

기계구조용 탄소강의 표면피로균열의 하한계 특성 Characteristics of surface fatigue crack in carbon steel, used for machinery structure, under threshold conditions

이종형*, 송득중**, 이상영***, 안세원****

Jong-Hyung Lee*, Deuk-Jung Song**, Sang-Young Lee***, Se-Won An****

<Abstract>

There have been numerous structure-related accidents including structural destruction from past to the present. This experiment used a beachmark technique that does not exceed the maximum stress and reduce the range of amplitude (or alternating stress). Difference in stress on the actual section affects the progress of crack.

Key Words: structure-related, alternating stress, Annealing

1. 서론

과거로부터 현재에 걸쳐서 구조물 및 기계의 파괴사고가 수많이 경험되고 있다. 설계시 허용응력조건 및 사용조건이 만족되고 있어도 파괴사고는 일어난다. 이것은 재료 중의 결함, 구조물의 제작시의 파괴, 더욱이 사용 중에 생기는 결함을 고려하지 않았기 때문이다. 역사적으로 파괴역학은 1920년의 Griffith의 취성 파괴이론에 출발하여 Oro-wan, Irwin들에 의해 발전되어 왔다. 파괴역학의 한 분야인 피로에 대해서 Paris에 의해서 응력확대계수 K와 균열진전속도 da/dN 의 사이에 지수함수적 관계 $da/dN = CK^m$ 이 성립하는 것이 실험적으로 나타나게 되었다. 또 1971년 Elber는 Al

합금의 피로실험에 의해 균열단합 (Crack clouser) 현상을 발견하였다.⁽¹⁾ 표면결합에서의 피로균열의 진전거동은 관통균열이 다르고 관통균열에 대해서 얻어진 성질이 적용되기는 어렵고, 또 표면균열의 표면과 내부에서의 균열단합 현상을 포함해서 균열의 진전거동의 상이, 표면균열 특유의 균열의 편평화의 원인에 대해서는 밝혀지지 않고 있다.

본 연구에서는 표면결합으로부터의 두 종류의 결정입경의 기계구조용강 SM45C에 대해서 실온에서 하중진폭 ΔP 일정피로 시험 및 ΔP 감소 피로시험을 행하여 표면결합에서의 피로균열의 진전거동, 하한계특성 그리고 균열단합 현상을 연구하였다.

* 금오공과대학교 기계공학부

** 울산기능대학 학생지원처장

*** 창원기능대학 컴퓨터응용기계과

**** 금오공과대학교 대학원

* Professor, School of Mechanical Engineering, K.I.T

** Ulsan Polytechnic College The Head of Student Support

*** Chang Won polytechnic College Dept. of computer-aided Machinery

**** Student, School of Mechanical Engineering, K.I.T

2. 시험편 및 이론

실험에는 표면결함을 갖는 평판상의 시험편을 사용하였다. 시험편 형상을 Fig. 1에 나타낸다. 실험에 사용한 재료는 기계구조용 탄소강 SM45C이고 그 화학성분 및 기계적 성질은 Table 1, 2와 같다.

재료의 결정립의 크기에 변화를 주기 위하여 진공 풀림(Annealing)을 행하였다. 표면균열의 치수를 Fig. 2에 나타내고 있고, $2b_0$ 는 인공결함의 길이, a_0 는 인공결함의 깊이, $2b$ 는 피로균열 길이 a 는 피로균열 깊이, t 는 판두께이다. 두소재 모두 850℃까지 가열한후 A소재는 1시간 유지 후 노냉 하여 결정립이 0.012mm, B소재는 24시간 유지 후 노냉한 후 결정립이 0.025mm가 되었다. Fig. 3은 전극이동판인 방전가공기에 의해 시험편 중앙부에 인공결함으로 표면길이 2mm, 깊이 1mm의 반원형상을 만들었다. 표면균열이 1mm진전한 후 Beach mark 조작을 행하였다.

Beach mark시의 응력비 R은 일반적으로 0.5를 사용하지만 균열진전속도가 낮은 범위에서는 0.5보다 적은 값을 균열진전속도가 빠른 범위에서는 0.5보다 큰 값을 사용해서 선명한 Beach mark가 얻어지도록 하였다.

ΔP 의 감소율은 7.5%~20%이고 그 값은 표면방향의 응력확대계수 범위 ΔK_B (계산치)가 균열길이의 진전량 $\Delta 2b \approx 1mm$ 에 대해 10% 이하로 감소하도록 하였고, 하한계 후의 ΔP 의 증가율은 10%~50%로 하였다. ΔP 증가 시험에 의해 어느 정도 균열이 진전한 후에 ΔP 를 일정하게 해서 피로시험을 행하였다.

3. 실험방법

피로실험의 반복속도는 1Hz~3Hz, 비치마크시의 반복속도는 3Hz~7Hz이다. 균열은 표면의 인공결함에서 표면방향과 깊이 방향으로 동시에 진전해 간다. 표면방향의 균열진전량은 10배의 금속현미경으로서 직접 측정하였다. 깊이 방향의 균열진전량은 비치마크법에 의해 시험편 파단 후에 표면상의 비치마크를 10배의 금속현미경으로서 측정하고 균열의 진전량을 구하였다.

Table 1 Chemical composition (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr
0.46	0.19	0.70	0.03	0.009	0.01	0.06

Table 2 Mechanical properties of SM45C

Annealing	Elongation (%)	Yield Strength MPa (kgf/mm ²)	Tensile Strength MPa (kgf/mm ²)	Hardness H _R B
(A)	19.1	355.0(36.2)	471.7(48.1)	83
(B)	17.3	336.4(34.3)	612.9(62.5)	83

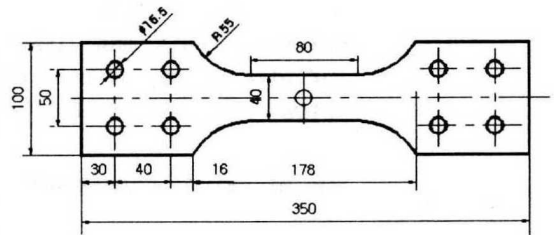


Fig. 1 Geometric of the specimen

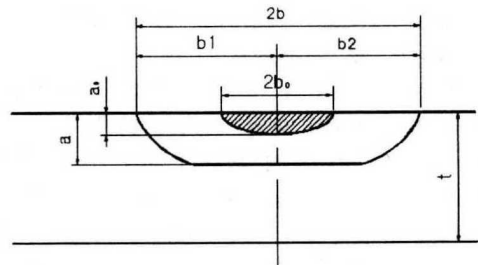


Fig. 2 Geometric of crack

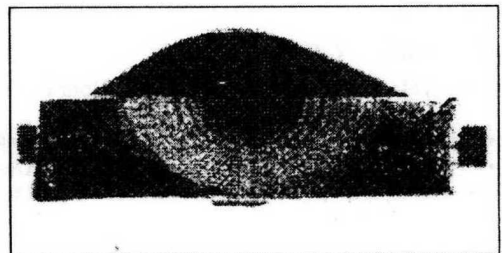


Fig. 3 Fracture surface

본 실험에서는 최대응력을 넘지 않고 응력진폭을 적게 하는 비치마크법을 사용했다.

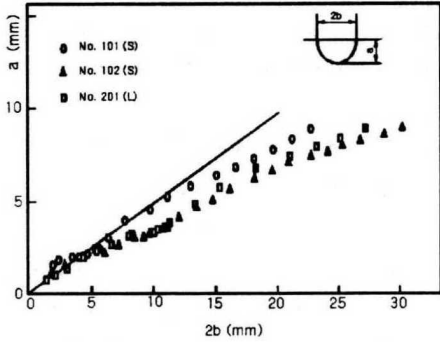


Fig. 4 Relation between 2b and a

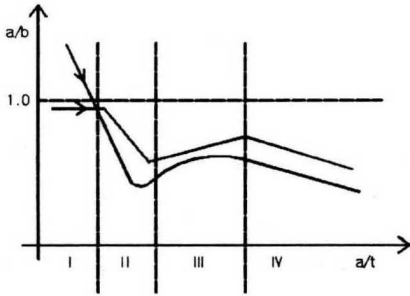


Fig. 5 Model of a/b

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 4에 균열길이 2b와 균열깊이 a의 관계를 나타낸다. Fig. 4에서 원점을 지나서 기울기 1/2의 직선은 균열이 반원형인 것을 의미한다. 각 시험편 함께 균열길이 2b의 진전량에 대한 균열깊이 a의 진전량의 비율은 일정하지 않고 균열의 진전에 따라 균열 현상은 변화하고 있다. Fig. 5에 a/b의 변화의 모습을 모식적으로 표현한 것이다. a/t를 4개의 영역으로 나누며 첫째 영역 I은 초기결합의 형상의 영향부로 a/b의 값이 1.0에 가까운 범위이다. 그리고 영역II는 표면과 내부의 균열단합 현상의 차이에 의해 생기는 것으로 이 영역은 균열단합이 특히 문제로 되는 저응력 확대계수 범위 ΔK 영역이다. $\Delta K_B(\text{표면}) > \Delta K_A(\text{내부})$ 인 것으로서 ΔK 의 작은 내부의 쪽이 균열단합이 크고 그 때

에 내부의 균열이 표면과 비교해서 진전하

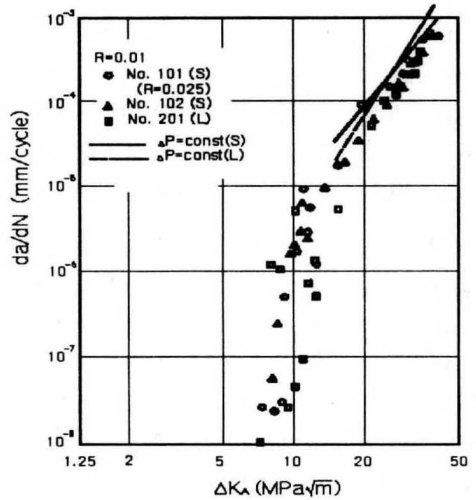


Fig. 6 Relation between da/dN and ΔK_A

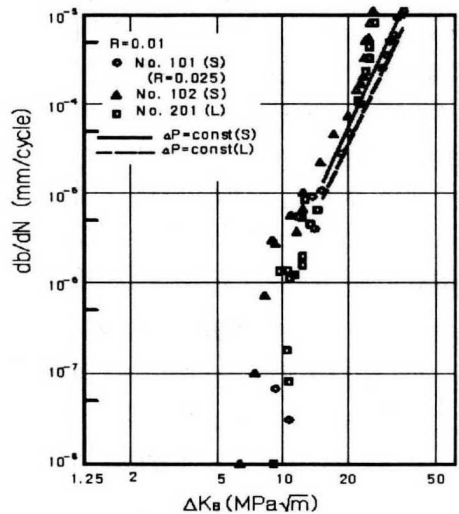


Fig. 7 Relation between db/dN and ΔK_B

기 어렵게 되었다.

또 영역III은 앞의경우와 반대로 $\Delta K_B < \Delta K_A$ 인 것으로서 표면 쪽의 균열단합이 크기 때문에 표면의 균열이 내부와 비교해서 진전하기 어렵기 때문에 a/b의 값이 증가하는 범위고, 마지막으로 영역IV는 $\Delta K_B < \Delta K_A$ 이지만 고 ΔK 영역 때문에 표면과 내부의 균열단합에 차가 생기지 않는다. 그러나 리

가멘트에 작동하는 굽힘모멘트의 영향 때문에 a/b의 값이 감소한다.

표면방향과 깊이방향의 응력확대계수 범위와 균열진전속도의 관계를 각각 Fig. 6, 7에 나타낸다. 응력확대계수 범위 ΔK 가 감소함에 따라 균열진전속도도 감소하고 0으로 보여지는 균열진전속도에 대응하는 하한계 응력확대계수 범위 ΔK_{th} 가 표면방향과 깊이방향의 양쪽에 존재하였다.

A재, B재의 균열진전속도곡선은 3단계(2a, 2b, 2c)로서 나타났다. A재의 경우 고 ΔK 영역에서의 실 단면응력이 다른 것 보다 크기 때문에 리가멘트가 항복하고 만다. 확실히 제 2c단계는 나타나지 않았다. 제 2b단계에 있어서 A재는 ΔP 일정시험 결과와 거의 일치하였지만 B재는 일치하지 않았다. 이 단계에 있어서 A재의 실단면응력은 ΔP 일정시험의 그것과 거의 동일하고 A재, B재의 그것은 ΔP 일정시험보다 적은 것으로부터 실단면응력의 차이가 제 2b단계의 균열진전에 영향을 준다고 생각되어진다. Fig. 6, Fig. 7의 결정립이 적은 A재와 결정립이 큰 B재의 Data를 사용해서 하한계에 미치는 결정립의 영향에 비교하면 표면방향, 깊이방향과 함께 하한계 응력확대계수 범위 ΔK_{th} 는 결정립의 큰 쪽이 결정립이 작은 것에 비해서 약 40% 큰 값으로 되고, 또 ΔK_{th} 의 값은 하한계의 ΔK 를 사용하고 있다. 표면방향의 경우 균열진전속도 db/dN 가 급히 감소하는 응력확대계수 범위 ΔK_B 는 결정립이 적은 것은 $8MPa\sqrt{m}$ 전후, 결정립이 큰 것은 $10MPa\sqrt{m}$ 전후이다. 또 깊이방향으로서 균열진전속도 da/dN 가 급히 감소하는 ΔK_A 는 결정립이 적은 것은 $9MPa\sqrt{m}$ 전후이고, 결정립이 큰 것은 $11MPa\sqrt{m}$ 전후이다.

문하고 $2b \approx 5mm$ 로부터 균열진전속도가 증대하기 시작하고 $2b \approx 10mm, 15mm$ 로 증가함에 따라 균열진전속도는 일층 증대하고 $2b$ 가 $20mm$ 를 넘어서면 급속히 파단한다.

5. 결론

표면결함을 가진 시험편을 사용해서 하한계를 포함한 균열의 진전거동을 조사하는 실험을 대기 중 실온에서 SM45C의 결정립 크기에 의한

2종류에 대해서 행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실단면 응력의 차이는 균열의 진전에 영향을 준다.
2. 하한계시 표면에서 균열이 정류하더라도 내부에서는 부분적으로 균열이 진전 한 후 정류한다.
3. 하한계 응력확대계수 범위 ΔK_{th} 는 표면보다 깊이방향의 쪽이 약 10% 크다.
4. 결정립의 크기는 하한계 근방의 균열진전거동에 영향을 주고 결정립이 큰 쪽이 ΔK_{th} 는 크게 된다. 이것은 표면거칠기가 균열단형 현상에 영향을 주는 결과라고 생각된다.
5. 표면 및 깊이방향에 대해서 Paris 법칙이 성립하였다.

참고 문헌

- 1) Horace Grover, "Fatigue crack propagation in sheet Specimens", Materials Research & Standards" 1964, pp. 430-433
- 2) Wolf Elber, "Crack-closed and crack-Growth Measurements in surfa-ceflawed Titanium Alloy Ti-6Al-4V", NASA Technical note D-8010, pp.1-16, 1975
- 3) Wolf Elber, "The Significance of Fatigue Crack Closure", ASTM STP 486, pp.230-242, 1971
- 4) M.H.EL Haddad, K.N.Smith, T.H.Topper, "Fatigue Crack Propagation of Short-Cracks", Transactions of the ASME Vol.101, pp.42-46, 1979
- 5) R.A.Schmidt, P.C.Paris, "Threshold for Fatigue Crack Propagation and the Effects of Load Ratio and Frequency", ASTM STP 536, pp.79 - 94, 1973
- 6) LEE, J,H, and Kobayashi, H, "Fatigue Limit and Non propagative Crack for Smoothand Precracked Specimen in a Carbon Steel", Trabsactions of the Japan Society of Mechanical Engineews, vol 447, pp.1209-1214, 1986

(2004년 7월15일 접수, 2004년 11월20일 채택)