KIGAS Vol.4, No.1, March, 2000
(Journal of the Korean Institute of Gas)

잔류응력 영역에서 발생한 작은 피로균열의 초음파 평가

강 계 명* · 김 진 연
*서울산업대학교 재료공학과
오하이오주립대학교 용접공학과
(2000년 2월 18일 접수, 2000년 3월 8일 채택)

Ultrasonic evaluation of small surface fatigue cracks initiating in residual stress zone

Kang Kae-Myung* · Kim Jin-Yeon
*Dept. of Safety Engineering, Seoul National University of Technology,
The Ohio State University, Industrial, Welding & Systems Engineering
(Received 18 February 2000 ; Accepted 8 March 2000)

요 약

Pit형 표면결함으로부터 발생하는 작은 피로균열의 거동을 초음파의 표면파를 이용하여 이를 위하여 피로시험중인 Al 2024-T3를 시험재료, 피로시험도중 초음파를 이용하여 피로균열의 거동을 조사하였다. 즉, 피로시험에서 균열이나 Pit로부터 발생하는 작은피로균열을 여러 응력조건하에서 나타나는 표면파의 반사특성에 관하여 연구하였다. 또한 이론적 결과와 실험적 결과를 상호 비교, 분석하였고, SEM을 사용하여 이들 작은 피로균열을 관찰하였다. 초음파를 이용한 피로균열의 균열 개구 거동에 관한 연구에서 피로균열의 유효균열 특성을 초음파법으로 평가 할 수 있었다.

Abstract - A surface acoustic wave method for the evaluation of small fatigue crack initiated from a pit-type surface flaw is presented. *In-situ* ultrasonic experiments are performed for aluminum 2024-T3 alloy samples under the fatigue test. During the fatigue test, the surface acoustic wave reflection signal from the pit and crack is measured under different hold-stress levels. From the measured and predicted surface wave reflections the depths of fully and partially open cracks are determined and results are verified by comparing with SEM fractography. The crack opening behavior of the fatigue crack is evaluated from the predicted effective crack depths. The method developed in this study can be applied to monitor and characterize crack initiation and propagation from pit-type surface flaws in the early stage of fatigue life.

Key Words : Small Fatigue Crack, Ultrasonic, Fatigue Test, SEM, Crack Opening Behavior, Crack Initiation and Propagation

1. 서 론

표면 부식이나 이물질의 충돌에 의한 미소결함 및 이들로 기인한 피로 균열의 발생과 전파는 노후 항공기 구조에 광범위한 손상의 원인이 되는 것으로 알려져 있다[1]. 특히 미소한 부식 피트(Pit)로부터 발생한 피로 균열은 기존의 검사방법에 의하여 장시간 검출되지 않을

†주저자 : littbird@duck.snut.ac.kr

수 있으므로, 이의 비파괴적 검사방법의 개발은 최근 자주 발생하는 노후 항공기의 추락사고의 방지와 안전운항을 위한 적정 유지 보수를 위하여 필수적이다.

Tittman과 Buck[2]은 티타늄 합금을 대상으로 피로 균열의 크기 및 닫힘 하중을 등을 실험적으로 결정하였다. Khuri-Yakub 등[3]과 Tien 등[4]은 표면파의 저주파 산란 해석을 통하여 세라믹에 발생한 미소 균열의 크기와 압입(Indentation)에 의한 잔류 응력의 영향에 관한 연구결과를 발표하였다. 이들 이외에도 다수의 연구자들에 의하여 탄성 표면파와 표면 균열의 상호작용에 관한 다양한 해석들이 있다.[5-8]

기존의 수행된 연구 결과에 대한 고찰로부터 대부분의 표면 균열의 비파괴적인 연구들이 결함이 없는 평평한 표면에서 발생한 균열을 다루고 있음을 알 수 있다. 그러나, 실제의 균열들은 평평한 표면 보다 결함주위에서 발생하기가 쉽다. 더욱이 일단 결함주위에서 발생한 균열을 초음파로 검사할 경우 결함과 균열사이에서의 초음파의 복잡한 산란현상으로 인하여 그 크기가 결함의 크기보다 작은 균열은 평가하기가 매우 힘든다.

한편, 소성 잔류 응력에 기인한 피로균열의 닫힘 현상은 초음파 탐상을 어렵게 한다. 이는 실제로 균열이 존재함에도 불구하고 균열이 닫혀 있을 경우 초음파는 균열을 감지하지 못하는 것으로 있다[5]. 더욱이 작은 피로 균열의 경우 문제는 더욱 심각하게 된다. 또한 피로 균열의 닫힘 현상에 관한 연구는 피로파괴의 주요 연구과제로서, 실제로 균열을 진전시키는 구동력은 균열의 닫힘의 정도에 의하여 결정되기 때문이다.

본 연구에서는 표면 결함 주위에서 발생한 작은 균열(Small Crack)의 거동을 평가하기 위하여, 표면파의 균열에 의한 산란의 이론적인 모델을 앞서 연구결과에서 제시하였고, 이를 작은 균열의 깊이 및 닫힘 현상에 관한 실험결과와 비교, 검토하고자 하였다. 즉, 표면파 반사에 미치는 결함의 영향을 고려하기 위하여 먼저 제안한 근사 파괴역학 모델을 기초로, 실제의 피로 시험 하에 있는 알루미늄 2024-T3 시료에 대하여 In-situ 초음파 실험하였다. 이들 실험결과로부터 완전히 열린, 혹은 하중에 의하여 부분적으로 열린 피로 균열의 깊이를 전편의 모델링에서 구한 표면파 반사계수의 물리 의미와 비교, 해석하였다. 또한 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하여 측정된 피로 균열의 깊이와 SEM 사진으로 조사된 결과를 비교, 검토하였다.

2. 실 험 방 법

2.1. 시험편 및 피로시험

실험에 사용된 재료는 1.6mm 두께의 Al 2024-T3 합금판재로서, 피로실험을 위한 시험편은 ASTM-E-466-96 규격에 의거하여 표준 피로시험편으로 가공하였다. 이들 피로시험편에 초기 표면균열의 가공을 위하여 전기방전기(EDM: Electrical Discharge Machine)를 이용하였고, 이 때 균열의 깊이는 260 μm로 직경 240 μm 인 피트를 피로시험편의 중앙에 방전가공하여 피로균열전파를 위한 피로시험편으로 준비하였다.

피로시험은 10 톤 유압식 서보콘트롤 MTS(Mechanical Testing System)에서 피로실험하였다. 이는 가공된 인공적인 유사균열, 즉 노치(Notch)로부터 피로시험에 의한 진 피로균열(True Fatigue Crack)을 대상으로 피로균열의 전파거동에 관하여 초음파탐상으로 피로균열의 거동을 실험하고저 하였다. 실제로 피로현상에 기인한 피로균열의 거동은 인공적인 균열이나 노치의 거동현상과는 상이하게 다른 전파거동을 보임을 알 수 있다. 한편 피로시험편에 작용하는 피로응력은 231 MPa로 피로하중의 응력비, 0.1을 실험에 적용하였다. 즉 최대응력이 시험재료의 항복응력의 75% 조건하에서 피로시험하였으며, 피로하중에 부과된 주파수는 15 Hz를 이용하였다. 이와같은 피로하중의 조건하에서는 피트의 모서리 부분에 걸리는 응력집중으로 인하여 재료의 전체 피로수명중 매우 초기 단계에서 피로균열이 발생, 전파하기 시작한다.

또한 SEM을 이용하여 피로시험도중 파괴된 시험편의 파단면으로부터 피로균열의 깊이를 측정,조사하였고, 이들 피로파단면을 관찰하였다.

2.2. 초음파 실험

피로시험과정에서 발생하는 피로균열의 시작과 전파과정을 조사하기 위하여, 피트와 균열로부터 반사되는 표면파를 측정하였다. 먼저 표면파를 발생시키기 위하여 중심주파수 5 MHz의 종파 트랜스듀서를 폴리스티렌 쐐기

(Wedge)에 조립하여, Fig. 1에 나타낸 바와 같이 이들 장치를 피로시험편 위에 장착하였다. 이때 단일 트랜스듀서를 이용하여 표면파의 전달과 함께 반사를 측정하였다. 또한 피로시험 도중 간헐적으로 측정된 표면파의 반사파를 분석하여 균열의 깊이를 예측하였다.

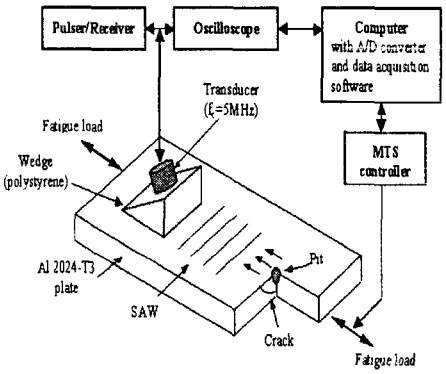


Fig. 1. Schematic of surface wave wedge transducer on the fatigue sample with pit.

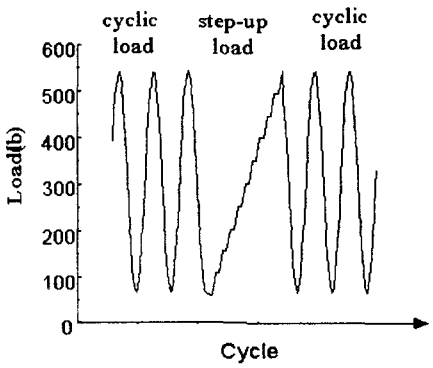


Fig. 2. Applied load pattern.

본 실험의 경우 피트와 피로균열의 크기가 수백 마이크로 미터 단위의 매우 작은 대상임으로, 트랜스듀서의 빔 각도 및 피로균열로부터의 상대적인 위치 등에 반사파의 파형이 매우 민감하게 변화하였다. 뿐만 아니라, 전피로시험과정에서 시험을 중단후, 즉 피로하중을 제거후 다시 동일한 피로하중을 부과하기는 매우 어렵다. 따라서 본실험에서는 쐐기와 트랜스듀서를 피로시험편 위에 단단히 고정을 하고 피로시험 도중 미리 정해진 피로 싸이클이 되면 피로하중을 잠시 멈추고, Fig. 2에 나타낸 바와같이 계단하중을 피로하중으로 부과하여, 계단하중의 각 단계에서 표면파 반사파를 측정하였다.

이 모든 과정은 관련된 실험장치 오실로스코우프, MTS 및 데이터 획득 장치를 주컴퓨터와 연결하여, 컴퓨터 프로그램으로 전 피로실험과정을 제어함으로써 피로실험을 가능하게 하였다. 이는 피로시험도중 초음파실험을 위하여 시험을 중단하고 시험편을 피로시험기에서 제거하여 초음파측정한 후, 재차 장착할 필요가 없는 In-situ 실험으로 피로실험하였다.

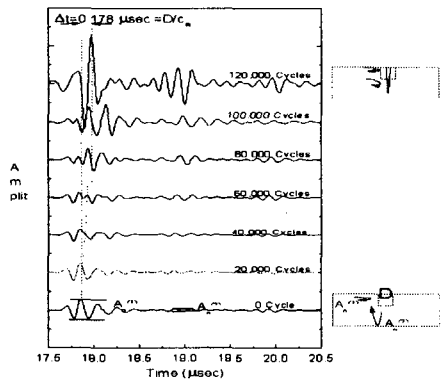


Fig. 3. Change of reflection signal during fatigue test.

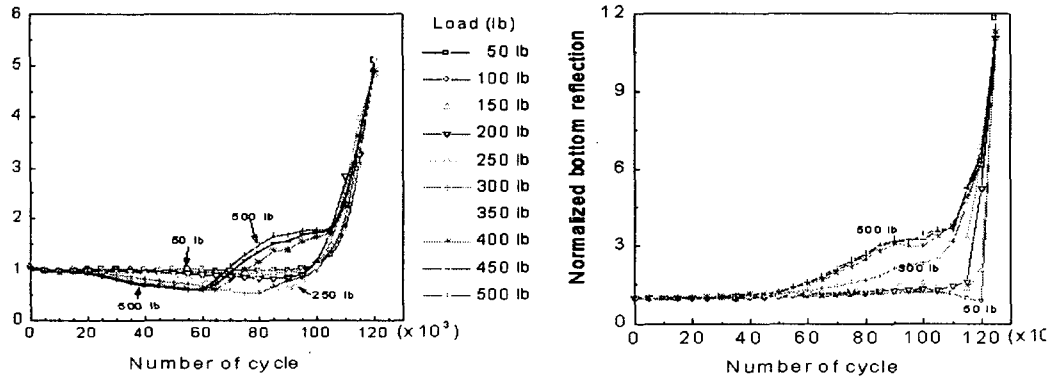
3. 결과 및 고찰

3.1. 초음파 실험결과 해석

Fig. 3의 0 cycle에서 나타낸 바와 같이 반사파 신호는 피트의 여러 모서리로부터의 반사파와 피트 끝에서 전단파로 모우드 변환(Mode Conversion)되어 시편 두께 내에서 다중 Echo를 일으키는 파동이 피트에 의하여 산란되어 트랜스듀서 방향으로 되돌아오는 반사파의 중첩이다. 그림에서 볼 수 있듯이 첫 번째 반사신호 $A_o^{(1)}$은 피트와 균열에 의한 반사에 기인한 것이며 피로가 시작되기 전에는 가장 큰 진폭을 가진다. 두 번 째 패킷(Packet)은 피트의 끝에서 모우드 변환된 전단파가 바닥으로부터 반사된 후 트랜스듀서로 돌아오는 반사파로서 피로시험동안 균열의 시작과 진전으로 인하여

반사파의 형태가 계속 변화하게 된다. 40,000 싸이클 이상의 신호부터는 피트와 균열에서 반사된 두 반사 파동의 간섭이 일어나기 시작한다. 이는 두 반사파의 경로차가 약 반 파장에 해당하여 상쇄간섭을 일으키기 때문이다. 하지만 그림에 점선으로 표시한 바와 같이, 결국 균열이 피트의 깊이를 넘어 성장하면 이때부터 균열에 의한 반사가 피트에 의한 반사보다 지배적으로 된다. 한편 균열이 성장함에 따라 바닥으로부터 반사되는 파동의 더 많은 양이 트랜스듀서 쪽으로 유도되어 두 번째 반사파의 크기는 단조롭게 증가하기 시작한다.

사계수가 최소를 나타내는 것은 앞서 언급한 바와 같은 상쇄간섭에 의한 것이다. 이후 하중의 증가에 따라 반사파 크기가 감소하다가 증가하며 파괴 직전 반사파의 크기는 하중에 거의 무관하게 되는 매우 복잡한 양상을 나타내었다. 한편 Fig. 4(b)에서 피로 싸이클의 증가와 하중의 증가에 따라 반사파 크기는 단조 증가하는 것으로 조사되었고, 특히 하중의 영향에 매우 민감한 것으로 볼 수 있다. Fig. 4(b)에서 50,000 사이클 부근에서 바닥으로부터의 반사의 기울기가 더 큰 기울기를 가지고 증가하는 것은 균열이 피트보다 깊기 때문에 훨씬



(a) (b)

(a) Normalized amplitude of the first reflection. (reflection from pit and crack)
(b) Normalized amplitude of the second reflection. (reflection from plate bottom)

Fig. 4. Change of reflections during fatigue test.

여러 하중 하에서의 두 반사파 신호의 크기를 0 싸이클에서 측정된 반사파 신호의 피크대 피크의 크기(Peak to Peak Amplitude), 즉 Fig. 3의 $A_0^{(1)}$ 와 $A_0^{(2)}$로 정규화하여 Fig. 4의 (a)와 (b)에 각각 나타내었다. Fig. 4(a)에서 볼 수 있듯이 약 60,000 싸이클까지는 하중이 증가함에도 불구하고 반사파의 크기가 오히려 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 하중이 증가함에 따라 균열의 열림도 크게 되어 균열로부터의 반사파 크기도 증가하지만, 피트의 반사파와 상쇄간섭을 일으켜, 균열에 의한 반사파의 크기가 피트에 의한 반사파의 크기와 같아질 때까지 중첩된 파동의 크기가 감소하기 때문이다. 55,000 싸이클(550 lb 하중하)에서 반

많은 바닥으로부터의 반사에너지가 균열의 면에 입사되어 트랜스듀서로 되돌아오기 때문이다.

65,000 피로 싸이클 후 인위적으로 파괴된 시험편의 파단면 사진을 Fig. 5에 나타내었다. 본 사진으로부터 균열의 깊이는 280 μm로써 피트의 깊이, 265 μm보다 약간 깊은 것으로 나타났다. 이는 앞서 기술한 피로 싸이클과 반사파 크기 변화의 관계에 대한 해석이 타당함을 증명한다.

더욱이 Fig. 4 (a)와 (b)에서 모두 하중이 150 lb이하에서는 약 100,000 싸이클까지 정규화된 반사파의 크기가 거의 변화하지 않음을 관찰할 수가 있다. 이것은 초음파가 압축 잔류

응력에 의하여 빈틈없이 닫혀있는 균열은 탐색할 수 없음을 예시하고 있다. 더 높은 하중에서 균열이 부분적으로 혹은 완전히 열리게 되고 초음파는 균열의 열린 부분만을 감지하여 초음파 산란으로부터 결정된 균열의 깊이는 유효균열깊이(Effective Crack Depth)가된다.

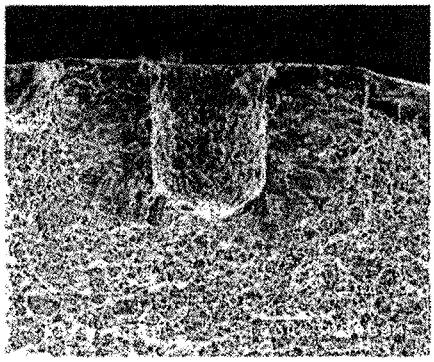


Fig. 5. Fracture surface at number of fatigue cycles 65,000.

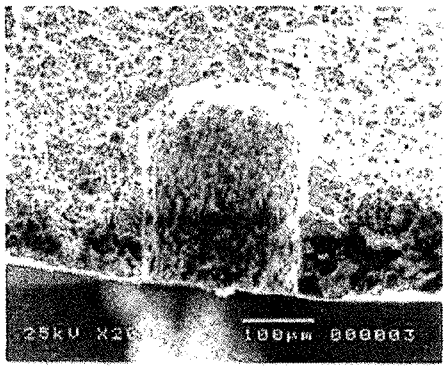


Fig. 6. Fracture surface at number of fatigue cycles 25,000.

3.2. 작은 모서리 균열 평가

앞서의 이론적 모델에 의한 균열의 깊이에 대한 표면파의 반사계수와 실험의 피로 싸이클에 대한 표면파의 반사계수를 이용하면 피로 싸이클에 대한 균열의 깊이를 예측할 수 있다. 앞서 Fig. 4에서 알 수 있듯이 균열의 깊이가 피트의 깊이와 같게 되었을 때 반사계수는 최소값을 가진다. 특히 본 연구의 피트와 균열 조건하에서는 트랜스듀서 상수 η_T를 계측하여 결정하는 대신 위의 사실을 토대로 이 상수는 실험에서 얻은 신호와 계산된 신호를 비교함으로서 결정하였다.

피로 시험도중 파괴시킨 시험편의 파단면 SEM 사진으로부터 직접 균열의 형상과 깊이를 조사 측정하였다. 피로 초기 단계에는 아래쪽으로 길쭉한 사분 타원 형상($c/a<1$)을 나타내다가, 이 후 점차 사분 원 형상($c/a\approx1$)으로 균열의 형상이 변화하여 종횡비(c/a)가 0.2-1 사의의 범위에서 변화하였다. 이를 Fig. 5와 6에 각각 나타내었다.

한편 직경이 다른 피트에서 조사된 균열의 깊이 변화에 대한 반사파 신호의 크기를 Fig. 7에 나타내었다. 피트의 직경에 의존하여 반사파가 보강적으로 혹은 상쇄적으로 발생할 수 있음을 보여 준다. 또한 직경이 255 μm인 피트에 대하여 이론적 예측의 결과를 실험결과를 비교하였다. 이론 결과는 실험결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

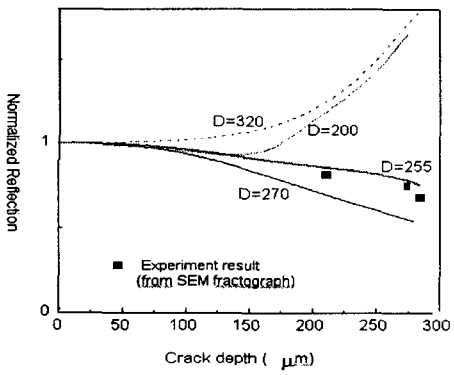


Fig. 7. Normalized reflection of the corner cracks on pit.

어떤 피로 싸이클에서 완전히 열린 균열의 깊이는 예측된 반사파 신호의 크기와 측정된 반사신호의 크기를 비교함으로써 결정될 수 있다. 부분적으로 개방된 균열의 유효 균열 깊이 또한 같은 방법으로 결정될 수 있다.

Fig. 8에서는 예측된 완전히 혹은 부분적으로 열린 균열의 깊이를 서로 다른 시편에 대하여 예시하고 있다. 몇 가지 흥미로운 결과들이

발견된다. 사용된 하중조건 하에서는 네 시편에 대한 결과에서 공통적으로 균열이 피로 수명의 매우 이른 단계에서 시작되었음을 알 수 있다. 피로 싸이클 5,000에서 균열의 깊이는 이미 50 μm에 달하고 있다.

$e = \alpha r_n[(k_t\sigma_{max}/\sigma_Y)^{2/3} - 1]$로 예측될 수 있다. 여기서 r_n은 노치 반경, k_t는 응력 집중계수, σ_{max}와 σ_Y는 각각 최대 피로응력 및 재료의 항복응력을 의미한다. 또한 차원의 보정

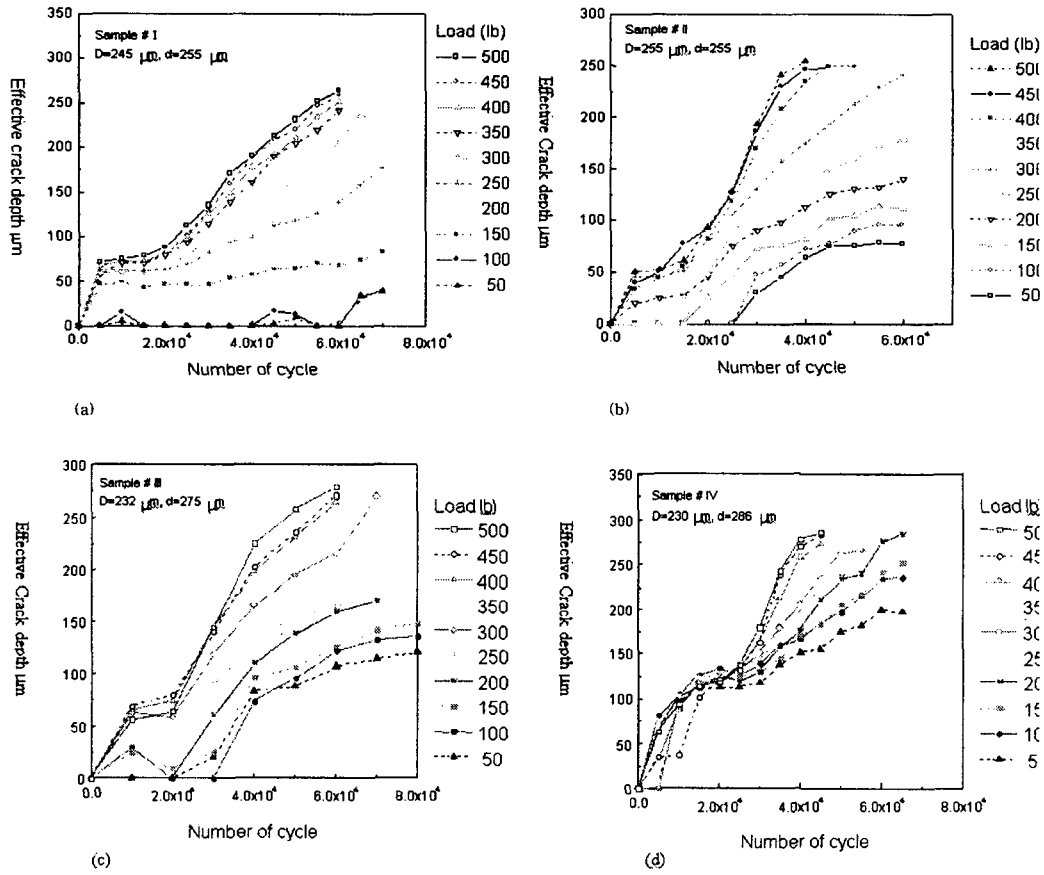


Fig. 8. Predicted crack depths for different samples based on scattering theory developed in this paper

이 그림들은 본 재료와 균열에 대한 균열 닫힘의 특성들을 보여주고 있다. 균열 닫힘을 유발하는 요인 중 하나로 피트 주위의 응력 집중에 기인한 소성변형과 이에 의한 압축 잔류 응력을 들 수가 있다. 이 소성 영역의 크기를 근사적으로 계산하기 위하여 2차원 노치 주위 소성영역의 크기를 계산하기 위하여 사용된 식 [9]를 이용한다. 즉, 소성역의 직경은 을 위하여 보정계수 $\alpha(>1)$를 도입하였다. 동일 양방향 응력 (Equal Biaxial Stress) 하의 쌍곡선형 단면을 가진 피트에 작용하는 응력집중계수가 $k_t = 3.4 - 3.8$ [10] 임을 기초로 하여 응력 집중계수를 $k_t = 3 - 4$로 가정, 보정계수를 1.5로 가정하면 소성역의 근사치는 피트로부터 최대 210 μm의 크기를 가진다. 이로부

터 균열은 피트의 깊이까지 성장하는 동안 내내 소성영역 내에서 압축 잔류응력 하에 있게 됨을 알 수 있다. Fig. 8(a)에서 균열은 낮은 하중(100 lb)에서는 거의 닫혀있고 높은 하중(450, 500 lb)에서는 완전히 열리게 됨을 보여준다. 서로 다른 시편에 있어서 이와 같은 결과는 낮은 하중에서 약간 다르게 조사되었다. Fig. 8(b)와 8(c)에서는 최소 하중 (50 lb)에서 균열은 피로 시험도중 부분적으로 열리게 되나, 피트의 깊이가 가장 깊은 경우 Fig. 8(d)에서와 같이 피로 시험의 처음부터 부분적으로 열려 있음을 볼 수 있다.

Fig. 9는 저주파수 이론을 이용하여 예측된 균열의 깊이와 SEM으로부터 관찰, 조사한 파단면 사진으로부터 직접 측정한 균열 깊이의 결과를 상호 비교한 결과로서, 본 실험에 사용된 각 시편의 피트 깊이는 $\pm 20\mu m$의 오차가 있음에도 불구하고, 예측된 균열의 깊이와 실험값은 상호 일치하는 것으로 나타났다. 그림에서 피트의 양쪽에서 발생한 균열은 항상 비대칭적임으로 그림에는 깊은 균열과 얕은 균열의 깊이를 각각 표시하였다.

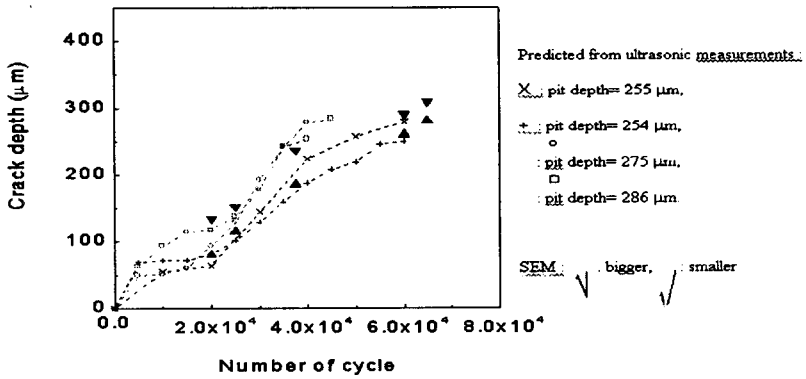


Fig. 9. Crack depth predicted and measured from SEM

5. 결 론

피트 형상의 표면 결함으로부터 발생하는 미소 균열을 규명하기 위하여 표면 음파를 이용한 초음파 실험으로 얻은 결과는 다음과 같다. 저주파수 산란이론과 근사적인 파괴역학 모델을 이용한 표면파의 산란모델과 본 실험의 결과는 상호 부합되는 것을 알 수 있었다. 즉, 초음파를 이용하여 균열의 깊이를 피로 싸이클의 함수로 예측할 수 있었고, 균열의 닫힘 현상을 조사할 수 있어, 부분적으로 닫힌 균열의 유효균열깊이(Effective Crack Depth)의 평가가 예측 가능하였다. 또한 이들 결과는 피로 파단면의 SEM 사진의 균열 깊이와도 잘 일치함을 알 수 있었다. 본 방법은 피트 형상의 미소 표면 결함이나 리벳 홀 주변에 발생한 균열의 탐지에 적합한 평가 방법으로 생각할 수 있다.

참 고 문 헌

1. J. C. I. Chang, Structural integrity of aging aircraft, AD-Vol.47, ASME, pp.1-7, 1995.
2. B. R. Tittman and O. Buck, Proceedings of the DARPA/AFML Review of Progress in Quantitative NDE, pp. 411-421, 1980.
3. B. T. Khuri-Yakub, G. S. Kino and A. G. Evans, J. Am. Ceram. Soc., 63(1,2), pp.65-71, 1980.
4. J. J. W. Tien, B. T. Khuri-Yakub, G. S. Kino, D. B. Marshall and A. G. Evans, J. Nondestr. Eval., 2(3,4), p.219-229, 1981.
5. M. T. Resch and D. V. Nelson, Small-crack test methods, ASTM STP 1149, J. M. Larsen and J. E. Allison, Eds., pp.169-196, 1992.
6. D. A. Mendelsohn, J. D. Achenbach and

L. M. Keer, Wave Motion, 2, pp.277-292, 1980.
7. J. D. Achenbach, A. K. Gautesen and D. A. Mendelsohn, IEEE Transc. Sonics and Ultras. SU-27, pp.124-129, 1980.
8. M. Hirao, H. Fukuoka and Y. Miura, J. Acoust. Soc. Am., 72(2), pp. 602-606, 1982.
9. N. E. Dowling, Fracture Mechanics, ASTM STP 677, Smith, C. W., Ed., pp.247-273, 1973.
10. R. E., Jr. Reed and P. R. Wlicox, NASA Technical Memorandom 43829, 1979.