

음향방출법을 이용한 스테인레스강 피로수명 예측

김용환* · 정창규* · 양유창* · 한경섭**

Fatigue Life Prediction of Stainless Steel Using Acoustic Emission

Y.H. Kim, C.K. Jung, Y.C. Yang and K.S. Han

Key Words : Acoustic Emission (음향방출법), Fatigue Life (피로수명)

Abstract

The feasibility of the acoustic emission technique in predicting the residual fatigue life of STS304 stainless steel is presented. Acoustic emission was continuously monitored during the fatigue tests. Considerable acoustic emission occurred during the first few cycles. Acoustic Emission increased rapidly at about 90% of the fatigue life, clear and ample warning of impending fatigue failure was observed. Fatigue damage accumulation was evaluated in terms of an AE cumulative counts. The AE cumulative counts may be taken as an indicator of fatigue cumulative damage. Fatigue damages corresponding to 20, 40, 60 and 80% of the total life were induced at a cyclic stress amplitude. The specimens with and without fatigue damage were subjected to tensile tests. In tensile tests, the total cumulative counts were reduced with increasing fatigue damage. It was observed that the residual tensile strength of material did not change significantly with prior cyclic loading damages.

1. 서론

최근에 1960년대부터 건설되어 온 각종 산업 설비와 공공구조물의 대형사고가 빈번히 발생하여 경제적, 사회적 피해가 발생하고 있다. 이러한 산업설비의 70% 이상은 피로에 의한 재료의 파손으로 밝혀지고 있고 이에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 실제 산업설비에 적용되는 구조물은 초기에 설계할 때 충분한 피로수명을 고려하여 제작된다. 하지만 대부분의 경우, 실제 구조물에 작용하는 하중은 정확한 예측이 어려우며 또한 사용환경에서 예상치 못하는 불확실성이 존재하게 된다. 초기 설계에는 이런 영향이 충분히 고려되지 못하기 때문에 실제 피로수명(Fatigue life)을 예측하는 것이 어려운 실정이다. 따라서 실제 구조물에서와 같이 가해진 피로 하중을 모르거나 불확실성이 존재하는 조건에서 피로수명을 평가하는 방법을 개발하는 것이 설계의 신뢰성을 높이고, 실제 구조물의 유지, 보수 비용의 절감을 가져올 수 있으므로 산업설비의 안전성 평가에 필요하다.

이런 이유로 최근 구조물의 안정성 평가를 위해서 비파괴검사(Nondestructive Test)가 널리 실용화 되고 있다. 음향방출법(Acoustic Emission, AE)은 재료가 하중을 받아 소성변형, 균열의 발생 및 성장 등에 의하여 재료내부에서 방출되는 에너지, 즉 탄성파를 이용하는 것으로서 재료의 손상과정을 나타낼 수 있는 아주 유용한 비파괴 평가 기법이다. AE 실용화를 위해서는 구조물의 결함 위치 및 크기, 손상 정도 등 AE 신호특성을 평가 분류하여야 하며 파손여부를 평가하는 기준을 제시하여야 한다. Baram[1]등은 AE 진폭분포와 피로균열 성장율과의 관계를 규명하였으며, Fang and Berkovits[2,3]는 초기피로균열의 발생, 진전특성에 따른 AE 신호를 분석하였다. 최근에는 Lee 등[4]이 AE를 이용하여 알루미늄 합금의 균열 단합 하중을 규명하였다. 위의 연구들은 피로에 따른 AE 신호특성 분석에 초점이 맞춰져 있어서 피로손상을 받은 재료의 AE 신호 분석을 하지 못하였다.

본 연구에서는 음향방출법(Acoustic Emission)을 이용하여 스테인레스강의 피로손상에 따른 AE 신호를 분석하고 피로손상시편을 제작하여 피로손상 정도에 따른 음향방출 신호 특성 해석을 통해 피로 잔류수명 예측하는 것을 목적으로 한다.

* 포항공과대학교 기계공학과 대학원

** 포항공과대학교 기계공학과

2. 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용되는 시험재료는 STS304 스테인레스강으로 자성을 띠지 않으며 내식성과 내열성이 좋아서 열교환기, 과열기의 튜브나 배기구등 구조용 부재나 화학 공업설비 등 구조용 강으로 널리 쓰인다. STS304의 화학조성과 기계적 성질은 Table 1 과 Table 2 에 나타내었다. 인장 시험편은 ASTM E8 에 의거하여 두께가 2mm 인 판상 형태로 선반 가공하여 제작하였고 피로시험에 사용된 시험편의 규격과 재료는 인장시험에 사용된 것과 동일하게 제작하였다. 시험편 형상은 Fig. 1 에 나타내었다.

Table 1. Chemical composition of STS 304

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.052	0.64	1.21	0.023	0.011	9.16	18.13

Table 2. Mechanical property of STS304

Yield strength	Tensile strength	Elongation
320 MPa	645 MPa	36.53 mm

2.2 실험장치 및 방법

AE 계측에는 PAC 사의 SPARTRAN AT 시스템과 150kHz R-15 공진형 센서를 사용하였으며 발생하는 신호를 민감하게 수집하기 위해 시편과 센서 사이에 글리세린을 얇게 바른 후 천테이프로 센서를 압착 하였다. 센서로부터 검출된 신호는 50-250kHz 범위의 필터(band pass filter)를 통하여 잡음(noise)을 제거하였다. 필터를 통해 여과된 신호는 매우 미약한 신호이기 때문에 1 차적으로 예비증폭기(pre-amplifier)에서 40dB 로 증폭한 후 AE 본체인 SPARTRAN AT 내의 주증폭기(main amplifier)에서 2 차적으로 다시 20dB 로 증폭하였다. 외부로부터 전기적, 기계적 잡음(noise) 신호를 제거하기 위하여 문턱값(threshold value)을 40dB 로 고정하여 AE 파라미터에 대한 분석을 행하였다. Fig. 2 는 전체적인 AE 시스템을 나타낸 것이다.

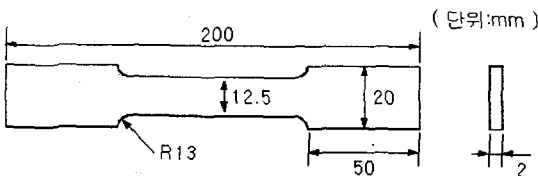


Fig. 1 Geometry of specimen

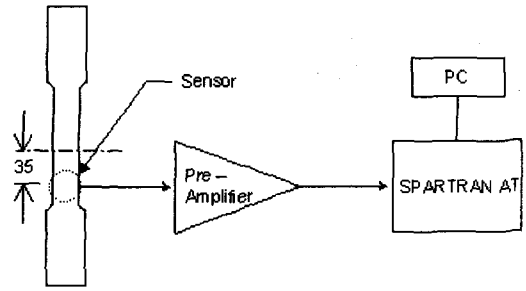


Fig. 2 Schematic diagram of AE system

인장시험(tensile test)과 피로시험(fatigue test)은 Shimadzu 사의 만능유압시험기를 이용하여 상온에서 수행하였다. 피로시험은 하중제어(load control)로 수행하였다. 응력비(stress ratio)는 0.1, 주파수는 6Hz, 응력파형은 sine 파로 하였다. 피로시험을 통해서 기본적으로 STS304 스테인레스강의 S-N 곡선을 구하였다. AE 신호 계측은 인장강도의 0.6(375 MPa)과 0.7(448 MPa) 응력수위(stress level)에서 AE 신호를 모니터링 하였다.

인장시험은 변위제어(5mm/min)로 수행하였고 인장강도의 0.6 과 0.7 응력수위에서 피로수명의 20, 40, 60, 80%의 피로손상 받은 시편을 3 개씩 제작하여 각 손상정도에 따른 AE 신호를 계측하였다. 인장강도의 0.6 과 0.7 응력수위에서의 피로수명은 각각 피로시험에서 구한 S-N 곡선을 기준으로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로시험

피로시험은 인장강도에 대한 비가 0.55, 0.6, 0.65, 0.7, 0.75, 0.8 이 되는 응력 수위에 대해 각각 3 번씩 실험하였다. 피로시험에서 구해진 S-N 곡선은 Fig.3 에 나타내었다. 여기서 피로한도(fatigue limit)를

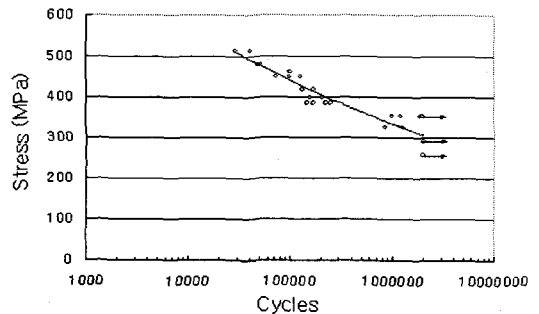
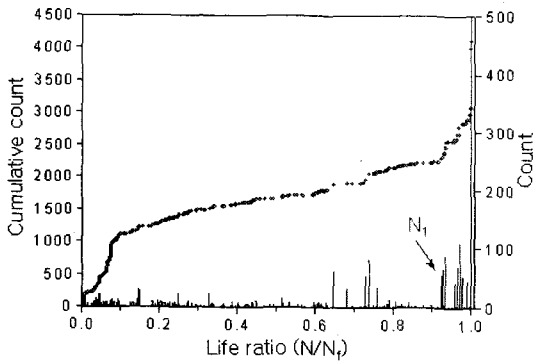
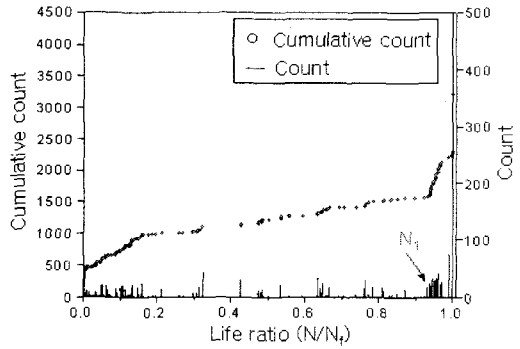


Fig. 3 S-N curve



(a) Stress level 0.6



(b) stress level 0.7

Fig. 4 AE counts versus Life ratio(N/N_f)

는 2×10^6 사이클을 기준으로 하여 320MPa 이었다. S-N 곡선에서 응력수위 0.6 과 0.7 에서의 피로수명은 각각 100,000 과 220,000 사이클이다. 이 사이클은 피로손상 받은 시편 제작시 기준으로 사용되었다.

일반적으로 연성이 강한 재료의 피로파손은 표면에서의 슬립밴드에 의한 미소 균열 발생으로 점차 피로하중 사이클의 증가에 따라 균열이 성장하여 파손에 이르게 된다. Fig.4 는 응력수위 0.6 과 0.7 에서의 피로 시험시 AE 신호를 계측하여 AE counts 와 Life ratio(N/N_f)의 관계를 나타낸 것이다. 횡축은 각 피로사이클 수를 시험편이 파단 되었을 때 사이클, 즉 피로수명 N_f 로 무차원화 시켜 나타내었고 종축은 AE cumulative counts 와 counts 를 나타내었다. Fig.4 의 실험결과에서 보여주는 바와 같이 응력수위 0.6 과 0.7 에서의 AE 신호는 비슷한 경향을 보이고 있고, 피로하중 사이클의 증가에 따른 AE counts 변화는 일반적으로 피로균열 성장 곡선과 유사하게 크게 세 영역으로 나누어 증가하고 있음을 알 수 있다. 피로수명의 20%이내의 초기 사이클에서 많은 AE 신호가 검출되고, 20%에서 90%사이의 피로수명에서는 AE 신호가 비교적 일정하게 증가한다. 피로수명의 90%부터는 AE 신호가 급격히 증가하여 파단에 이른다. Fig.4 에서 N_f 은 피로균열 진전의 개시점임을 부여주고 있고 피로에 의한 파단이 임박했음을 보여주고 있다. 한편 이와 같은 피로하중 사이클의 증가에 따른 AE counts 증가 현상은 재료의 미시적 피로손상 진전 기구에 기인 되는 것으로, AE counts 가 피로손상 과정을 나타내는 중요한 파라미터임을 알 수 있다.

피로손상 과정을 AE 로 나타내면 Fig.5 와 같다. 횡축은 각 피로사이클을 피로수명(N_f)로 무차원화

시켜서 나타내었고 종축은 피로시험시 파단 될 때까지 발생한 전체 AE counts(η_f)로 각 사이클에 발생하는 AE counts(η)를 무차원화 시켜서 나타내었다. AE counts 가 재료의 피로손상 과정을 잘 표현하고 있으므로 이 파라미터를 이용해 피로에 따른 손상(Damage)을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$Damage(D) = \frac{\eta}{\eta_f} \quad (1)$$

식(1)로 표현한 $Damage(D)$ 와 Life ratio(N/N_f)와의 관계에서 피로에 의한 손상은 3 영역으로 나눌 수 있다. (I)영역은 피로수명(fatigue life)의 0 에서 20% 정도로 초기 AE 신호가 다수 발생하는 영역으로 피로 하중 사이클에 의한 재료의 초기 탄소성 변형(initial elasto-plastic deformation)에 의해 발생하는 것으로 보인다. (II) 영역은 피로 하중 사이클 증가에 따라 재료 표면에서의 슬립밴드(slip band)에 의한 미세 균열 생성(micro crack incubation and initiation)에 의해 지배되는 영역으로 피로수명의

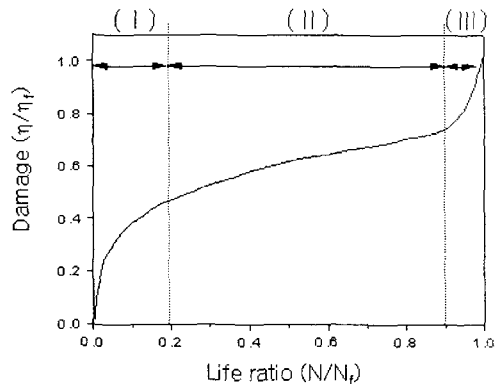


Fig. 5 $Damage(D)$ versus Life ratio(N/N_f)

90%까지 전체적으로 AE 신호가 일정하게 증가하는 영역이다. High cycle fatigue 에서 피로균열은 슬립밴드에 의해 재료표면에서 발생하며 전체 피로수명에서 균열발생에 따른 시간이 가장 많이 걸리는 영역임을 알 수 있다. (III) 영역은 피로하중 사이클 증가에 따라 (II) 영역에서 발생한 미세 균열들간의 상호연결(link-up) 현상으로 인한 거시 균열로의 급격한 성장에 기인되는 것으로 피로 균열성장(crack propagation) 영역이다.

3.2 인장시험

STS 304 스테인레스강은 연신율이 높으며 연성이 큰 재료임을 인장시험 결과 알 수 있었다. 피로손상에 따른 재료의 AE 신호분석을 위해서 피로손상 시편을 제작하였다. 피로손상 시편은 피로시험에서 구한 Fig.3 의 S-N 곡선에서 응력수위 0.6 과 0.7 에서의 피로수명을 기준으로 근거로 20, 40, 60, 80%에 해당하는 피로하중 사이클을 주었다. Fig.6 에 정상시편과 각각의 피로 손상 받은 시편

의 인장시험 결과를 나타내었다. 횡축은 변위(displacement)를, 종축은 힘(load)과 AE cumulative counts 를 각각 나타내었다. 변위와 AE cumulative counts 와의 관계에서 정상시편과 피로손상 받은 시편 모두 AE counts 가 항복점 근처에서 급격히 증가함 보인다. 이는 인장 하중을 받을 때 항복점 근처에서의 소성 영역 형성과 미세균열 생성이 AE counts 증가에 기인하는 것으로 보인다. 항복점을 지나 변위가 10mm 부터 AE 신호가 일정하게 증가하여 파단에 이른다. 연성이 큰 재료인 STS 304 의 인장시험시 AE 신호 특성은 항복점에서 많이 검출되고 소성역에 접어들면 급격한 AE 신호 검출은 되지 않는 것을 알 수 있다.

Fig.6 의 힘(load)과 변위(displacement)와의 관계에서 정상시편과 각각의 피로손상 받은 시편의 인장강도는 비슷하다. 피로손상은 인장강도에 영향을 거의 주지 않음을 알 수 있는데 이는 high cycle fatigue mechanism 과 일치한다. High cycle fatigue 에서는 피로수명은 균열 발생 기간(crack initiation period)에 의해 결정되며 피로수명의 마지막 단계에서 균열 진전(crack propagation)이 일어나 파단에 이른다. 따라서 피로수명의 20, 40, 60, 80%에서의 피로 손상은 미세균열이 발생하지 않았거나 균열이 발생했다라도 매우 작고, 적은 균열 분포(micro-crack density)를 이루며, 균열들간의 상호연결(link-up)이 되어 있지 않아서 재료의 인장강도에는 영향을 끼치는 않는 것으로 보인다. High cycle fatigue mechanism 은 Fig.4 의 피로시험시 AE 신호 특성을 통해서도 알 수 있다.

Fig.6 에서 피로손상 시편의 피로손상 정도가 증가함에 따라 인장시험시 AE total counts 가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 피로에 의한 재료내부의 손상 및 변형에 따른 결과로 재료 내부에 피로에 의해 발생한 미소 균열 등 피로손상이 인장강도에 영향을 끼치지 않을 정도로 미세하지만 AE count 에는 영향을 미친다. 이는 AE 신호의 비가역성(Kaiser effect)에 기인하는 것으로 피로손상이 클수록 그 재료에 균열 등 손상이 많아 하중이 가해졌을 때 그 손상만큼의 AE 신호가 발생하지 않는 것으로 보인다. Table 3 은 정상시편과 피로손상 받은 시편의 인장시험시 발생한 전체 AE counts 를 나타낸 것이다. η_{ϕ} 는 ϕ 만큼 피로손상 받은 시편의 인장이 발생한 전체 AE counts 이고, $\overline{\eta_{\phi}}$ 는 ϕ 만큼 피로손상 받은 시편의 인장시험시 발생한 전체 AE counts 평균이다. 인장시험시 정상시편에서 발생한 전체 AE counts 평균($\overline{\eta_{1.0}}$)은 3215 이다.

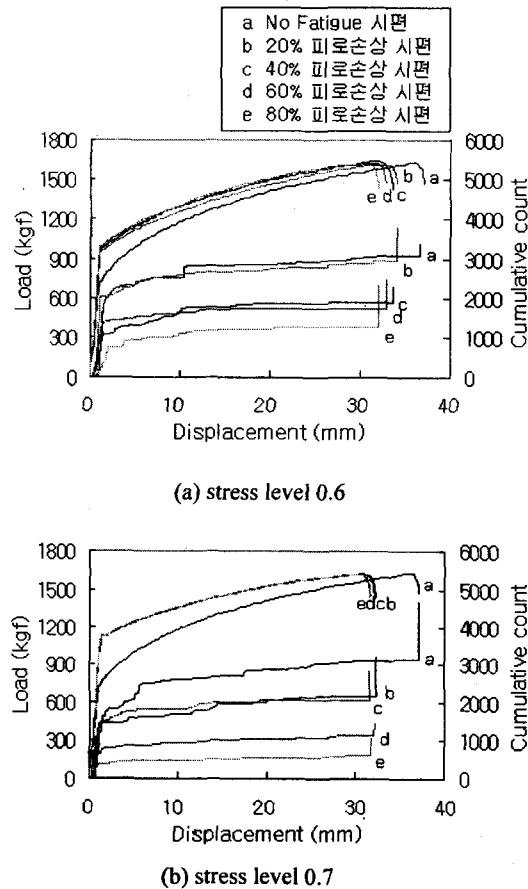


Fig. 6 Load and AE cumulative counts versus displacement

Table 3. AE total counts in tensile test

Stress level	$\eta_{i,20}$	$\eta_{i,40}$	$\eta_{i,60}$	$\eta_{i,80}$	$\overline{\eta}_{i,20}$	$\overline{\eta}_{i,40}$	$\overline{\eta}_{i,60}$	$\overline{\eta}_{i,80}$
0.6	2501	1892	1740	1740	2828	2125	1880	1161
	2966	2241	1891	1891				
	3018	2244	2008	2008				
0.7	2064	2156	1137	618	2180	1846	1181	814
	2179	1800	1197	831				
	2298	1582	1209	995				

응력수위 0.6 과 0.7 에서의 AE total counts 변화와 피로손상(N/N_f)과의 관계를 Fig.7 에 도시하였다. 종축은 인장시험시 정상 시편의 AE total counts 로 각각의 피로손상 받은 시편의 AE total counts 를 무차원 시켜서 나타내었다. Fig.7 에서 보듯이 피로손상 증가에 따라 인장 하중을 받았을 때 AE total counts 가 비선형적으로 감소함을 알 수 있다. 피로손상 증가에 따른 AE counts 감소는 재료가 피로하중을 받았을 때 생성된 재료내부의 균열이나 소성변형등이 원인으로서 인장시험시 발생한 AE total counts 로 피로손상 정도를 나타낼 수 있다. 따라서 피로손상 정도와 AE total counts 관계에서 피로에 의한 잔류수명을 예측할 수 있다. 각 시편들의 피로에 따른 손상을 AE counts 로 나타내면 피로손상은 다음과 같이 비선형 손상 모델로 나타낼 수 있다.

$$Damage(D) = \left(\frac{N}{N_f}\right)^c = 1 - \frac{\eta_{i,\phi}}{\eta_{i,0}} \quad (2)$$

응력수위 0.6 과 0.7 에서의 c 값은 각각 1.5131, 0.8881 이다. 이 비선형 손상모델을 통해 재료의

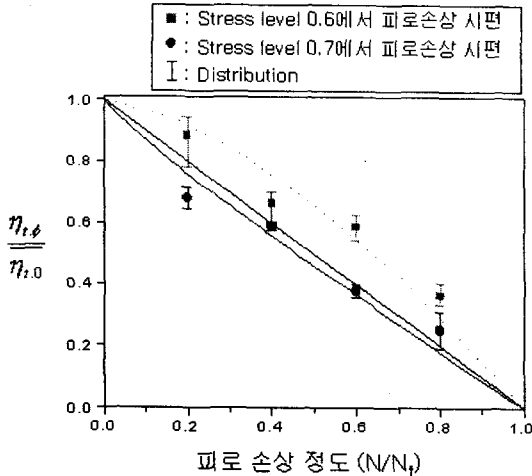


Fig. 7 Ratio of AE total counts ($\frac{\eta_{i,\phi}}{\eta_{i,0}}$) versus fatigue damage

잔류수명 예측이 가능하다. 또한, 응력 수위에 따라 피로손상 누적률이 다르다는 것을 보여주고 있는데 같은 피로손상(N/N_f)에서 피로에 의한 손상이 높은 응력 수위일 때 더 크게 뒝을 보여주고 있다.

Marco 와 Stakey[5]가 하중에 따라 변하는 비선형의 피로손상 함수를 제안하여 하중수위에 따라 손상 누적률이 다름을 보여 주었고, Kutt 와 Bieniek[6]은 응력수위에 따른 다른 손상모델을 적용하여 응력간 간섭효과를 고려한 비선형 피로손상 법칙을 제안하여 변동 하중하의 피로 잔류수명을 예측하였다. 이런 비선형 모델들은 재료 상수들을 구하기 위해 많은 실험이 필요하다는 단점이 있다. 본 연구에서는 피로손상 시편의 인장시험시 AE 신호 특성을 해석 함으로서 각각의 응력수위에 따른 피로 손상률을 구할 수 있어 변동 하중하의 피로 잔류수명 예측에도 적용 가능하다.

4. 결론

음향방출법(Acoustic Emission)을 이용하여 피로 시험과 피로손상 받은 시편 인장시험을 모니터링 하여 AE 신호로 피로손상(Fatigue damage)과 피로 잔류수명(Residual fatigue life)을 예측하였다.

(1) AE 로 피로에 따른 손상과정을 3 영역으로 나눌 수 있으며 피로균열 진전 시점을 알 수 있다. (I)영역은 피로하중 초기에 재료 표면에 발생하는 반복경화 현상으로 초기 AE 신호가 다수 발생하는 영역으로 피로 하중 사이클에 의한 재료의 초기 탄소성 변형(initial elasto-plastic deformation)영역이다. (II) 영역은 피로 하중 사이클 증가에 따라 재료 표면에서의 슬립밴드에 의한 미세 균열 생성(micro crack incubation and initiation)영역으로 피로수명의 대부분을 차지하는 영역이다. (III) 영역은 (II) 영역에서 발생한 미세 균열들간의 상호연결(link-up) 현상으로 인한 거시 균열로의 급격히 성장하는 균열성장(crack propagation)영역으로 이 영역에서의 급격한 AE counts 증가가 피로 균열 진전 시점임을 보여주는데 피로수명의 90%정도 되는 시점이다.

(2) 피로 손상 받은 시편의 인장시험 결과 피로 손상은 인장강도에 영향을 거의 주지 않는다. 피로수명의 80%까지의 피로손상은 미세균열이 발생하지 않았거나 균열이 발생했다라도 거시적 균열로 진전하지 않아 재료의 인장강도에는 영향을 끼치지 않는다.

(3) 피로손상 받은 시편의 인장시험시 AE 신호 특성은 피로에 의한 손상이 증가될수록 AE total counts 가 감소한다. 피로손상 정도와 AE total counts 와의 관계를 이용하여 잔류수명을 예측할 수 있다.

(4) 인장시험시 AE total counts 와 피로손상과의 관계에서 응력수위에 따라 피로손상 누적률이 다르다는 것을 보여준다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안정성 평가 연구센터의 지원하에 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Baram. J and Rosen. M, 1981, "Prediction of low-cycle fatigue-life by acoustic emission-1 : 2024-T3 aluminum alloy", Engineering Fracture Mechanics, vol. 15, pp. 477-386
- (2) Averanam Berkovits and Daining Fang, 1995, "Study of fatigue crack characteristics by acoustic emission", Engineering Fracture Mechanics, vol.51, pp. 401-416
- (3) D. Fang and A. Berkovits, 1994, "Evaluation of fatigue damage accumulation by acoustic emission", Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structure, vol. 7, pp. 1051-1067
- (4) C.S. Lee, C.G. Park and Y.W. Chang, 1996, "Precise determination of fatigue crack closure in Al alloys", Materials Science and Engineering, vol. A216, pp. 131-138
- (5) S.M. Marco and W.L. Starkey, 1954, "A concept of Fatigue Damage", Journal of Applied Mechanics, vol. 76, pp. 627-643
- (6) T.V. Kutt and M.P. Bieniek, 1988, "Cumulative damage and fatigue life prediction", AIAA Journal, vol. 26, pp. 213-219