
 論 文

大韓造船學會誌
 第26卷 第2號 1989年 6月
 Journal of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vov. 26, No. 2, June 1989

과부하로 인한 균열지연과 변형경화지수와의 상호관계

김 상 철*, 정 진 만**, 한 문 식***

Correlation between Overload Retardation and Hardening Exponent

by

Sang Chul Kim*, Jin Man Jeong** and Moon Sik Han***

요 약

본 연구에서는 기계적 성질이 상이한 4가지 박용재료에 대한 피로실험을 통하여, 일정 진폭하중 피로실험에서의 피로 균열 전파거동과 단일 과부하하중 피로실험에서의 피로 균열 전파거동을 비교함으로써, 재료의 변형경화지수(n)와 단일 과부하하중에 의한 피로 균열 지연효과와의 관계를 규명하고자 하였다.

본 실험의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 단일 과부하하중을 작용시키면 피로 균열 전파속도는 지연되며, 이 지연효과의 정도는 재료의 기계적 성질 특히 변형경화지수와 밀접한 관계가 있다.
- (2) 단일 과부하하중에 의한 피로 균열 전파속도는 변형경화지수의 값이 작은 재료에서는 피로 균열 지연효과가 작고, 변형경화지수의 값이 큰 재료일수록 지연효과가 커진다.
- (3) 단일 과부하하중에 의한 균열 closure의 현상은 변형경화지수의 값이 큰 재료에서 뚜렷이 나타나며, n 이 0.2보다 큰 재료에서 단일 과부하하중에 의한 피로수명 연장이 효과적임을 알 수 있다.

Abstract

This paper investigates the relationship between strain hardening exponents(n) of various marine materials and fatigue crack retardation effect after applying single overload. Using the four different sheet materials, following results are obtained.

- (1) The fatigue crack propagation rate after applying single overload was retarded and the effects of this retardation were closely related to the strain hardening exponent.
- (2) The larger the strain hardening exponents were, the more were the fatigue crack retardation effects after applying single overload.
- (3) The considerable crack closure with the applying of a overload was observed in materials with large strain hardening exponent. When n is smaller than 0.1, the fatigue crack retardation effects are negligible. On the contrary, when n is larger than 0.2 the fatigue crack retardation effects are significant.

본 논문은 1988년도 대한조선학회 추계연구발표회에서 발표된 논문임.

접수일자: 1988년 10월 29일, 재접수일자: 1989년 2월 23일

* 정회원, 인하대학교

** 금호타이어(주)

*** 정회원, 한국기계연구소 대덕선박분소

1. 서 론

산업이 발달함에 따라 박용기구나 선체구조물의 예기치 못한 파괴사고로 인적, 물적피해가 대형화되어 가고 있다[1, 2, 3].

박용기구나 선체구조물에 사용된 박용재료의 수명에 영향을 주는 원인은 여러가지가 있겠지만 특히 중요한 것은 규칙적 또는 불규칙적 반복하중에 의한 피로파괴이다[4, 5].

피로파괴에 관한 연구는 활발히 진행되어 피로파괴의 역학적 거동이 어느 정도 규명되었으며, 피로수명에 대한 예측도 가능하게 되었다[6, 7].

또한 최근에는 단일 과부하하중이나 block 과부하하중에 의한 피로 균열 전파거동에 관한 연구로 균열 전파속도를 증가시키거나 감소시킬 수 있다는 것을 알아냈다[8, 9].

그러나 재료가 갖는 특성은 다양하여 같은 하중조건이라 할지라도 같은 결과를 기대할 수 없다. 이러한 이유는 균열 선단에 생기는 소성영역이나 잔류응력 또는 잔류변형 등으로 설명될 수 있으며, 재료가 갖는 변형경화가 소성영역에 영향을 주기 때문일 것으로 예측되어 왔다[10, 11, 12].

실제로 사용되고 있는 재료들이 변형경화 재료라는 사실을 감안할 때, 변형경화지수가 피로 균열 전파거동에 끼치는 영향이 클 것으로 사료되며, 변형경화지수가 피로 균열 전파거동에 미치는 영향이 몇몇 연구가들에 의해 발표되었지만 [13, 14], 아직 피로 균열 전파거동과 변형경화지수와의 관계가 체제화되지 못하였다. 이러한 점을 고려하여 여러 재료에 대한 피로시험을 통하여 단일 과부하하중과 균열 전파속도의 관계를 조사하고, 재료의 변형경화지수와 균열 지연효과와의 관계를 규명하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1. 재료 및 시험편

본 실험에서는 재료의 두께가 2.8mm인 steel(SM45C)과 4 mm인 steel(SS41), aluminum(1060A1) 및 stainless steel(STS304) 등 기계적 성질이 상이한 4가지 박용재료를 택하였으며, 각 재료에 대한 화학성분과 기계적성질은 Table 1, 2와 같다.

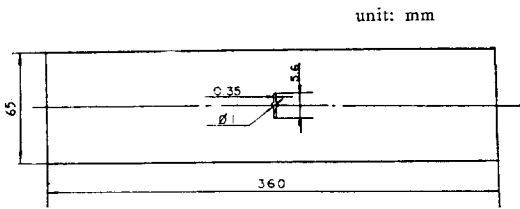
피로 시험편은 Fig. 2-1과 같이 폭 65mm, 길이 360mm로 절단 가공한 다음 판의 중앙에 $\phi 1\text{mm}$ 의 구멍을 뚫고, 가는 실타($t=0.35$)를 이용하여 slit의 길이가 5.6mm되도록 하였다.

Table 1 Chemical compositions unit : Wt %

| | Fe | Si | Ti | P | Ni | Zn | | |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| Aluminum(1060Al) | 0.33 | 0.04 | 0.01 | 0.006 | 0.003 | 0.003 | | |
| | C | Si | Mn | P | S | | | |
| Steel(SM45C) | 0.45 | 0.20 | 0.70 | 0.015 | 0.02 | | | |
| | C | Si | Mn | P | S | Ni | | |
| Steel(SS41) | 0.101 | 0.004 | 0.340 | 0.172 | 0.20 | 0.41 | | |
| | C | Cr | Ni | Mn | Si | W | P | S |
| Stainless Steel(SUS304) | 0.07 | 19.97 | 9.94 | 0.66 | 0.42 | 3.35 | 0.03 | 0.012 |

Table 2 Mechanical properties

| property | Young's modulus E(MPa) | Yield strength σ_{ys} (MPa) | Tensile strength σ_u (MPa) | Elongation percentage (%) | Poisson's ratio ν | Strain hardening exponent n |
|------------------------|------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Aluminum(1060Al) | 5.58×10^4 | 108 | 118 | 6.3 | 0.32 | 0.063 |
| Steel(SM45C) | 2.12×10^5 | 365 | 640 | 22 | 0.31 | 0.17 |
| Steel(SS41) | 2.10×10^5 | 315 | 440 | 25 | 0.29 | 0.20 |
| Stainless Steel(SS304) | 1.95×10^5 | 330 | 670 | 62 | 0.29 | 0.42 |



t { SS45C : 2.8
Aluminum, SS41, Stainless Steel : 4

Fig. 2-1 Fatigue test specimen

균열 주위의 표면은 균열이 잘 보이도록 하기 위하여 경면으로 가공하였고, 피로시험기를 이용하여 균열 길이가 6.5mm 이상이 되도록 예비 균열을 주었다.

2.2. 시험 절차

본 실험에서는 기본 피로시험인 일정진폭하중 피로 시험 및 단일 과부하하중 피로시험을 실시하였으며, ASTM E 647 규정에 준하였다. 본 실험에 사용된 피로 시험기는 유압식 servo 피로시험기(Saginomia Co.; 50 ton)이며, 기본 피로시험과 단일 과부하하중 피로 시험에서 사용한 시험편은 동일한 시험편으로서 Fig. 2-1과 같다. 시험편은 피로시험기의 유압식 척에 장착한 뒤 20 Hz의 sine 파형으로 반복하중을 가하였으며, 균열 길이는 1/100 mm까지 측정가능한 travelling microscope로 균열 선단을 따라가며 측정하였다.

기본 피로시험은 응력비 (R)를 일정하게 하여 균열 길이가 증가함에 따라 응력확대계수폭(ΔK)의 값이 증가하는 ΔK 증가 시험(또는 constant amplitude load fatigue test)으로 행하였다.

응력비(R)는 0.4로 하였고, 각 재료에 대한 하중조건은 Table 3과 같다.

본 실험에서의 응력확대계수(K)는 Isida가 제안한 식

$$K = \sigma \sqrt{a} Y \tag{1}$$

을 이용하였으며, 여기서 Y는 F(a/W)로 표시되는 형상계수로서 다음과 같이 주어진다[15].

$$Y = 1.77[1 - 0.1(2a/W) + (2a/W)^2] \tag{2}$$

여기서 a는 반 균열 길이이며, W는 시험편의 폭이다.

단일 과부하하중 피로시험에서는 일정 진폭하중을 가하여 실험하는 도중에 단일 과부하하중을 가한 다음, 다시 일정 진폭하중으로 복귀하는 방법으로 실험하였으며, 하중조건은 Table 4와 같다.

Fig. 2-2는 단일 과부하하중 피로시험에서의 하중조건을 도식적으로 표시한것이며, 단일 과부하하중에서의 피로 균열 전파거동과 기본 피로 시험에 의한 피로 균열 전파거동과의 비교가 용이하도록 단일과부하하중을 제외한 하중조건은 기본 피로시험과 동일하게 하였다.

단일 과부하하중에 의한 균열 지연 효과는 Fig. 2-2에서 % peak load 즉.

$$\% P.L. = (Kov. max - Kmax) / \Delta K \tag{3}$$

에 의해 크게 좌우되므로[16], 단일 과부하하중 피로시험에서는 모든 재료에 대하여 (Pov. max - Pmax) / Pamp)을 일정하게 유지하였다. 여기서 Kov. max 및 Pov. max는 단일과부하하중에 의한 최대응력확대계수 및 최대 하중이며, ΔK 및 Pamp는 응력계수폭 및 작용하중

Table 3 Conditions of constant amplitude load fatigue test

unit : KN

| materials | max. load (P _{max}) | min. load (P _{min}) | stress ratio (R) |
|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------|
| Aluminum(1060Al) | 15.6 | 6.24 | 0.4 |
| Steel(SM45C) | 31.4 | 12.56 | 0.4 |
| Steel(SS41) | 39.2 | 15.68 | 0.4 |
| Stainless Steel(SUS304) | 39.2 | 15.68 | 0.4 |

Table 4 Conditions of single overload fatigue test

unit : KN

| materials | before single overload | | single overload | | after single overload | |
|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | max. load (P _{max}) | min. load (P _{min}) | max. load (Pov. max) | min. load (Pov. min) | max. load (P _{max}) | min. load (P _{min}) |
| Aluminum(1060Al) | 15.6 | 6.24 | 20.28 | 1.56 | 15.6 | 6.24 |
| Steel(SM45C) | 31.4 | 12.56 | 41.16 | 2.8 | 31.4 | 12.56 |
| Steel(SS41) | 39.2 | 15.68 | 50.96 | 3.92 | 39.2 | 15.68 |
| Stainless Steel(STS304) | 39.2 | 15.68 | 50.96 | 3.92 | 39.2 | 15.68 |

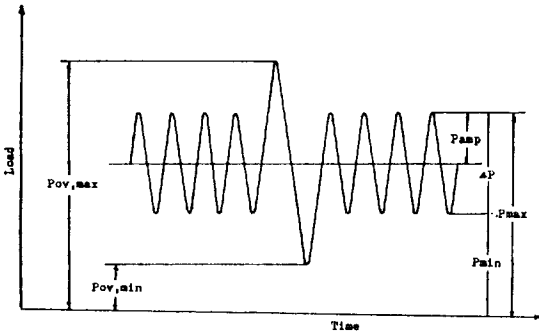


Fig. 2-2 Schematic Representation of the Test Spectrum

의 진폭이다.

또한 시편에 작용하는 압축응력이 단일 과부하하중에 의한 균열 지연효과를 감소시키므로 단일 과부하하중을 가하는 동안 압축응력이 작용하지 않도록 하였다.

3. 실험 결과 및 결과에 대한 고찰

3.1. 실험 결과

응력비 (R)를 0.4로 하여 일정한 반복하중을 가하여 얻어진 기본 피로실험과 일정 진폭하중 실험중에 단일 과부하하중을 가한 다음 다시 정상적인 반복하중을 가한 단일 과부하하중 피로실험의 결과는 다음과 같다.

Fig. 3-1~4에 4가지 박용재료에 대한 각각의 실험에 있어서 반복 cycle수(N)에 대한 균열 진전길이(a)의 관계를 기본 피로실험과 단일 과부하하중 피로 실험에 대하여 상호 비교하여 표시하였다.

또한 기본 피로실험과 단일 과부하하중 피로실험 경

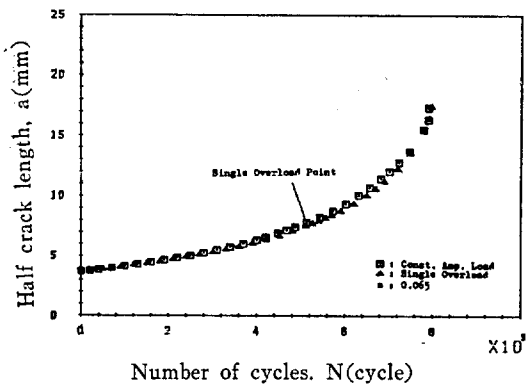


Fig. 3-1 Fatigue crack growth curve for center cracked specimen in aluminum

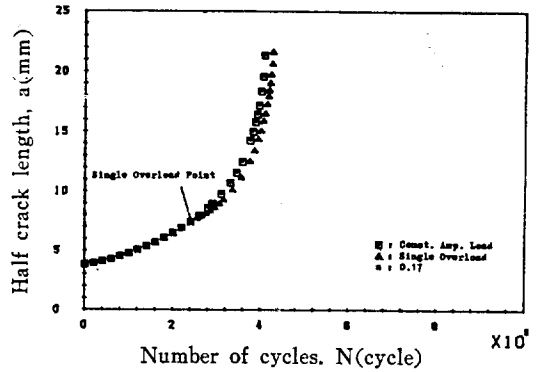


Fig. 3-2 Fatigue crack growth curve for center cracked specimen in SM45C

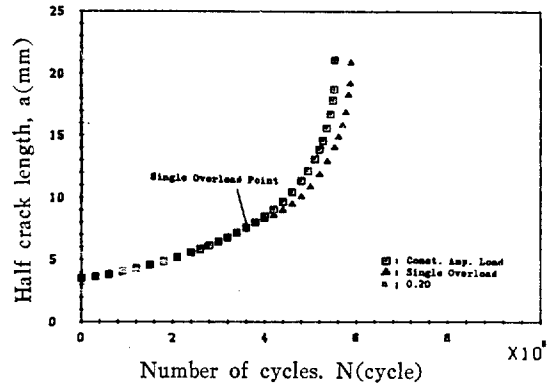


Fig. 3-3 Fatigue crack growth curve for center cracked specimen in SS41

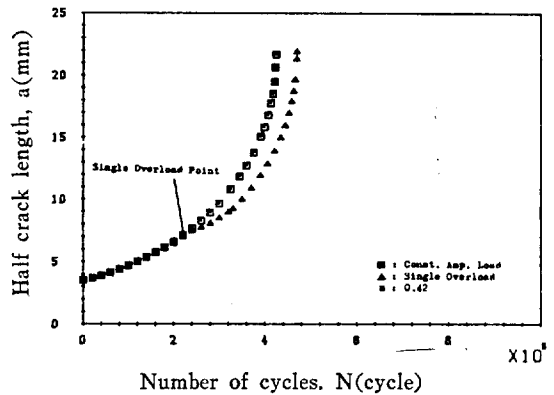


Fig. 3-4 Fatigue crack growth curve for center cracked specimen in stainless steel

우의 응력확대계수폭에 대한 균열 전파속도를 상호 비교하기 위하여, 측정된 반복 cycle 마다의 균열 진전길이 및 부하하중값에 의하여 각재료별로 구한 균열 전

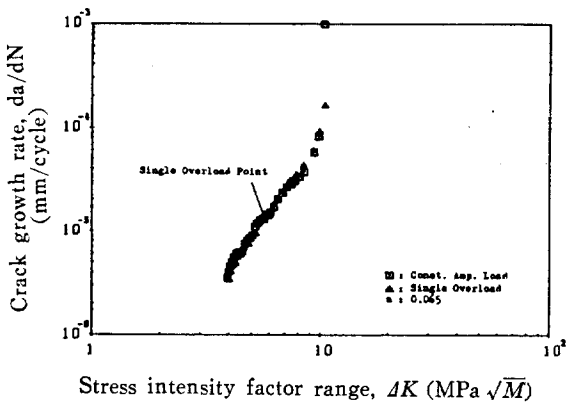


Fig. 3-5 Crack growth rate vs. stress intensity factor range for aluminum

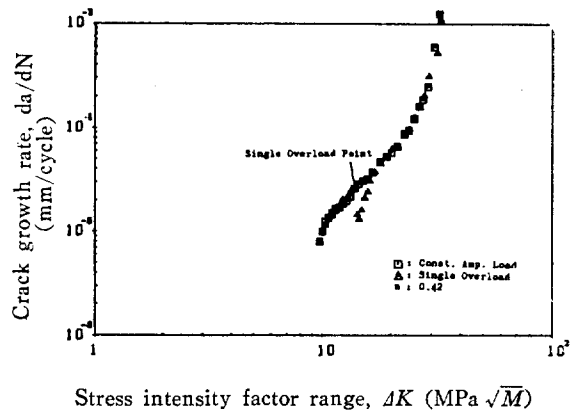


Fig. 3-8 Crack growth rate vs. stress intensity factor range for stainless steel

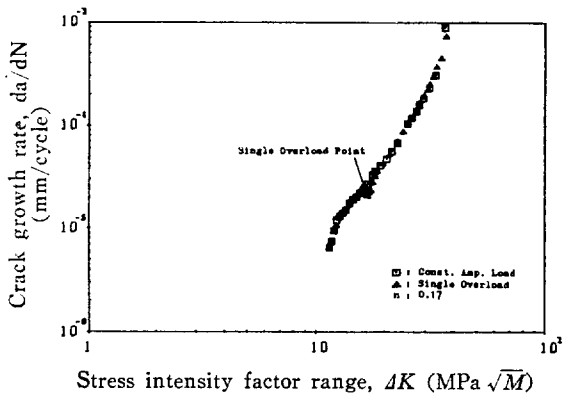


Fig. 3-6 Crack growth rate vs. stress intensity factor range for SM45C

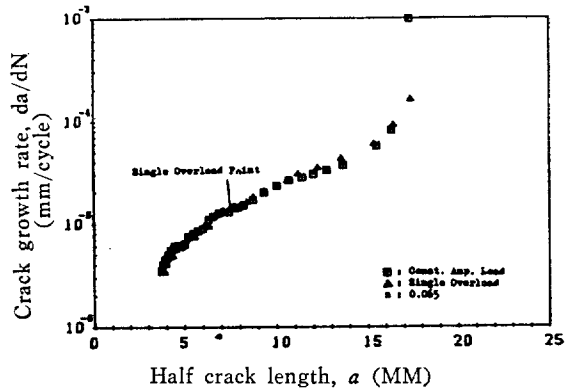


Fig. 3-9 Crack growth rate vs. crack length for aluminum

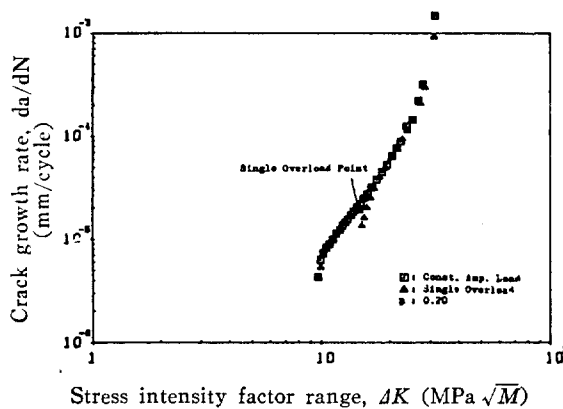


Fig. 3-7 Crack growth rate vs. stress intensity factor range for SS41

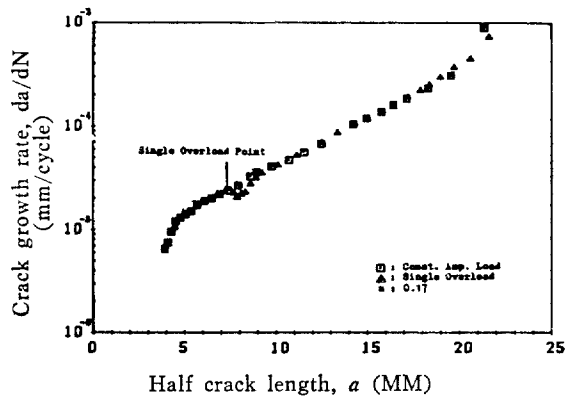


Fig. 3-10 Crack growth rate vs. crack length for SM45C

파속도(da/dN)와 응력확대계수폭(ΔK)와의 관계를 Fig. 3-5~8에 표시하였다.

Fig. 3-9~12는 균열 길이 증가에 따른 균열 전파 속도를 상호 비교하기 위하여 균열 진전길이 (a)와 균

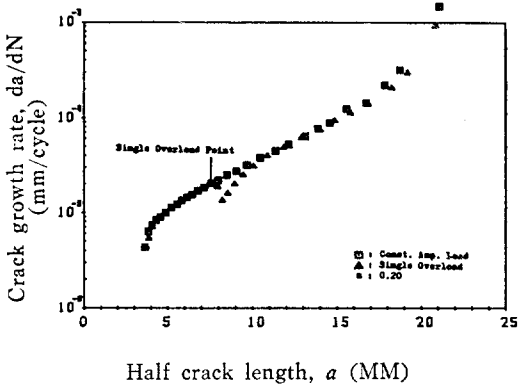


Fig. 3-11 Crack growth rate vs. crack length for SS41

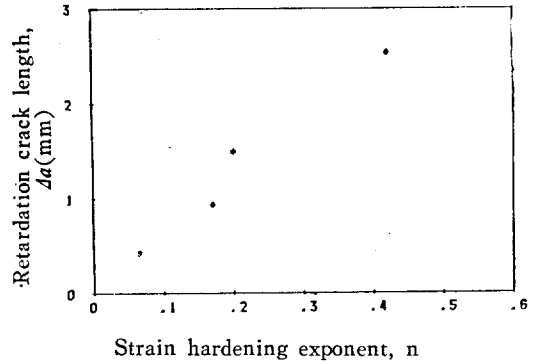


Fig. 3-13 Retardation crack length vs. strain hardening exponent

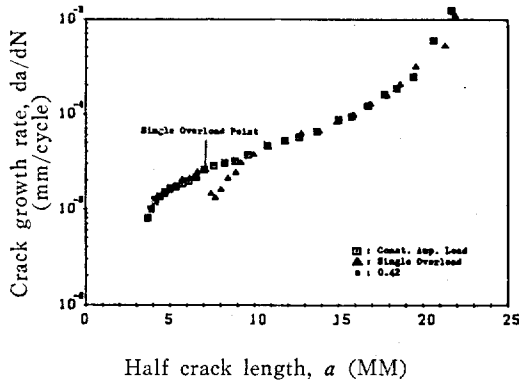


Fig. 3-12 Crack growth rate vs. crack length for stainless steel

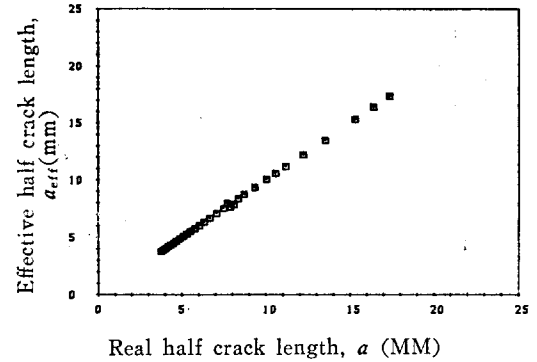


Fig. 3-14 Effective half crack length vs. real half crack length for aluminum

열 전파속도 (da/dN)와의 관계를 나타내었다.

3.2. 시험결과에 대한 고찰

이상의 실험결과를 통하여, 일정한 하중폭의 피로실험 도중에 단일과부하하중을 가한 후의 피로 균열 전파속도는 지연되며, 이 지연효과의 정도는 재료의 기계적 성질과 밀접한 관계가 있고, 특히 재료의 변형경화지수(n)와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

또한 단일 과부하하중에 의한 피로 균열 전파속도의 지연은 변형경화지의 값이 작은 재료에서 피로 균열 지연효과가 작고, 큰 재료일수록 지연효과가 커짐을 알 수 있다.

각 재료의 변형경화지수(n)와 지연 균열 길이(Δa)의 관계를 Fig. 3-13에서 좀더 상세히 살펴보면 aluminum과 같이 변형경화지수가 작은 재료($n=0.065$)에서는 단일 과부하하중으로 인한 지연 균열 길이가 0.42 mm로서 피로 균열 전파속도의 지연효과는 극히 미약하다. 그러나 stainless steel과 같은 변형경화지수가

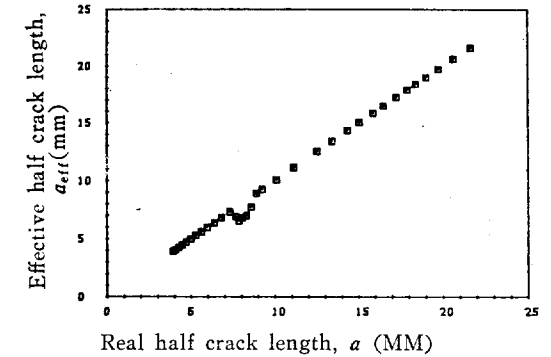


Fig. 3-15 Effective half crack length vs. real half crack length for SM45C

큰 재료($n=0.42$)에 있어서는 단일 과부하하중으로 인한 지연 균열 길이는 2.53mm로서 단일과부하하중으로 인한 균열 지연효과가 상당히 크고, SM45C($n=0.17$)와 SS41($n=0.20$)의 경우에는 지연 균열 길이가 각각 0.93, 1.49(mm)로서 aluminum과 stainless

steel의 증간정도의 지연효과를 갖는다.

이상의 결과에서 단일 과부하하중을 작용시킨 후의 피로 균열 전파속도는 지연되는데, 이 지연된 부분에서의 균열 길이는 단일 과부하하중에 의한 영향 때문에 실제의 균열 길이보다 작은 것과 같은 현상이 나타난다. 이와 같이 실제의 균열 길이보다 작은 것처럼 작용하는 균열 길이를 유효 균열 길이(a_{eff})로 하고, 이를 좀더 상세히 비교해 보기 위하여, 단일 과부하하중에 의한 실제의 균열 길이(a)와 기본 피로시험에서의 균열 전파속도(da/dN)와의 관계를 고려한 유효 균열 길이(a_{eff})의 관계를 Fig. 3-14~17에 나타냈다.

Fig. 3-18은 단일 과부하하중을 후의 피로 균열 전파속도가 최소가 되는 점에서의 유효 균열 길이(a_{eff})와 실제 균열 길이(a)의 비인(a_{eff}/a)_{min}와 변형경화지수와의 관계를 표시한 것으로써, aluminum, SM45C, SS41 및 stainless steel의 (a_{eff}/a)_{min} 값은 각각 0.96, 0.83, 0.73 및 0.56을 나타낸다.

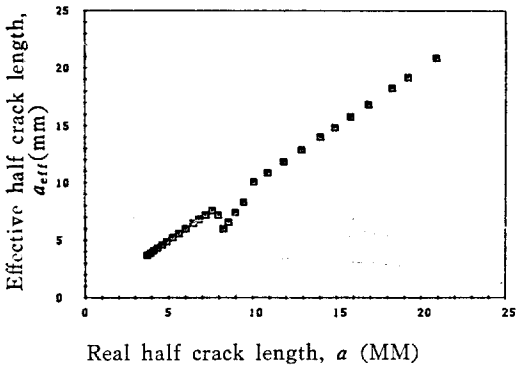


Fig. 3-16 Effective half crack length vs. real half crack length for SS41

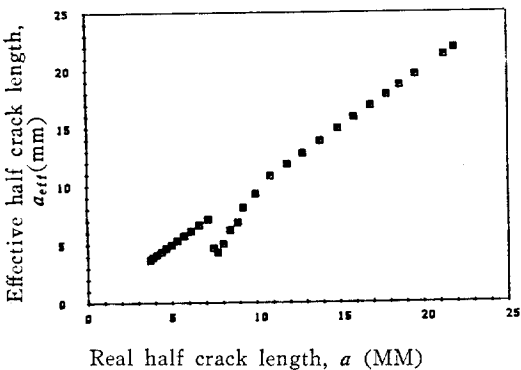


Fig. 3-17 Effective half crack length vs. real half crack length for stainless steel

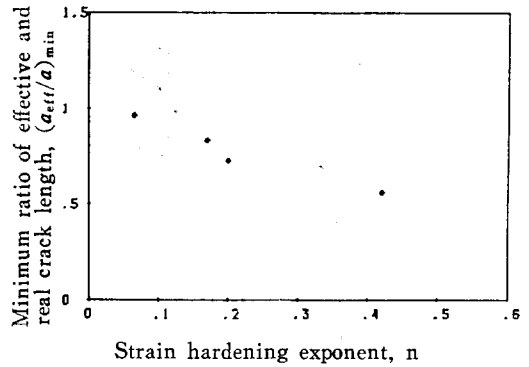


Fig. 3-18 Minimum ratio of effective and real crack length vs. strain hardening exponent

이와 같이 균열 closure의 관점에서 볼 때, n 이 0.1보다 작은 재료에 있어서는 단일 과부하하중으로 인한 지연현상은 거의 나타나지 않음을 뜻하고, n 이 0.2보다 큰 재료에 있어서만이 뚜렷이 균열 closure 현상이 일어날 것이라는 사실을 본 연구를 통하여 추측할 수 있다. 즉, 단일 과부하하중에 의한 피로수명의 연장은 n 이 0.2보다 큰 재료에서 효과적임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 기계적 성질이 상이한 4가지 박용재료에 대한 피로실험을 통하여, 일정 진폭하중 피로시험에서의 피로 균열 전파거동과 단일과부하하중을 받은 후의 피로 균열 전파거동을 비교함으로써, 재료의 변형경화지수(n)와 단일 과부하하중에 의한 피로 균열 지연효과와의 관계를 규명하였다.

본 실험의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 일정한 하중폭의 피로시험 도중 단일 과부하하중을 작용시키면 피로 균열 전파속도(da/dN)는 지연되며, 이 지연효과와 정도는 재료의 기계적 성질 특히 변형경화지수와 밀접한 관계가 있다.

(2) 단일 과부하하중에 의한 피로 균열 전파속도의 지연은 aluminum($n=0.065$), SM45C($n=0.17$), SS41($n=0.20$) 및 stainless steel($n=0.42$)의 순으로 커지며 변형경화지수의 값이 작은 재료에서는 피로 균열 지연효과가 작고, 변형경화지수의 값이 큰 재료일수록 지연효과가 커진다.

(3) 단일 과부하하중 후의 피로 균열 전파속도가 최소가 되는 점에서의 유효 균열 길이(a_{eff})와 실제 균열 길이(a)의 비(a_{eff}/a)_{min}의 값이 aluminum, SM45C, SS41 및 stainless steel의 경우 각각 0.96, 0.83, 0.73,

0.56으로서, 균열 closure의 현상은 변형경화지수의 값이 큰 재료에서 뚜렷이 나타나며, n 이 0.2 보다 큰 재료에서 단일 과부하중에 의한 피로수명 연장이 효과적임을 알 수 있다.

References

- [1] Shank, M.E., "A Critical Survey of Brittle Fracture in Carbon Steel Structures other than Ships", Weld. Res. Bull., 1971(1954).
- [2] Parker, E.R., Brittle Behavior of Engineering Structures, John Wiley and Sons Inc., New York (1957).
- [3] Boyd, G.M., Brittle Fracture in Steel Structures, Butterworths (1970).
- [4] A Haaland, "Damages to important Structural Parts of the Hull", DET NORSKE VERITAS Publication No. 61, pp.1-8, OSLO, Jan., 1968.
- [5] S. Janzen, O. Nilsson, "Hull damage in Large Ships", LR Technical Association No. 1 Session, 1972~1973.
- [6] A.K. Head, The Growth of Fatigue Cracks, Phil. Mag. 44, 925 (1953).
- [7] P.C. Paris and F. Erdogan, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", *J. Bas. Engng*, Trans. Am. Soc. Mech. Engng, Series D. 85 (4), 528(1963).
- [8] O.E. Wheeler, "Spectrum Loading and Crack Growth", ASME Publ. 1971.
- [9] Willenborg, J., Engle. R.M. and Wood. H.A., "A Crack Growth Retardation Model Using an Effective Stress Concept", AFFDL-TM-71-1-FBR (1971).
- [10] J.W. Hutchinson, "Singular Behavior at the End of a Tensile Crack in a Hardening Material", *J. Mech. Phys. Solids*. 16(1), 13-32 (1968).
- [11] W. Ramberg and W.R. Osgood, "Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters", NACA TN 902(July 1943).
- [12] K.M. Lal and S.B.L. Garg, "On the Evaluation of Monotonic and Cyclic Plastic Zones", *Eng. Frac. Mech.* 1977, Vol. 9, pp.433-442.
- [13] W.M. Thomas, "The Effect of Single Overloads upon Fatigue Cracks in 5083-H321 Aluminium", *Eng. Frac. Mech.* Vol. 23. No. 6, pp.1015-1029, 1986.
- [14] K.M. Lal and S.B.L. Garg, "A Fatigue Crack Propagation Model for Strain Hardening Materials", *Engineering Fracture Mechanics*. 1977. Vol. 9, pp.939-949 Pergamond Press, Printed in Great Britain.
- [15] F.B. William, Jr, and J.E. Srawley, "Plane Strain Crack Toughness Testing of High Strength Metallic Materials", ASME, Special Technical Publication, No. 410.
- [16] E.F.J. von Euw, R.W. Hertzberg and Richard Roberts, "Delay Effects in Fatigue Crack Propagation", *ASTM STP* 513, 1972, pp.230-259.