https://doi.org/10.21289/KSIC.2022.25.2.233

HV가 다른 0.57 wt.% 탄소강의 미소 균열에 따르는 피로 한도

Fatigue Limit According to Microcracks in 0.57 wt.% Carbon Steel with Different HV

오창석[1], 구경희[2], 이금화[2], 남기우[2,3*]

Chang-Seok Oh[1], Kyoung-Hee Gu[2], Gum-Hwa Lee[2], Ki-Woo Nam[2,3*]

〈Abstract〉

This study evaluated the fatigue limit depending on microcracks using 0.57 wt.% carbon steel with different Vickers hardness. The fatigue limit was almost constant up to a certain limit regardless of the carbon content. However, the fatigue limit decreased rapidly as the size of the crack increased. As the crack aspect ratio was smaller, the fatigue limit of the depth (point A) a lot decreased. The fatigue limit ratio of the depth decreased significantly because the crack propagation in the depth direction was fast as the crack aspect ratio became smaller. On the other hand, the fatigue limit ratio of surface cracks increased as the crack aspect ratio decreased.

Keywords : Carbon Steel, Fatigue Limit, Microcracks, Vickers Hardness

1 부경대학교 재료공학과, 대학원생

2 부경대학교 마린디자인융합공학과, 대학원생

3* 부경대학교 재료공학과, 교수
E-mail: namkw@pknu.ac.kr

1 Graduate student, Dept. Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

2 Graduate student, Dept. Marine Convergence Design Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

3 Professor, Dept. Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea
E-mail: namkw@pknu.ac.kr

1. 서 론

파괴역학의 발전으로 구조물의 안전성은 많이 확보되었으며[1-3], 피로 수명 평가에 관한 연구가 많이 실시되었고[4-7], 구조물의 수명 예측이 가능하게 되었다. 이것은 큰 균열에 관한 연구로서, Paris의 법칙[8]에 따라서 평가하였다. 그러나 미소 균열은 발생에서 진전까지 연구되었지만, 재료에 존재하는 미소 균열에 의한 피로 수명에 관한 연구는 많지 않은 실정이다.

미소 균열의 피로 한도 평가에 관해서는 Haddad 등[9]이 식을 제안하여, 정확하게 평가할 수 있었다. 그 후, Kitakawa 등[10]은 미소 균열의 피로 균열 진전의 하한계 응력확대계수는 균열 길이가 짧아짐에 따라서 작아지는 것을 실험적으로 규명하였다. 이 연구로 균열 길이에 의존하지 않는 하한계 응력확대계수와 균열 길이에 의존하는 하한계 응력확대계수로 구분되었다.

Tange 등[11]은 Haddad 등의 식에서 하한계 응력확대계수의 균열 길이 의존성에 대하여 편리한 평가식을 수정 제안하였다. 한편 Ando 등[12]은 항복 응력보다 낮은 피로 한도에서 비선형 거동을 고려한 하한계 응력확대계수 식을 제안하여, 미소 균열 의존성을 평가하였다[13].

본 연구는 0.57 wt.% 탄소강을 열처리하여, 2종류의 경도를 가지는 시험편의 미소 균열에 따르는 피로 한도를 평가하였다.

2. 평가 대상 재료 및 시험편

재료는 0.57 wt.% 탄소강의 스프링강을 사용하였다[13]. Table 1은 화학적 성분, Table 2는 기계적 특성 나타낸다. 평가 구조 모델은 Fig. 1에 나타낸다. 즉, 판폭 $2W$ = 400mm, 두께 t = 20mm로 응력비 R = 0.05의 굽힘 피로 응력을 받는 경우이다.

Table 1. Chemical compositions (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.57	0.25	0.86	0.022	0.019	0.2	0.11	0.82

Table 2. Mechanical properties

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
1,243	1,311	11.3

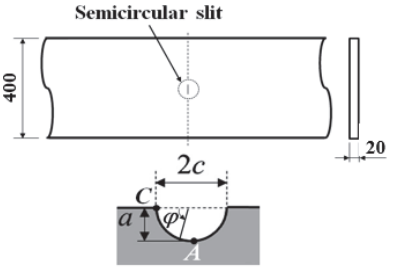


Fig. 1 Schematic of a finite plate containing a semicircular crack

재료표면은 균열 깊이(a), 균열 길이($2c$)의 반타원 표면 균열이 존재하고 있다. 균열 형상비는 $As=a/c$로 정의한다. As는 1.0, 0.6, 0.3 및 0.1로 4종류 가정하였다.

경도는 열처리로 다르게 하였다. 470HV는 대기 중 930℃에서 11min 후에 oil quenching, 대기 중 460℃에서 60min 후에 공기 중에서 tempering 하였다. 570HV는 진공 중 930℃에서 11min 후에 oil quenching, 대기 중 300℃에서 60min 후에 공기 중에서 tempering 하였다[14].

3. 평가 방법

유한판의 반타원 표면 균열이 굽힘응력을 받을

때, ΔK_{th}의 균열 길이의 의존성은 식(1)로 평가할 수 있다[12].

$$\Delta K_{th} = 2\beta\Delta\sigma_w\sqrt{\frac{a}{\pi}}\cos^{-1}\left[\left\{\frac{\pi}{8\beta^2 a}\left(\frac{\Delta K_{th(l)}}{\Delta\sigma_w}\right)^2+1\right\}^{-1}\right] \quad (1)$$

유한판의 경우, 균열재의 피로 한도($\Delta\sigma_{wc}$)는 식(2)로 평가한다.

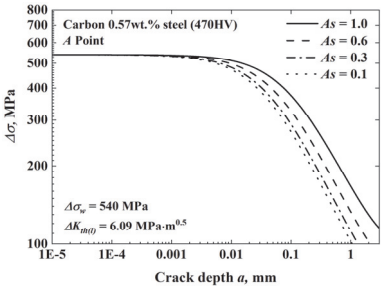
$$\Delta K_{th} = \Delta\sigma_{wc}\sqrt{\pi a} \quad (2)$$

여기서 a는 반타원 균열 깊이, α_A 및 β_A는 각각 유한판의 시험편이 인장응력 또는 굽힘응력을 받을 때에 균열 심부(A점)에서 Newman-Raju 식[15]에서 주어지는 형상보정계수이다. 균열 표면(C점)의 c_e를 평가할 때에는 α_A 및 β_A를 α_C 및 β_C로 바꾸면 된다[12].

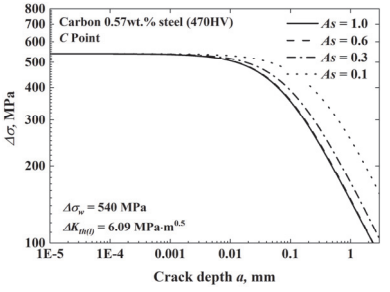
470HV 및 570HV의 피로 한도($\Delta\sigma_w$)는 각각 540MPa 및 645MPa이고, 긴 균열의 하한계 응력 확대계수 $\Delta K_{th(l)}$는 6.09 $MPa\sqrt{m}$을 사용하였다[16].

4. 결과 및 고찰

Fig. 2 및 Fig. 3은 각각 470HV와 570HV 강 유한판의 미소 균열 크기, 즉 균열 형상비 As = 1.0, 0.6, 0.3 및 0.1에 따르는 피로 한도를 나타낸다. Fig. 2 및 Fig. 3(a)은 Fig. 1의 균열 최심부(*A*점)의 결과이고, Fig. 2 및 Fig. 3(b)은 Fig. 1의 균열 표면(*C*점)의 결과이다. Fig. 2 및 Fig. 3은 미소 균열의 크기가 어느 한도까지 거의 일정한 피로 한도를 나타내지만, 그 이후에 균열의 크기가 증가함에 따라서 급격하게 피로 한도가 감소하였다. 구체적으로 살펴보면, Fig. 2 및 Fig. 3(a)의

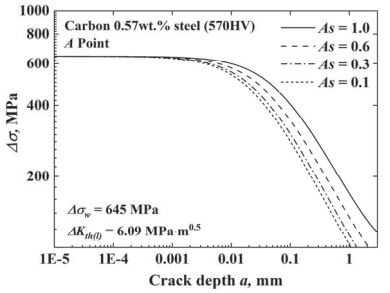


(a)

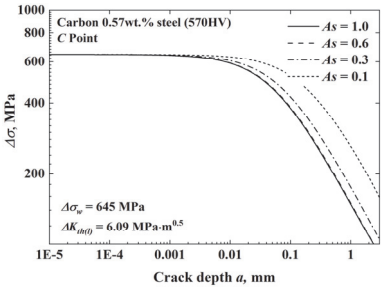


(b)

Fig. 2 Fatigue limit according to the size of microcracks in 470HV steel. (a) *A* point, (b) *C* point



(a)



(b)

Fig. 3 Fatigue limit according to the size of microcracks in 570HV steel. (a) *A* point, (b) *C* point

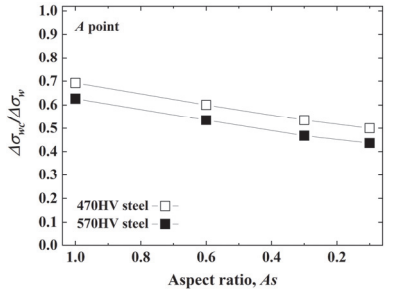


Fig. 4 Comparison of fatigue limit ratio according to aspect ratio at crack depth of 0.1 mm.

피로 한도는 균열 깊이에 따라서 감소가 다르게 나타났다. Fig. 2(a)는 균열 깊이 a = 0.1 mm에서 As = 1.0, 0.6, 0.3 및 0.1은 각각 $\Delta\sigma_{wc}$ = 374, 326, 289 및 270MPa이다. Fig. 3(a)는 균열 깊이 a = 0.1 mm에서 As = 1.0, 0.6, 0.3 및 0.1은 각각 $\Delta\sigma_{wc}$ = 404, 345, 302 및 281MPa이다. 이같이, 피로 한도는 As가 작을수록 감소가 더 많이 나타났다. 작은 As는 표면 균열이 길어서 피로 하중을 받으면, 균열 깊이가 먼저 진전하기 때문이다. Fig. 2 및 Fig. 3(b)의 피로 한도는 역시 균열 깊이에 따라서 감소가 다르게 나타났다. 이것은 표면 균열의 피로 한도를 균열 깊이에 대하여 나타낸 것이다. Fig. 2(b)는 균열 깊이 a = 0.1 mm에서 As = 1.0, 0.6, 0.3 및 0.1은 각각 $\Delta\sigma_{wc}$ = 354, 357, 390 및 461MPa이다. Fig. 3(b)는 균열 깊이 a = 0.1 mm에서 As = 1.0, 0.6, 0.3 및 0.1은 각각 $\Delta\sigma_{wc}$ = 380, 384, 425 및 522MPa이다. 이같이 표면 균열의 피로 한도는 As가 클수록 피로 한도의 감소가 더 많게 나타났다.

Fig. 4는 470HV 및 570HV 강의 균열 형상비(As)에 따른 균열 깊이(A점) 0.1 mm에서 피로한도비($\Delta\sigma_{wc}/\Delta\sigma_w$)를 나타낸 것이다. 여기서 $\Delta\sigma_w$는 평활재의 피로 한도이고, $\Delta\sigma_{wc}$는 균열재의 피로 한도다. 이 그림에서 경도가 높은 570HV 강의 피로한도비는 경도가 낮은 470HV 강의 피로한도비

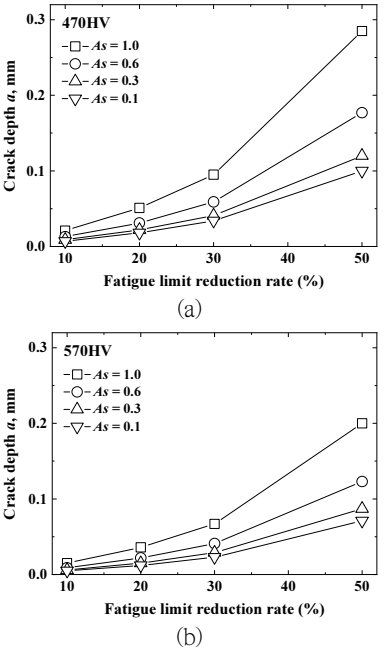


Fig. 5 Crack depth according to the fatigue limit reduction rate at each aspect ratio (As). (a) 470HV steel, (b) 570HV steel

보다 낮다. 이것은 같은 크기의 균열이 존재하더라도 고강도 강의 균열재 피로 한도는 저강도 강보다 빨리 감소한다. 또한 Fig. 4에서 A점의 피로한도비는 균열 형상비가 작아짐에 따라서 감소하는 것을 알 수 있었다. Murakami 등의 연구 결과[17]에서 미소 균열을 갖는 균열시험편의 피로한도는 균열의 크기에 의존한다. 같은 균열 깊이에서 작은 As의 $\sqrt{area}$는 큰 As의 $\sqrt{area}$보다 크다. 따라서 As가 작을수록 피로한도비는 작게 나타난다.

Fig. 5는 각 As에서 피로 한도 감소율(10%, 20%, 30%, 50%)에 따르는 균열 깊이를 나타낸다. 여기서 (a)(b)는 각각 470HV 강 및 570HV 강의 결과이다. 균열 깊이는 피로 한도 감소율이 증가함에 따라서 증가하였으며, As에 상관없이 피로한도 감소율 10%에 비하여 20%에서 약 2.4배,

30%에서 약 4.5배, 50%에서 약 15배 크게 나타났다. 특히 As가 클수록 각 피로 한도 감소율에서 균열 깊이가 크게 나타났다. 이것은 균열시험편의 피로 한도는 균열 면적$\sqrt{area}$에 의존하기 때문이다[17].

한편 피로 한도 감소율에 따르는 균열 깊이는 570HV 강이 470HV 강보다 작다. 균열이 존재하는 경우, 고강도강의 피로 한도는 저강도 강보다 감소가 더 크게 나타나기 때문이다.

5. 결 론

본 연구는 HV가 다른 탄소 0.57 wt.% 강의 미소 균열 크기에 따르는 피로 한도를 평가하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 피로 한도는 탄소 함유량과 관계없이 미소 균열의 크기가 어느 한도까지 거의 일정하지만, 균열의 크기가 증가함에 따라서 급격하게 피로 한도가 감소하였다.

(2) 균열 형상비가 작을수록 균열 심부(A점)의 피로 한도는 더 많이 감소하였고, 반대로 균열 표면(C점)의 피로 한도는 감소가 작았다. 또한 피로한도비는 HV가 큰 것이 더 낮았다. 깊이의 피로한도비는 균열 형상비가 작아짐에 깊이 방향으로 균열의 진전이 빠르므로 더 많이 감소하였다.

참고문헌

[1] ASME, “ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. VI”, The American Society of Mechanical Engineers, (1986).

[2] German Standard, “Quality Assurance of Welding Operations (DIN-8563)”, (1978).

[3] WES Standard,“ (WES-2805): Evaluation Method of Defect for Brittle Fracture Occurrence and Fatigue Crack Propagation of Welded Joints“, Japan Welding Engineering Society, (1977, 2007).

[4] K. W. Nam, K. Iwase, K. Ando, “Fatigue Life and Surface Crack Penetration Behaviour of an Aluminum Alloy”, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, vol. 18, pp. 179-187, (1995).

[5] J. C. NewmanJr, E. P. Phillips, M. H. Swain, “Fatigue-Life Prediction Methodology using Small-Crack Theory”, International Journal of Fatigue, vol. 21, pp. 109-119, (1999).

[6] S. W. Nam, “Assessment of Damage and Life Prediction of Austenitic Stainless Steel under High Temperature Creep–Fatigue Interaction Condition”, Materials Science and Engineering A, vol. 322, pp. 64-72, (2002).

[7] C. Ali, H. Gunnar, “Fatigue Life Prediction for Large Threaded Components”, Procedia Engineering, vol. 2, pp. 1225-1233, (2010).

[8] P. Paris, F. Erdogan, “A Critical Analysis of Crack Propagation Laws”, Journal of. Basic Engineerng, vol. 85, pp. 528-534, (1963).

[9] M. H. EI Haddad, T. H. Topper, K. N. Smith, “Prediction of Nonpropagating Cracks”, Engineering Fracture Mechanics, vol. 11, pp. 573-584, (1979).

[10] H. Kitagawa, S. Takahashi, “Applicability of Fracture Mechanics to Very Small Cracks or the Cracks in the Early Stages”, Proc. 2nd Intern. Conf. Mech. Behav. Mater., Boston, ASM, Cleveland, Ohio. pp. 627-631, (1976).

[11] A. Tange, T. Akutu, N. Takamura, “Relation between Shot Peening Residual Stress Distribution and Fatigue Crack Propagation Life in Spring Steel”, Transactions of JSSE, vol. 1991, pp. 47-53, (1991).

[12] K. Ando, R. Fueki, K. W. Nam, K. Matsui, K. Takahashi, “A Study on the Unification of the Threshold Stress Intensity Factor for Micro Crack Growth”, Transactions of JSSE, vol. 64, pp. 39-44, (2019).

[13] S. H. Yun, K. W. Nam, “Failure Analysis and Counter measures of SCM435 High-Tension Bolt of Three-Step Injection Mold”, Journal of The Korean Society of Industry Convergence, Vol. 23, No. 4, pp. 531-539, (2020).

[14] F. Takahashi, “Improvement of Fatigue Limit and Acceptable Surface Defect Size for Spring Steel by Shot Peening”, Yokohama National University PhD. Thesis, (2008).

[15] J. C. Newman Jr, I. S. Raju, “An Empirical Stress-Intensity Factor Equation for the Surface Crack”, Engineering Fracture Mechanics, vol. 15, pp. 185-192, (1981).

[16] M. Nakagawa, K. Takahashi, T. Osada, H. Okada, H. Koike, “Improvement in Fatigue Limit by Shot Peening for High-strength Steel Containing Crack-like Surface Defect (Influence of Surface Crack Aspect Ratio)”, Japan Society of Spring Engineers, Vol. 2014, pp. 13-18, (2014).

[17] Y. Murakami, “Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions on the Fatigue Strength of Metals”, JSME International Journal Series I, Vol. 32, pp. 1678-180, (1989).

(접수: 2022.02.10. 수정: 2022.02.22. 게재확정: 2022.02.25.)