

< 논문 >

## 6061알루미늄의 피로 균열 성장과 관통에 따른 탄성파의 응력비 영향

안석환\* · 김진욱\*\* · 남기우†  
(2004년 10월 29일 접수, 2005년 3월 18일 심사완료)

### Influence of Stress Ratio of Elastic Waves Generated by Fatigue Crack Growth and Penetration in 6061 Aluminum Plates

Seok Hwan Ahn, Jin Wook Kim and Ki Woo Nam

**Key Words:** Surface Crack(표면균열), Fatigue(피로), Crack Penetration Behavior(균열관통거동) Signal Characteristics(신호특성), Elastic Wave(탄성파), Stress Ratio(응력비)

#### Abstract

The characteristics of elastic waves emanating from crack initiation and propagation in 6061 aluminum alloy subjected to fatigue loading with different stress ratio was investigated. The objective of this study is to determine the properties of the signals generated from each stage of fatigue crack growth. AS a crack propagates, substantial elastic wave occurred just prior to penetration. Then it decreased and the crack penetrated. The waveforms and their power spectra were found to be dependent on the different stress ratio associated with the signals. It is determined that high-frequency signal 0.5~0.75 MHz is most likely emitted during crack propagation at peak load of fatigue cycle which release the highest energy. It is determined that 0.3 MHz is closely related to crack closure effect. The frequency peaks below 0.25 MHz may be attributed to fretting or hydraulic noise.

#### 1. 서 론

육상의 대형 플랜트, 선박, 해상의 대형 플랜트는 항상 반복하중을 받고 있으며, 특히 구조물은 표면에 발생한 미소 균열이 성장하여 두께를 관통하는 손상이 발생할 가능성이 존재한다. 이와 같이 균열이 구조물의 두께를 관통하면, 치명적인 손상을 초래하며, 막대한 경제적, 인적 손실을 가져온다. 따라서 반복하중이 작용하는 구조물에 표면 균열이 발생하여 두께를 관통하는 거동에 관한 연구는 다양한 재료를 사용하여 많은 연구

자들에 의하여 실시되었다.<sup>(1-4)</sup>

한편, 탄성파는 다른 비파괴검사방법에 비교하여, 구조물중의 결함이 가동 상태에서 성장할 가능성이 있는 것을 검출 할 수 있고, 연속 감시가 가능하다는 장점으로 인하여 대형 구조물의 안전성 평가에 널리 응용되고 있다.<sup>(5,6)</sup> 이러한 장점 때문에 탄성파를 사용한 음향방출법은 피로 균열 진전에 대한 평가에 많이 실시되어 왔다. 그러나 대부분의 연구는 관통 균열의 진전에 관한 것이고,<sup>(7,8)</sup> 구조물의 안전성 측면에서 중요한 내·외면에 존재하는 표면 균열의 진전과 관통거동에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.<sup>(9)</sup> 또한 표면 균열 진전에 따른 탄성파 신호의 특성을 응력비 영향에 대하여 평가한 것은 찾아볼 수 없다. 따라서 육·해상의 대형 플랜트에 있어서 탄성파 특성을 사용한 음향방출법을 적용하면, 구조물의 점검시 표면 균열의 진전을 발견하지 못하는 치

† 책임저자, 회원, 부경대학교 신소재공학부  
E-mail : namkw@pknu.ac.kr  
TEL : (051)620-1640 FAX : (051)624-0746  
\* 회원, 부경대학교 기계공학부  
\*\* 회원, 한국기계연구원 공인시험평가부

명적인 경우는 없을 것이므로, 안전성 및 경제성 확보를 위하여 중요한 것이다.

따라서 본 연구에서는 응력비 변화에 의한 표면균열의 진전과 관통에 따르는 탄성파의 특성을 파악하기 위하여 선박, 차량, 육상 구조물에 많이 사용되는 Al-Mg-Si계 6061 알루미늄 평판을 대표적으로 사용하였다. 그리고 검출된 탄성파 신호는 균열 진전영역을 각 단계별로 나누어서 특성을 검토하였다.

## 2. 실험재료 및 실험방법

피로 균열진전과 관통에서 발생하는 탄성파 신호를 검출하기 위해서 사용한 6061 알루미늄 시험편의 형상과 치수는 Fig. 1에 나타낸다. 노치는 방전 가공( $a_0=4.4$  mm,  $b=2.4$  mm)에 의하여 시험편의 중앙에 가공하였다. 노치의 폭은 0.2 mm였다. 피로시험은 용량 0.098 MN의 유압피로시험기 (INSTRON Model 8500)를 사용하여 실온 대기중에서 하중제어로 실시하였다. 파형은 사인파, 주파수는 2 Hz, 응력비는  $R=0.1(AT1)$ 과  $0.5(AT2)$ 로 하였다.

탄성파의 검출은 Fracture Wave Detector (FWD; Model F4000, Digital Wave Corp., Englewood, Co.)를 사용하여 실시하였다. FWD는 실시간에 전 탄성파 파형을 디지털화 하여 저장한다. 디지털화 속도는 하한계 값 0.2V로 하고, 샘플링 속도는 12.5 MHz이고, 샘플링 크기는 1024개이다. Fig. 2와 같이 성능을 가지는 두 개의 센서(DWC B1025)는 Fig. 1에 나타내듯이 노치를 중심으로 20 mm 떨어진 거리인 대칭위치에 설치하였다. 즉, 동일한 시간에 2개의 센서에 검출되는 탄성파가 균열의 진전에서 발생하는 것이고, 시차를 두고 검출된 것은 노이즈로 하였다. Preamplifier (AET140B)는 30 kHz~2 MHz plug-in filter를 갖는 40dB로 두 개를 사용하였다. 실험에 있어서, 탄성파 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. 1에서와 같이 그림 부분에 에폭시 수지를 사용하여 얇은 알루미늄 보강판을 부착하여 기계적인 노이즈를 줄였다.

또한 실험시에는 시험기의 지그 부분에 진흙을

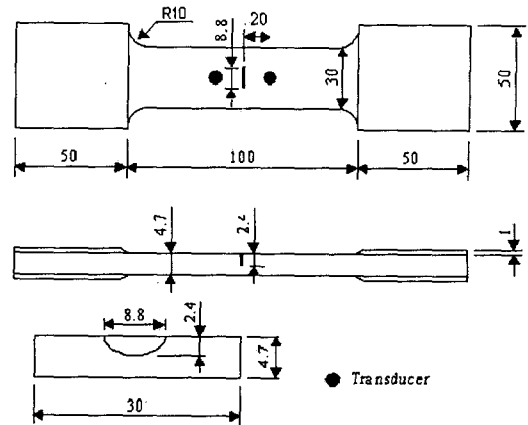


Fig. 1 Geometry of the test specimen. All dimensions are in millimeters

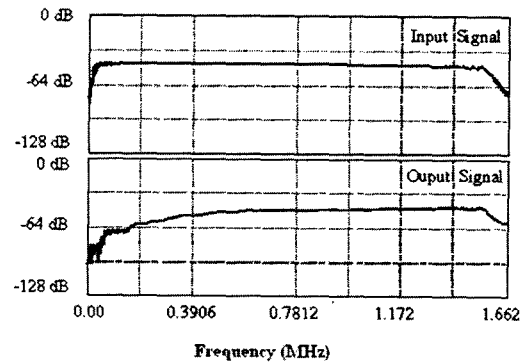


Fig. 2 Swept sine wave face-to-face calibration of B1025 sensors

사용하여 시험기로부터 시험편에 유입되는 노이즈를 감소시켰다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 피로균열의 성장거동과 음향방출

6061 알루미늄을 사용하여 피로 균열 진전과 관통에서 발생하는 탄성파 신호를 검출하였다. 본 연구에서 실시한 시험편과 같은 노치형상에서 성장하는 균열의 성장 거동의 개략도를 Fig. 3에 나타낸다. 이러한 균열성장특성은 저자들<sup>(10)</sup>에 의하여 보고되었다. 그림에서, 앞면에서 발생한 균열 진전 거동은 균열이 뒷면에 관통한 후에도 큰 변화는 없고, 연속적인 거동을 나타내고 있다. 이

것에 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 균열 길이가 앞면의 균열길이에 접근하여 파단에 이르는 영역이다.

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

균열 성장에 따른 무차원 누적 탄성파(하중 반복수의 탄성파/파단시의 총 탄성파)와 무차원 하중 사이클과(하중 반복수/파단 반복수)의 관계를 Fig. 4에 나타낸다. 원형은 시험편AT1의 결과이며, 삼각형은 시험편AT2의 결과이다. 이것은 두 센서에 동시에 검출된 신호를 정리한 것이다. 두 시험편에서 하중 사이클의 증가와 함께 신호의 발생은 완만한 발생을 보이고 있다. 그러나 표면균열이 성장하여 두께 방향으로 진전함에 따라서 신호의 발생은 급격하게 나타나고 있다. 신호의 발생은 판 두께 관통 전에 많이 발생한 후, 관통 직전에 발생이 줄어들면서 두께를 관통하고 있다. 즉, 표면균열이 진전하여 시험편 두께의 한 가운데 부분에서는 평탄한 파면이 부딪치는 프레팅 현상이 발생함으로써 많은 신호가 발생한다고 판단된다. 이것은 SS41을 사용한 연구 결과와 유사한 경향이다.<sup>(11)</sup>

한편, 관통 후 신호의 발생은 시험편AT1에서 하중 사이클의 증가와 함께 급상승하여 파단에 이

르고 있으나, 시험편 AT2는 신호의 발생이 적다.

이것은 응력비의 영향으로 시험편AT1은 큰 변동응력으로 Fig. 5에 나타내듯이 균열선단에 큰 소성변형을 동반하며,<sup>(12)</sup> 균열의 진전이 빠르지만, 시험편AT2는 균열 선단에 형성되는 소성변형이 작기 때문이라고 판단한다. 그 후 파단 직전에는 시험편AT1과 같은 거동을 나타내고 있다.

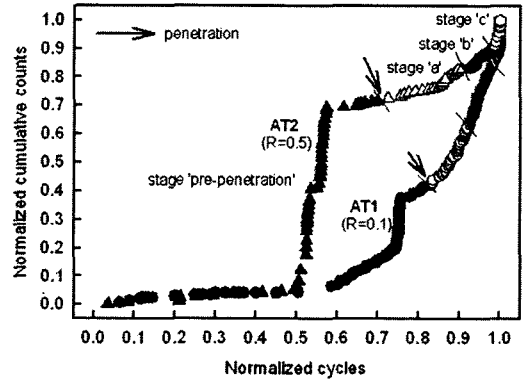


Fig. 4 Relationship between normalized signals and normalized load cycles

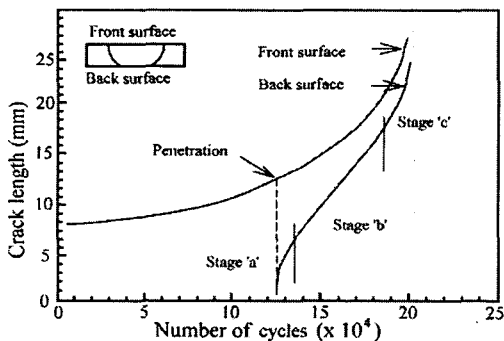


Fig. 3 Schematic diagram of crack propagation behavior in surface crack

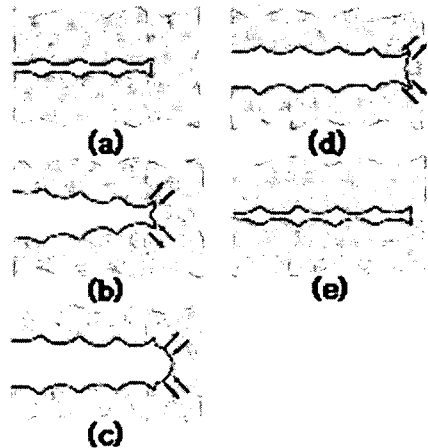


Fig. 5 Schematic diagrams of formation of striations in the fatigue crack propagation. (a) zero load, (b) small tension load, (c) maximum tensile load, (d) small compressive load, (e) maximum compressive load

### 3.2 신호특성

본 실험에서와 같이 두께가 두꺼운 시험편은 표면균열 길이가 균열 깊이 보다 긴 경우, 깊이 방향의 응력확대계수 값이 더 크다. 따라서 균열 진전은 표면보다 깊이방향으로 균열의 진전이 먼저 발생하여 진전한다. 그 후 균열은 표면에서도 발생하여 진전하면서 관통한다. 이러한 균열 진전 과정에서 검출된 탄성파 신호를 영역별로 구분하여, 분류된 파형과 파워 스펙트럼을 Fig. 6에 나타낸다. 스펙트럼 분류형태는 다음과 같이 구분하였다.

- Type-I : 0.5 MHz 주위 강한 값.
- Type-II : 0.3 MHz 주위 강한 값.
- Type-III : 0.75 MHz 주위 강한 값.
- Type-IV : 0.3, 0.5, 0.75 MHz 주위 강한 값.
- Type-V : 0.15 MHz 주위 강한 값.
- Type-VI : 0.25, 0.7 MHz 주위 강한 값.

Fig. 6에서 스펙트럼은 약 3 MHz까지 나타내었지만, 파형은 Fig. 2에 나타내듯이 1.5 MHz 이상의 주파수에서 센서 응답성에 의하여 변형이 된다. 더구나, 고주파수의 신호는 센서의 유효직경(약 5 mm)에 영향을 받으며, 검출된 모든 신호의 스펙트럼은 1.5 MHz 이상의 주파수에서 급격하게 감소하였다.<sup>(13)</sup> Type-I ~ V 파형은 10  $\mu$ s에서 20  $\mu$ s 사이에 나타나는 팽창파(extensional wave)가 지배적이지만, Type-VI는 반사파(flexural wave)가 20  $\mu$ s 이후에 강하게 나타나고 있다.

스펙트럼에서 Type-I은 대략 0.5 MHz 근처에서 강한 값이 나타나며, 전후에서 작은 값이 나타나고 있다. Type-II는 대략 0.3 MHz 근처에서 강한 값이 나타나며, 전후에서 작은 값들이 많이 나타나고 있다. Type-III는 대략 0.75 MHz 근처에서 강한 값이 나타나며, 고주파수 범위에서도 작은 값이 나타나고 있다. Type-IV는 대략 0.3, 0.5, 0.75 MHz 근처에서 강한 값이 나타나며, 0.3 MHz 이전과 0.75 MHz 이후에도 작은 값이 나타나고 있다. Type-V는 대략 0.15 MHz 근처에서 강한 값이 나타나며, Type-IV와 유사하게 0.5 MHz, 0.75 MHz에서도 나타난다. 응력비 0.5에서만 나타나는 Type-VI는 0.25 MHz와 0.7 MHz 근처에서 강한 값이 나타나며, 이 후에도 작은 값이 나타나고 있다. 이것은 '관통 전', 관통 후 'a', 'b' 영역에서만 나타나는 것으로 응력비의 영향이라고 판단되지만, 금후 연구할 과제다.

상기에서 얻어진 신호의 형태를 100%로 하여, 간 단계별에서 얻어진 신호를 백분율로 분류하여 Table 1에 나타낸다. 여기서 P.P(Pre-Penetration)는 관통 전을 의미한다. 6061알루미늄 시험편을 사용하여 응력비가 다른 조건에서 피로시험을 실시한 결과는 거의 유사한 신호가 발생하고 있다. 3차원적으로 균열이 진전하는 '관통전' 영역에서는 Type-I과 Type-III 형태의 신호가 주류를 이루고 있다. 관통후 'a' 영역은 Type-I, 'b' 영역은 Type-II 형태가 주신호로서 검출되고 있다. 또한 최종 파단에 가까운 'c' 영역은 Type-I이 주류를 이루

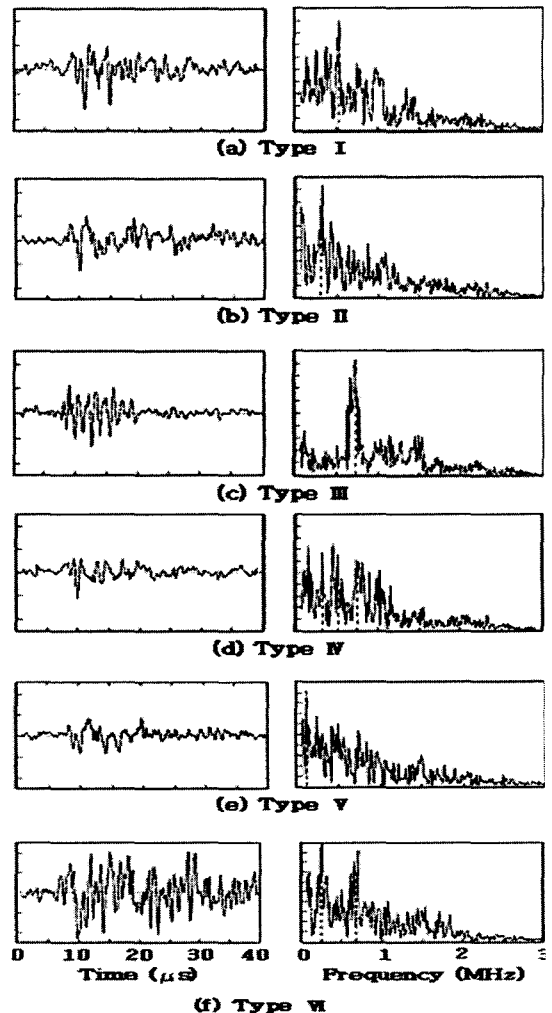


Fig. 6 AE waveforms and their spectra detected during fatigue crack propagation. Vertical scale is arbitrary

며, Type-V가 일부 검출되고 있다. 한편, 응력비가 0.5인 시험편AT2는 '관통전', 'a' 영역, 'b' 영역에서 Type-VI의 신호가 검출되었다.

탄성과 신호 특성의 차이는 고주파수인 팽창파와 저주파수인 반사파의 혼합에 의하여 나타나며, 두 가지 파형의 상대적인 양은 시험편 표면에 대한 균열의 거리에 관계가 있다고 할 수 있다.<sup>(14)</sup> 균열이 판 두께를 진전함에 따라서, 신호 특성은 두 가지 파형의 결합 비율 차이에 의한 간섭으로 변한다. 더구나 다른 형태의 신호는 피로 하중의 함수로서 균열 발생과 전파로 발생 할 수 있다. 피로 하중이 0에 접근함에 따라서 균열은 닫히게 될 것이고, 신호는 균열 표면 프레팅에서 발생한다. 이런 신호는 균열 성장에서 발생하는 신호와 다른 주파수 특성을 가지고, 노이즈로 분류하여 버릴 수도 있다. 하중이 증가함에 따라서 기계적으로 부착된 균열 표면은 분리되고, 균열 성장으로 신호가 발생한다.

이상의 탄성과 특성에서, 비교적 고주파수인 0.5~0.75 MHz의 탄성파는 높은 에너지가 해방되는 최대 피로 하중의 균열 진전동안 대부분 검출되었다. 0.3 MHz 이하는 최대 피로 하중이하에서 대부분 검출하였다. 즉, 0.3 MHz는 균열 닫힘 효과와 밀접한 관련이 있고, 0.25 MHz 이하는 프레팅 또는 기계적 노이즈와 밀접한 관련이 있다고 판단된다.

#### 4. 결론

6061알루미늄 시험편을 사용하여 응력비가 다른 조건하에서 피로 균열 진전과 관통에서 발생하는 탄성과 신호를 검출하였다. 그리고 검출된

탄성과 신호는 균열 진전영역을 각 단계별로 나누어서 파형형태와 파워스펙트럼을 비교 검토하였다. 탄성과 신호의 누적 카운트는 균열이 두께를 관통하기 전에 많이 발생한 후, 감소하면서 관통하고 있다. 응력비가 달라짐에 따라서 신호의 발생 거동은 다르게 나타났다. 탄성파의 특성은 비교적 고주파수인 0.5~0.75 MHz는 높은 에너지가 해방되는 최대 피로 하중의 균열 진전동안 대부분 검출되었다. 0.3 MHz는 균열 닫힘 효과와 밀접한 관련이 있고, 0.25 MHz 이하는 프레팅 또는 기계적 노이즈와 밀접한 관련이 있다.

#### 참고문헌

- (1) Gilchrist, M. D., Chipalo, M. I. and Smith, R. A., 1992, "Shape Development of Surface Defects in Tension Fatigued Finite Thickness Plates," *Int. J. Press. Piping*, Vol. 49, pp. 121~137.
- (2) Nam Ki-Woo and Ahn Seok-hwan, 2002, "Crack opening behavior of penetrated crack under fatigue load," *KSME International Journal*, Vol. 16, No. 1, pp. 24~31.
- (3) Nam Ki-Woo, Ahn Seok-Hwan, Yoo Yeon-Sik and Ando Kotoji, 2002, "Crack opening behavior of penetrated crack under cyclic or monotonic loading," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 214, Issue 3, pp. 221~229.
- (4) Nam, K. W., Iwase, K. and Ando, K., (1995), "Fatigue Life and Surface Crack Penetration Behaviour of an Aluminium Alloy," *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* Vol. 18, No. 2, pp. 179~187.
- (5) Nam Ki-Woo and Ahn Seok-Hwan 2004, "Fracture Behaviors and Acoustic Emission Characteristics of Pipes with Local Wall Thinning," *Key Engineering Materials*, Vol. 270-273, pp. 461~465.
- (6) Lee Sang-Guk, 2004, "Leak Detection and Evaluation for Power Plant Boiler Tubes Using Acoustic Emission," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 24, No. 1, pp. 45~51.
- (7) Nam Kiwoo and Lee Kunchan, 2003, "Frequency Characteristics of Acoustic Emission Signal from

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

| speci. | Type stage | I    | II   | III  | IV   | V    | VI   | R   |
|--------|------------|------|------|------|------|------|------|-----|
|        |            | AT1  | P.P  | 51.0 | -    | 42.9 | 6.10 |     |
| a      | 61.5       | 23.3 | -    | -    | 15.2 | -    | -    |     |
| b      | -          | 81.5 | 3.70 | -    | 14.8 | -    | -    |     |
| c      | 90.0       | -    | -    | -    | 10.0 | -    | -    |     |
| AT2    | P.P        | 45.4 | -    | 27.3 | -    | -    | 27.3 | 0.5 |
| a      | 75.0       | -    | -    | -    | -    | -    | 25.0 |     |
| b      | -          | 69.2 | -    | -    | -    | 15.4 | 15.4 |     |
| c      | 74.5       | -    | -    | -    | -    | 25.5 | -    |     |

- Fatigue Crack Propagation in 5083 Aluminum by Joint Time-Frequency Analysis Method," *J. Ocean Engineering and Technology*, Vol. 17, No. 3, pp. 46~51.
- (8) Yoon, D. J., Jeong, J. C., Park, P., Lee, S. S. and Kim, K. B., 2002, "Characteristics of Fatigue Crack Opening and Closure in Structural Aluminum Alloy," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 22, No. 2, pp. 155~169.
- (9) Ahn Seok-Hwan and Nam Ki-Woo, 2003, "Characteristics of Elastic Waves Generated by Fatigue Crack Penetration and Growth in an Aluminum Plate," *KSME International Journal*, Vol. 17, No. 11, pp. 1599~1607.
- (10) Nam, K. W., Ando, K., Ogura, N. and Matui, K., 1994, "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.
- (11) Nam KiWoo, 1999, "Acoustic Emission from Surface Fatigue Cracks in SS41 Steel," *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol. 22, No. 12, pp. 1103~1109.
- (12) Laird, C., 1967, "The Influence of Metallurgical Structure on the Mechanisms of Fatigue Crack Propagation," *ASTM STP 415*, pp. 131~168.
- (13) Nam Kiwoo and Mal, Ajit, 2001, "Characteristics of Elastic Waves Generated by Crack Initiation in Aluminum Alloys under Fatigue Loading," *J. Mater. Res.*, Vol. 16, No. 6, pp. 1475~1751.
- (14) Wu, J. U., 1995, "Characteristics of Acoustic Emission from Fatigue of 2024-T4 Aluminum using Pattern Recognition," Mater's Thesis, University of California, Los Angeles, CA.