

알루미늄 합금의 랜덤하중 하에서 발생한 피로파면 해석방법

김상태[†], 최성종*, 양현태**, 이희원**

(2003년 3월 17일 접수, 2003년 10월 18일 심사완료)

Fractographic Analysis Method of Fatigue Fracture Surface under Program and Random Loading for Aluminum Alloy

Sang Tae Kim, Sung Jong Choi, Hyun Tae Yang and Hi Won Lee

Key Words : Fractography(프랙토그래피), Micro-Fractography(마이크로 프랙토그래피), Fatigue(피로), Striation(스트라이에이션), Random Loading(랜덤 하중)

Abstract

Striation is a typical pattern observed on the fatigue fracture surface and the spacing is known to correspond to a macroscopic fatigue crack growth rate, and many models for the predict in the formation of such striation have been proposed. However, these theories and methods can't be applied under random loading spectrum. In this study, the fatigue tests were carried out on aluminum alloy under random loading spectrum. The fatigue fracture surfaces were observed in the scanning electron microscope (SEM) and great quantities of SEM micrographs were synthesized and saved in computer system. The space and morphology of several large-scale striations, which are expected to form at the relatively greater load range in loading block, were observed. The crack length for each loading blocks was decided in consideration of regularity and repetition of those striations. It is shown that the applicability of fractographic methods on the fatigue fracture surface under random loading spectrum.

1. 서론

균열의 생성 및 성장에 의하여 형성된 재료의 파면에는 균열의 발생 및 진행과정을 나타내는 특징적인 흔적들이 남아 있으며, 이러한 흔적을 관찰하여 검토 분석함으로써 균열발생 원인과 성장 기구의 해명에 관련된 중요한 정보를 얻을 수 있다.⁽¹⁾ 한편, 파면 해석학적 방법 또는 그 학문적 분야를 의미하는 프랙토그래피(fractography)는 현미경의 발달과 더불어 발전하여 왔다. 육안 및 저배율의 광학 현미경을 관찰수단으로 사용하는 매크로 프랙토그래피(macro-fractography)를 거쳐 고배율의 광학 현미경, 주사형 전자 현미경(Scanning Electron Microscope: SEM) 및 투과형 전자 현미경(Transmission Electron Microscope: TEM)과 같은 전자현미경을 주로 사용하는 마이크로 프랙토그래피(micro-fractography)로 대변되는 시기에 이르러 급속한 발전을 이루었다⁽²⁾. 현재 널리 인식되어지고 있는 파괴역학적 연구결과 중의 많은 부분들이 마이크로 프랙토그래피를 이용한 파면 해석학의 산물이며, 또한 표면 및 파면 해석에 있어서 파괴역학과 관련된 정량적, 직접적 증거자료를 제시할 수 있는 관찰 수단으로서 가장 많이 사용되어지고 있다.

피로 분야도 마이크로 프랙토그래피에 의하여 많은 발전을 이루었으며, 피로균열의 성장단계는 결정학적 파괴를 일으키는 [제 1 단계], 결정학적 특징면에 의존하지 않고 하중진폭에 의존하여 하중방향에 수직하게 진전하는 [제 2 단계], 피로수

[†] 책임저자, 회원, 영남대학교 기계공학부
E-mail : stkim@ynuucc.yeungnam.ac.kr
TEL : (053) 810-2456, FAX : (053) 810-3703

* 회원, 영남대학교 기계공학부

** 영남대학교 대학원

명의 최후에 외력에 견디지 못하고 파괴되어 정적인 인장시험에서 볼 수 있는 파면과 동일한 파면을 형성하는 [제 3 단계]로 나누어지고 있다⁽²⁾.

특히, 역학적인 지배를 받는[제 2 단계]의 파괴파면에 대하여 집중적인 연구가 이루어져, 이 단계에서는 전형적인 파괴파면의 특징적인 형태로서 잘 알려져 있는 스트라이에이션(striation)이 형성되며, 그 모양은 각 하중 사이클에 대응한다고 알려져 있다. 또한 스트라이에이션 간격은 특정구간에서 거시적인 균열진전속도 da/dN 과 거의 일치한다고 알려져 있으며, 형성 기구에 관해서는 Laird 에 의한 비결정학적 모델⁽⁴⁾과 이것을 결정학적으로 발전시킨 Pelloux 및 Broek 에 의한 결정학적 모델^(5,6)이 일반적으로 받아들여지고 있다.

일정 응력진폭 하에서 스트라이에이션은 각 응력 반복 횟수에 대응하며, 진폭이 클수록 그 간격이 증가한다. 또한 스트라이에이션은 일정 응력진폭 하에서 뿐만 아니라 변동 응력진폭 하에서도 형성된다고 잘 알려져 있다. 그러므로 변동 응력진폭 하에서 형성되는 스트라이에이션을 검토하는 것은, 변동응력 하에서의 미시균열 진전속도를 검토하는 것이 되며, 실동응력으로 파괴된 부재에 작용한 응력의 크기와 빈도를 추정할 수 있는 근거를 마련하는 것이 된다. 더욱이 이러한 검토로부터 스트라이에이션에 미치는 응력파형의 영향을 조사 함으로써 그 형성기구와 파괴균열 진전기구에 관련된 중요한 정보를 얻을 수 있다. 이러한 견지에서 변동 응력진폭 하에서의 스트라이에이션 형성에 관하여 많은 연구⁽⁷⁻¹¹⁾가 이루어져 왔다.

2024-T3 알루미늄 합금으로 응력 비를 $0 < R < 1$ 로 하여 실행한 J. C. McMillan 의 연구결과⁽⁷⁾에 의하면, 진폭을 일정하게 유지하고 최대응력을 변화시킨 경우에는 부하하중이 최대 인장응력 부하과정에서 스트라이에이션 간격의 점프(jump) 현상이 발생하여 매우 큰 간격으로 형성되며, 최대응력을 일정하게 유지하고 응력진폭을 변화시킨 경우에는 응력진폭을 변화시킨 직후에 급격한 간격의 변화는 일어 나지 않으며 응력진폭이 파소하면 스트라이에이션은 형성되지 않는다고 보고하고 있다. 이와 같은 현상은 균열닫힘(crack closure) 현상이나 유효응력(σ_{eff}) 등으로 설명되어지고 있다.⁽⁹⁾

그러나 이러한 대부분의 연구들은 단순화된 블록 랜덤(block random)형 하중에 대하여 주로 검토하고 있기 때문에, 그 결과를 실제 동하중 즉 완전 변동하중에 적용하기에는 충분하다고 할 수 없다. 실제 동하중의 경우에는 하중의 크기와 스트라이에이션 간격의 크기가 비례하지 않을 가능성이 있으며, 하중의 크기나 전후 하중의 크기에 따

라서 스트라이에이션이 형성되지않는 하중 사이클이 존재하기 때문에 파면에 형성되는 스트라이에이션이 반복하중 사이클과 일대 일의 대응으로 형성되지 않는다.

본 연구는 하중사이클의 크기 및 형태를 알고있는 실제 동하중으로 파괴된 파괴파면 상에서, 각 하중 블록에 대응하는 균열성장 길이를 결정하는 방법에 관하여 검토하였으며, 또한 하나의 블록 내에서 하중 사이클과 스트라이에이션의 대응관계에 관해서도 검토하고자 한다.

2. 시험편 및 실험방법

본 연구에서 사용된 재료는 2000 계열의 구조용 알루미늄합금이며 시험편의 형상은 Fig. 1 과 같다. 또한 초기균열을 시험편의 중앙부에서 발생시키기 위하여 두께 0.25mm, 직경 1.5mm 의 원판을 사용하여 시험편 두께방향으로 Pre-Flaw 를 방전가공하였으며, 가공 후에 얻어진 사진을 Fig. 2 에 제시하였다. 응력비 $R=0.1$, 하중반복속도 4Hz 로 대기중, 실온에서 오른쪽 균열길이 약 1.27mm 의 예비균열을 도입하였다. 그 후, Fig. 3 에 나타내는 것과 같이 하중반복 수 61,793cycle 의 변동하중 블록을 반복속도 5Hz 로 파단까지 부가하였다.

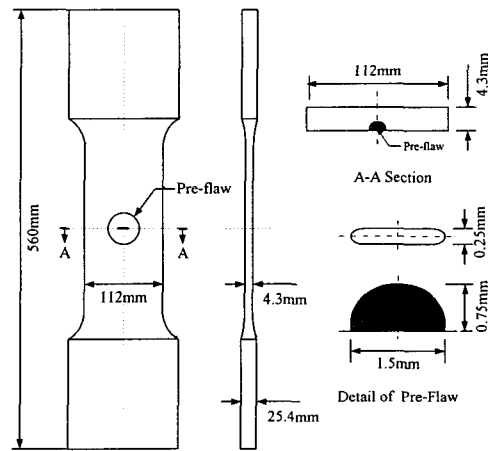


Fig. 1 Shape and dimensions of specimen

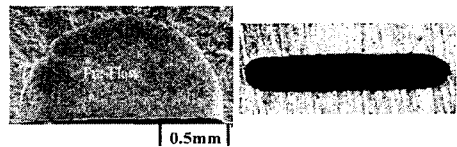


Fig. 2 Photographs of pre-Flaw

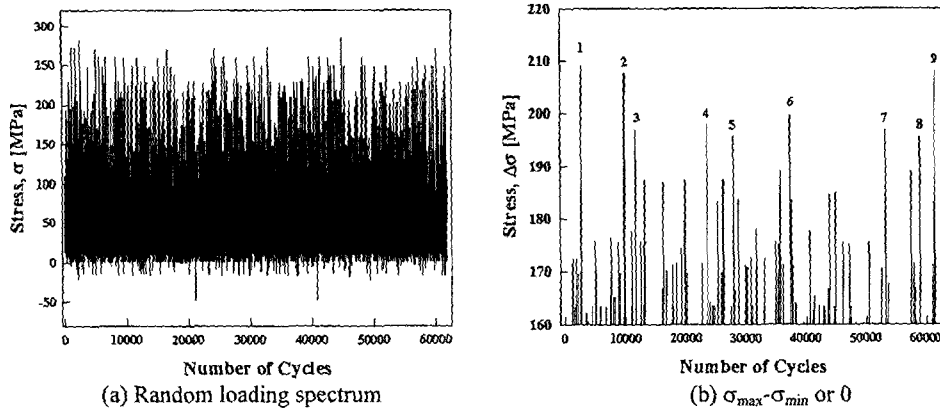


Fig. 3 Random loading spectrum and reconstructed spectrum



Fig. 4 SEM micrographs of the fatigue fractured area and loading spectrum

균열길이의 측정은 각 블록마다 정밀도 0.01mm의 이동식 광학현미경으로 하중 축에 직각방향으로 수행하였다.

3. 파면분석 방법

파면관찰은 하중블록 및 각 하중 사이클과 스트라이에이션의 대응관계를 검토하는 작업이므로 작업의 단순화, 간편성을 고려하여 사전에 하중 스펙트럼을 다음과 같이 채 구성하여 SEM 사진과 비교 검토하였다. 여기서는 특정 시험편을 예로 설명한다.

- (1) 균열진전은 인장하중 부하과정에서만 발생하므로 하중블록 Fig. 3(a) 내의 압축하중 부분은 무시하기로 한다. Fig. 3(a)의 각 하중 사이클에서 $P_{max}-P_{min}$ (압축하중 영역이 있을 경우에는 $P_{max}-0$)을 구하고, 그 값이 160MPa 이상의 부하하중 스펙트럼을 Fig. 3(b)와 같이 구한다.
- (2) SEM 을 이용하여 저배율($\times 500$)로 전 파면을 촬영하여 컴퓨터 상에서 Fig. 4 에 일부분을 보

여주는 것과 같이 조합하여 보관한다.

- (3) 파단 직전 수 블록에 해당하는 파면영역을 고배율($\times 1000$ 이상)로 관찰하여, 하중블록 파형 Fig. 3(b)와 파면의 형상을 비교 검토한다. 이때 파면상에 형성되어있는 스트라이에이션의 반복성을 파악하고, 하중블록 영역에 해당하는 파면영역을 Fig. 5 에 제시하는 바와 같이 설정한 후에, 파면 상에서 하중 스펙트럼 내의 반복성이 강한 하중 점의 설정과 함께 그 간격을 조정한다.
- (4) 최종파단 영역에서 초기균열(예비균열) 영역으로 이동해 가면서 각 하중블록에 해당하는 파면 영역을 결정하고, (2)의 SEM 사진 위에 균열 철단 라인을 표시한다. 실제로는 SEM 사진 위에서 결정된 하중 블록에서 균열측정기준점까지의 길이를 균열길이로 결정하게 된다.
- (5) 하중 블록의 증가에 따르는 스트라이에이션 생성등과 관련하여 인접한 하중블록에는 파면을 고 배율로 관찰하여 검토한다.
- (6) SEM 상에서 시험편 중앙부 및 표면부에서 각

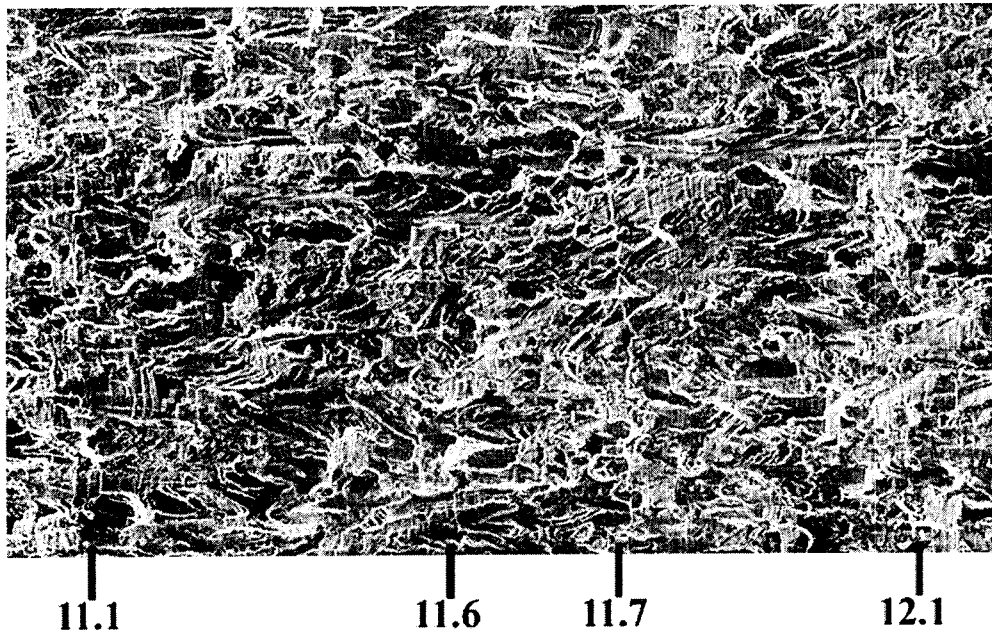
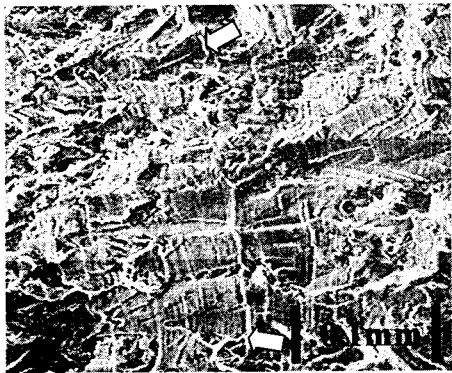
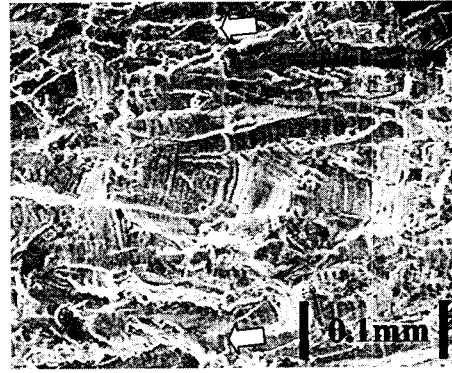


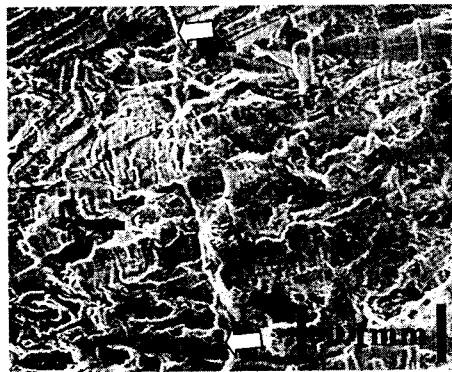
Fig. 5 SEM micrograph of the 11th loading spectrum region



(a) 10.7 block



(b) 11.7 block



(c) 12.7 block



(d) 13.7 block

Fig. 6 SEM micrographs of fatigue fracture surface at loading number 7

하중블록에 해당하는 균열길이를 산출하고 실험에서 구한 값과 비교 평가한다.

4. 시험 결과

Fig. 6 은 Fig. 2(b)의 7 번 하중 점에 해당하는 스트라이에이션이라고 사료되는 파면영역에서 관찰되어진 SEM 사진을 보여주고 있다. 각 사진으로부터 7 번 하중에 해당하는 스트라이에이션과 전후의 스트라이에이션을 비교해보면 반복성이 잘 지켜지고 있음을 인지할 수 있다.

이러한 반복성의 검토로부터 실제로 파면 위에서 확정된 블록의 영역을 Fig. 4 에 나타내었다. 그러나 하중 블록 내에는 1 번, 2 번, 9 번 하중과 같이 7 번 하중보다 큰 하중이 존재를 하고 있으나, 위에서 언급한 바와 같이 전후에 존재하는 스트라이에이션의 규모나 간격을 고려하여, 가장 규모가 크고 선명한 스트라이에이션을 7 번 하중으로 정하였다. 실제로 파면해석학적인 견지에서 보면, 파면 상에서 블록 당 균열길이의 산출이 목표인 점을 고려하면, 반복성이 해결된다면 블록 당 균열길이의 기준이 되는 하중 점은 큰 의미가 없다. 또한 많은 보고에 의하면, 랜덤하중의 경우에는 유사한 크기의 하중일지라도 배치순서에 따라서 스트라이에이션의 형성 시에 점프(jump)현상 및 지연(delay)현상이 발생한다고 알려져 있다^(7, 12, 13). 이러한 점을 고려하면, 본 연구에서와 같이 상당히 많은 수의 하중사이클로 이루어진 랜덤 스펙트럼의 경우에는, 개개의 하중에 대응하는 스트라이

에이션을 정확하게 대응시킨다는 것은 거의 불가능하며, 블록 당 균열길이의 파악이라는 관점에서 의미는 크지 않다.

위에서 설명한 순서에 따라 파면을 해석하여 파면의 두께방향의 중앙 부에서 구한 균열길이를 실험 시에 광학현미경으로 구한 균열길이를 병기한 것을 Fig. 7 에 나타내었다. 파면해석으로 구한 값이 조금 크게 나타나고 있으나 좋은 일치를 보이고 있다.

또한, 다른 시험편에 대하여 동일한 방법으로 파면분석을 실시한 결과를 Fig. 8 에 참고로 제시하였다. (a)는 시험편 중앙부 한쪽 측면에, (b)는 시험편 코너부에 Pre-Flaw 와 예비균열을 도입하였으며, 병기한 하중 스펙트럼을 부가한 결과이다.

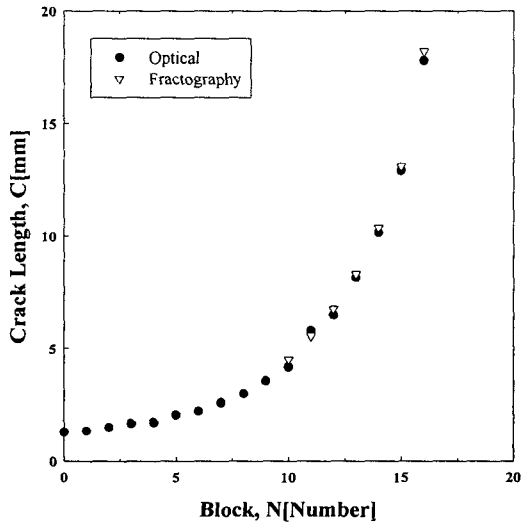
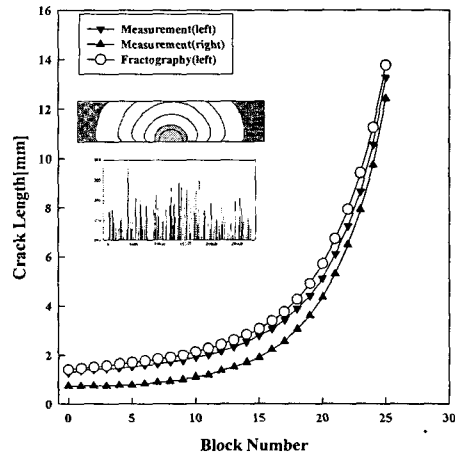
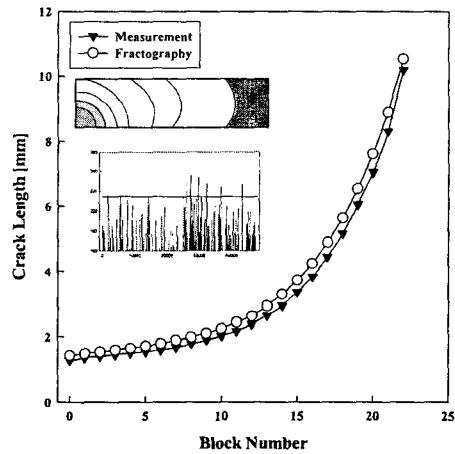


Fig. 7 The result of fracto-graphic analysis



(a) Center crack type specimen



(b) Corner crack type specimen

Fig. 8 The results of fracto-graphic analysis

두 시험편의 파면관찰로부터 본 실험에서 가해진 모든 영역에서 각 블록 수에 해당하는 균열길이를 얻을 수 있었다. 이것은 하중 스펙트럼에 속해있는 가장 큰 하중이 실험 개시 시점에 이미 이 재료의 균열진전에 필요한 응력확대계수 범위(ΔK)에 있었기 때문으로 사료된다.

이 두 결과에 있어서도, 시험 시에 얻어진 결과와 파면분석으로 얻어진 결과는 약간의 차이는 있으나 좋은 상관관계가 인정되어진다. 파면해석 결과가 시험 시에 측정된 값보다 다소 크게 나타나는 것은 파면해석에서 구한 값은 시험편 두께부 중앙에서 측정되는 최대 균열길이를 적용 했기 때문이다.

5. 결 론

본 연구는 하중사이클의 크기 및 형태를 알고 있는 실제 동하중으로 파괴된 피로파면 상에서 각 하중 블록에 대응하는 실제 균열성장 길이를 결정하는 방법에 관하여 검토하였다. 관찰 수단으로는 SEM 을 사용하고, 대량의 사진을 조합하고 평가하는 작업은 컴퓨터 상에서 이루어 졌다.

하중 사이클을 파면 상에 적용하는 방법으로는 부하 하중(P_{\max} - P_{\min} or 0)의 크기로 변환되어진 하중 스펙트럼을 이용하고, 상대적으로 큰 몇 개의 하중점을 선정하여, 파면의 반복성과 연계시켜 블록을 결정하였다. 이러한 파면 해석에서 얻어진 균열길이와 하중블록 수와의 관계는 시험시에 얻어진 값과 시험편에 따라서는 편차가 있었으나 좋은 상관 관계를 보이고 있으므로, 이 파면분석 결과로 균열성장에 영향을 미치는 하중 스펙트럼을 유추해 볼 수 있고, 이를 토대로 하여 피로파괴 원인을 규명 하는데 일조 할 수 있다.

후 기

본 논문은 2002 년도 영남대학교 학술연구조성비와 BK21 사업비에 의해서 지원되었습니다.

참고문헌

- (1) Koterazawa, R., 1981, *Fractography and its application*, (in Japanese) Nikkan Kogyo Shinbunsha.
- (2) Brooks, C. R. and Choundhury, A., 1993, *Metallurgical Failure Analysis*, McGraw-Hill, Inc.
- (3) Richard, W. H., 1976, *Deformation and Fracture mechanics of Engineering Materials*, John Willy & Sons, pp. 465~490.
- (4) Laird, C., 1967, "The Influence of Metallurgical Structure on the Mechanisms of Fatigue Crack Propagation," ASTM STP, Vol. 415, pp. 131~168.
- (5) Pelloux, R. M. N., 1969, "Mechanisms of Formation of Ductile Fatigue Striations," *Transactions of the ASM*, Vol. 62, pp. 281~285.
- (6) Bowles, C. Q. and Broek D., 1972, "On the Formation of Fatigue Striation," *International Journal of Fracture Mechanics*, Vol. 8, pp. 75~85.
- (7) McMillan, J. C. and Pelloux, R. M. N., 1967, "Fatigue Crack Propagation Under Program and Random Load," ASTM STP, Vol. 415, pp. 505~532.
- (8) Warhill, R. J. H., 1975, "Fractography of Fatigue Crack Propagation in 2024-T3 and 7075-T6 Aluminum Alloys in Air and Vacuum," *Metallurgical Transactions A*, Vol. 6A, pp. 1587~1596.
- (9) McMillan, J. C. and Pelloux, R. M. N., 1970, "Fatigue Crack Propagation under Programmed Loads and Crack Tip Opening Displacements," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 2, pp. 81~84.
- (10) Schive, J., 1999, "The Significance of Fractography for Investigations of Fatigue Crack Growth under Variable-Amplitude Loading," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 22, pp. 87~99.
- (11) Abelkis, P. R., 1978, "Use of Microfractography in the Study of Fatigue Crack Propagation under Spectrum Loading," ASTM STP, Vol. 645, pp. 213~234.
- (12) Koterazawa, R., Mori, M., Matsui, T. and Shimo, D., 1973, "Fractographic Study of Fatigue Crack Propagation," *Transactions of the ASME*, OCTOBER, pp. 202~212.
- (13) Von Euw, E. F. J., Hertzberg, R. W. and Roberts, R., 1972, "Delay Effects in Fatigue Crack Propagation," *ASTM STP*, Vol. 513, pp. 230~259.