

## 피로손상과 비파괴평가 Nondestructive Evaluation of Fatigue Damage

권 오 양\*  
 Oh-Yang Kwon\*

초 록 피로손상이 발생하는 초기단계는 결정립계나 석출물, 그리고 잔류응력과 같은 전위(dislocation)의 이동성에 영향을 미치는 변수에 의해 지배되는 것으로 널리 알려져 있으나, 물리적으로 손상의 발생을 탐지할 수 있는 단계는 미소균열의 발생단계라 할 수 있다. 미소균열은 microcrack으로 부르는 것이 일반적이지만 피로손상의 문제에서만은 short (or small) fatigue crack으로 통용되고 있다. 따라서 미소균열 보다는 소균열 또는 피로 단균열이 더 알맞은 용어일지도 모르는데, 그 크기가 수  $\mu\text{m}$ 에서 수 mm의 범위에 걸친 균열의 총칭이다. 이러한 크기라면 대략 통상적인 비파괴시험 방법으로 탐지할 수 있는 범위의 한계 부근에 있으므로 피로손상의 탐지와 관련된 비파괴평가의 역할과 관련하여 새삼스럽게 한번 짚고 넘어가는 것도 의미 있는 일이라 생각된다. 피로와 관련하여 보고된 비파괴평가에 관한 연구는 감히 그 숫자를 헤아릴 수 없이 많으나 그 대부분은 피로균열의 성장 및 전파에 관한 것으로, 피로 단균열과 관련된 연구는 상대적으로 적으며 특히 국내에서는 거의 찾아볼 수 없다. 그러나 피로 단균열의 탐지와 관련하여 지금까지 전세계적으로 보고된 연구 결과는 다수 있으므로 여기서는 주로 비파괴평가로 볼 수 있는 연구에 대해서만 살펴보기로 한다.

**Abstract** In order to determine the mode I stress intensity factor ( $K_I$ ) by means of the alternating current potential drop(ACPD) technique, the change in potential drop due to load for a paramagnetic material containing a two-dimensional surface crack was examined. The cause of the change in potential drop and the effects of the magnetic flux and the demagnetization on the change in potential drop were clarified by using the measuring systems with and without removing the magnetic flux from the circumference of the specimen. The change in potential drop was linearly decreased with increasing the tensile load and was caused by the change in conductivity near the crack tip. The reason of decreasing the change in potential drop with increasing the tensile load was that the increase of the conductivity near the crack tip due to the tensile load caused the decreases of the resistance and internal inductance of the specimen. The relationship between the change in potential drop and the change in  $K_I$  was not affected by demagnetization and was independent of the crack length.

### 1. 서 론

피로균열의 발생단계가 총 피로수명의 상당한 부분을 차지한다는 점은 이미 오랫동안 알려진 사실이며, 특히 예비균열이나 예리한 노치 등이 없는 매끈한 표면에서는 피로균열이 발생하기까지 부재의 수명이 대부분 소모되는 구조물도 있다. 물론 이 단계가 총 수명에서 차

지하는 비율은 재료의 미세조직, 부재에 걸리는 응력상태 등 환경조건에 따라 매우 달라지지만, 어떤 경우에는 총 수명의 불과 10% 단계에서 이미 단균열이 발생할 수도 있다. 그 이후의 과정은 단균열 중 일부가 성장하면서 다른 단균열과 합체되고 드디어 장균열(long crack) 즉, 일반적으로 알려진 피로균열(fatigue crack)이 되는데, 이 피로균열이 계속 성장하여 임계

크기에 도달하면 불안정파괴로 이어진다는 것은 잘 알려진 사실이다.

지금까지 여러 연구자들에 의해 보고된 바에 따르면 단균열은 통상적인 피로균열과 비교하여 매우 다른 성장거동을 보인다[1-7]. 균열의 크기가 작을수록 그 성장속도가 아주 빠르며, Fig. 1에 나타낸 바와 같이 선형파괴역학(linear elastic fracture mechanics: LEFM)에 의해 그 거동을 예측하기 어렵다. 초기 피로균열이 충분히 크다면 소재나 구조의 피로수명의 예측은 선형파괴역학을 바탕으로 지금까지 발전된 이론에 의해 어느 정도 정확하게 이루어질 수 있다. 그러나 실제로는 가스터빈 디스크나 항공기 구조처럼 매우 작은 피로균열에도 위험한 부재나 구조들이 많다. 따라서 통상적인 피로시험에서 보통 크기의 피로균열을 바탕으로 얻어진 데이터를 구조설계에 적용한다면 결과적으로 피로수명을 과대평가하는 잘못을 범할 수 있다.

피로균열은 크게 장균열과 단균열로 나눌 수 있다. 장균열 또는 그저 피로균열은 일반적으로 가시적인 범위에 속하며 그 크기 또는 길이는 피로시험 또는 파괴시험에서 파괴역학적으로 가장 중요하게 고려되므로 당연히 측정되어야 하는 기초자료이다. 단균열은 그 크기가 매우 작아서 피로하중이 가해지고 있는 동안에 통상적인 광학적 측정으로는 측정하기 불가능하거나 매우 어려운 범위에 속한다. 보다 정확하게 역학적인 관점에서 정의한다면 단균열은 소성역이나 소성변형장의 크기보다 작은 균열이라 말할 수 있다.

피로 단균열은 다시 역학적(mechanically) 단균열과 미세조직적(microstructurally) 단균열로 나누어

진다. 후자는 결정립의 크기와 같은 미세조직적 특성치보다 크지 않은 단균열을, 전자는 후자보다는 크지만 장균열보다는 작은 단균열을 지칭한다. 또한 전자 또는 후자까지 통틀어 물리적(physically) 단균열로 부르기도 하는데 이는 단순히 화학적(chemically) 단균열과 구분하기 위함이다[8]. 한가지 덧붙인다면 연구자에 따라 (주로 재료공학을 전공한 경우) 단(short)균열을 소(small)균열로 부르는 경향이 있으며 거의 같은 의미로 사용되나 엄밀하게 따지자면 그 의미가 다소 다르다. 단균열은 3차원적인 균열의 가장 큰 치수를 기준으로 짧은 것을 의미하지만, 소균열은 3방향의 치수를 모두 고려하여 작은 것을 뜻하기 때문이다.

일반적으로 피로 단균열의 비정상적인 성장속도에 대하여 최초로 언급하고 석출경화형 알루미늄 합금에서 관찰된 결과를 보고한 것은 Pearson으로 알려져 있다 [9]. 그 이후 이 문제에 관한 연구를 수행한 사람이 적지 않는데 참고문헌 1~8을 포함하여 피로 단균열을 주제로 한 몇 차례의 국제학술회의 논문집에서 이들의 업적을 가늠해 볼 수 있다[10-13]. 그러나 아직도 비상하게 빠른 단균열의 성장거동에 대하여 완전히 이해하였다고 할 수 없는 부분이 많다.

Fig. 2는 일명 Kitagawa diagram으로 불리는 것으로 1976년에 발표한 논문에서 제안되었는데[7], 미세조직적 단균열의 효과가 중요하게 취급되어야 하는 경계치인 임계균열크기  $a_0$ 를 결정하는 방법은 아직도 변함이 없다. 또한 피로하중을 가하고 있는 동안에 이러한 크기의 균열발생을 탐지하거나 그 크기를 측정하는 것은 현실적으로 매우 어렵기 때문에 유효 응력확대

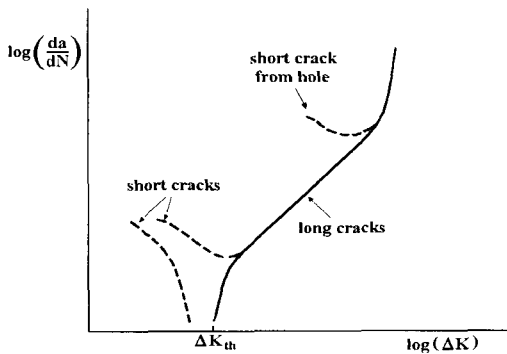


Fig. 1 A schematic of the typical fatigue crack growth behavior of long and short cracks at constant values of imposed cyclic range and load ratio

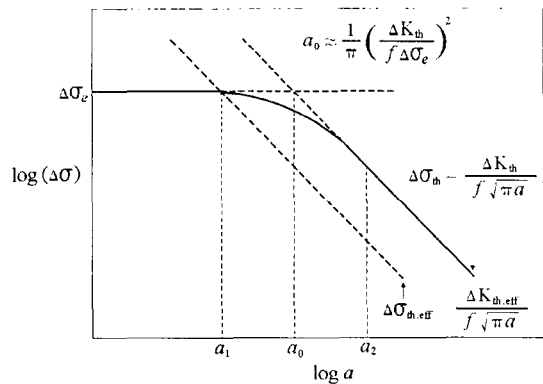


Fig. 2 A schematic presentation of the threshold stress-crack length diagram with three critical crack sizes

계수범위의 문턱값  $\Delta K_{th,eff}$ 를 정확하게 결정하는 것이 불가능해진다. 단균열에서  $a_1$ 과  $a_2$  값은 미세조직에 의존하는 경향이 매우 관련이 크며 따라서 재료의 종류나 상태에 의해 크게 달라질 수 있다. 앞에서 임계치  $a_0$ 보다 짧은 균열을 미세조직적 단균열로 정의하였지만 여기서 좀더 정밀하게 다시 정의한다면  $a_2$ 보다 짧으면 일반적으로 단균열이며,  $a_1$ 보다 짧으면 미세조직적 단균열로 분류할 수 있다.

피로 단균열의 탐지와 측정을 위해 개발된 여러 가지 방법 중에는 비파괴적인 것도 있고 파괴적인 것도 있다 [8,13]. 어차피 모두 언급할 수 없으므로 주로 비파괴 평가와 관련이 높은 방법들을 중심으로 살펴보기로 한다. 우선 가장 널리 쓰이는 것들로 표면복제법(replication)[14], 광학현미경(photomicroscopy)[15], 전위차(electric potential difference)[16], 초음파(ultrasonics)[17], 레이저간섭계(laser interferometry)[18], 주사전자현미경(scanning electron microscopy)[19],  $K_{max}$  고정법(constant  $K_{max}$ -decreasing  $\Delta K$ )[20], 음향방출(acoustic emission)[21] 등이 있다. 그 밖에도 응력진폭감소, 탄소계수변화, 밀도변화, 전기저항변화, 미소경도변화를 측정하여 피로손상의 발생을 탐지하는 등의 방법들을 문헌상에서 찾아볼 수 있다[22].

## 2. 비파괴평가(NDE) 방법의 적용

피로손상의 발생을 조기에 탐지하는데 있어서 비파괴적 방법의 필요성에 대해서는 이제 더 이상의 설명이 필요하지 않으리라 본다. 그리고 피로손상의 조기탐지는 피로 단균열의 발생과 성장을 측정하고 평가하는 것으로 이루어질 수 있음에도 별다른 이견은 없을 것이다. 문제는 이러한 일련의 방법들이 피로하중 하에서 작동중인 구조의 정상적인 기능에 지장을 주지 않으면서 실시간에 적용될 수 있다면 가장 바람직하지만 그것이 결코 쉬운 일이 아니라는 점이다. 많은 경우에 전형적인 균열탐지 방법인 초음파시험이나 와전류탐상법에 의해 탐지되었다면 단균열은 충분히 성장한 다음이고 총 수명의 50% 이상이 이미 소모된 다음이라 파손에 대처할 수 있는 시간적 여유가 충분하지 않을 수도 있다. 또 하나의 어려움은 단균열 상태에서는 균열의 성장거동에 미치는 미세조직의 영향이 보통 피로균열에서 예상되는 것보다 훨씬 크다는 점이다[23]. 따라서 미세조직의 변화에 민감한 NDE 방법을 사용할 때 피로손

상의 조기탐지라는 목적을 더 충실하게 달성할 수 있다 [24]. 이러한 목적으로 특별히 개발된 일련의 NDE 기법들에 관하여 여기서 다루고자 하지만 아무래도 부족하게 느끼는 독자들은 참고문헌 24~26를 참고하기 바란다. 여기서는 다만 몇 가지 중요하다고 생각되는 NDE 방법으로 초음파 방법, 자기적 방법, 광학적 방법의 활용사례를 살펴보고, 피로손상의 조기탐지를 위해 가능성 있는 연구의 방향을 제시해보는 것으로 마감하고자 한다.

### 2. 1. 초음파 방법(Acoustic Methods)

피로손상의 비파괴적 탐지에 있어서 아마도 가장 먼저 떠올리는 방법일 것이다. 약 20년 전에 발표된 참고문헌 26은 피로손상의 조기탐지를 위한 초음파 방법에 관하여 깊이 있게 검토한 내용들을 담고 있는데 오늘날의 시각에서는 부분적으로 착오도 있지만, 측정장치나 모든 것이 열악했던 당시로서는 획기적인 것이었다고 하겠다. Green과 Duke는 이 연구에서 피로손상의 조기탐지에 적용가능한 초음파 방법으로 초음파의 감쇠, 초음파 벌크파의 반사, 초음파 표면파의 반사 및 음향방출(AE)의 4가지에 대하여 집중적으로 검토하였으며, 초음파 감쇠측정과 AE를 동시에 사용하면 가장 효과적으로 피로손상의 발생을 탐지할 수 있다고 밝히고 있다. 개별적으로 사용한다면 초음파 감쇠측정법이 AE보다 여러 가지 면에서 우수하며, 4가지 방법 중 가장 유력한 것으로 결론을 내리고 있다.

그러나 이후에 발표된 결과들을 살펴보면 감쇠측정법 보다는 표면파(surface acoustic wave: SAW) 반

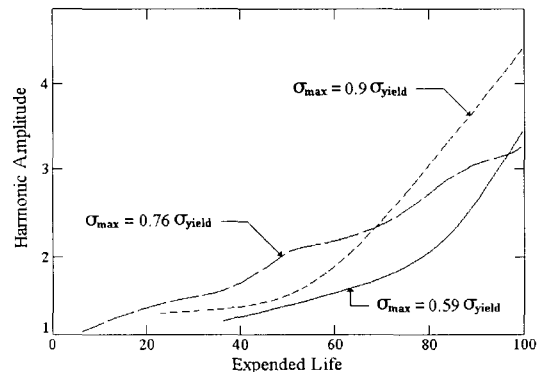


Fig. 3 Dependence of harmonic amplitude on expended fatigue life.(adopted from Ref. 29)

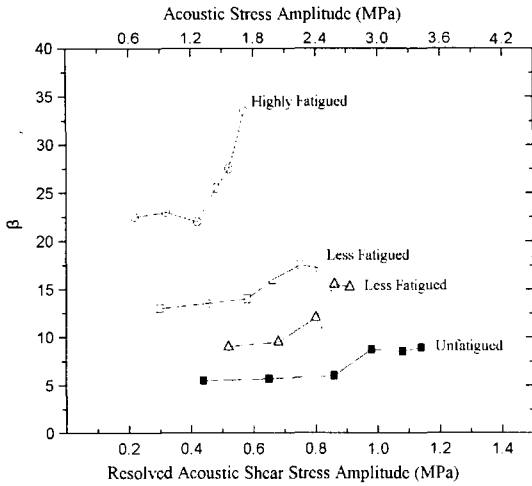


Fig. 4 Acoustic nonlinearity parameters of Al 2024-T3 fatigued to various damage levels vs. stress amplitude. (adopted from Ref. 30)

사법 [27, 28], 음향변조법(acoustic modulation) [29], 음향비선형성(acoustic nonlinearity) 측정법 [30]과 같은 방법들이 더욱 각광을 받고 있다. 예를들어 Fig. 3은 충분히 강한 표면파가 입사되면 피로균열이 고조파(harmonic) 발생원으로 작용한다는 점을 이용하여 피로손상도를 예측한 것으로 응력진폭의 최대치( $\sigma_{max}$ )가 항복강도에 근접할수록 현저한 경향을 보여준다.

한때는 표면파 반사법이 초음파감쇠 측정에 비하여 열등한 것으로 생각되었지만, 측정기술과 신호처리 분야의 눈부신 발전에 힘입어 최근에는 오히려 표면파 반사법이 이 목적에 더욱 널리 사용되는 경향이 있다. 또한 Fig. 4는 음향비선형인자  $\beta$ 와 전단응력진폭과의 관계를 나타내고 있는데, 피로손상이 누적된 시편일수록 부동전위의 밀도가 높으며 전단응력에 의해 부동전위가 이동하게 되었을 때  $\beta$ 값의 변화가 현저한 점을 이용하면 피로손상도의 예측이 가능함을 보여준다.

AE의 경우 극도로 민감한 탐지능이나 실시간 측정이 가능한 점 등 여러 가지 장점이 있음에도 불구하고 단독으로 피로균열의 발생을 탐지하는데 활용된 사례가 많지 않았다. 피로균열의 발생단계에서는 신호대잡음비가 낮을 수밖에 없고 따라서 신호와 배경잡음의 분리가 어렵다는 치명적인 약점 때문이었다. 그러나 이러한 문제도 역시 지난 20여년 동안 비약적인 발전을 거듭해

온 측정장비와 신호처리 기술의 의해 어느 정도 극복할 수 있게 되었고, 이제는 신호와 잡음의 분리가 불가능한 것은 아닌 수준에 이르렀다. 특히 최근에는 웨이블릿(wavelet) 변환이나 스펙트럼분할처리(split spectrum processing; SSP)와 같은 신호처리 방식을 잡음제거에 활용함으로써 신호대잡음비를 개선하여 피로손상의 초기단계에서도 균열의 생성을 탐지할 수 있게 되었다[31-33].

Fig. 5는 석출경화형 니켈기 내열초합금의 하나인 Incoloy901 합금의 피로시험에서 AE 카운트를 관찰함으로써 피로균열의 발생을 탐지할 수 있음을 보여준다[34]. 뿐만아니라 피로 단균열의 발생을 AE 측정으로 예측한 다음 이를 현미경으로 관찰하여 입증하고 있다. Fig. 6은 필자의 최근 연구 내용 중 하나로 도시가스 배관으로 많이 사용되는 API 5L Gr. 42 강철에서 피로사이클에 따른 AE 발생율을 기록한 것인데, 파단 수명의 약 22%에 해당하는 50,000cycle 부근에서 이미 피로균열이 발생하는 것을 탐지할 수 있었고 이를 현미경으로 관찰한 결과 이미 단균열이라 부르기에 부적합할 정도로 성장해 있음을 발견하였다[35]. 단균열의 성장속도는 보통 피로균열보다 10배 이상 빠르다는 사실에 비추어 가능하면 실시간 처리에 의해 균열의 발생을 탐지하는 방법을 개발하는 것이 바람직하다.

## 2.2. 자기적 방법(Magnetic Methods)

피로손상의 탐지를 위한 자기적 방법으로 재료의 자기적 성질을 측정하는 여러 가지 방법들이 제안되었다.

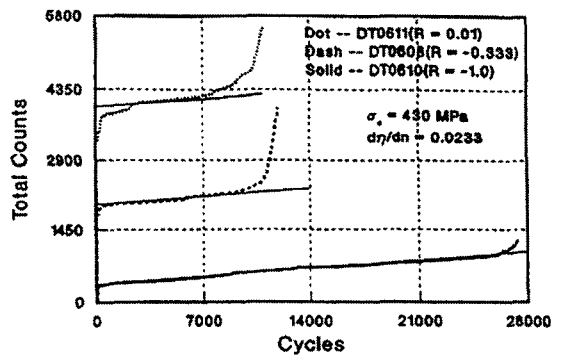


Fig. 5 Cumulative AE counts vs. the number of cycles indicating the initiation of cracks for three specimens of Incoloy 901 at  $\sigma_e = 430\text{MPa}$ . (adopted from Ref. 34)

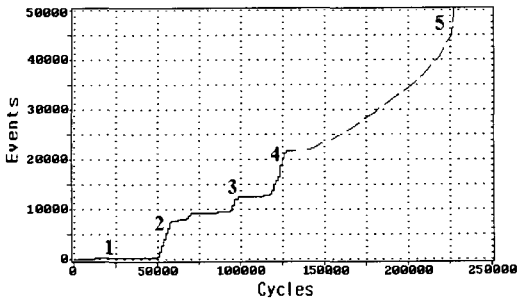


Fig. 6 Cumulative AE events vs. fatigue cycles indicating the initiation of short cracks at about 50,000 cycles for API 5L steel. (adopted from Ref. 35)

흔히 접할 수 있는 것들로 항자성(coercivity), 잔류자기(remanence), 최대투자력(maximum differential permeability), 자기이력손실(hysteresis loss), 바크하우젠잡음(Barkhausen noise) 등이 있다. 이 중에서도 항자성과 잔류자기의 변화를 측정하여 피로손상을 탐지하는 방법이 가장 많이 보고되었다[36]. 대부분의 자기적 방법들이 가진 약점은 실용적인 면에서 큰 의미가 없다는 점이다. 자기적 성질은 대부분 피로하중이 가해지는 동안 거의 변화를 보이지 않다가 피로수명의 마지막 단계에 가서 급격한 감소를 나타내므로 피로손상의 초기단계를 탐지하고자 하는 목적에는 다소 맞지 않는 것으로 보인다. 바크하우젠 잡음법도 자주 등장하는 방법 중의 하나인데, 음향(acoustic) 바크하우젠과 자기(magnetic) 바크하우젠이 있으며 음향바크하우젠은 자기음향방출(magneto-acoustic emission: MAE)로 알려져 있기도 하다. 바크하우젠 잡음은 항자성이나 잔류자기에 비하여 미세조직적 변화에 더 민감하다는 장점이 있다[37]. 또한 최근에는 SQUID를 이용하여 피로손상을 평가한 예도 보고되어 있으나 아직은 일반화된 방법은 아니다[38].

### 2.3. 광학적 방법(Optical Methods)

피로손상의 탐지에 있어서 광학적 방법은 아마 가장 먼저 개발되고 가장 널리 사용된 것으로 보인다. 우리 격언에 백문이불여일견(百聞而不如一見)이라 했듯이, 그만큼 직접적인 측정이기 때문일 것이다. 표면복제법과 광학현미경법을 비파괴적인 방법에 포함한다면, 피

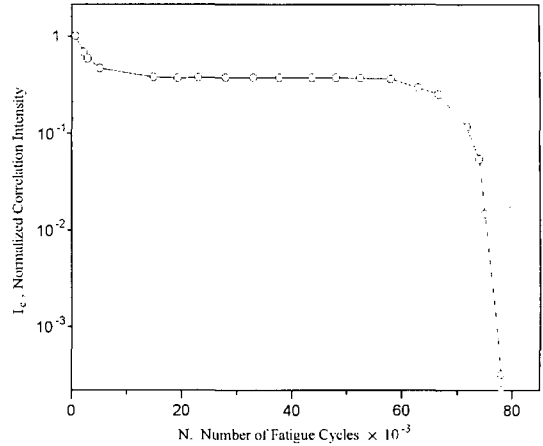


Fig. 7 Optical correlation intensity curve for fatigued Al2024-T3. (adopted from Ref. 39)

로손상의 광학적 측정방법은 크게 두 가지 또는 그 이상으로 분류할 수 있다. 하나는 피로손상에 의한 돌출(extrusion)/함몰(intrusion)이 가져오는 표면거칠기의 변화에 의한 지형학적 정보에 바탕을 둔 것이고, 다른 하나는 기본적으로 피로 단균열의 직접적인 측정에 의존하는 것이다.

하나의 예로 홀로그래피를 사용하여 손상된 표면의 지형학적 정보를 취득하고 이에 대한 광학적 상관함수를 구함으로써 알루미늄 2024-T3의 피로사이클에 따른 상관함수의 세기를 나타내는 지배곡선을 얻을 수 있었다[39]. Fig. 7에서 상관함수의 세기는 피로수명의 약 80%까지는 거의 변화를 보이지 않으나 그 무렵부터 돌출/함몰이 현저해지고 미소균열이 나타나면서 상관함수도 급격한 감소를 나타내고, 미소균열의 합체가 일어나 결국에는 피로균열로 발전하는 것으로 볼 수 있다. 한편 표면복제법과 광학현미경법은 우선 일반적인 피로균열 성장 실험에 거의 필수적으로 사용되었으며, 자연스럽게 피로 단균열의 탐지에도 쓰이게 되었다고 볼 수 있다. 따라서 이 방법은 비파괴적 방법임에는 틀림없으나 파괴역학과 관련하여 실험을 행하는 연구자들 사이에서 더욱 애용되고 널리 알려져 있는 방법이다[14, 15].

### 3. 맺음말

기계장치 또는 구조의 성능이 고도화될수록 사용 중 발생하는 손상과 그 결과로 이어지는 파손에 의한 재앙

은 더욱 커지게 마련이다. 따라서 피로손상의 발생도 조기에 탐지할 수 있는 방법의 개발이 절실하게 요구된다. 지난 20여년간 이러한 목적에 부합하는 NDE 방법의 개발에 많은 진전이 있었다. 피로파괴의 가장 초기 단계인 손상의 발생과 탐지에 관하여 지금까지 알려진 연구 결과들을 NDE 관점에서 정리하고 가능한 연구의 방향을 제시해 보았다. 관련 연구자들이 읽었을 때 조금이라도 도움이 되고 연구의 길잡이 구실이 되기를 기대한다.

## 후 기

이 해설의 내용은 1999년 11월 8-11일 대만의 쉐탕에서 개최된 FENDT'99에서 필자가 발표한 Plenary Lecture의 원고를 바탕으로 작성하였으며, 대부분의 내용은 관련 문헌에서 발췌하여 정리한 것임을 밝혀 두고자 한다.

## 참고문헌

- [1] K. Hussain, "Short fatigue crack behaviour and analytical models: A review", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 58, No. 4, 327-354, (1997)
- [2] K. J. Miller, "Materials science perspective of metal fatigue resistance", *Materials Science and Technology*, Vol. 9, 453-462, (1993)
- [3] S. J. Hudak, Jr., D. L. Davidson, K. S. Chan, A. C. Howland, and M. J. Walsch, "Growth of small cracks in aeroengine disc materials", AFWAL-TR-88-4090, Wright-Patterson Air Force Base, OH, USA, (1998)
- [4] R. O. Ritchie and J. Lankford, "Overview of the small crack problem", *Small Fatigue Cracks*, R. O. Ritchie and J. Lankford, Eds., The Metallurgical Society, Warrendale, PA, USA, pp. 1-5, (1986)
- [5] S. Suresh and R. O. Ritchie, "Propagation of short fatigue cracks", *International Metals Review*, Vol. 29, 445-476, (1984)
- [6] J. C. Newman, Jr., "A nonlinear fracture mechanics approach to the growth of small cracks", AGARD-CP-328, Paris, France, pp. 6.1-6.26, (1983)
- [7] H. Kitagawa and S. Takahashi, "Applicability of fracture mechanics to very small cracks or the cracks in the early stage", *Proc. Second International Conference on Mechanical Behavior of Materials*, Boston, MA, USA, pp. 627-631, (1976)
- [8] ASTM E647-95, "Standard test method for measurement of fatigue crack growth rate", *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 03.01, pp. 578-614, (1995)
- [9] S. Pearson, "Initiation of fatigue cracks in commercial aluminum alloys and the subsequent propagation of very short cracks", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 7, 235-247, (1975)
- [10] *Small Fatigue Cracks*, R. O. Ritchie and J. Lankford, Eds., The Metallurgical Society, Warrendale, PA, USA, (1986)
- [11] *The Behavior of Short Fatigue Cracks*, EGF 1, K. J. Miller and de los Rios, Eds., Mechanical Engineering Publications, London, UK, (1986)
- [12] *Short Fatigue Cracks*, ESIS 13, K. J. Miller and de los Rios, Eds., Mechanical Engineering Publications, London, UK, (1992)
- [13] *Small-Crack Test Method*, J. M. Larsen and J. E. Allison, Eds., STP 1149, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, USA, (1992)
- [14] M. H. Swain, "Monitoring small-crack growth by the replication method", *Ref. 13*, pp. 34-56, (1992)
- [15] J. M. Larsen, J. R. Jira, and K. S. Ravichandran, "Measurement of small

- cracks by photomicroscopy: experiments and analysis", Ref. 13, pp. 57-80, (1992)
- [16] R. P. Gangloff, D. C. Slavik, R. S. Piascik, and R. H. Van Stone, "Direct current electrical potential measurement", Ref. 13, pp. 116-168, (1992)
- [17] M. T. Resch and D. V. Nelson, "An ultrasonic method for measurement of size and opening behavior of small fatigue cracks", Ref. 13, pp. 169-196, (1992)
- [18] W. N. Sharpe, Jr., J. R. Jira and J. M. Larsen, Real-Time Measurement of Small Cracks Opening Behavior Using an Interferometric Strain/Displacement Gage, Ref. 13, pp. 92-115, (1992)
- [19] D. L. Davidson, "The experimental mechanics of microcracks", Ref. 13, pp. 81-91, (1992)
- [20] R. Herzberg, W. A. Herman, T. Clark, and R. Jaccard, "Simulation of short cracks and other low closure loading conditions utilizing constant  $k_{max}$   $\Delta K$ -decreasing fatigue crack growth procedures", Ref. 13, pp. 197-220, (1992)
- [21] D. H. Kohn and P. Ducheyen, "Source of acoustic emission during fatigue of Ti-6Al-4V: effect of microstructure", Journal of Materials Science, Vol. 27, 1633-1641, (1992)
- [22] J. Lemaitre, A Course on Damage Mechanics, 2nd Ed., Springer-Verlag, Berlin, Germany, pp. 19-37, (1996)
- [23] D. L. Davidson, "Degradation of components and structures by fatigue", Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 15, Nos. 3/4, 101-106, (1996)
- [24] G. Dobmann, "Early fatigue damage from the NDE point of view", Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 14A, pp. 2003-2010, (1996)
- [25] O. Buck, "Fatigue damage and its non-destructive evaluation: an overview", Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 17A, pp. 1-13, (1998)
- [26] R. E. Green, Jr. and J. C. Duke, Jr., "Ultrasonic and acoustic emission detection of fatigue damage", International Advances in Nondestructive Testing, Vol. 6, pp. 125-177, (1979)
- [27] J. D. Achenbach, I. Komsky, and C. Zhang, "Ultrasonic surface wave technique to determine fatigue damage", Damage Mechanics in Engineering Materials, AMD-Vol.109, American Society for Mechanical Engineers, New York, NY, USA, pp. 227-236, (1990)
- [28] P. Karpur and M. T. Resch, "Improved detectability of fatigue microcracks by split spectrum processing of back-scattered rayleigh wave", Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 10A, pp. 757-764, (1991)
- [29] W. L. Morris, O. Buck, and R. V. Inman, Journal of Applied Physics, Vol. 50, 6737- , (1979).
- [30] J. H. Cantrell and W. T. Yost, Phil. Mag., Vol. 69, 315- , (1994)
- [31] E. Gueller, B. Sankur, E. Anarim, C. D. Mendi, O. Alkin, Y. P. Kahya, and T. Engin, "Wavelet transform based transient detection", Advances in Signal Processing for NDE of Materials, P. V. Maldague, Ed., Kluwer, pp. 269-283, (1994)
- [32] H. Suzuki, T. Kinjo, Y. Hayashi, M. Takemoto, and K. Ono, "Wavelet transform of acoustic emission signals", Journal of Acoustic Emission, Vol. 14, 69-84, (1996)
- [33] A. Abbate, J. Frankel, and P. Das, "Wavelet transform signal processing applied to ultrasonics", Rev. of Progress in Quantitative NDE, Vol. 17B, pp. 741-748, (1996)
- [34] D. Fang and A. Berkovits, "Acoustic

- emission during fatigue of a nickel base superalloy", *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 11, 85-94, (1993)
- [35] O-Yang Kwon, "Nondestructive evaluation of the evolution of fatigue damage", *Proc. of the Fifth Far-East Conference on NDT (FENDT'99)*, pp.1-12, (1999)
- [36] M. R. Govindaraju, A. Storm, D. C. Jiles, and S. B. Biner, "Evaluation of low-cycle fatigue damage in steel structural components by a magnetic measurement technique", *Review of Progress in Quantitative NDE*, Vol. 12B, 1839-1846, (1993)
- [37] A. Le Burn and F. Billy, "Nondestructive fatigue damage assessment using ultrasonic and magnetic measurements on metallic materials", *Review of Progress in Quantitative NDE*, Vol. 13B, pp. 1833-1840, (1994)
- [38] H. -J. Basseler, D. Eifler, M. Lang, and G. Dobmann, "Characterization of the fatigue behavior of austenitic steel using HTSL-SQUID", *Review of Progress in Quantitative NDE*, Vol. 17B, pp. 1597-1604, (1998)
- [39] W. L. Haworth, A. F. Hieber, and R. K. Mueller, *Metall. Transactions*, Vol. 8A, 1597- , (1987)