

이축하중을 받는 S45C강의 피로균열의 발생과 성장거동

박선홍* · 이상협 · 김상태

Behavior of Fatigue Crack Initiation and Growth
in S45C Steel Under Biaxial Loading

S.H.Park, S.H.Lee, S.T.Kim

Key Words: S45C, Biaxial loading(이축하중), mean stress(평균응력), 균열생성, 균열 성장, 균열진전 방향, Stage I -mode II, Stage II -mode I

Abstract

Fatigue test was conducted on a S45C 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 system, i.e 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 were employed. The test results show that a superimposed static tensile mean stress reduced fatigue lifetime, however a superimposed static compressive mean stress increased fatigue lifetime. Experimental results indicated that cracks were initiated on planes of maximum shear strain with either a superimposed mean stresses or not. A biaxial mean stress had an effect on the direction which cracks nucleated and propagated at stage I (mode II).

1. 서론

실제의 많은 구조물이나 기계부품 등은 운전 중에 이축 또는 다축하중을 받는 경우가 대부분이다. 특히 가스 터빈축, 헬리콥터의 로터축, 발전용 터빈축, 자동차의 동력전달축 등은 인장 또는 압축하중과 더불어 비틀림 하중이 동시에 작용하는 경우가 많다. 이러한 구조물이나 기계 부품의 피로수명을 평가하기 위해서는 이축피로를 고려해야 하지만 그동안 많은 연구가 일축인장하중만을 받는 mode I 상태로 단순화하여 실험한

경우가 많았다. 이러한 이유로 인해 그 동안 이축하중이 작용 하는 구조물이나 기계부품의 정확한 피로거동을 관찰하고, 피로수명을 평가하는 데는 한계가 있었다. 특히 상기한 구조물이나 기계부품들에 작용하는 비대칭응력($\sigma_m \neq 0$)은 일축하중에 의한 피로거동과 상이한 거동을 보이기 때문에 이를 고려한 피로 설계는 매우 중요하다. 비록 지난 30년 동안 이러한 평균응력에 관한 연구가 활발히 진행되어왔지만 평균응력에 인한 피로균열의 발생 및 성장거동에 관한 연구는 드문 실정이다. 최근 90년도 초에 Wang과 Miller^(1,2)가 미소균열의 거동에 대한 평균응력의 영향에 관하여 연구를 수행한 바 있다. 또 Zhang과 Akid^(3,4)는 평균응력이 BS250A53 스프링 강과 316L 스테인레스 강에 미치는 영향을 관찰하였다. 그들은 비틀림 반복하중에 정적인 인장하중이 가해질 경우 순수 비틀림 반복하중보다 피로수명이 감소

하였고 이에 반해 정적인 압축하중이 부가될 경우 피로수명이 증가함을 보였다. 이에 본 연구에서는 비틀림 반복하중에 정적인 인장하중과 압축하중이 작용하는 S45C의 피로균열의 발생과 성장 거동을 관찰하였다. 이를 위하여 재료는 열간 압연한 구조용 보통탄소강인 S45C를 사용하였고, 시편은 원형 튜우브형으로 가공하였다. 균열의 발생 및 성장 거동을 관찰하기 위해 일정한 cycle마다 cellulose acetate replica를 이용해 표면 복제하였다.

2. 이론

일반적으로 다축피로 이론은 아래와 같이 네 가지로 분류할 수 있다.

- ① 응력 기초 이론
- ② 변형률 기초 이론
- ③ 에너지 기초 이론
- ④ 임계 평면 이론

2.1 응력 기초 이론

이 이론은 최대 주응력, 최대 전단응력 또는 octahedral 전단응력 같은 전통적인 파괴이론의 확장이다. 이는 주로 소성변형이 거의 없는 고주파 피로에 주로 적용된다.

2.2 변형률 기초 이론

변형률 기초 이론은 위에서 언급했던 전통적인 파괴 이론들 중 변형률에 관한 것이다. 이 중 octahedral 변형률은 다양한 조건의 반복하중에 관한 해석의 가능성을 보여준 바 있지만 이것 역시 다양한 하중조건을 이해하는 데는 불충분하다. 특히 평균 응력 효과를 설명하기 힘들다.

2.3 에너지 기초 이론

에너지 기초 이론은 1981년 처음 발표되었을 때 많은 비판이 있었다. 특히 scalar 양인 변형 에너지 밀도가 하중이력을 설명하기에는 불충분하다.

2.4 임계 평면 이론

임계 평면이론은 피로균열은 전단이나 수직 응력 또는 변형률이 작용하는 임의의 임계면에서 발생하고 성장한다는 이론이다. 최근 들어 많은 연구자들이 이 이론을 이용하여 피로손상 과정의 물리적 기구를 밝히기 위해 연구하고 있다. 균열의 발생과 성장을 보면 처음 발생은 최대 전단면에서 발생되어 최대 주변형률에 수직인 면으로 방향을 바꿔 성장한다. 이런 거동은 일축 하중뿐만 아니라 다축 하중계에서도 나타난다^[3,6]. 균열성장이 stage I-mode II(균열이 최대 전단 변형률면에서 성장하는 단계)에서 stage II-mode I(균열이 주변형률과 수직인 면에서 성장하는 단계)로 천이되는 현상은 재료의 미세조직이나 하중조건, 응력의 진폭 등 여러 가지 인자에 의해 영향을 받는다^[7,8]. Kandil, Brown 그리고 Miller^[9]는 최대 전단면에서 균열이 발생하는 것을 관찰하고 피로 수명을 지배하는 임계 매개변수는 최대 전단 변형률과 그 면에 수직인 변형률이라 제안했다.

$$v_{max} + S\epsilon_n = C \quad (1)$$

여기서 v_{max} 는 최대 전단 변형률이고 ϵ_n 은 최대 전단 변형률이 작용하는 면에 수직방향으로 작용하는 수직 변형률이고 S는 재료상수이다. Socie와 Shield^[10]는 이축피로에서 평균응력 효과를 고려하여 다음 식을 제안하였다.

$$v_{max} + S\epsilon_n + T \frac{\sigma_m}{E} = C \quad (2)$$

여기서 σ_m 는 최대 변형률면에 수직으로 작용하는 평균응력이고 T는 재료상수이다. Socie^[11]는 stage II에서 발생하는 mode I 균열을 고려하여 아래 식을 제안하였다.

$$\sigma_1^{max} \frac{\Delta\epsilon_1}{2} = C \quad (3)$$

여기서 $\frac{\Delta\epsilon_1}{2}$ 은 최대 주변형률의 진폭이고 σ_1^{max} 는 최대 주변형률면에 작용하는 최대 응력이다.

3. 실험방법

3.1 실험장치 및 재료

본 연구에 사용된 재료는 열간압연된 구조용 보 통탄소강인 S45C로 그 화학적 조성과 기계적 물 성치는 Table 1.과 Table 2.와 같다.

Table 1. S45C의 화학조성

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 S45C의 기계적 특성

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

또한 본 실험에 사용된 S45C의 미세조직은 Fig. 1에 나타내었다.

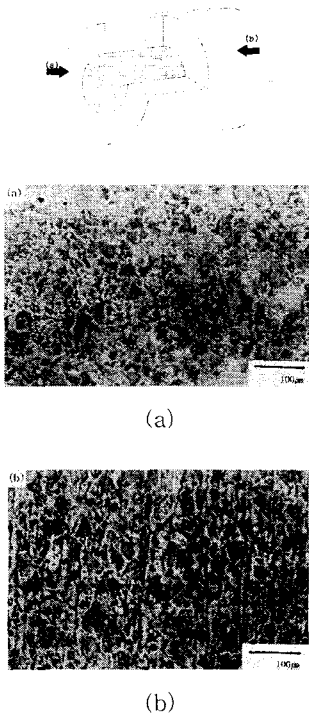


Fig. 1 S45C의 미세조직
(a)원주방향 (b)축방향

본 실험에 사용된 이축피로 실험 장치는 혼합 모드 하중하에서 피로 특성을 평가하기 위하여 MTS사의 최대하중 100 kN, 최대 torque 1100 N-m인 페루프 서보 유압식 (closed loop servo hydraulic type) 시험기 809 Axial/Torsional Test System을 사용하였고, software package는 Testware-SX를 이용하여 사인 파형을 구현하였다. 시편은 얇은 구계의 튜브형 시편을 사용하였다. 시편의 외부는 선반가공 한 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 응력의 형태는 아래와 같다.

- i) 반복 비틀림 응력 + 정적 인장 응력
- ii) 반복 비틀림 응력
- iii) 반복 비틀림 응력 + 정적 압축 응력

반복 비틀림 응력의 경우 응력비는 -1로 하고 비틀림 응력은 비틀림 함복 응력의 75%인 182MPa로 하였다. 정적 인장 응력과 압축 응력은 인장 함복 응력의 60%인 ± 222 MPa로 가하고 반복 응력의 주파수는 10Hz이고 파형은 sine파로 하여 균열 발생과 진전방향 그리고 균열의 성장거동을 관찰하고 피로 수명을 측정하였다. 복제된 표면은 광학 현미경으로 관찰하였다. 본 실험에 사용된 시편의 형상은 Fig. 2와 같다.

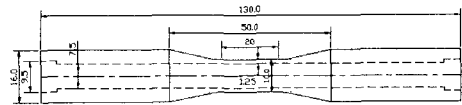


Fig. 2 시편형상

4. 실험결과 및 고찰

4.1 피로 수명 결과

각 응력에 의한 피로 수명의 결과는 Table 3 에 나타내었다. Table 3에서 보듯이 정적 인장 응력이 부가된 비틀림 반복 응력은 순수 비틀림 반복 응력에 비해 피로 수명이 감소되었고, 이에 비해 정적인 압축 응력이 부가된 비틀림 반복 응력은 피로 수명이 증가하였다.

Table 3. 피로수명

최대비틀림응력 (MPa)	182		
정적 축응력(MPa)	-222	0	222
피로수명(cycles)	425640	276520	143251

4.2 피로균열 생성 및 성장 거동

피로균열의 발생과 성장거동은 cellulose acetate replica를 사용하여 표면복제 한 후 관찰하였다. 균열의 성장은 최대 전단면에서 균열이 생성 및 성장하는 단계인 stage I 과 주변형물면에서 성장하는 단계인 stage II로 분류할 수 있다. 균열의 생성 및 성장은 평균응력의 존재여부에 관계없이 최대 전단변형률면에서 시작하여 임계균열길이 까지 성장한 후 주변형물면으로 바뀌어 성장한다. 이때 정적인 응력의 영향에 의해 stage I 에서의 균열 성장 방향이 결정되는데 인장 응력의 경우 균열이 시편축과 수직 방향(가로방향)으로 성장하고 압축 응력의 경우 시편축과 평행한 방향(세로방향)으로 성장했다. 순수 비틀림 응력의 경우는 정적 압축 응력이 부가된 경우와 같이 시편의 축방향으로 성장한다. 이를 Fig. 3에 나타내었다.

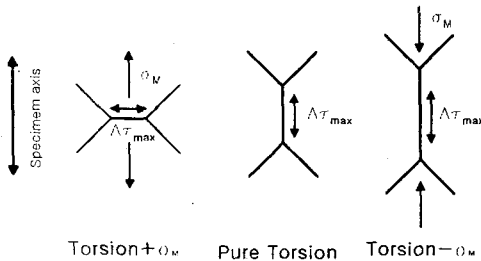


Fig. 3 응력 상태에 따른 균열 진전 방향

비틀림 반복 응력에 정적 축응력의 부가는 균열

이 stage I 에서 stage II로 천이되는 임계균열의 길이에도 영향을 미친다. stage I 에서 stage II로 천이 되는 임계균열의 길이는 정적 인장 응력이 작용할수록 짧아지는 경향을 보였다. 이 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

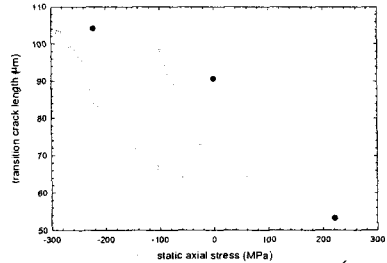


Fig. 4 부가된 정적 응력에 따른 천이 균열길이 변화

균열이 stage I 에서 stage II로 천이되면서 균열 분기 현상이 나타난다. 이를 Fig. 5에 나타내었다. 균열 분기현상이 시작된 이후에는 뚜렷한 균열진전 방향의 변화는 나타나지 않고 결국 최종적으로 파단에 이른다.

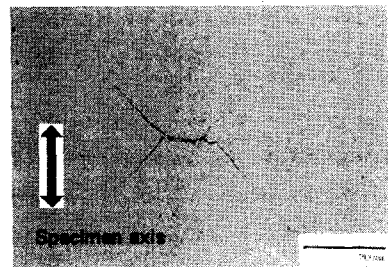


Fig. 5 $\Delta \tau = 182 \text{MPa}$, $\sigma_M = 222 \text{MPa}$, $N/N_f = 0.85$

4.3 균열성장 및 성장 속도

균열 성장의 초기 단계인 stage I 에서는 최대 전단면에서 여러 개의 균열이 생성되어 다같이 성장한다. 이 단계에서 cycle수가 증가함에 따라 몇

개의 균열이 합체되면서 다른 균열과 비교해 지배적으로 성장하는 균열이 나타난다. 이 균열이 결국은 파단을 일으키고 이런 균열은 한 개가 될 수도 있고 때에 따라서 여러 개가 될 수도 있다. 이 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

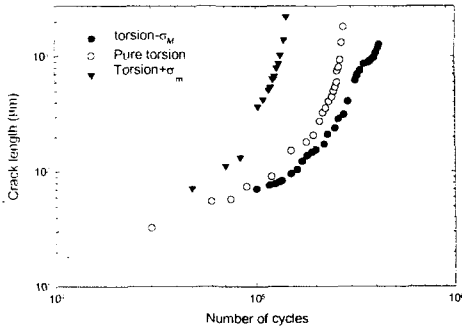


Fig. 6 cycle수에 따른 균열성장

Fig. 6은 위에서 언급한대로 지배적으로 성장하여 결국 파단을 일으키는 균열만을 역추적하여 cycle수에 대한 균열길이를 나타내었다. 균열성장 속도는 비틀림 반복 응력에 정적인 인장 응력이 추가된 경우가 다른 실험조건에 비해 균열성장 속도보다 모든 성장단계에서 대체로 빠르게 나타났고 stage II에서는 정적인 압축 응력이 추가된 경우의 균열성장속도가 가장 느리게 나타났다.

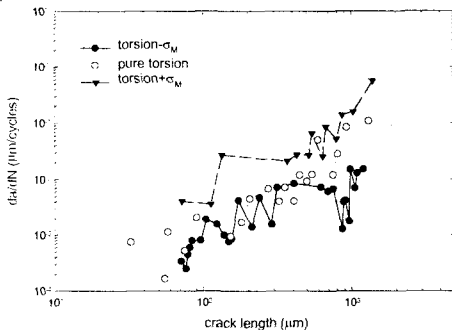


Fig. 7 균열길이에 따른 균열성장속도

하지만 순수 비틀림 응력이 작용한 경우와 순수 비틀림 응력에 정적인 압축응력이 추가된 경우의 stage I 성장단계에서는 두 실험 조건간에 뚜렷한 성장속도의 차이가 나타나지 않았다. 이 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

5. 결론

튜우브형 S45C강으로 이축응력에 의한 균열의 발생과 성장거동을 실험하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 압축 평균응력은 S45C의 피로수명을 증가시켰고 이에 반해 인장 평균응력은 피로수명을 감소시켰다.
2. 균열 생성 및 stage I에서의 균열성장은 평균 응력의 존재여부와 관계없이 최대전단면에서 생성, 성장한다.
3. stage I에서의 균열성장 방향은 인장 응력이 작용하는 최대전단면에서 성장한다.
4. 모든 응력 조건에 대하여 최대전단면에서 성장한 stage I 균열은 임계길이까지 성장한 후 주변형틀이 작용하는 면으로 바뀌어 성장한다.
5. 균열이 stage I에서 stage II로 천이되는 임계 균열의 길이는 인장 응력이 작용할수록 짧아진다.
6. 균열의 성장속도는 대체로 모든 성장 단계에서 정적인 인장 응력이 추가된 경우가 가장 빠르게 나타났고, stage II에서는 정적인 압축 응력이 추가된 경우가 가장 늦었다. 또한 순수 비틀림 응력과 정적인 압축 응력이 추가된 경우 stage I에서의 균열성장속도는 뚜렷한 차이를 보이지 않았다.

참고문헌

- [1] C. H. Wang, K. J. Miller, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. Vol 14, No. 2/3, pp. 293-307, 1991
- [2] C. H. Wang, K. J. Miller, Fatigue Fract.

Engng. Mater. Struct. Vol 15, No. 12, pp. 1223-1236 , 1992

[3] W. Zhang, R. Akid, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. Vol 20, No. 4, pp. 547-557 ,1997

[4] W. Zhang, R. Akid, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. Vol 20, No. 2, pp. 167-177 ,1997

[5] M. W. Brown, K. J. Miller, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. Vol 1, pp. 231-246 ,1979

[6] H. C. Wu, C. C. Yang, J. Engng. Mater. Tech. Vol 109, pp 107-113, 1987

[7] M. W. Brown, K. J. Miller, Int. Mech. Engrs. Vol 187, pp 745-755, 1973

[8] D. F. Socie, T. W. Shield, J. Engng. Mater. Tech. Vol 106, pp 277-232, 1984

[9] D. F. Socie, J. Engng. Mater. Tech. Vol 109, pp 293-298. 1987

[10] R. O. Ritchie, F. A. McClintock, Metallurgical Transactions A, Vol 13A, pp. 101-110 , 1982

[11] R. O. Ritchie, Frank A. McClintock, ASTM STP 853, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp203-227 , 1985