

이축하중을 받는 SM45C강의 피로균열의 발생과 성장거동

김상태* · 박선홍* · 권숙인**

*영남대학교 기계공학부

**고려대학교 재료공학부

Behavior of Fatigue Crack Initiation and Growth in SM45C Steel under Biaxial Loading

SANG-TAE KIM* · SUN-HONG PARK*, AND SOOK-IN KWUN**

*School of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan, Korea

**School of Materials Engineering, Korea University, Seoul, Korea

KEY WORDS: SM45C, Biaxial Loading 이축하중, Mean Stress 평균응력, Crack Initiation 균열생성, Crack Propagation 균열 성장, Crack Growth Direction 균열진전 방향

ABSTRACT: Fatigue tests were conducted on SM45C steel using hour-glass shaped smooth tubular specimen under biaxial loading in order to investigate the crack formation and growth at room temperature. Three types of loading systems, were employed fully-reserved cyclic torsion without a superimposed static tension or compression fully-reserved cyclic torsion with a superimposed static tension and fully-reserved cyclic torsion with a superimposed static compression. The test results showed that a superimposed static tensile mean stress reduced fatigue life however a superimposed static compressive mean stress increased fatigue life. Experimental results indicated that cracks were initiated on planes of maximum shear strain whether or not the mean stresses were superimposed. A biaxial mean stress had an effect on the direction that the cracks nucleated and propagated at stage 1 (mode II).

1. 서 론

기계부품과 구조물에 대한 피로 평가는 국가 기간산업뿐만 아니라, 작은 기계부품에 이르기까지 넓은 분야에 걸쳐 설계 단계부터 고려해야 할 중요한 요소가 되었다. 역사적으로 항복 강도 이하의 응력에서 발생한 많은 실제 구조물이나 기계부품의 파괴는 대부분 정적인 하중보다는 반복하중에 의한 피로 때문이고, 현재까지 보고된 이러한 사고의 90% 이상이 피로에 의한 것이라고 보고된 바 있다(Wang and Miller, 1991). 이 때문에 지난 수십 년 간 피로에 관한 연구가 활발히 진행되어져 왔고 지금도 역시 활발히 진행중이다. 실제의 많은 구조물이나 기계부품 등은 운전 중에 2축 또는 다축하중을 받는 경우가 대부분이다. 특히 가스터빈축, 헬리콥터의로터축, 발전용 터빈축, 선박의 동력 전달축 등은 인장 또는 압축하중과 더불어 비틀림 하중이 동시에 작용하는 경우가 많다. 이러한 구조물이나 기계 부품의 피로수명을 평가하기 위해서는 다축피로를 고려해야 하지만 그 동안 많은 연구가 일축 인장/압축 하중만을 받는 mode I 상태로 단순화하여 시험한 경우가 많았다. 이러

한 이유로 인해 그 동안 다축하중이 작용하는 구조물이나 기계부품의 정확한 피로거동을 관찰하고, 피로수명을 평가하기에는 한계가 있었다. 이에 다축피로는 지난 30여년 동안 피로 연구 분야에서 가장 급속히 발전한 관심분야로 부상하였다. 특히 상기한 구조물이나 기계부품들에 작용하는 비대칭응력($\sigma_m \neq 0$)은 일축하중에 의한 피로거동과 상이한 거동을 보이기 때문에 이를 고려한 피로 설계는 매우 중요하다(Wang and Miller, 1991; Zhang and Akid, 1997; Ritchie et al., 1982; Ritchie et al., 1985).. 비록 지난 30여년 동안 이러한 평균응력에 관한 연구도 활발히 진행되어왔지만 평균응력으로 인한 피로균열의 발생 및 성장거동에 관한 연구는 여전히 드문 실정이다. 이에 본 연구에서는 비틀림 반복하중에 정적인 인장하중과 압축하중이 작용하는 SM45C의 피로균열의 발생과 성장 거동을 시험을 통해 관찰하였다. 이를 위하여 재료는 인발 가공된 구조용 보통 탄소강인 SM45C를 사용하였고, 시편은 원형 튜우브형으로 가공하였다. 균열의 발생 및 성장 거동을 관찰하기 위해 일정한 cycle마다 cellulose acetate replica를 이용해 표면 복제하고 파단 후 SEM을 사용하여 파단면을 관찰하였다. 이를 통해 이축 평균응력이 SM45C의 피로거동에 미치는 영향을 규명하고, 피로 수명을 증가시킬 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

제1저자 김상태 연락처 : 경상북도 경산시 대동 214-1
053-810-2456 stkim@yu.ac.kr

2. 실험방법

2.1 실험장치 및 재료

본 연구에 사용된 재료는 인발 가공된 구조용 보통탄소강인 SM45C로 그 화학적 조성과 기계적 물성치는 Table 1과 Table 2와 같고 미세조직은 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 미세조직에서 볼 수 있듯이 인발 제작과정에서 나타나는 특징인 초석 페라이트의 방향성이 관찰된다. 즉 Fig. 4의 횡단면 미세조직에서 펄라이트는 방향성이 없는 등축정인데 반해 초석페라이트는 축방향으로 길게 배열된 것을 관찰할 수 있다.

Table 1 Chemical composition of a SM45C

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Fe
0.45	0.18	0.67	0.027	0.012	0.06	0.05	0.12	bal

Table 2 Mechanical property of a SM45C

Tension	Ultimate strength(MPa)	591
	Yield stress(0.2% offset,MPa)	371
	Modulus of elasticity(GPa)	204
Torsion	Ultimate strength(MPa)	663
	Yield strength(MPa)	243
	Shear modulus(GPa)	79

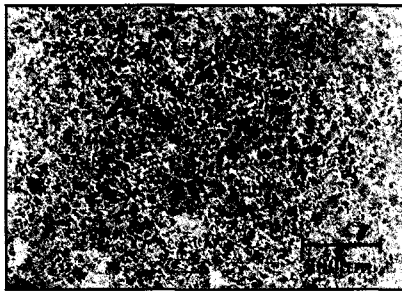


Fig. 1 A Microstructure of a transverse section of SM45C steel

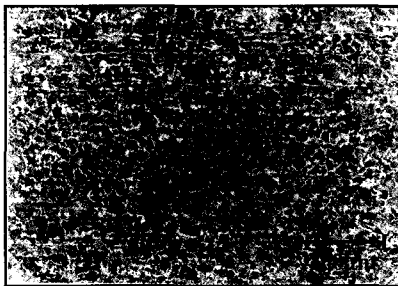


Fig. 2 A Microstructure of longitudinal section of SM45C steel

2.2 시험방법

본 실험에 사용된 이축피로 실험 장치는 혼합 모드 하중하에서 피로 특성을 평가하기 위하여 MTS사의 최대하중 100 kN, 최대 torque 1100 N-m인 서보 유압식 시험기 (MTS 809 Axial/Torsional Test System)을 사용하였고, Testware-SX의 소프트웨어 파형을 구현하였다. 시편은 얇은 두께의 튜브형 시편으로서 시편의 외부는 선반가공한 후 단계적으로 연마하여 마지막에 #2000 사포로 연마하였다. 또한 시편의 중앙에 20mm의 가장 얇은 평형부를 가공하여 피로 균열이 이 영역에서만 발생하여 성장하도록 하였다. 평형부에서 시작되는 균열의 방향과 길이를 확인하기 위해 일정한 cycle에서 평형부를 cellulose acetate replica로 표면복제 하였다. 본 실험에 적용된 하중의 형태는 아래와 같다.

- i) 반복 비틀림하중+ 정적 인장하중
- ii) 반복 비틀림하중
- iii) 반복 비틀림하중 + 정적 압축하중

반복 비틀림 하중의 경우 응력비는 -1로 하고 비틀림응력은 비틀림 항복응력의 75%인 182MPa로 하였다. 정적 인장응력과 압축응력은 인장 항복응력의 60%인 ±222MPa로 가하고 반복하중의 주파수는 4Hz이고 파형은 사인파로 하여 균열 발생과 전진방향 그리고 균열의 성장거동을 관찰하고 피로 수명을 측정하였다. 복제된 표면은 광학 현미경으로 관찰하였다. 본 실험에 사용된 시편의 형상은 얇은 두께의 튜브형 시편으로서 피로균열이 두께부분의 가장 얇은 부분에서만 발생하도록 하였으며(이현우와 오세중, 1998; 허용학 등, 1999), Fig 3은 시편의 도면이다.

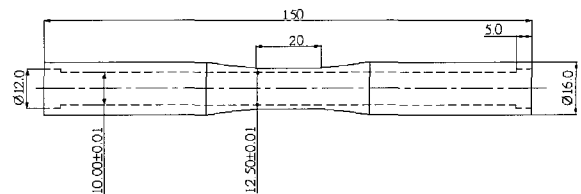


Fig. 3 Geometry of a specimen

3. 시험결과 및 고찰

3.1 피로 수명 결과

각 하중에 의한 피로 수명의 결과는 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 보듯이 정적 인장응력이 추가된 비틀림 반복하중은 순수 비틀림 반복하중에 비해 피로 수명이 감소되었고, 이에 비해 정적인 압축하중이 추가된 비틀림 반복하중은 피로 수명이 증가하였다.

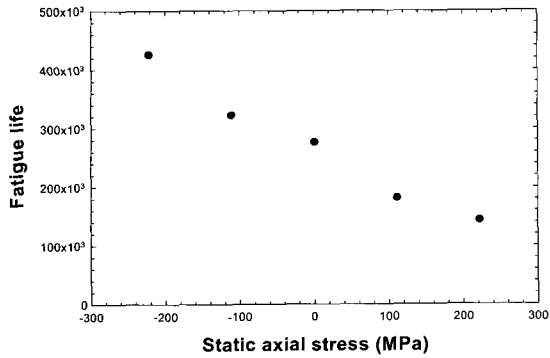


Fig. 4 Fatigue life versus applied static axial stress

3.2 피로균열 생성 및 성장 거동

피로균열의 발생과 성장거동은 cellulose acetate replica를 사용하여 표면복제한 후 관찰하였다. 균열의 성장은 최대 전단변형률면에서 균열이 생성 및 성장하는 단계인 stage I 과 주변형률면에서 성장하는 단계인 stage II로 분류할 수 있다. 균열의 생성 및 성장은 평균응력의 존재여부에 관계없이 최대 전단 변형률면에서 시작하여 임계균열길이까지 성장한 후 주변형률면으로 바뀌어 성장했다. 이때 부가된 평균응력의 영향에 의해 stage I 에서 두 개의 최대 전단변형률면 중 균열이 성장할 면이 결정되는데 인장 평균응력이 작용한 경우 균열이 시편축과 수직 방향(가로방향)으로 성장했고 압축 평균응력이 작용한 경우 시편축과 평행한 방향(세로방향)으로 성장했다. 순수 비틀림 응력의 경우는 압축 평균응력이 부가된 경우와 같이 시편의 축방향(세로방향)으로 성장했다. 이를 Fig. 5에 나타내었다. 균열이 stage I 에서 stage II로 천이되면서 균열분기 현상이 나타났다. 균열 분기현상이 시작된 이후에는 뚜렷한 균열진전 방향의 변화는 나타나지 않고 결국 최종적으로 파단되었다. Fig. 6에서 Fig. 10은 하중방향과 균열성장 형태를 보여주는 사진들이다

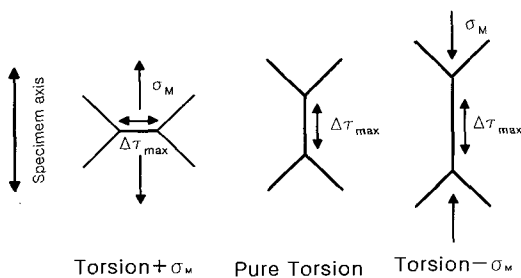


Fig. 5 A schematic illustration of crack orientations and loading stress-states

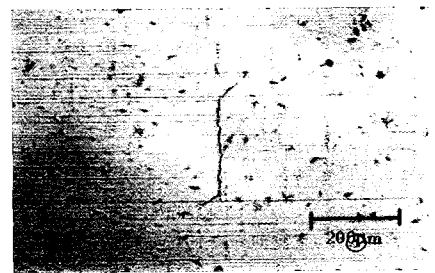
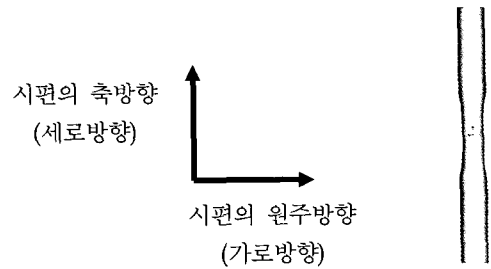


Fig. 6 Pure torsion test ($N/N_f=0.88$)



Fig. 7 Torsion with static tensile stress, $\sigma_m=222\text{MPa}$, $N/N_f=0.85$

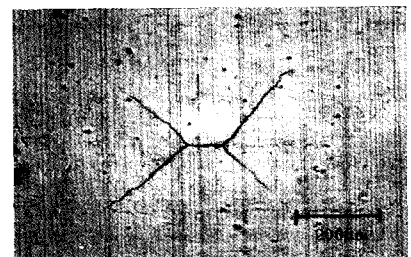


Fig. 8 Torsion with static tensile stress, $\sigma_m=111\text{MPa}$, $N/N_f=0.78$

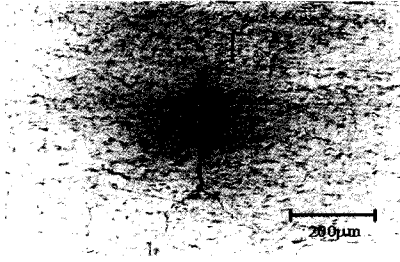


Fig. 9 Torsion with static compressive stress, $\sigma_m = -111\text{MPa}$, $N/N_f = 0.83$

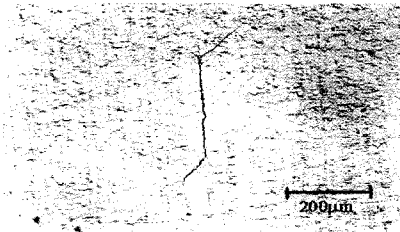


Fig. 10 Torsion with static compressive stress, $\sigma_m = -222\text{MPa}$, $N/N_f = 0.8$

3.3 균열성장 및 성장 속도

균열 성장의 초기 단계인 stage I에서는 최대 전단면에서 여러 개의 균열이 생성되어 다같이 성장했다. 이 단계에서 cycle 수가 증가함에 따라 몇 개의 균열이 합체되면서 다른 균열과 비교해 지배적으로 성장하는 균열이 나타났다. 이 균열이 결국은 파단을 일으키고 이런 균열은 한 개가 될 수도 있고 때에 따라서 여러 개가 될 수도 있다. 이 결과를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11은 위에서 언급한대로 지배적으로 성장하여 결국 파단을 일으키는 균열만을 역추적하여 cycle수에 대한 균열길이를 나타내었다. 균열성장 속도는 정적인 인장응력이 작용한 경우가 다른 응력이 작용한 경우보다 모든 성장단계에서 빠르게 나타났고 stage II에서는 정적인 압축응력이 부가된 경우의 균열성장속도가 가장 느리게 나타났다. 하지만 순수 비틀림 응력이 작용한 경우와 순수 비틀림 응력에 압축 평균응력이 부가된 경우의 stage I 성장단계에서는 두 시험 조건간에 뚜렷한 성장속도의 차이가 나타나지 않았다. 이를 Fig. 12에 나타냈다

3.4 파면관찰

파면관찰은 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였다.

사진의 왼쪽 부분은 100배로 관찰한 것이고, 오른쪽 부분은 왼쪽의 흰 사각형부분만 1,000배로 확대하여 관찰한 것이다. Fig. 13에서 Fig. 16은 각 시험조건의 stage I의 파면을 관찰한 것이다. 인장 평균응력이 작용한 경우 stage I 영역의 파면은 인장 응력의 작용으로 균열이 열리고 이로 인해 균열면에 마찰 흔적이 나타나지 않지만 압축 평균응력이 작용하는 경우와 순수 비틀림 반복응력의 경우에는 균열이 열리지 않아 두 균열면에서 마찰의 흔적이 관찰됐다. 이것은 stage I의 균열성장에 전단응력인 mode II 응력이 작용했기 때문이다. 이로 인한 전단 응력 때문에 전단변형이 발생하고 균열면이 열리지 않은 시험 조건하에서는 파면에서 보이는 것처럼 균열면에 마찰의 흔적이 나타난다. Fig. 17에서 Fig. 20은 각 시험조건의 stage II 영역의 파면을 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 것이다. 단순 반복 비틀림 시험 조건과 압축 평균응력이 부가된 경우 stage I 영역 파면의 마찰흔적은 stage II에서는 전혀 보이지 않고 있다. 이것은 stage II 영역의 균열성장이 주로 mode I 응력의 작용으로 성장하기 때문이다. 즉 균열면에 수직인 방향으로 주 응력이 발생하고 이로 인해 균열이 성장하기 때문에 stage II 영역에서는 마찰의 흔적이 나타나지 않았다.

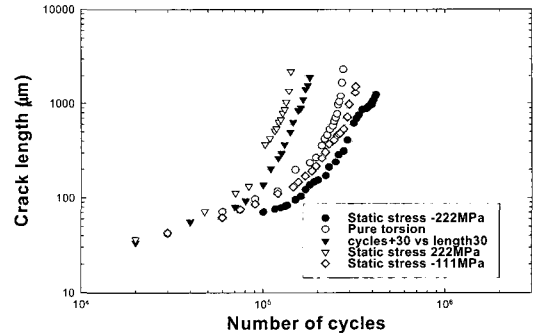


Fig. 11 Fatigue crack growth versus number of cycles

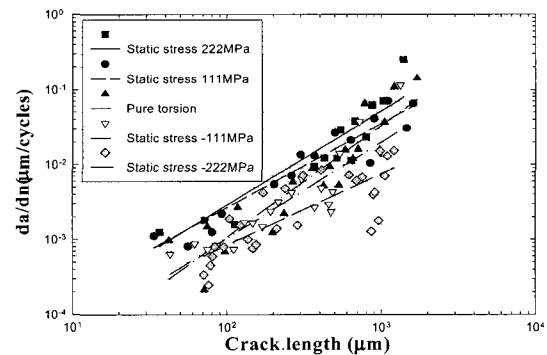


Fig. 12 Fatigue crack growth rate versus crack length

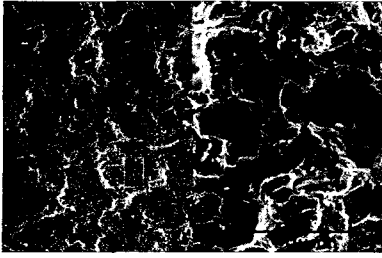


Fig. 13 Fracture surface of a specimen applied tensile mean stress ($\sigma_m=222\text{MPa}$) in stage I

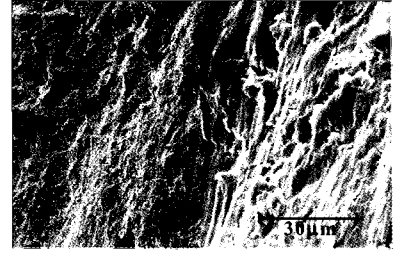


Fig. 17 Fracture surface of a specimen applied tensile mean stress ($\sigma_m=222\text{MPa}$) in stage II

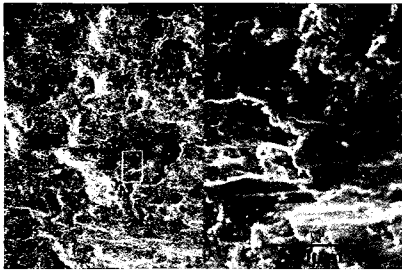


Fig. 14 Fracture surface of a specimen applied pure torsion ($\sigma_m=0\text{MPa}$) in stage I

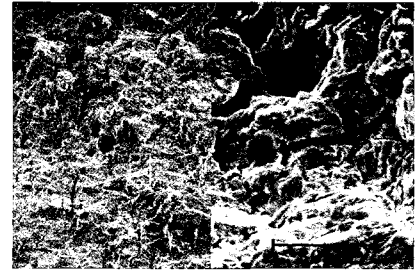


Fig. 18 Fracture surface of a specimen applied pure torsion ($\sigma_m=0\text{MPa}$) in stage II



Fig. 15 Fracture surface of a specimen applied compressive mean stress ($\sigma_m=-111\text{MPa}$) in stage I

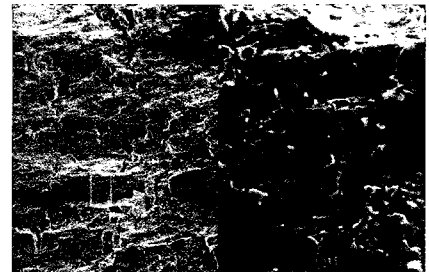


Fig. 19 Fracture surface of a specimen applied compressive mean stress ($\sigma_m=-111\text{MPa}$) in stage II

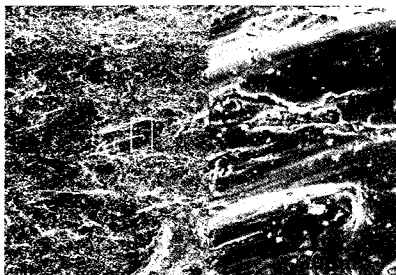


Fig. 16 Fracture surface of a specimen applied compressive mean stress ($\sigma_m=-222\text{MPa}$) in stage I

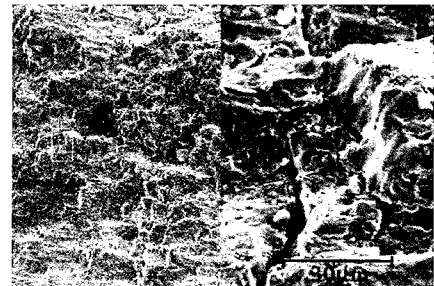


Fig. 20 Fracture surface of a specimen applied compressive mean stress ($\sigma_m=-222\text{MPa}$) in stage II

3.5 미소균열

피로시험에 사용된 시편은 파단 후 조직관찰과 미소균열 관찰을 위하여 파단면 부근에서 하중 방향과 평행한 방향과 수직인 두 방향으로 절단하여 연마 후 2% 나이탈로 에칭시켜 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하였다. Fig. 21에서 Fig. 25까지는 각 시험조건에서의 미소균열 양태를 나타내고 있다. 그림에서 어두운 부분은 초석 페라이트이고, 밝은 부분은 펄라이트이며 화살표로 가리키는 부분은 미소균열이다. 이 초석페라이트가 응력생성점으로 작용하고 노치 같은 비연속부위에서 슬립을 보다 원활히 해 주기 때문에 그림에서 보듯이 대부분의 미소균열은 초석 페라이트에서 생성되었다(Wood, 1956).



Fig. 21 A longitudinal section of a specimen applied pure torsion



Fig. 22 A longitudinal section of a specimen applied compressive mean stress ($\sigma_m = -111\text{MPa}$)



Fig. 23 A longitudinal section of a specimen applied compressive mean stress ($\sigma_m = -222\text{MPa}$)



Fig. 24 A transverse section of a specimen applied compressive mean stress ($\sigma_m = -111\text{MPa}$)

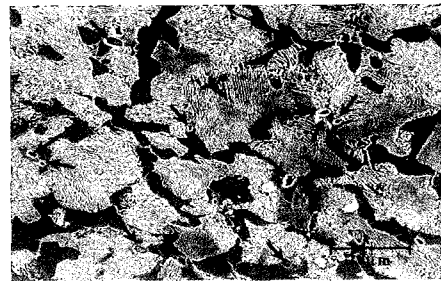


Fig. 25 A transverse section of a specimen applied compressive mean stress ($\sigma_m = -222\text{MPa}$)

4. 결 론

튜우브형 SM45C강으로 이축응력에 의한 균열의 발생과 성장거동을 시험하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 압축 평균응력은 SM45C의 피로수명을 증가시켰고 이에 반해 인장 평균응력은 피로수명을 감소시켰다.
- (2) 균열 생성 및 stage I에서의 균열성장은 평균응력의 존재부와 관계없이 최대 전단 변형률면에서 생성, 성장한다.
- (3) stage I에서의 균열성장 방향은 인장응력이 작용하는 최대 전단변형률면에서 성장한다.
- (4) 모든 응력조건에 대하여 최대전단면에서 성장한 stage I 균열은 임계길이까지 성장한 후 수직응력의 진폭이 최대로 작용하는 면으로 바뀌어 성장한다.
- (5) 대부분의 미소균열은 초석 페라이트에서 발생, 성장하며 균열 성장속도는 평균응력이 증가함에 따라 증가한다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 기초연구비 (R01-2002-000-0001)와 영남대학교 BK21사업비에 의해 지원된 것임.

참고 문헌

- 이현우, 오세종 (1998). "이축 하중을 받는 원형 노치에서 발생하는 균열의 생성과 초기 성장에 관한 연구", 대한기계학회 1998년도 추계학술대회논문집 A pp 171-177.
- 허용학, 박휘립, 이완규, 김진영 (1999). "이축 정적 응력이 부가된 되풀이 인장 혹은 비틀림 하중하에서 피로 균열 발생과 성장 거동", 대한 기계학회 1999년도 춘계학술대회 논문집A pp 981-986.
- Wang, C.H. and Miller, K.J. (1991). "The Effect of Mean Shear Stress on Torsional Fatigue Behaviour", *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* Vol 14, No 2, pp 293-307.
- Ritchie, R. O., McClintock, F. A. Nayeb-Hashemi, H. and Ritter, M. A. (1982). "Mode III Fatigue Crack Propagation in Low Alloy Steel", *Metallurgical Transactions A*, Vol 13A, pp 101-110.
- Ritchie, R.O., McClintock, F.A., Tschegg, E.K and Nayeb-Hashemi, H. (1985). "Mode III Fatigue Crack Growth under Combined Torsional and Axial Loading, Multiaxial fatigue", *ASTM STP 853*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp 203-227.
- Wang, C.H. and Miller, K.J. (1991). "The Effects of Mean and Alternation Shear Stresses on Short Fatigue Crack Growth Rates", *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* Vol 15, No 12, pp 1223-1236.
- Wood, W.A. (1956). "Fatigue in Aircraft Structures", A.M. Freudenthal ed., Academic Press.
- Yates, J.R. and Mohammed, R.A. (1996). "Crack Propagation under Mixed Mode(I+III) Loading, Fatigue and Fracture of engineering materials and structures", Vol 19, pp 1258- 1290.
- Zhang, W. and Akid, R. (1997a). "Effect of Biaxial Mean Stress on Cyclic Stress-Strain Response and Behaviour of Short Fatigue Cracks in A High Strength Spring Steel", *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* Vol 20, No 2, pp 167-177.
- Zhang, W. and Akid, R. (1997b). "Mechanism and Fatigue Performance of Two Steels in Cyclic Torsion With Axial Static Tension/compression", *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* Vol 20, No 4, pp 547-557.

2004년 4월 2일 원고 접수

2004년 11월 23일 최종 수정본 채택