

## 부식된 알루미늄 합금의 피로균열진전에서 얻어진 음향방출

† 남 기 우 · 이 종 략\*

부경대학교 재료공학부, \*한국가스안전공사 가스안전기술연구원 연구개발실  
(2000년 11월 13일 접수, 2001년 2월 14일 채택)

### Acoustic Emission from Fatigue Crack Extension in Corroded Aluminum Alloys

†Kiwoo Nam and Jongrark Lee\*

*Pukyong National University, Division of Materials Science and Engineering*

*\*Korea Gas Safety Corporation, R&D Division*

*(Received 13 November 2000 ; Accepted 14 February 2001)*

#### 요 약

고강도 알루미늄 합금 2024-T3의 모재 시험편과 부식 시험편을 사용하여 피로 균열 진전에서 발생하는 음향방출 신호를 검출 분석하였다. 시험편 조건에 관계없이 5종류의 신호가 관찰되었다. 모재에서 얻어진 신호는 피로하중을 받으면서 균열 발생 초기 노치선단의 돌출과 함몰에 의한 높은 에너지를 가진 짧은 기간의 입내 파괴 신호이며, 부식 시험편은 피트 선단 근처의 결정경계의 취화로 인하여 입계 파괴 신호이다. 따라서, 파형과 파워 스펙트럼은 시험편 조건에 의존하는 것 같다. 시험편 조건에 의한 파형과 파워 스펙트럼을 해석함으로써, 구조부재의 다양한 손상과 결함으로부터 발생하는 균열 전파와 최종 파괴 과정의 실시간 감시 가능하다.

**Abstract** - The main objective of this study is to determine if the sources of AE in corroded specimens of aluminum could be identified from the characteristics of the waveform signals recorded during fatigue loading. Coupons of notched 2024-T3 aluminum with or without corrosion (at the notch) were subjected to fatigue loading and the AE signals were recorded using non-resonant, flat, wide-band transducers. The time history and power spectrum of each individual wave signal recorded during fatigue crack growth were examined and classified according to their special characteristics. Five distinct types of signals were observed regardless of specimen condition. The waveform and power spectra were shown to be dependent on specimen condition. During the initial phase of crack growth, the signals obtained in the as-received specimens are most probably due to transgranular cleavage caused by extrusion and intrusion under fatigue loading. In the corroded specimen the signal are probably generated by intergranular cleavage due to embrittlement of grain boundary near the pitting tip. The need for additional research to further validate these findings is indicated.

**Key words** : 2024-T4 aluminum, fatigue, acoustic emission signal, corrosion pit, waveform, power spectrum

### 1. 서 론

음향방출은 재료내부의 균열이나 결함의 파괴로 인하여 변형에너지의 갑작스러운 해방으로 발생하는 탄성파이다<sup>(1)</sup>. 이것은 하중을 받는 구조부재에 손상을 감시하기 위해서 사용되는 일반적인 비파괴 방법이다. 부하를 받는 구조부재에서 미세 파괴는 다양한 기구에 의하여 발생할 수 있다. 음향방출의 일차적인 것<sup>(2-6)</sup>은 상변환, 부식, 마찰, 자화공정 등 검출될 수 있는 음향을 발생시키는 동적변형과 파괴이다. 일반적인 비파괴 시험 방법<sup>(7-9)</sup>으로서, 음향방출은 구조물의 건전성 감시, 누설탐지, 초기 파괴의 감시에 사용되어지며, 재료 거동의 특성 평가에 사용될 수 있다. 더구나 음향방출은 다른 비파괴시험 방법보다 상당한 잇점이 있다. (1) 외부 하중을 받는 구조물에서 실시간에 데이터를 제공할 수 있는 동적 검사이다. (2) 한번의 시험으로 전 구조물에 대하여 불연속의 중요성을 검출하고, 평가 할 수 있다. (3) 종래의 비파괴적 방법과 기계적 시험 방법으로 검출할 수 없는 불연속성을 검출 할 수 있다. (4) 구조물의 설치 장소에서 검사를 수행 할 수 있다. (5) 미확인 불연속성을 갖는 구조물의 갑작스러운 파괴 방지와 밀폐된 구조물의 시험<sup>(10)</sup> 동안에 최대 압력을 제한하기 위해서 사용될 수 있다. 이러한 독특한 특성 때문에, 음향방출법은 다방면에서 성공적으로 사용되어지고 있다<sup>(11-16)</sup>.

본 연구에서는 2024-T3 알루미늄 합금의 모재와 부식 시험편을 사용하여, 피로하중 하에서 발생하는 음향방출 신호를 실시간으로 검출하고, 분류하였다.

### 2. 시험편

본 실험에서 사용된 시험편은 두께 1.57mm의 2024-T3 알루미늄합금으로, 모재와 부식 시험편 2종류를 사용하였다. 시험편의 형상과 치수를 Fig. 1에 나타내었다.

시험편의 그림은 음향방출 검출시 기계적인 노이즈를 감쇠시키기 위해서 에폭시 수지를 사용하여 부착하였다. 에폭시 수지의 경화는 섭씨 80도에서 20분간 열처리하였다. 부식 피트 시험편은 실온에서 16일 동안 약 7ppm의 0.5M NaCl 용액에 침적시켰다. 시험편은 노치면만 용액에 노출되도록 하기 위해서 다른 부

분은 락커로 밀폐시켰다. 노치면의 부식 외관을 Fig. 2에 나타내었다.

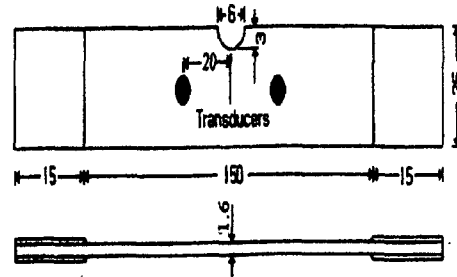


Fig. 1. Dimensions of specimens ; all dimensions in mm.



(x 300)

Fig. 2. Corrosion pit appearance of notch tip.

### 3. 실험 방법

피로실험은 서보 유압 피로시험기 (INSTRON model 8500)를 사용하여 실온에서 하중제어로 수행하였다. 파형은 사인파, 주파수는 1Hz, 용력비는 0.1이다. 음향방출의 검출은 Fracture Wave Detector (model F4000, Digital Wave Corp., Englewood, Co.)를 사용하였다. FWD는 실시간에 전 음향방출 파형을 디지털화 할 수 있으며, 디지털화 속도는 하한 계값 0.2V로 하고, 각 채널에 대하여 1024 point gate length인 12.5MHz로 하였다. 음향방출을 검출하기 위한 센서 2개(1.5MHz 응답성을 갖는 평판형)는 그림 1에서와 같이 노치로부터 같은 거리(20mm) 떨어진 위치에 설치하였다. 본 실험에서 30kHz - 2MHz plug-in

filter를 가지는 두 개의 40dB preamplifiers (AET 140B)가 사용되었다.

#### 4. 피로시험에서 얻어진 신호특성

피로시험 동안 균열 전파로 인한 신호와 노이즈 신호가 많이 검출 되었다. 알루미늄 시험편의 피로시험에서 얻어진 다양한 신호형태는 각 시험편에 대하여 파형과 파워 스펙트럼으로 분류하였다. 두 센서에 동시에 검출된 모든 신호형태를 특성화하고 그룹화하기 위해서 시각적 분류방법이 사용되었다. 피로시험에서 얻어진 신호의 시각적 분류방법을 Fig. 3에 나타내었다.

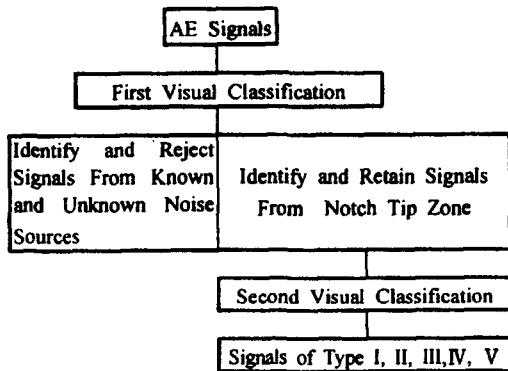
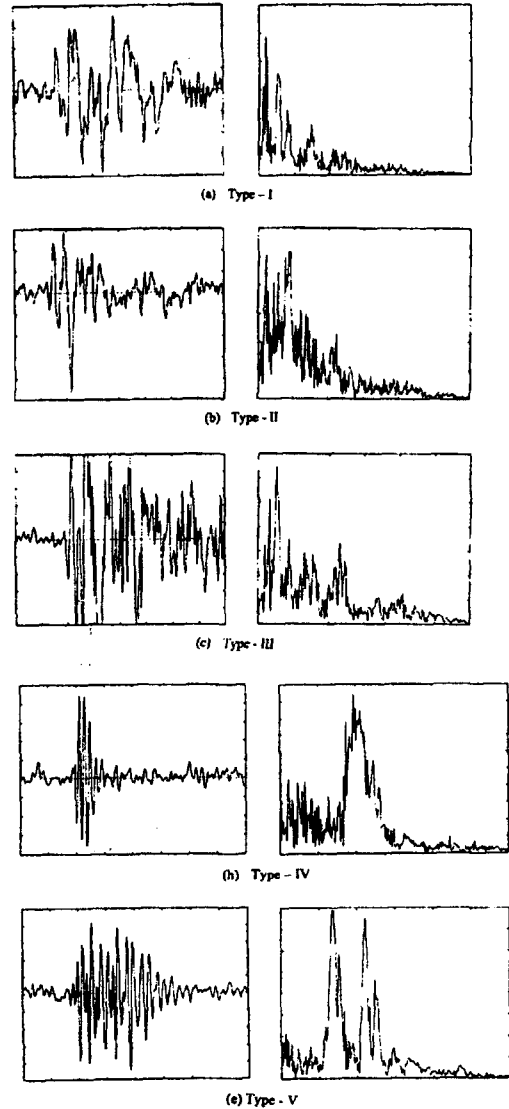


Fig. 3. Flow chart of visual classification of AE signals

모재와 부식 시험편에서 얻어진 신호를 분류하여 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4는 모재의 것이고, Fig. 5는 부식재의 것이다. 각 시험편의 신호 형태는 스펙트럼 특성에 의하여 5 종류로 나눌 수 있었다. 2종류 시험편에서 얻어진 Type I, Type II, Type III신호는 비슷한 특성을 가졌으나, Type IV, Type V는 두 시험편에서 다른 특성을 나타냈다. 두 시험편에서 얻어진 신호의 백분율을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Acoustic emission events classification

Type condition	I	II	III	IV	V
as-received(%)	3.1	12.5	15.6	25.0	43.8
corroded(%)	12.1	10.3	28.2	13.0	15.4



i) waveform      ii) power spectrum

Fig. 4. AE events detected during fatigue testing of as-received specimens ; Horizontal scale ;

i) time :  $5 \mu\text{s}/\text{div.}$ ,

ii) frequency :  $0.5\text{MHz}/\text{div.}$

Vertical scale : arbitrary

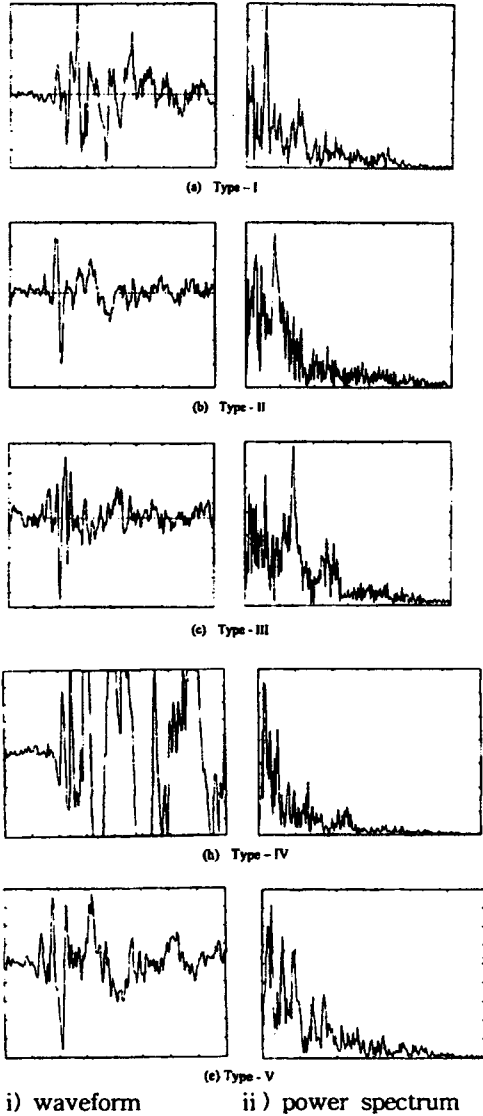


Fig. 5. AE events detected during fatigue testing of corroded specimens ;  
 Horizontal scale ;  
 i) time :  $5 \mu s/div.$ ,  
 ii) frequency :  $0.5MHz/div.$   
 Vertical scale : arbitrary

Type I, Type II, Type III신호는 모재 시험편에서는 균열이 노치 선단으로 어느 정도 떨어

진 곳까지 전파한 후 노치 선단에서 발생 한 것이고, 부식 시험편에서는 부식된 영역을 지난 후에 노치선단에서 발생한 것이다. 따라서 이러한 신호들은 부식에 의한 영향을 받지 않는다. Fig. 4, 5에서, Type I 신호는 파워 스펙트럼에서 대략 0.25MHz와 0.75MHz에서 뛰어난 값을 가진다. Type II 신호는 약 0.5MHz에서 뛰어난 값을 가지고, 약 1.0MHz에서 적은 피크값을 가진다. Type III신호는 약 0.25, 0.7, 1.2MHz에서 뛰어난 값을 가진다.

한편, Type IV 신호는 Fig. 4(모재 시험편)에서는 약 1.0MHz에서, Fig. 5(부식 시험편)에서는 약 0.15MHz에서 뛰어난 값을 가진다. Type V 신호는 Fig. 4에서는 약 0.7과 1.1MHz에서, Fig. 5에서는 0.5MHz이하에서 피크값을 가지며, 0.5MHz이후에서 적은 값을 가진다. Type IV와 Type V 신호는 모재에서는 비교적 균열전진의 초기 단계에서 얻어졌고, 부식 시험편에서는 부식 영역에서 얻어졌다. 따라서 Type IV와 Type V 신호의 발생기구는 두 시험편에서 다르다. 일반적으로 모재 시험편에서 얻어진 신호의 파형은 부식 시험편에서 얻어진 것 보다 더 높은 주파수 성분을 가진다. 이렇게 다른 이유에 대해서는 분명하지 않다. 그러나, 모재 시험편에서 얻어진 신호는 피로하중을 받으면서 균열 발생 초기 노치 선단의 돌출과 함몰에 의한 높은 에너지, 짧은 기간 입내 파괴로 발생한 것이라 생각된다 (Fig. 6(a)). 한편, 부식시험편은 노치 선단 근처의 결정경계의 취화로 인하여 입계파괴로 인한 신호라 생각한다.

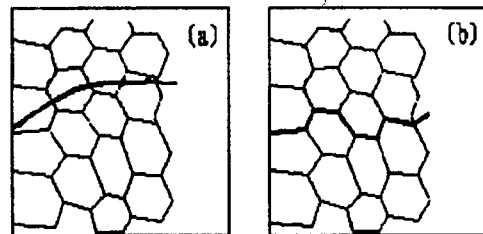


Fig. 6. (a) Transgranular fracture  
 (b) intergranular fracture

### 5. 고찰

고강도 알루미늄 합금에서 피로균열 성장은

표면에서 검출 될 수 있는 수많은 음향 방출이 발생한다. 시험에 사용된 재료는 2024-T3 알루미늄 합금으로 모재 시험편과 부식 시험편 두종류이다. 피로 시험에서 시험편 상태에 관계없이 5종류의 신호가 검출되었다. Type I, Type II, Type III 신호는 시험편 상태에 관계없이 비슷한 특성을 가졌다. 그러나, Type IV, Type V 신호는 파형과 파워 스펙트럼에서 다른 특성을 나타내었다. 이 신호들은 Lamb파이고, 판의 모서리에서 반사된 것이라고 생각된다. 본 실험에서 사용된 알루미늄 판의 분산 곡선을 Fig. 7에 나타내었다. 신호들의 대부분 스펙트럼 피크값은 1.2MHz이하 주파수이므로, 파형들은 최저 모드의 대칭(So)과 비대칭(Ao)으로 구성된다. 1MHz주파수에서, 파형속도는 대략 대칭파형(So)에 대해서는  $V_{gs}=4.4\text{mm}/\mu\text{sec}$ , 비대칭파형(Ao)에 대해서는  $V_{ga}=2.2\text{mm}/\mu\text{sec}$ 이다. 반사된 대칭파형(So)은 직접 전달된 So파형이 도착한 후, 약  $4\mu\text{sec}$ 후에 수신 트랜서듀서에 도착하기 시작하고, 직접 전달된 Ao파형은 So파형이 도착 후 약  $1\mu\text{sec}$ 후에 도착하는 것을 쉽게 알 수 있다. 그러므로, 검출된 파형의 처음  $4\mu\text{sec}$ 만이 순수한 So 모드 Lamb파이고, 나머지는 다양한 다른 파형들의 복합체이다. 신호들의 스펙트럼 성분은 반사된 것과 다양한 것들에 의하여 심각한 영향을 받으므로, 진전하는 균열 선단에서 전시간에 발생한 신호들과 파괴 기구에 대하여 관련성을 규명하는 것은 어렵다. 그러나 본 연구에서 실시한 두시험편에서 관찰된 파형의 스펙트럼 특성 차이는 신뢰할 수 있고, 대체적으로 구조물의 부식 존재를 검출할 수 있다.

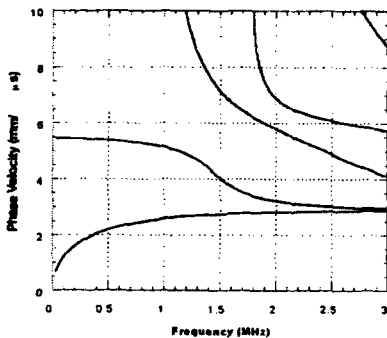


Fig. 7. Dispersion curves for aluminum plate.

## 6. 결 론

본 연구에서는 구조 건전성과 재료 거동 특성을 감시하기 위해서 음향방출 파형 관찰을 실시하였다. 고강도 알루미늄 합금의 파괴는 표면에서 검출 할 수 있는 수많은 음향방출 신호를 발생하였다. 사용된 재료는 2024-T3 알루미늄 합금으로, 모재 시험편과 부식 시험편 두 종류를 사용하였다.

시험편 조건에 관계없이 5종류의 신호가 관찰되었다. 두종류의 시험편에서, Type I, Type II, Type III신호는 시험편 조건에 관계없이 비슷하다. 그러나 Type IV와 Type V는 두 종류에서 다르다. 모재에서 얻어진 신호는 피로하중을 받으면서서 균열 발생 초기 노치선단의 돌출과 합몰에 의한 높은 에너지를 가진 짧은 기간의 입내 파괴 신호이며, 부식 시험편은 피트 선단 근처의 결정경계의 취화로 인하여 입계 파괴 신호이다. 따라서, 파형과 파워 스펙트럼은 시험편 조건에 의존하는 것 같다. 시험편 조건에 의한 파형과 파워 스펙트럼을 해석함으로써, 구조부재의 다양한 손상과 결함으로부터 발생하는 균열 전파와 최종 파괴 과정을 실시간 감시 가능하리라 생각한다.

## 참 고 문 헌

1. Annual Book of ASTM Standards, Section 3, "Metals Test Methods and Analytical Procedures", Vol.3 : *Nondestructive Testing*, ASTM, Philadelphia, Pennsylvania (1993).
2. S. Carpenter and M. Gorman, "A Waveform Investigation of the Acoustic Emission Generated during the Deformation and Cracking of 7075 Aluminum", *Progress in Acoustic Emission VII*, The Japanese Society for NDI (1994).
3. D. Buttle and C. Scruby, "Characterization of Fatigue of Aluminum Alloys by Acoustic Emission", *J. of Acoustic Emission*, Vol.9, No.4, 243~254 (1990).
4. C. Heiple, S. Carpenter and D. Armentrout, "Comments on the Origin of Acoustic Emission in Fatigue Testing of Aluminum Alloys", *J. of Acoustic Emission*, Vol.10, No.3-4, 103~106 (1992).

5. S. McBride, J. Maclanchlan and B. Paradis, "Acoustic Emission and Inclusion Fracture in 7075 Aluminum Alloy", *J. of Nondestructive Evaluation*, Vol.2, 35~41 (1981).
6. S. McBride and J. Harvey, "Effect of Temperature and Heat Treatment on Crack Growth Acoustic Emission in 7075 Aluminum", *Review of Progress in Qualitative Nondestructive Evaluation*, Vol.6A (1987).
7. M. Friesel, "Application of Signal Analysis to Acoustic Emission from a Cyclically Loaded Aluminum Joint Specimen", *Materials Evaluation*, No.47 (1989).
8. C. Scala and S. Cusland, "Acoustic emission during Fatigue of Aluminum Alloy 2024 ; The Effect of an Overload", *Materials Science and Engineering*, Vol.76 (1987).
9. I. M. Daniel, J. J. Luo, C. G.S ifriotopoulos and H. J. Chun, "Acoustic Emission Monitoring of Fatigue Damage in Metals", *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. Vol.16, 451~458 (1997).
10. Nondestructive Testing Handbook, 2nd ed., Vol.5, *Acoustic Emission Testing*, ASNT, Columbus, Ohio (1987).
11. D. Guo, A. K. Mal and K. Ono, "Wave Theory of Acoustic Emission in Composite Laminates", *J. Acoustic Emission*, Vol.14, S19~46 (1996).
12. O, Y, Kwon and K, Ono, "Acoustic Emission Characterization of the Deformation and Fracture of an SiC-Reinforced, Aluminum Matrix Composite", *J.Acoustic Emission*, Vol.9, 123~130 (1990).
13. M. R. Bhat, M. A. Majeed and C. R. L. Murthy, "Characterization of Fatigue Damage in Unidirectional GFRP Composites through Acoustic Emission Signal Analysis", *NDE&E International*, Vol.27, 27~32 (1994).
14. 송준희, 임재규, 정세희, "MSP 시험법에 의한 경사기능재료의 파괴인성 및 AE특성 평가", 대한기계학회논문집, 제19권, 제3호, 631~638 (1995).
15. 이유태, 김상태, 이택순, 권재도, 志波光晴, 岸輝雄, "AE에 의한 SiC/SiC 세라믹복합재료의 파괴기구 평가", 대한기계학회논문집, 제19권, 제10호, 2421~2430 (1995).
16. 송성진, 최지웅, 김학준, "복합재 구조물의 비파괴평가를 위한 탄성과 전파 연구", 대한기계학회논문집, 제22권, 제6호, 978~989 (1998).