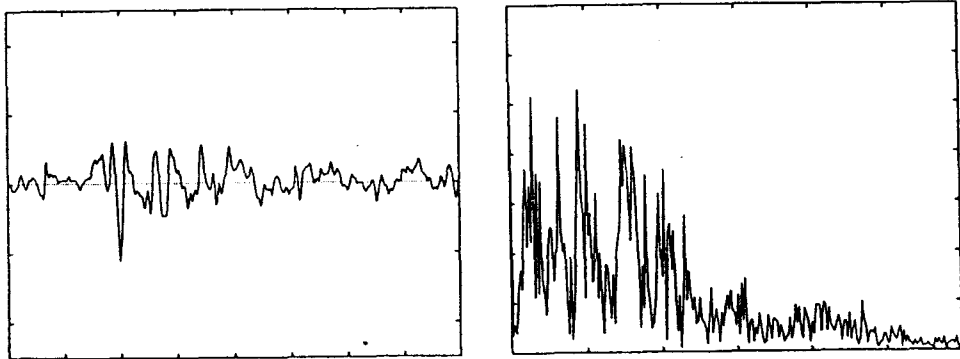
Specimen	Type						
	Stage	I	II	III	IV	V	VI
AT1	before penetration	42.9	-	6.1	51	-	-
	a	33.3	51.5	-	-	15.2	-
	b	-	81.5	3.7	-	14.8	-
	c	90	-	-	-	10	-
AT2	before penetration	41.7	-	7.4	51.9	-	-
	a	-	54.5	-	45.5	-	-
	b	-	72.2	-	-	17.8	-
	retardation	-	4	-	-	-	96
	c	62.5	-	-	-	37.5	-



(a) Type - I



(b) Type - III

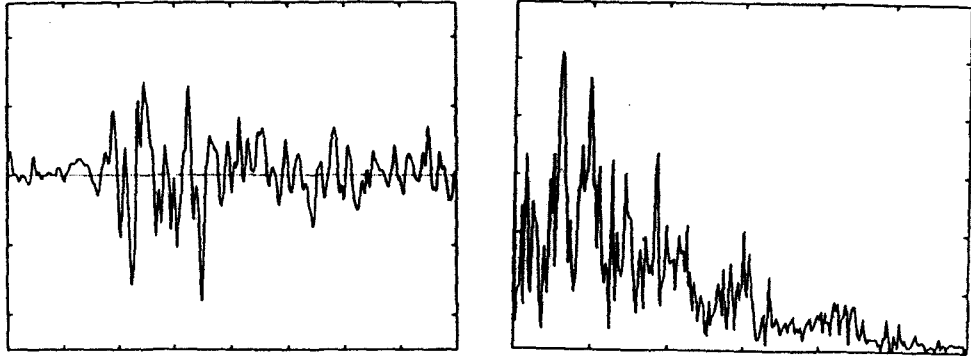


(c) Type - IV

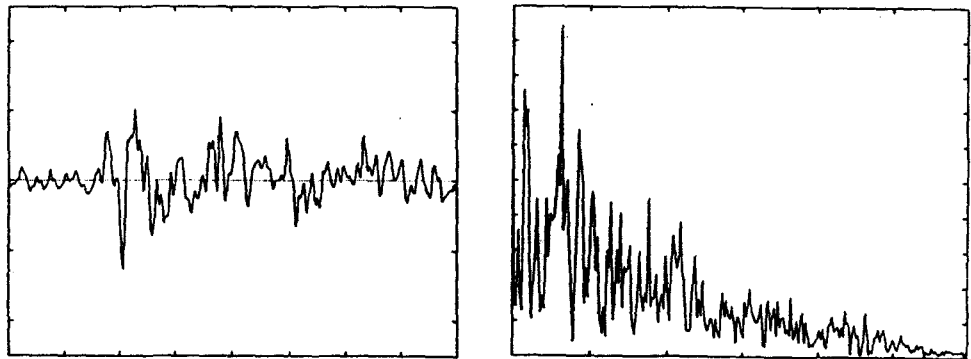
i) waveform

ii) power spectrum

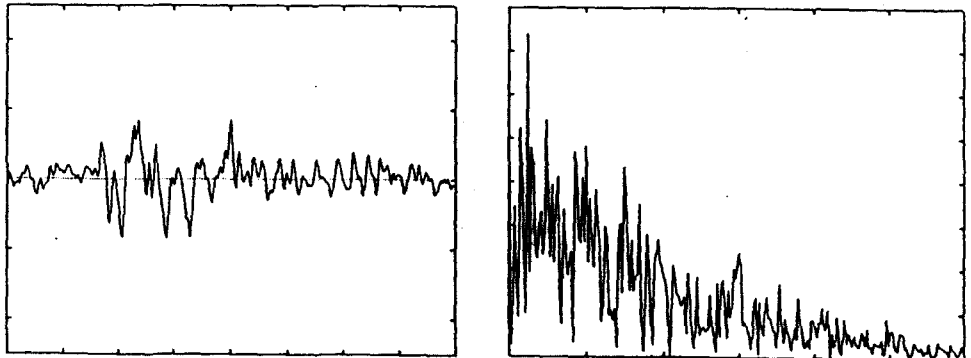
Fig. 5 AE events detected at the stage 'before penetration' during fatigue crack propagation of 6061 aluminum specimen with a surface crack (specimen AT1)
Horizontal scale ; i) time : $5 \mu\text{s}/\text{div}$, ii) frequency : $0.5\text{MHz}/\text{div}$. Vertical scale ; arbitrary



(a) Type - I



(b) Type - II



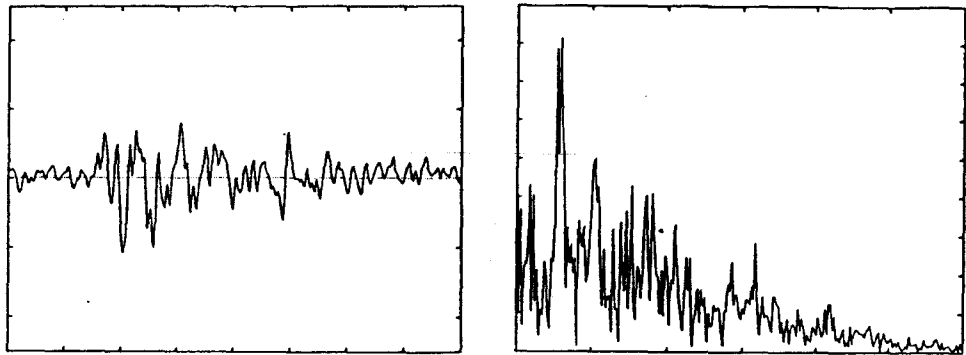
(c) Type - V

i) waveform

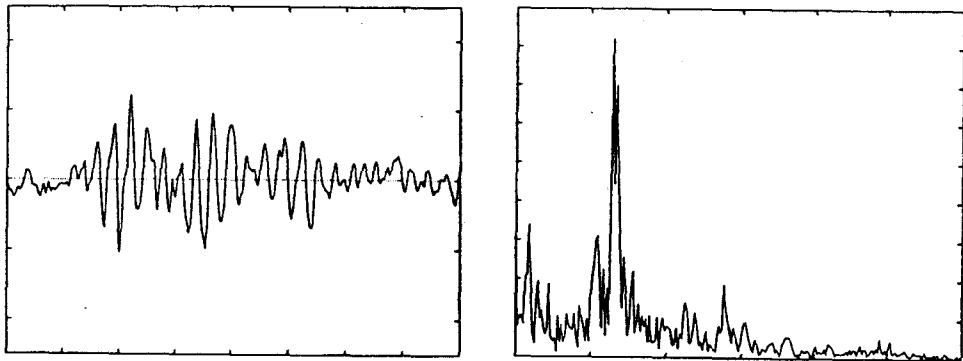
ii) power spectrum

Fig. 6 AE events detected at the stage 'a' during fatigue crack propagation of 6061 aluminum specimen with a surface crack (specimen AT1)

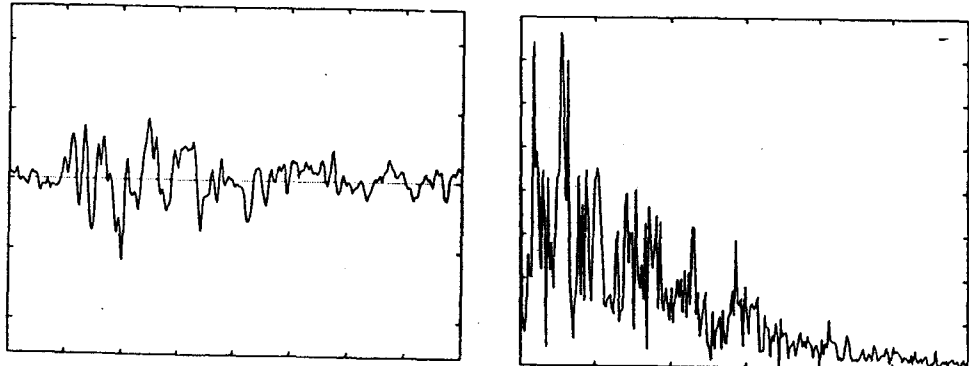
Horizontal scale ; i) time : $5\mu\text{s}/\text{div}$, ii) frequency : $0.5\text{MHz}/\text{div}$. Vertical scale ; arbitrary



(a) Type - II



(b) Type - III



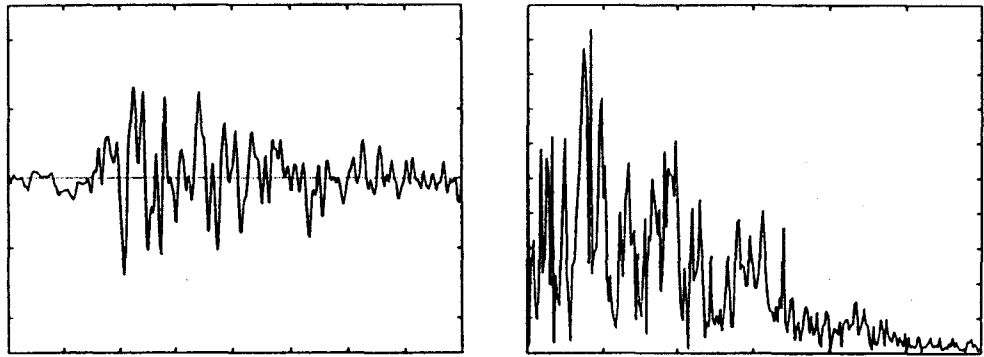
(c) Type - V

i) waveform

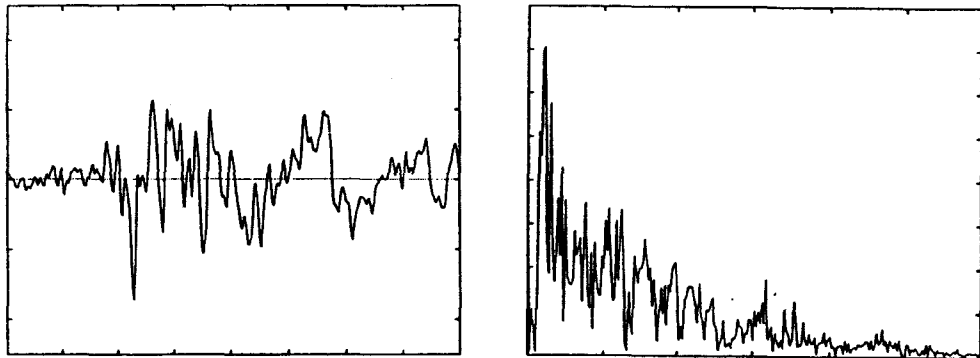
ii) power spectrum

Fig. 7 AE events detected at the stage 'b' during fatigue crack propagation of 6061 aluminum specimen with a surface crack (specimen AT1)

Horizontal scale ; i) time : $5 \mu\text{s}/\text{div.}$, ii) frequency : $0.5\text{MHz}/\text{div.}$ Vertical scale ; arbitrary



(a) Type - I



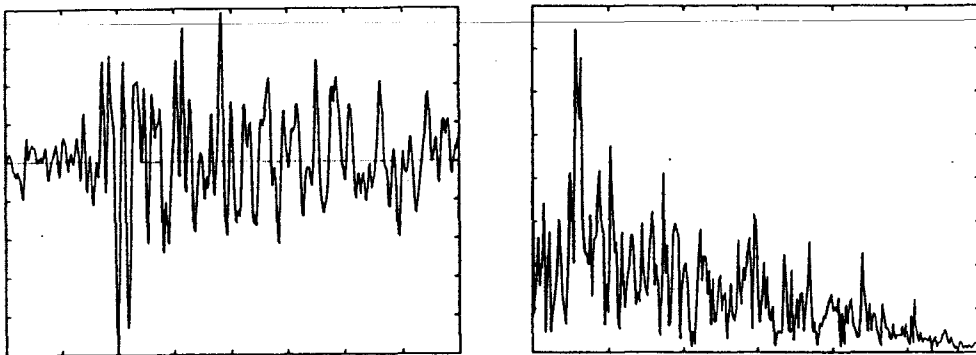
(b) Type - V

i) waveform

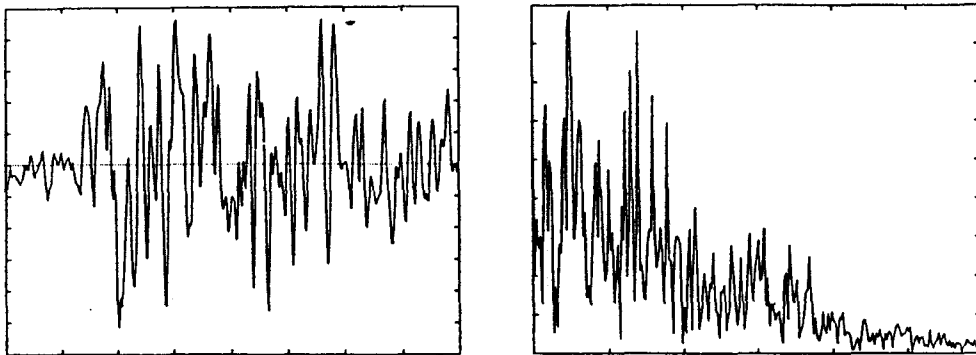
ii) power spectrum

Fig. 8 AE events detected at the stage 'c' during fatigue crack propagation of 6061 aluminum specimen with a surface crack (specimen AT1)

Horizontal scale ; i) time : $5\mu\text{s}/\text{div.}$, ii) frequency : $0.5\text{MHz}/\text{div.}$ Vertical scale ; arbitrary



(a) Type - II



(b) Type - VI

i) waveform

ii) power spectrum

Fig. 9 AE events detected at the stage '*retardation*' during fatigue crack propagation of 6061 aluminum specimen with a surface crack (specimen AT2)

Horizontal scale ; i) time : $5\mu\text{s}/\text{div.}$, ii) frequency : $0.5\text{MHz}/\text{div.}$ Vertical scale ; arbitrary

Type-V 파형은 예리한 상승과 하강을 나타내며, 짧은 기간만 지속된다. 이것은 박판 시험편에서 얻어진 extensional wave와 flexural wave와 유사한 형상¹⁹⁾이다. 시험편 AT2의 지연영역은 응력비를 R=0.1에서 R=0.42로 변경함으로써 fretting에 의해서 많은 신호가 검출되었다. 이 경우 작용응력의 변동폭이 작아짐으로서 지연현상¹⁵⁾이 발생하고, 고응력에 의하여 형성된 파면에 fretting이 발생함으로써 많은 신호가 발생한다. 이 영역에서 얻어진 Type-II와 Type-VI 파형은 오랜 기간 지속하고 있는 것을 알 수 있다.

각 신호의 파워 스펙트럼에서 Type-I은 대략 0.5MHz 근처에서 강한 피크값을 나타내며, 전후에서도 작은 피크값을 나타내고 있다. Type-II는 대략 0.3MHz 근처에서 피크값을 나타내며, 전후에서도 작은 피크값들이 많이 나타나고 있다. Type-III는 대략 0.75MHz 근처에서 피크값을 나타내며, 고주파수 범위에서도 작은 피크값을 나타내고 있다. Type-IV는 대략 0.3, 0.5, 0.75MHz 근처에서 피크값을 나타내며, 0.3MHz 이전과 0.75MHz 이후에도 피크값을 나타내고 있다. Type-V는 대략 0.15MHz 근처에서 강한 피크값을 나타내며, 지연영역에서 얻어진 Type-VI는 대략 0.25와 0.7MHz 근처에서 피크값이 나타나며, 고주파수 범위에서도 작은 피크를 나타낸다.

Table 1에서 균열이 3차원적으로 진전하는 관통전 영역에서는 Type-I과 Type-IV형태의 신호가 주류를 이루고 있다. 관통후 영역 'a'와 'b'에서는 Type-II의 형태가 주신호로서 검출되고 있다. 그리고 관통후 영역 'b'에서 지연현상으로 fretting에 의하여 발생한 신호는 Type-VI가 96%이다. 또한 최종 파단에 가까운 영역 'c'에서 발생한 신호는 Type-I이 주신호로 검출되고 있다.

이와 같이 6061 알루미늄의 관통전 영역에서는 균열이 복잡하게 진전함에 따라서 비교적 고주파수 범위인 0.5~0.75MHz의 신호가 음향방출 신호의 주요소임을 알 수 있다. 관통후 2차원 균열로서 뒷면 균열 길이가 앞면 균열 길이에 접근하는 영역 'a'와 'b'에서는 0.3MHz의 저주파수가 주요소이며, 최종 파괴에 가까운 영역 'c'에서는 0.5MHz가 주요소이다.

4. 결 론

5083 알루미늄 시험편을 사용하여 피로균열 진전과 관통후 지연거동을 검토하였다. 그리고, 6061 알루미늄 시험편을 사용하여 피로 균열 진전과 관통에서 발생하는 음향방출 신호를 검출하여, 균열 진전영역의 각 단계별로 나누어서 파형과 파워스펙트럼 형태를 비교 검토하였다.

- 1) 5083 알루미늄의 관통후 뒷면 피로 균열 성장 거동은 초기 표면 균열 길이에 관계없이 반원형 노치를 갖는 시험편과 유사하였고, 3영역으로 나누어졌다. 그리고, 저자들이 제안한 응력 확대계수 식을 사용하여, 초기 표면 균열이 관통한 후의 지연거동에 대한 수명예측을 평가할 수 있었다.
- 2) 6061 알루미늄 음향방출 신호의 누적 카운트는 균열이 두께를 관통하기 전에 급격하게 발생한 후, 둔화하면서 관통하고 있다. 그리고 지연에 의한 음향방출 신호의 발생은 소성잔류 변형으로 인하여 둔화하였다. 검출된 음향방출 신호를 분석한 결과는 영역별로 다른 신호가 검출됨을 알 수 있었다.
- 3) 따라서 구조물의 안전성 및 경제성 확보를 위하여, 3차원 균열의 관통 거동에 대한 음향방출 신호의 주요한 발생원 및 경향을 파악하기 위하여 다양한 재료를 사용하여 검토하여 들 필요가 있다고 생각한다.

참고문헌

- 1) Kawahara, M. and M. Kurihara, "A Preliminary Study on Surface Crack Growth in a Combined Tensile and Bending Fatigue Process", Japan Soc. Naval Archit., Vol.137, pp.297-306, 1975 (in Japanese)
- 2) Gilchrist, M.D., M.I. Chipalo and R.A. Smith, "Shape Development of Surface Defects in Tension Fatigued Finite Thickness Plates", Int. J. Press. Piping, Vol.49, pp.121- 137, 1992
- 3) Kaufman, J.G., R.J. Bucci and R.A. Kelsey,

- "Fracture Mechanics Aspects of the Structural Integrity Technology of Spherical Aluminum Containment Vessels for LNG Tankers", ASME J. Eng. Mater. & Technology, Vol.102, pp.303, 1980
- 4) Ando, A., S. Fujibayashi, K.W. Nam, M. Takahashi and N. Ogura, "The Fatigue Life and Crack Through Thickness Behavior of a Surface Cracked Plate (for the Case of Tensile Load)", JSME Int. J., Vol.30, pp.1898-1905, 1987
 - 5) Nam, K.W., S. Fujibayashi, K. Ando and N. Ogura, "The Fatigue Life and Crack Through Thickness Behavior of a Surface Cracked Plate (Effect of Stress Concentration)", JSME Int. J., Vol.31, pp.272-279, 1988
 - 6) 남기우, "고장력강의 피로수명과 균열관통거동에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제15권 제6호, pp.1990-2001, 1991
 - 7) Nam, K.W., K. Ando, N. Ogura and K. Matui, "Fatigue Life and Penetration Behaviour of a Surface Cracked Plate under Combined Tension and Bending", Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., Vol.17, pp.873-882, 1994
 - 8) Nam, K.W., K. Ando and N. Ogura, "The Effect of Specimen Size on the Behaviour of Penetrating Fatigue Cracks", Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., Vol.16, pp.767-779, 1993
 - 9) Nam, K.W., K. Ando and N. Ogura, "Surface Fatigue Crack Life and Penetration Behavior of Stress Concentration Specimen", Engng. Fract. Mech., Vol.51, pp.161-166, 1995
 - 10) Kwon, O. Y. and K. Ono, "Acoustic Emission Characterization of the Deformation and Fracture of an SiC-Reinforced, Aluminium Matrix Composite", J. of Acoustic Emission, Vol.9, pp.123-130, 1990
 - 11) 송성진, 최지웅, "대칭 적층 복합재 연소관의 탄성과 전파에 관한 실험적 연구", 비파괴검사학회지, 제18권 제3호, pp.191-204
 - 12) Ohira, T., T. Kishi and R. Horiuchi, "Acoustic Emission during Fatigue Crack Propagation in 7049 Al-Zn-Mg Alloy", JNDI, Vol.29, pp.189-197, 1988 (in Japanese)
 - 13) Ohira, T. and T. Kishi, "Effects of Mechanical Condition and Materials Characteristics on Acoustic Emission during Fatigue Crack propagation", JNDI, Vol. 30, pp.922-928, 1989 (in Japanese)
 - 14) Newman, J. C. Jr. and I. S. Raju, "An Empirical Stress-Intensity Factor Equation for the Surface Crack", Engng. Fract. Mech., Vol.15, pp.185-192, 1981
 - 15) Wheeler, O. E., "Spectrum loading and crack growth", J. Basic Engng., Vol.90, pp.181-186, 1972
 - 16) Ando, K., H. Matsushita, S. Fujibayashi and N. Ogura, "Separation and Fracture Toughness of Controlled Rolled Steel", J. Society of Materials Science, Vol.34, pp.388-393, 1985 (in Japanese)
 - 17) 남기우, 김선진, 이진찬, 오정환, 오세규, 이주석, "표면균열재의 피로균열 관통거동에 따른 어코스트에미션" 한국해양공학회지, 제11권 제3호, pp.29-38, 1997
 - 18) Elber, W., "Fatigue Crack Closure under Cyclic Tension", Engng. Fract. Mech., Vol.2, pp.37-45, 1970
 - 19) Guo, D., A. Mal and K. Ono, "Wave Theory of Acoustic Emission in Composite Laminate" J. of Acoustic Emission, Vol.14, pp.s19-s46, 1996