

# 리벳구멍을 갖는 2024 알루미늄 합금의 피로 균열 진전 동안에 발생한 음향방출 파형 특성

남기우\* · 안석환\*\*

\*부경대학교 재료공학부, \*\*부경대학교 기계공학부

## Characteristics of the Acoustic Emission Waveforms from the Fatigue Crack Propagation of 2024 Aluminum Alloy with Rivet Hole

KI-WOO NAM\* AND SEOK-HWAN AHN\*\*

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

\*\*Division of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

**KEY WORDS :** Acoustic emission 음향방출, Waveform 파형, Power spectrum 파워 스펙트럼, Rivet hole 리벳구멍, Fatigue 피로, Lamb wave 판파

**ABSTRACT:** This study were looks at the effect of the initial cut length or stress concentration level, on the wave forms produced by crack propagation. The signals were collected, then classified visually for each type of sample. They were put into three classes according to their shapes in the time and frequency domain. Each class should contain signals which could be correlated to a certain micro-failure mechanism that occurs during the fatigue process. Classes of these signals compared, with each sample. To see if there were any classes common to the three samples. The fatigue test attempted to determine if the initial cut length has any influence on the type of signals.

### 1. 서 론

음향방출은 재료내부의 균열이나 결함의 파괴로 인하여 변형에너지의 갑작스러운 해방으로 발생하는 탄성파이다. 이것은 하중을 받는 구조부재에 손상을 감시하기 위해서 사용되어지는 일반적인 비파괴 검사 방법이다. 부하를 받는 구조부재에서 미세 파괴는 다양한 기구에 의하여 발생할 수 있다. 음향방출의 일차적인 것(Ono, 1994)은 상변환, 부식, 마찰, 자화공정 등 음향을 발생시키는 동적변형과 파괴이다. 일반적인 비파괴 시험 방법(Scott, 1992)으로서, 음향방출은 구조물의 건전성 감시, 누설탐지, 초기파괴의 감시에 사용되어지며, 재료 거동의 특성 평가에 사용될 수 있다(남과 김, 1999; 남 등, 1997; Nam, 1999).

음향방출은 특히 저사이클 피로 시험 동안에 피로 하중을 받는 재료에 있어서 균열의 발생과 전파를 검출하기 위해서 매우 유용한 것으로 인정되어 왔다. 음향방출은 피로균열의 시각적 관찰에 앞서 검출되며, 일단 균열이 발생하면 하중 사이클 함수로서 발생한다. (1) 균열의 성장과 개재물 파괴에서 발생하는 음향방출은 피크하중 근처에서 검출된다. (2) 하중이 0에 가까워짐에 따라서, 균열면의 부딪침과 개재물의 찌그러뜨림에서 균열폐구 노이즈는 음향방출로서 관찰된다. (3) 하중이 증가함에 따라서 기계적으로 함께 부착된 균열면은 분리되고, 음향방출 신호가 발생한다.

알루미늄 합금의 피로에서 발생된 음향방출은 많은 연구자에 의하여 상세하게 연구되어 왔다. 대부분의 연구(Carpenter, 1994; Buttle, 1990; Heiple, 1992)는 고강도를 가지고, 항공산업에 폭넓게 응용되는 2000과 7000 계열 알루미늄에서 실시하여 개재물이 음향방출에 영향을 준다고 하였다. 개재물의 크기, 분포와 음향방출 발생 분포와의 사이에 상당한 연관성이 있다고 보고하였고(McBride, 1981), 균열전단의 소성변형으로 개재물파괴에 의하여 발생할 수 있다고 하였다(McBride and Harvey, 1987). 7075 알루미늄의 피로중 음향방출의 원인을 연구하여 피크 하중에서 발생하고, 균열전단의 균열면 가까이에서 발생한다고 결론 지었다(Buttle and Scruby, 1990). 그리고, 7050과 7075 알루미늄의 인장-인장 피로시험 중 음향방출의 가장 대표적인 원인은 균열진전이라는 가설을 더욱 확실하게 하였다(Heiple, 1992). 이와 같이 유사한 연구결과는 다른 연구자들(Friesel, 1989; Scala, 1987; Daniel, 1997)에 의해서도 얻어져 있다.

본 연구에서는 리벳 구멍을 가지는 2024-T4 알루미늄 합금의 피로 균열 진전중에 발생하는 음향 방출 신호를 검출하여, 신호의 파형 형태를 분류하였다.

### 2. 시험편

본 연구에서 사용한 시험편은 두께 1.57mm의 2024-T4(Al-

4.4Cu- 0.6Mn-1.5Mg) 알루미늄 합금으로, 고강도와 T-temper에서 뛰어난 기계 가공성과 내부식성 때문에 항공기 구조물에 많이 사용되고 있다. 또한, 4.4%Cu 함량은 알루미늄 합금의 전연성을 향상시키므로, 항공 산업에 폭넓게 응용되고 있다. 시험편의 기계적인 특성을 Table 1에 나타내며, 형상과 치수를 Fig. 1에 나타낸다. 사용한 시험편의 노치 형상은 3가지를 사용하였다. 시험편의 리벳 구멍은 직경  $\varnothing 2.1\text{mm}$ 로 시험편 측면으로부터 15.5mm거리에 드릴로 만들고, 방전가공으로 0.5mm(Type-I), 1.0mm(Type-II), 1.5mm(Type-III) 노치를 가공하였다. 시험편의 그림은 음향방출 검출시 기계적인 소음을 감소시키기 위하여, 그림과 같이 예폭시 수지를 사용하여 부착하였다. 예폭시 수지의 경화는 24시간 상온에 방치한 후, 80°C에서 20분간 열처리하였다.

Table 1 Typical properties of aluminum

| Tensile strength<br>MPa | Yield strength<br>MPa | Failure strain<br>% | Elastic modulus<br>GPa | Hardness |
|-------------------------|-----------------------|---------------------|------------------------|----------|
| 470                     | 365                   | 19                  | 73                     | 42(Re)   |

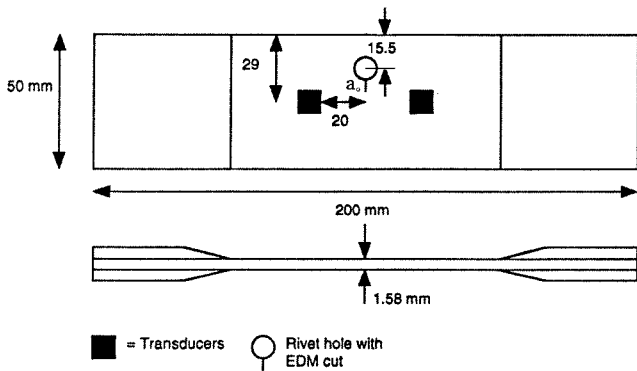


Fig. 1 Dimensions of specimen; all dimensions in mm

### 3. 실험방법

피로 시험은 유압 서보 피로시험기를 사용하여, 실온 대기중에서 하중제어로 실시하였다. 시험시의 제어는 정현파를 사용하고, 주파수는 2Hz, 응력비는  $R=0.8$ 로 하였다. 피로 시험시 최대하중은 파단하중의 60%로 하였다.

균열의 발생과 진전에 따라서 발생하는 음향방출 신호의 검출은 Fracture Wave Detector (model F4000, Digital Wave Corp., Englewood, Co.)를 사용하였다. FWD는 발생하는 모든 음향방출 파형을 디지털화시켜 저장한다. 검출되는 음향방출 신호의 디지털화 속도는 하한계 값 0.2V로 하고, 샘플링 속도는 12.5MHz이고, 샘플링 크기는 1024개이다. 음향방출을 검출하기 위한 센서 2개는 Fig.1에 나타난 것과 같이 노치를 중심으로 대칭적인 위치(20mm)에 부착하였다. 사용된 센서는 넓은 범위의 주파수 응답 특성을 가지는 PAC광대역 센서인 30k-2MHz plug-in filter이며, 두 개의 40dB 전치증폭기(AET 140B)를 거쳐 검출하였다.

### 4. 박판의 신호특성

연필심파괴는 시험편의 표면위에 직접 하중을 부하하는 기법이다(ASTM Standard E1067-85, ASTM Standard E976-84). 이것은 하중의 대칭적인 성분과 비대칭적인 성분을 가지며, 대칭적인 판파와 비대칭적인 판파를 발생한다. 그리고 이것은 직접파와 반사파를 가지게 된다.

연필심파괴에 의하여 얻어진 신호의 대표적인 예를 Fig. 2에 나타낸다.

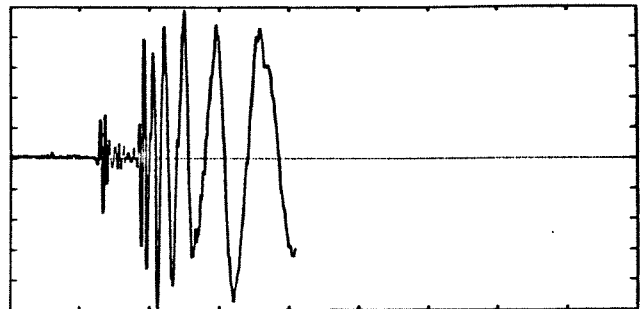


Fig. 2 Typical signal from pencil lead fracture horizontal scale ; 0.2us/div., Vertical scale ; arbitrary

이 그림에서 신호의 첫부분은 저진폭, 고주파수를 나타내며, 뒷부분은 고진폭, 저주파수를 나타낸다. 신호의 첫부분은 신호원에서 발생하는 파가 먼저 수신센서에 도착하므로 뒷부분보다 더 높은 상속도를 갖는 파이다. 이것은 판파 확산곡선에서, 0과 3MHz 사이의 주파수 범위에서 직접파가 반사파보다 더 높은 상속도 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 따라서 신호의 첫부분은 직접파이고, 뒷부분은 반사파이다. 직접파와 반사파의 스펙트럼 그래프에서도 고 스펙트럼 진폭값을 갖는 저 주파수 성분인 반사파와 저 스펙트럼 진폭값을 갖는 고 주파수 성분인 직접파를 볼 수 있다.

그리고, 직접파와 반사파 사이의 신호원과 센서 사이의 거리가 증가함에 따라서 반사파가 더 멀어지고, 더 쉽게 구별된다. 따라서 이동 거리가 클수록, 속도차는 빠른 직접파와 늦은 반사파 사이에 더 큰 지연이 나타난다.

이 두가지 형태의 음속은 일정한 거리 떨어진 두 개의 다른 센서에 기록된 파형을 비교함으로써 계산 할 수 있다.

$$c_i = d / (t_2 - t_1) \tag{1}$$

식(1)에서  $d$ 는 두센서 사이의 거리이고,  $i$ 는 직접파(e) 또는 반사파(f)를 나타낸다. 그리고,  $t_1$ 과  $t_2$ 는 판파가 각각 첫번째 센서와 두 번째 센서에 도착한 시간이다(Gorman, 1991).

실험과 계산에서 얻어진 직접파와 반사파의 속도를 Table 2와 Table 3에 나타낸다. 실험값과 계산값의 차이는 실험한 알루미늄판의 모서리 효과에서 발생한 것이라고 할 수 있다. Bulk 속도는 주파수나 두께에 의존하지 않고 일정하다.

**Table 2** Experimental plate wave velocities

| Extensional wave | Flexural wave |
|------------------|---------------|
| 5319m/s          | 2597m/s       |

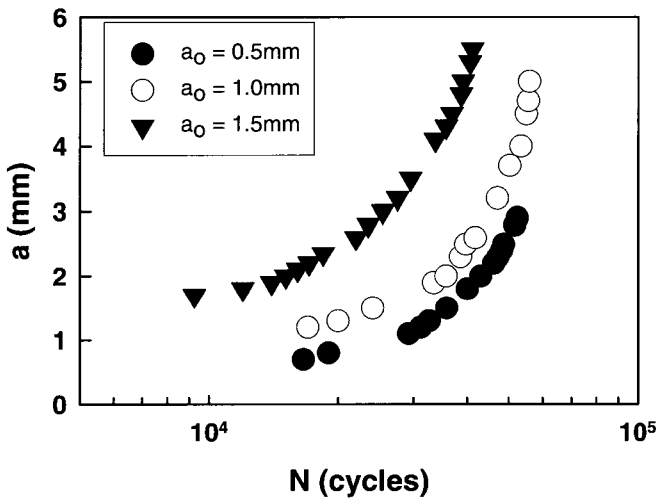
**Table 3** Theoretical plate wave velocities

| Material properties    | Plate velocities               | Bulk velocities      |
|------------------------|--------------------------------|----------------------|
| E=73GPa                | (extensional)                  | (longitudinal)       |
| $\rho=2.78\text{g/cc}$ | $c_e=5380\text{m/s}$           | $c_l=5950\text{m/s}$ |
| $\nu=0.34$             | (flexural)                     | (transverse)         |
| $t=1.58\text{mm}$      | $c_f=4.45(\sqrt{f})\text{m/s}$ | $c_t=3180\text{m/s}$ |

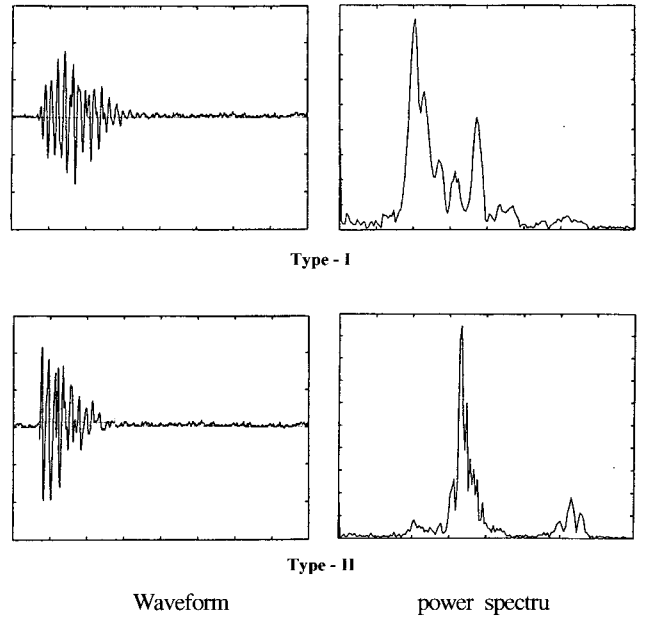
### 5. 피로시험에서 얻어진 신호특성

$\varnothing 2.1\text{mm}$ 의 드릴 구멍에서 초기 노치 길이를 달리하여 가공한 알루미늄 합금의 균열 진전 상황을 Fig. 3에 나타낸다. 이 그림은 같은 하중하에서 얻어진 것이다. 초기 균열이 길어짐에 따라 균열전단의 응력확대계수값이 커져서 균열의 진전이 빠르게 나타나 있다.

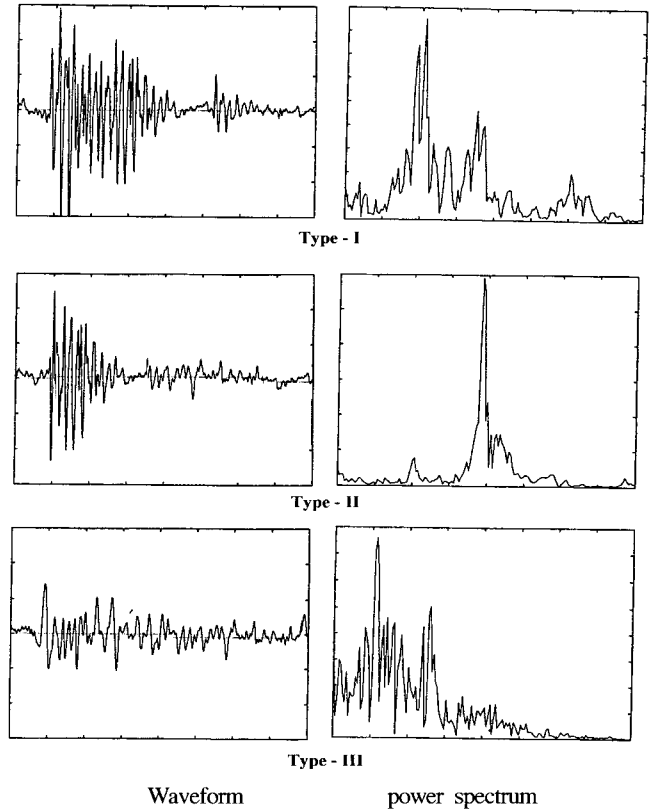
상기와 같은 리벳 구멍에서 균열이 진전할 때, 균열 진전으로 인한 많은 신호와 노이즈 신호가 발생하였다. 피로시험에서 얻어진 음향방출 신호를 각 균열길이에 대하여 파형과 파워 스펙트럼으로 분류한 결과를 Fig. 4, 5, 6에 나타낸다. 이들 신호들은 두 센서에 동시에 검출된 신호들만 사용하여, 시간적 분류방법을 사용하였다. Fig. 4는 초기 균열 길이 0.5mm, Fig. 5는 1.0mm, Fig. 6은 1.5mm일 때의 결과이다. 시험편의 신호 형태는 스펙트럼 특성에 의하여, 0.5mm의 결과인 Fig. 4는 Type-I과 Type-II 2 종류, 1.0mm와 1.5mm의 결과인 Fig. 5와 6은 Type-I,



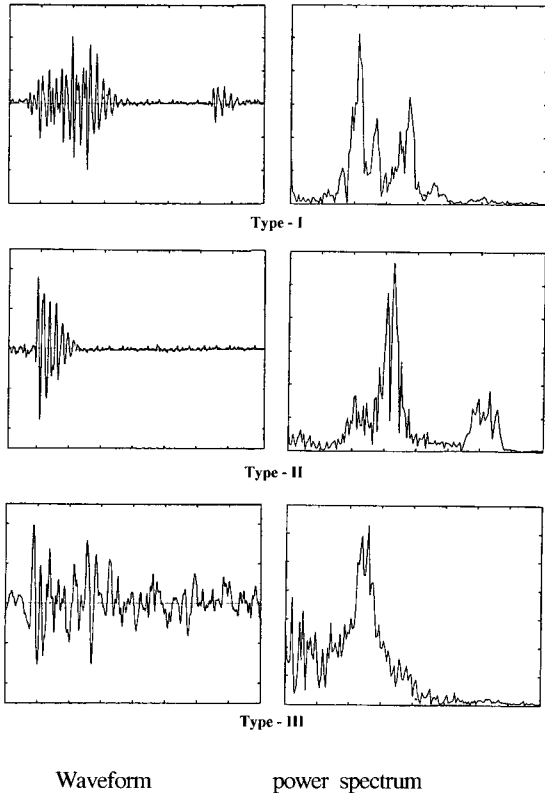
**Fig. 3** Crack length versus number of cycles for the three kinds of specimens



**Fig. 4** AE events detected during fatigue crack propagation at specimen with  $a_0=0.5\text{mm}$   
Horizontal scale; i) time:  $5\ \mu\text{s/div.}$ , ii) frequency:  $0.5\text{MHz/div.}$ ,  
Vertical scale : arbitrary



**Fig. 5** AE events detected during fatigue crack propagation at specimen with  $a_0=1.0\text{mm}$   
Horizontal scale; i) time:  $5\ \mu\text{s/div.}$ , ii) frequency:  $0.5\text{MHz/div.}$ ,  
Vertical scale: arbitrary



**Fig. 6** AE events detected during fatigue crack propagation at specimen with  $a_0=1.5\text{mm}$   
 Horizontal scale; i) time:  $5\mu\text{s}/\text{div.}$ , ii) frequency:  $0.5\text{MHz}/\text{div.}$ ,  
 Vertical scale: arbitrary

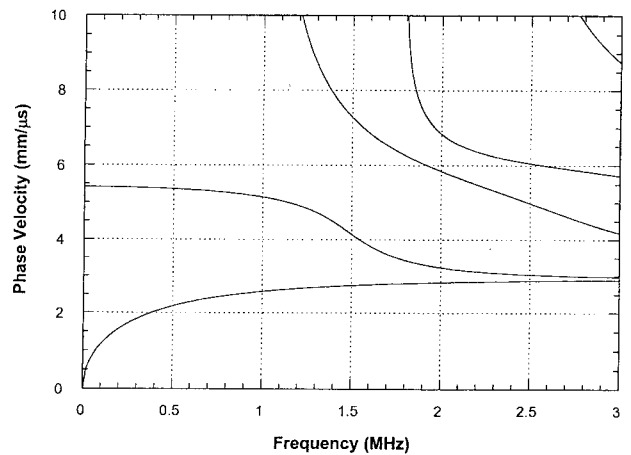
Type-II, Type-III의 3종류의 신호로 나눌 수가 있었다. 이들 신호들은 시간 영역과 파워 스펙트럼에 있어서 독특한 특성으로 분류되어 진다.

Fig. 4, 5, 6에서, Type-I 신호는 매우 예리한 상승과 하강하는 파형의 특성을 나타낸다. 주파수 성분이 급격하게 하강함에 따라서 신호들은 매우 짧은 시간동안 지속된다. 파워 스펙트럼에서 대략 1.0MHz에서 뛰어난 값을 가지고, 1.5MHz~2MHz사이에서 또 하나의 작은 피크값을 가진다. Type-II 신호 역시 매우 예리한 상승과 하강하는 파형을 나타내며, 고 주파수 성분의 특성을 나타낸다. 이 신호는 2개로 구분되는 파형을 나타내고 있다. 파워 스펙트럼은 1.5~2.0MHz 범위에서 뛰어난 값을 나타내며, 그 뒤에 작은 값을 나타내고 있다. Type-III 신호는 비교적 오랫동안 지속되는 파형을 나타내며, 상기 2가지 형태의 신호에 비하여 가장 낮은 1.5MHz이하 범위에서 분산된 파워 스펙트럼 주파수를 나타낸다.

## 6. 고 찰

고강도 알루미늄 합금에서 피로균열 성장은 표면에서 검출될 수 있는 수많은 음향 방출 신호가 발생한다. 시험에 사용된 재료는 2024-T4 알루미늄 합금으로 균열 길이가 다른 3종류이

다. 피로 시험에서 초기 균열 길이가 0.5mm의 것은 2종류, 1.0mm와 1.5mm는 3종류의 신호가 검출되었다. Type I, Type II, Type-III 신호는 초기 균열 길이에 관계없이 비슷한 특성을 가졌다. 이 신호들은 균열 진전에 따라서 발생한 판파이고, 직접파와 반사파라고 생각되어진다. 직접파는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 저진폭 고주파수를 가지는 것으로서, Type I의 일부성분과 Type II에서 얻어졌다. 그리고 반사파는 고진폭 저주파수를 가지는 것으로서, Type I의 일부성분과 Type-III에서 얻어졌다. 본 실험에서 사용된 2024-T4 알루미늄 박판의 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 센서에 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 판파이고, 나머지는 다양한 다른 파형들의 복합체이다. 진전하는 균열 선단에서 전 시간에 발생한 신호들과 파괴 기구에 대하여 관련성을 규명하는 것은 어렵다. 그러나 신호들의 스펙트럼 성분은 반사된 것과 다양한 것들에 의하여 심각한 영향을 받지 않는다. 따라서 균열 길이가 다른 시험편에서 관찰된 파형의 스펙트럼 특성은 신뢰할 수 있고, 균열의 존재를 검출하기 위하여 사용되어 질 수 있다.



**Fig. 7** Dispersion curves for aluminum plate (Mal and Singh, 1991)

## 7. 결 론

본 연구에서는 구조 건전성과 재료 거동 특성을 감시하기 위해서 음향방출 파형 관찰을 실시하였다. 고강도 알루미늄 합금의 파괴는 표면에서 검출할 수 있는 수많은 음향방출 신호를 발생하였다. 사용된 재료는 2024-T4 알루미늄 합금으로, 리벳 홀에서 가공한 초기 균열 길이가 다른 3종류의 시험편을

사용하였다. 시험편의 초기 균열 길이가 0.5mm 시험편은 2종류, 1.0mm와 1.5mm는 3종류의 신호가 관찰되었다. 3종류의 시험편에서, Type I, Type II, Type III신호는 초기 균열 길이에 관계없이 비슷하였다. 초기 균열 길이가 다른 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

- 남기우, 김선진(1999). “피로균열의 지연거동에 따른 수명예측 및 비파괴평가”, 한국해양공학회지, 제13권 제3호, pp 36~48.
- 남기우, 김선진, 이진찬, 오정환, 오세규, 이주석(1997). “표면균열체의 피로 균열 관통 거동에 따른 어코스티에미션”, 한국해양공학회지, 제11권 제3호, pp 29~38.
- ASTM standard E1067-85.
- ASTM standard E976-84.
- Arlt, G., Bottger, U. and Witte, S. (1993). “Emission of GHz shear waves by ferroelastic domain walls in ferroelectrics”, *Applied Physics Letters*, Vol. 63, pp 602~604.
- Buttle, D. and Scruby, C. (1990). “Characterization of Fatigue of Aluminum Alloys by Acoustic Emission”, *J. of Acoustic Emission*, Vol. 9, pp 243~254.
- Buttle, D. and Scruby, C. (1990). “Characterization of Fatigue of Aluminum Alloys by Acoustic Emission”, *J. of Acoustic Emission*, Vol. 9, pp 243~254.
- Carpenter, S. and Gorman, M. (1994). “A Waveform Investigation of the Acoustic Emission Generated during the Deformation and Cracking of 7075 Aluminum”, *Journal of Acoustic Emission*, Vol.13, No.1/2, pp S1~S7.
- Daniel, I. M., Luo, J. J., Sifniotopoulos, C. G. and Chun, H. J. (1997). “Acoustic Emission Monitoring of Fatigue Damage in Metals”, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. Vol. 16, pp 451~458.
- Friesel, M. (1989). “Application of Signal Analysis to Acoustic Emission from a Cyclically Loaded Aluminum Joint Specimen”, *Materials Evaluation*, No. 47, pp 38~45.
- Gorman, M. (1991). “Plate Wave Acoustic Emission”, *J. Acoustic Society of America*, Vol. 90, No. 1, pp 358~364.
- Heiple, C., Carpenter, S. and Armentrout, D. (1992). “Comments on the Origin of Acoustic Emission in Fatigue Testing of Aluminum Alloys”, *J. of Acoustic Emission*, Vol.10, pp 103~106.
- Mal, A. J. and Singh A. J. (1991). “Deformation of Elastic Solids”, Prentice Hall, pp 173~188.
- McBride, S., Maclanchlan, J. and Paradis, B. (1981). “Acoustic Emission and Inclusion Fracture in 7075 Aluminum Alloy”, *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 2, pp 35~41.
- McBride, S. and Harvey, J. (1987). “Effect of Temperature and Heat Treatment on Crack Growth Acoustic Emission in 7075 Aluminum”, *Review of Progress in Qualitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 6A, pp 353~360.
- Nam, K. W. (1999). “Acoustic Emission from Surface Fatigue Cracks in SS41 Steel”, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol. 22, No. 12, pp 1103~1109.
- Ono, K. and Huang, Q. (1994). “Pattern Recognition Analysis of Acoustic emission signals”, *Progress in Acoustic Emission VII*, The Japanese Society for NDI, pp 69~78.
- Scott, I. G. (1992). “Basic Acoustic Emission”, Gordon and Beach Science Publishers, pp 251~272.
- Scala, C. and Cusland, S. (1985). “Acoustic emission during Fatigue of Aluminum Alloy 2024 ; The Effect of an Overload”, *Materials Science and Engineering*, Vol. 76, pp 83~88.

2000년 8월 18일 원고 접수

2000년 12월 28일 수정본 채택