

중탄소강의 피로크랙 개폐구의 특성 및 피로강도의 평가

윤 명 진*

Evaluation of Fatigue Strength and Characteristics of Fatigue Crack Closure in SM35C Steel

Myung Jin Yoon*

Abstract

It is not clearly known how surface defects or inclusions of a medium carbon steel affect a fatigue strength. In this study, we used SM35C specimens with spheroidized cementite structure to eliminate dependence of micro structure of fatigue crack. The investigation was carried out by behavior of crack closure at non-propagating crack and effect of the fatigue limit according to the artificial defects size. Experimental findings are obtained as follows : (1) Fatigue crack initiation point of medium carbon steel with spheroidized cementite structure is at the surface defects. (2) Non-propagating crack length of smooth specimen is equal to the critical size of defect. (3) Considering the opening and closure behavior of fatigue crack, the defect shape results in various crack opening displacement, while it does not affects the fatigue limit level of medium carbon steel with spheroidized cementite structure. (4) The critical length of the non-propagating crack of smooth specimen is the same as critical size of defect in transient area which determines threshold condition in steel with spheroidized cementite structure.

Key words : defects and inclusions(결함과 개재물), crack closure(크랙닫힘), fatigue strength(피로강도), spheroidized cementite structure(구상화시멘타이트조직), critical size of defect(한계결함크기)

1. 서 론

철강재료는 기지조직 내에 비금속개재물, 조직결함과 같은 무수한 결함이 분포되어 있으며, 재료 표면에는 가공결함 등의 미소결함이 존재하고 있다. 이들 결함은 피로강도의 저하와 변화가 큰 요인으로 지적되고 있

다.^(1~5) 피로강도 평가를 위한 연구로는 개재물과 결함을 고려하지 않은 상태에서 재료의 피로강도를 추정할 경우 피로강도의 분포가 일정하지 않고 다양하여 정량적으로 평가할 수 없기 때문에 최근 인공결함을 도입한 시험편으로 결함이 피로강도에 미치는 영향인자를 검토하여 피로 강도를 추정하려는 연구와^(1, 2) 파괴역학적

* 경북산업대학교 공과대학 기계공학과

수법을 사용하여 평가하려는 방법 등이 발표된 바 있고^(3, 4), 지금까지 많은 연구가 이루어지고 있으나 통일된 견해는 정립되지 못하고 있는 실정이다⁽²⁻⁵⁾.

결함을 가진 철강재료의 피로강도에 대한 저자 등의 일련의 연구결과⁽⁶⁻¹²⁾ 피로강도의 정량적 평가를 복잡하게 하는 인자는 재질, 결함의 크기, 모양, 위치, 크랙선단의 개폐구 문제, 크랙성장의 하한계 특성 등 다양하다. 미소크랙과 결함은 파괴현상을 일으키는 주된 요인이며, 재질에 따라 피로크랙의 발생조건이 다르다. 피로크랙의 발생기점은 고강도강의 경우 표면결함에서 발생하지만 내부결함에서도 발생하여 피쉬아이(fish eye)를 형성하며, 중·저탄소강은 주로 시험편의 표면결함에서 발생하는 것이 일반적인 경향이다^(2, 4). 다양한 열처리 조건에 따라서 조직이 불균질하므로 미소크랙의 발생조건, 결함주변의 응력 특이성에 따라 피로강도의 변화, 정류크랙길이 등이 다양하여 통일된 견해를 찾기가 어렵다. 따라서 조직 의존성을 배제하고 결함이 피로강도에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해서 우선 정성적인 검토가 필요하다.

한편, 크랙이나 결함이 존재하는 재료에서 허용할 수 있는 반복응력을 결정하기 위하여 하한계응력확대계수범위 ΔK_{th} 또는 하한계유효응력확대계수범위 $\Delta K_{eff,th}$ 에 대한 데이터가 필요하다. 그러나 ΔK_{th} 는 일반적으로 재질과 크랙길이에 따라서 변화한다. 즉, 크랙길이가 짧으면 ΔK_{th} 도 작은 값이 되는 경향이 있으며^(13, 14), 한계치에 도달한 정류크랙길이는 결함의 모양과 크랙선단의 개폐구 특성과 관계가 있다. 특히 결함의 모양은 크랙만 존재하는 것이 아니고 미소원공과 같은 모양의 비금속개재물도 존재한다. 크랙과 비금속개재물에서 발생한 크랙의 성장거동은 항상 같다고 볼 수는 없다. 이러한 현상을 고려하여 크랙과 개재물을 어떻게 취급할 것인가에 대한 정성적인 평가를 할 필요가 있다.

따라서 본 실험에서는 피로크랙의 다양한 조직의존성을 배제하고, 피로강도에 미치는 결함과 미소크랙의 영향을 정성적으로 고찰하기 위하여 결함의 크기에 비하여 기지조직이 작은 구상화시멘타이트 조직을 가진 중탄소강 재에 인공결함의 크기, 모양을 변화하여 인공결함이 피로한도에 미치는 영향을 검토하였으며, 피로한도수준에서 정류한 한계정류크랙의 개폐구 특성의 변화를 고찰하여 피로강도의 평가를 시도하고자 하였다.

2. 실험 방법

본 실험에 사용한 재료는 기계구조용 중탄소강인 SM35C를 사용하였으며, 이 재료의 화학성분은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical composition Wt.(%)

Material	C	Si	Mn	P	S
SM35C	0.36	0.27	0.53	0.014	0.011

결함의 크기에 비하여 기지조직이 작은 구상화시멘타이트 조직을 가진 재료에 인공결함의 크기, 모양을 변화하기 위하여 프리크랙과 미소원공을 도입하였고, 가공경화 및 잔류응력을 제거하기 위하여 열처리를 2단계로 나누어 실시하였다. 프리크랙은 850℃에서 1시간 가열 후에 수냉각하여 600℃에서 30초간 가열의 뜨임처리 후에 피로시험기에서 피로한도 보다 10% 높은 응력을 반복하여 다양한 길이의 크랙을 도입하였고, 미소원공은 평활재 시험편에서 미소크랙의 형상비가 0.3 - 1.0의 비로 성장하는 경우가 많다고 보고되어 있으므로^(15, 16), 직경(d)과 깊이(h)의 비가 $h/d=0.7$ 인 원공결함을 사용하였다. 미소원공의 직경과 깊이는 방전가공기에서 텅스텐 와이어의 직경에 따라 미소원공의 직경이 결정되고, 깊이는 다이얼게이지를 부착하여 측정하면서 가공하였다. 결함도입을 마친 시험편은 640℃에서 1시간의 진공어닐링 열처리를 하여 가공경화 및 잔류응력을 제거하였다.

이상과 같은 과정에 의하여 가공한 시험편의 기계적 성질은 Table 2와 같다.

Table 2 Mechanical properties of specimens

Mechanical Properties	Micro-vickers hardness(0.98N,50 Points)	0.2% Proof Stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
SM35C	229	500	620	25.4

Fig. 1에는 프리크랙과 미소원공을 도입한 시험편

의 모양과 치수, 그리고 프리크랙과 미소원공의 단면 형상을 표시한 것이다.

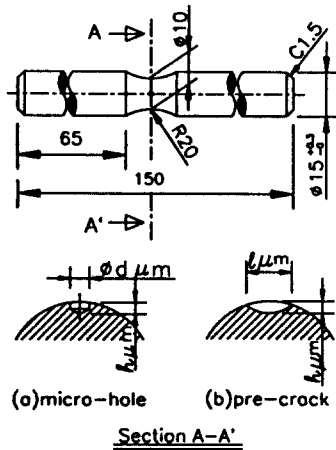


Fig. 1 Geometries of fatigue test specimen

본 실험에 사용한 피로 시험기는 Ono형으로 부하 방법은 2점지지, 1점 수직중추식 균일 굽힘모우멘트형 이고, 시험기 용량은 98N·m, 3600rpm이다.

크랙 개구량의 측정방법은 다음과 같다. micro-vickers경도시험기를 이용하여 0.2N의 하중을 가하여 크랙의 양면에 압인을 설정하였다. 시험편을 시험기에 고정하여 부착한 400배의 현미경으로 크랙 양면에 설정한 압인의 중심거리를 측정하였다. 하중이 부하된 상태의 크랙 개구량을 측정하기 위하여 정적 굽힘하중하의 개구량을 측정하고, 무부하상태의 개구량을 측정하여 그 차를 크랙 개구량으로 결정하였다.

한편, 회전굽힘피로시험기에 고정된 시험편의 상단부는 압축하중상태이므로 위에서 개구량을 측정하기 곤란하다. 따라서, Fig. 2와 같이 시험편 상단부의 부하상태를 압축에서 인장으로 변환시키기 위하여 하중의 지지점을 변화하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3 - 1 중탄소강재의 피로한도에 미치는 결함의 영향

구상화시멘타이트 조직을 가진 중탄소강의 피로크랙의 발생과 성장에 대한 검토를 위하여 평활재 시험편도 인공결함재와 같은 열처리를 하여 동일한 조직을 가진 시

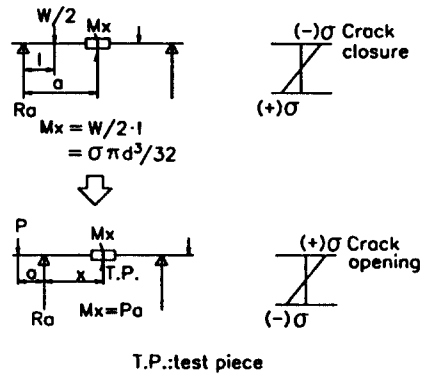


Fig. 2 Loading condition in rotary bending fatigue tester for crack opening displacement measurement

험편으로 피로시험을 하였다. Fig. 3은 평활재 시험편의 피로시험 결과이며 피로한도는 325Mpa이다.

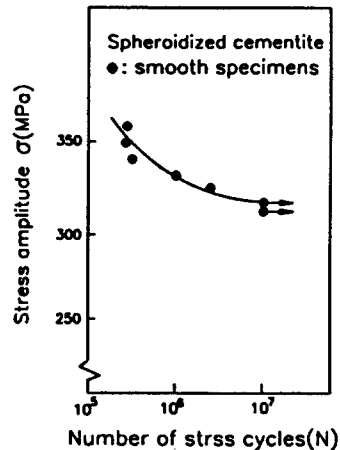


Fig. 3 S-N curve of smooth specimens

중·저탄소강의 피로크랙 발생기점은 주로 표면결함이나 표면근방의 결함에서 발생한다. 본 연구에서 사용한 중탄소강의 평활재 피로시험에서도 피로한도에 도달하여 정류크랙이 발생한 시험편의 표면크랙은 Fig. 4와 같이 표면결함에서 발생한 크랙이다. 전해연마한 시험편의 표면에는 20-30μm 크기의 표면결함이 선재하였고, 정류크랙은 표면 결함중에서 가장 큰 결함에서 발



$\sigma = 325\text{MPa}$
 $N = 1 \times 10^7 (\text{cycles})$

Fig. 4 Non-propagating crack

생하여 정류한 것이다. 이때 발생하여 성장한 정류크랙 길이는 약 $50\mu\text{m}$ 이었다. 이들 정류크랙은 재료내의 $20\text{-}30\mu\text{m}$ 의 비금속재물에서 발생한 것이다.

따라서, 구상화시멘타이트 조직을 가진 중탄소강에 포함되어 있는 선계결함은 피로크랙의 발생점이 된다.

3 - 2 인공결함의 크기와 피로강도

결함이 존재하는 평활재의 피로강도를 정확하게 평가하기 위하여 프리크랙과 미소원공결함의 크기를 변화하여 피로강도를 평가하고자 한다. 평활재와 인공결함재의 피로강도를 이미 발표된 보고를 통하여 고찰하여 보면 인공결함의 크기에 따라서 피로강도가 낮아지며 많은 차이가 있다⁽⁶⁻⁸⁾. 또, 피로강도에서도 파괴를 일으키지 않는 허용결함크기는 존재하지만, 허용결함크기 보다 큰 인공결함을 가진 시험편의 피로강도는 평활재의 피로강도보다 낮아진다.

크랙의 발생원으로써 철강재료중에 존재하는 비금속 재물은 주체를 이루는 기지조직에 따라서 크랙성장률과 정류거동이 달라진다. 철강재료의 피로강도 및 크랙성장의 하한계 조건인 하한계응력확대계수 등은 미소크랙의 성장

거동과 깊은 관계가 있으며, 미소크랙의 성장거동은 재료의 미시조직에 따라서 성장속도의 변화가 크다. 따라서, 결함에서 발생하는 미소크랙의 조직 의존성을 배제한 균질조직에 결함선단에서 발생하여 성장 또는 정류하는 크랙거동과 피로강도의 변화를 함께 고찰하였다.

Fig. 5는 미소원공의 직경과 프리크랙의 길이에 따른 피로강도의 변화를 정리한 실험결과이며, 프리크랙과 미소원공의 크기에 따라서 피로강도는 저하한다. 그러나 피로강도를 저하시키지 않는 한계결함크기(d_c, ℓ_c)는 존재하므로 그림에 표시한 한계결함크기 이하의 결함은 존재하더라도 피로강도에 영향을 미치지 않는다. 중·저탄소강의 한계결함크기는 비균질 조직의 경우는 피로강도 레벨에서 한계결함크기가 일치하지 않으나⁽⁸⁾, 본 실험에서 사용한 균질 조직인 경우는 피로강도 레벨에서 한계결함크기가 일치한다. 이러한 원인은 피로강도는 정류크랙의 성장거동과 밀접한 관계가 있고, 피로크랙 선단의 미시조직 의존성을 배제한 상태의 미소원공과 프리상태의 미소원공과 프리크랙에서 발생한 크랙의 성장기구가 동일함을 알 수 있다. 평활재의 피로강도 레벨인 325MPa 에서 평활재 시험편의 피로강도를 저하시키지 않는 한계결함크기는 미소원공과 프리크랙에서 각각 $50\mu\text{m}$ 정도로 같다. 이 값은 평활재의 피로강도 레벨에서 관찰된 정류크랙의 길이와 같다. 그러나 한계결함크기 보다 큰 인공결함을 가진 시험편은 프리크랙 보다 미

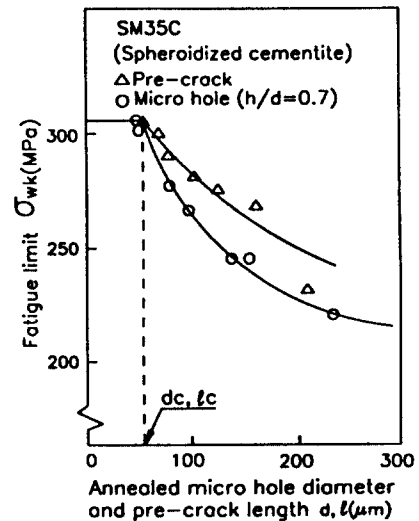


Fig. 5 Fatigue limit according to the defect size

소원공 결합을 가진 시험편의 피로한도의 감소폭이 크다. 이와같은 결과는 인공결합의 모양에 따른 프리크랙과 미소원공의 형상비의 차이가 있으나 평활재의 피로한도를 결정하는 한계결합크기가 평활재의 허용결합크기로 볼 수 있다.

3 - 3 미소원공 및 프리크랙에서 정류한 크랙의 개폐구 특성

미소결합이나 미소크랙의 문제는 복잡한 크랙성장 혹은 정류기구를 가지는 것으로 알려져 있으며 이에 대한 연구들이 많다⁽⁸⁻¹⁰⁾. 그중에서 미소크랙의 성장 혹은 정류기구에 가장 중요한 문제는 크랙 개폐구 현상과 관련이 있다고 볼 수 있다. 크랙의 개폐구현상은 재료가 피로하중을 받으면 크랙선단에서는 인장소성변형에 대한 주변 탄성부의 변형구속에 기인하는 압축잔류응력이 발생하고, 이 압축잔류응력은 미소크랙의 개구를 어렵게 하는 효과를 통해서 크랙성장의 억제효과를 가져오는 것이라고 알려져 있다⁽¹⁷⁾.

진보⁽¹²⁾에서 한계결합크기인 미소원공에서 정류한 크랙과 한계 크랙길이인 프리크랙에서 정류한 크랙의 길이를 정리한 결과 한계결합크기를 가진 미소원공에서 정류한 크랙길이가 프리크랙에서 정류한 크랙길이 보다 조금 더 성장하여 정류한 상태이다.

따라서 미소원공과 프리크랙에서 정류한 크랙길이가 정량적으로는 각각의 크랙에 따라서 다르지만 정성적인 면에서는 미소원공에서 성장하여 정류한 크랙이 항상 프리크랙의 그것보다 길다는 것이 확인 되었으므로 이에 대한 고찰을 위해서 정류크랙에 대한 크랙 개구량을 측정하였다.

크랙 개구량 측정에 사용한 크랙은 인공결합재의 정류크랙이다. 크랙 양면에 표시한 압인의 중심거리의 변화를 측정하여 정리한 것이 Fig. 6이다. 크랙선단은 종래의 정류크랙에 대한 연구결과와 같이 양 크랙 모두가 폐구상태에 있는 것을 확인하였다^(18, 19).

그러나 크랙선단에서 20 μ m지점 부터 크랙은 개구상태에 있고, 45 μ m지점이 최대 개구상태에 있다. 또, 미소원공에서 성장하여 정류한 크랙폭이 프리크랙에 비해서 크랙 개구량이 더 큰 것을 알 수 있다. 10⁷회 반복 후의 한계결합크기와 한계크랙길이는 같고, 재료의 손상이라는 면에서 보면 미소원공이 프리크랙에 비해서 큰 것으

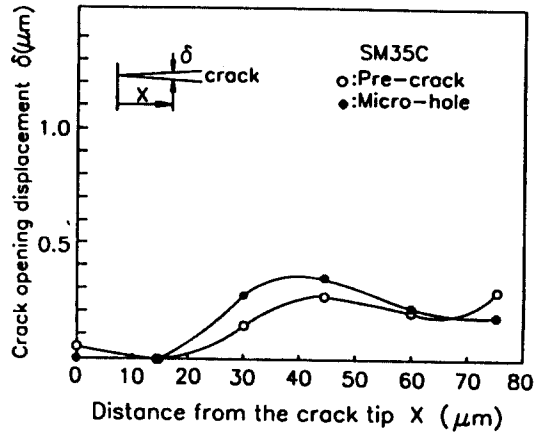


Fig. 6 Crack opening displacement of nonpropagating crack

로 판단된다. 그러나 피로한도를 변화 시킬 수 있는 영향은 아니다.

따라서, 본 연구에서 사용한 미세 균질 조직을 가진 중탄소강의 피로크랙 개폐구거동은 결합의 모양에 따라서 크랙선단의 개구량이 다소의 차이가 있으나 이것은 크랙성장과정을 지배하는 인자이며, 피로한도에는 영향을 미치지 못하고 정류크랙선단은 닫힘상태인 것을 확인하였다.

4. 결 론

실용재료인 기계 구조용 중탄소강을 사용하여 미소인공결합이 피로강도에 미치는 영향을 정성적으로 평가하였다. 특히 미소크랙길이나 결합의 크기에 대해서 조직의 대표치수가 작은 구상화시멘타이트조직에서 인공결합을 자연상태로 도입하기 위해서 진공어닐링하였고, 프리크랙과 미소원공의 크기를 변화하여 피로한도의 변화 및 결합선단에서 발생하여 정류한 크랙의 개폐구 특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 구상화시멘타이트 조직을 가진 중탄소강의 피로크랙 발생점은 표면결합이다.

(2) 평활재의 정류크랙길이와 피로한도를 저하시키지 않는 한계크랙길이(l_c)와 한계결합크기(d_c)는 일치한다.

(3) 피로크랙의 개폐구거동은 결함의 모양이 크랙개구량에 다양한 변화를 유발하지만 구상화시멘타이트 조직을 가진 중탄소강의 피로한도에는 영향을 미치지 않는다.

(4) 탄소강의 하한계 특성을 규정하는 천이영역의 한계크랙길이는 미세 균질한 구상화시멘타이트 조직의 경우는 평활계의 정류크랙과 동일한 길이라고 할 수 있다.

참고문헌

- 1) 村上敬宣, "金屬疲勞 : 微小缺陷と 介在物の 影響", 養賢堂, pp. 1 - 9, 1994
- 2) K. Yamada, M. G. Kim and T. Kunio, "Tolerant Microflaw size and Non-propagating Crack Behavior", The Behavior of Short Fatigue Cracks, EGP Pub., Edited by K.J. Miller and E.R. de los Rios, pp. 261 - 274, 1986
- 3) 田中啓介, "微小疲勞き裂傳ば", 材料, 第 33 卷, 第 370 號, pp. 961 - 972, 1984
- 4) 村上敬宣, 清水眞佐男, "疲勞強度に及ぼす介在物, 微小缺陷, 微小き裂の影響", 日本機械學會論文集, 第 54 卷, 第 499 號, pp. 413 - 425, 1988
- 5) H. Nisitani and I. Takeo, "Significance of Initiation, Propagation and Closure of Micro cracks in High Cycle Fatigue of Ductile Metals", Eng. Fract. Mech., Vol. 15, No. 3-4, pp. 445 - 456, 1981
- 6) 송삼홍, 오환섭, "미소원공재의 피로크랙거동과 페라이트 결정입도", 대한기계학회논문집, 제 9 권, 제 4 호, pp. 421 - 429, 1985
- 7) 윤명진, 송삼홍, "미소원공 및 미소슬릿재의 피로크랙 전파거동", 대한기계학회논문집, 제 10 권, 제 1 호, pp. 78-85, 1986
- 8) 윤명진, 송삼홍, "프리크랙과 미소원공재의 크랙성장 하한계조건에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제 12 권, 제 2 호, pp. 278-285, 1988
- 9) 尹命辰, 山田邦博, 國尾武, "中・低炭素均質化組織の耐久限度における許容缺陷寸法の推定", 材料, 第 38 卷, 第 426 號, pp. 275 - 279, 1989.
- 10) 윤명진, "철강재료의 피로수명에 미치는 미소결함의 영향에 관한연구", 동일문화논총, 제 2 집, pp. 171-188, 1993
- 11) 윤명진, 김창수, "탄소강의 하한계 피로크랙 성장에 미치는 결함깊이의 영향", 산업기술연구소논문집, 제 5 집, pp. 5-10, 1995-2
- 12) 윤명진, "저탄소강의 표면결함의 영향에 의한 피로강도의 정량적평가", 한국공작기계기술학회지, 제 4 권, 제 4 호, pp. 42-49, 1995-12
- 13) A. F. Grantd, Jr, "Introduction to Damage Tolerance Analysis Methodology", ASTM STP 842, pp. 3 - 24, 1984.
- 14) 村上敬宣, 松田健次, "7:3黃銅の微小き裂進展下限界値におよぼすき裂寸法の影響について", 日本機械學會論文集, 第 56 卷, 第 525 號, pp. 1123 -1132, 1990-5
- 15) 北川, 高橋, "微小な疲勞き裂の成長とその下限界條件に關する破壊力學的研究", 日本機械學會論文集, 第 45 卷, 第 399 號, pp. 1289 - 1303, 1979
- 16) 田中啓介, 中井善一, 前川 治, "低炭素鋼平滑材における疲勞き裂發生と初期成長に關する微視的研究", 材料, 第 31 卷, 第 343 號, pp. 376 - 382, 1982
- 17) W. L. Morris, "The Noncontinuum Crack Tip Deformation Behavior of Surface Microcracks", Met. Trans., Vol.11A, pp. 1117~1123, 1980.
- 18) H. Nisitani and M. Kage, "Observation of Crack Closure Phenomena at the Tip of a Fatigue Crack by Electron Microscopy", ICF4, Volume 2, 1977.
- 19) 西谷弘信, "停留き裂", 材料, 第 26 卷, 第 282 號, pp. 296~306, 1977.