

노치재의 피로균열진전과 응력확대계수 평가에 관한 연구 A Study on Fatigue Crack Growth and Stress Intensity Factors of Notch Materials

이중형*, 이상영**, 이창현**, 김윤곤**, 임춘규**, 이춘곤**, 권영신**
Jong-Hyung Lee*, Sang-Young Lee**, Chang-Heon Yi**, Yun-Gon Kim**,
Chun-Kyoo Lim**, Chun-Kon Lee**, Yung-Shin Kwon**

<Abstract>

Prediction of fatigue duration is attainable from the analysis of the growth rate of the fatigue crack, and the property of the fatigue crack growth is determined by the calculation of the stress intensity factor. And the evaluation of the stress intensity factor, K comes from the stress analysis of the vicinity of crack tip of the continuum. This study describes a simple method to decide the stress intensity factor for the small crack at the sharp edge notches. The proposed method is based on the similarities between elastic stress fields of the notch tip described by two parameters, the stress concentration factor K , the radius of arc of the notch. And it is applicable to the analysis of the semi-elliptical penetration cracks and the edge notches.

Keywords : *Fatigue crack growth, Stress intensity*

1. 서 론

일반적으로 반복하중에 의한 피로파괴가 가장 많다. 그러므로 반복하중을 받을 부재의 설계에서는 응력집중을 방지하는 것이 가장 중요하다. 기계구조용강(SM45C)으로 제작된 크랭크축 등에서 키 홈(key way), 기름구멍, 나사홈(screw thread) 등은 사고의 잠재적 근원으로서 피로파괴를 방지해야 할 설계에서 특별히 경계해야 할 존재들이다⁽¹⁾. 노치가 있는 구성요소에

대한 피로수명 예측은 피로균열성장해석으로 접근할 수 있으며 피로균열성장율의 특징을 지우기 위해서는 노치선단에 발생하는 균열에 대한 응력확대계수의 계산을 필요로 한다. 노치에서의 균열을 연구하는 명백한 수단은 파괴역학이며⁽²⁾, Fig. 3.1의 노치선단에서부터 진전하는 미소균열에 대한 응력확대계수는 노치선단에서 종축응력 분포에 대한 근사적 표현으로부터 평가할 수 있다⁽³⁾. 본 연구에서는 기 발표된 응력 집중계수 K_t 와 노치선단곡률반경 ρ 의 두 파라

* 교신저자, 정회원 금오공과대학교 기계공학부 교수, 工博 * Corresponding Author, Prof., School of Mechanical Engineering, K.I.T
Email : leejh@kumoh.ac.kr
** 준회원, 금오공과대학교 대학원 ** School of Mechanical Engineering, K.I.T

미터에 의해 표현된 노치선단 응력장 사이의 유사성을 기초로 하여, 예리한 부분 노치선단에서의 미소균열에 대한 응력확대계수를 결정하기 위해 더욱 간단하고 편리한 근사식을 활용하여 응력확대계수를 평가하고자 한다.

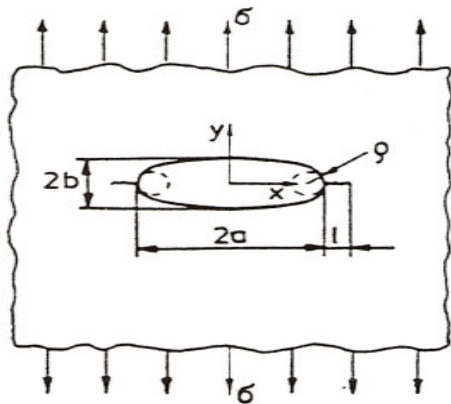


Fig. 1. Nomenclature of small notch emanating cracks.

노치선단에는 응력집중이 걸리고 K_t 로 정의된다. 그러나 균열에는 K_t 라는 파라미터를 사용할 수 없으며 응력확대계수 K 를 사용하게 된다. 노치는 K_t 가 한정된 값을 갖고 균열에는 K_t 가 무한대 값을 가지므로 파괴위험성은 노치보다 균열이 훨씬 높다. 따라서 균열이 존재하는 물체의 위험도를 줄이기 위해 균열선단을 찾아서 그 성단에 구멍을 내어 노치를 만들기도 한다⁽⁴⁾.

2 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 실험에 사용된 재료는 시판 기계구조용 탄소강 SM45C로 그 기계적 성질과 화학적 성분은 Table 1.와 Table 2.에 나타내었다.

Table 1. SM45C chemical composition (wt. %)

Material	C	Si	Mn	P	S
SM45C	0.45	0.23	0.67	0.034	0.021

Table 2. SM45C mechanical properties

Material	Yield strength (Kg/mm ²)	Tensile strength (Kg/mm ²)	Elongation	Hardness	
				H _B	H _S
SM45C	46.4	66.4	203.5	219	33

Fig. 2.는 KS13B호 인장 시험편이고, Fig. 3.3은 피로시험편의 형상 및 가공치수이다. 인장시험편과 피로시험편의 노치곡률반경 $\rho=0.3, 1.0$ 은 와이어 커팅머신으로 가공하였으며 조직의 균질화를 피하여 내부의 잔류응력을 제거하고 기계적 성질을 균일하게 하기 위해서 전기로에서 830℃로 1시간동안 가열하고 노냉시켜 풀림처리(Annealing)를 하였다.

열처리를 끝낸 시험편은 실험을 위해 연마지(#1000~1200)로 표면을 가볍게 래핑(lapping)시킨 후, 산화크롬 분말로서 버핑(buffing)을 실시하였다.

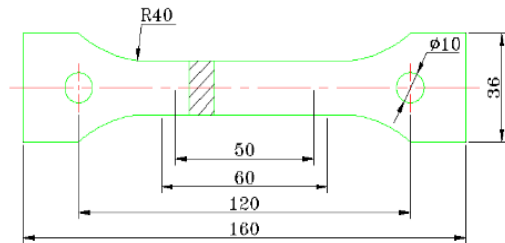


Fig. 2. Configuration of tensile specimen.

2.2 인장시험 및 피로시험

인장시험은 Fig. 2.의 인장시험편을 인장시험기(만능시험기, 100ton)로 수행하였으며, 인장시험을 통하여 최대응력 σ_{max} 와 항복응력 σ_s 을 먼저 구한 후 공칭응력 σ_n 을 결정하여 피로시험에 적용하였다.

피로시험은 피로시험기(INSTRON Model 1350-20, 10ton)를 사용하여 Fig. 3.의 노치선단 곡률반경이 서로 다른 두 종류($\rho=0.3, \rho=1.0$)의 DEN 피로시험편을 $R=0.05$ 의 응력비($\sigma_{min}/\sigma_{max}$)로 수행하였다.

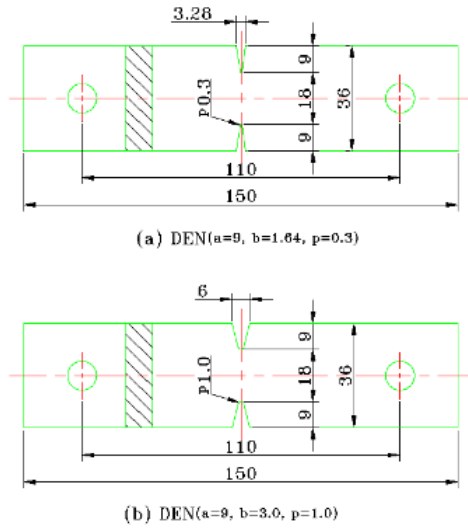


Fig. 3. Configuration of fatigue specimen

각 시험에 대한 피로시험을 통하여 피로한도를 구하고 미소균열(small crack)을 측정하여 이론적인 해석과 비교 검토하기 위한 균열길이 측정은 일정 응력반복회수마다 시험기를 정지시켜 채취한 레프리카(replica)를 광학 현미경으로 확대하여 측정하였다.

폴립 처리한 시험편의 기계적 성질을 파악하고 피로시험에 적용할 응력비 등을 결정하기 위하여 Fig. 2의 인장시험편으로 인장시험을 실시한 결과 인장강도 $\sigma_B=54.6\text{Kgf/mm}^2$ 와 항복응력 $\sigma_{ys}=35.9\text{Kgf/mm}^2$ 을 얻었으며 안전율을 고려하여 허용응력 σ_a 는 18Kgf/mm^2 정도로 추정하였다. 그러나 기계부재는 거의 반복하중을 받고 있으며, 실제 엄밀한 의미에서의 정하중은 있을 수 없다. 반복응력상태 하에서는 잔류응력의 영향 등으로 평균응력 σ_m 이 큰 경우라고 생각할 수 있다. 반복하중이 작용할 경우, 즉 탄성한계가 하일지라도 일정한 시간이 지나면 부재는 피로 파괴하기 때문에 허용응력을 피로한도를 고려하여 결정해야 할 것이다.

부재의 강도에 비해 응력비가 너무 크면 쉽게 파괴될 것이며 응력비가 너무 낮은 범위에서는 균열진전의 지연효과가 나타나므로 인장시험 결과를 참고하고 응력비를 $R=0.05$ 로 하여 Fig. 3의 피로시험편($p=0.3, p=1.0$)을 피로시험을 한 결과 Fig. 4의 S-N전도를 얻었으며 피로한도는 각각 $\sigma_{wa}=9.9\text{Kgf/mm}^2, \sigma_{wa}=12.8\text{Kgf/mm}^2$

으로 나타났다.

평활재에 비해 노치재의 피로한도가 낮은 것은 노치재의 경우 노치부의 응력집중의 영향으로 생각되어진다. 피로시험은 응력비 $R=0.05$ 로 하여 두 가지 응력레벨로 수행하였다. Fig. 3.5는 반복수와 균열길이와의 관계를 나타내었다.

노치선단곡률반경 ρ 의 값이 커질수록 파단수명(N_f)은 길어진다는 것을 알 수 있으며, 이것은 균열발생수명(N_i)이 길어진다는 것을 의미한다. 이것은 노치선단 곡률반경이 커질수록 노치선단에서 균열을 발생시키는데 소비되는 힘이나 시간이 더 필요하다는 것이다.

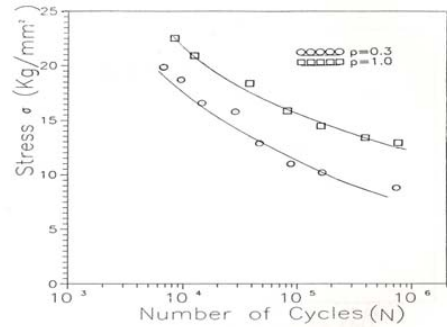


Fig. 4. Relationship between stress amplitude and number of cycles.

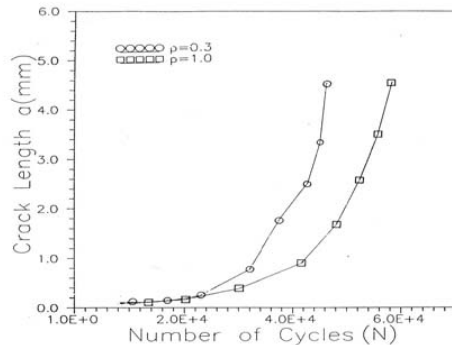


Fig. 5. Relationship between crack length and number of cycles.

노치곡률반경에 따라 파단수명은 달라지나 균열진전속도는 노치선단곡률반경에 거의 영향을 받지 않는다. 즉, 노치는 균열의 발생에는 영향을 미치나 이미 발생한 균열이 진전하는 데는 별 영향을 미치지 못한다는 것을 알 수 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 노치재의 미소균열에 대한 응력확대계수 평가

예리한 양쪽 노치인 두 피로시험($\rho=0.3, \rho=1.0$)에서 노치선단에서의 미소균열에 대한 응력확대계수 평가를 위해 실험결과를 미소균열과 큰 균열의 근사식과 함께 비교하였다. 무차원형태의 응력확대계수를 해를 Table 3.와 Fig. 4.에 각각 나타내었다.

예리한 타원형의 에지 선단에서의 피로균열 성장에 대한 최근연구에서 노치선단의 응력분포의 정확한 해석은 유한요소법(FEM)으로 평가 가능하며 응력집중계수 K_t 값이 $7.7 \leq K_t \leq 29$ 범위의 예리한 노치에서는 해석결과가 FEM 결과의 3% 이내에 있는 매우 정확한 평가를 제공하므로 공학적응에 안전한 해를 준다는 보고가 있다.⁽⁵⁾

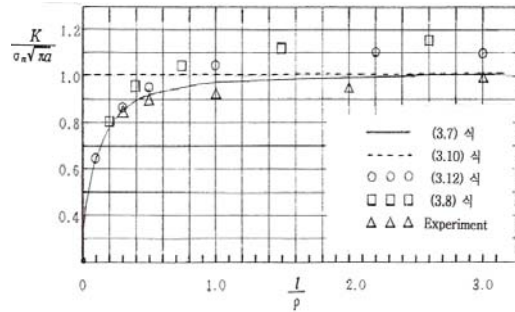
Table 3. Dimensionless solutions of stress intensity factor

x	0.03	0.06	0.09	0.12	0.15	0.30	0.45	0.60	0.75	0.90	1.05	1.30
x/ρ	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
f	1	1	$\frac{1.00}{4}$	$\frac{1.00}{8}$	1.01	1.03	1.05	1.07	1.10	1.12	1.14	1.16
Eq. 3.7	0.65	0.78	0.85	0.89	0.92	0.97	0.98	0.99	1.00	1.01	1.04	1.03
Eq. 3.10	0.64	0.78	0.86	0.92	0.94	1.04	1.07	1.10	1.11	1.09	1.09	1.11
Eq. 3.12	0.65	0.81	0.89	0.95	1.00	1.09	1.12	1.13	1.14	1.18	1.18	1.17
Eq. 3.8	$\frac{1.00}{1}$	$\frac{1.00}{3}$	$\frac{1.00}{4}$	$\frac{1.00}{5}$	$\frac{1.00}{6}$	1.01	1.02	1.02	1.03	1.04	1.04	1.05
Experimental Result	-	-	0.84	-	0.89	0.92	-	0.94	-	0.98	-	-

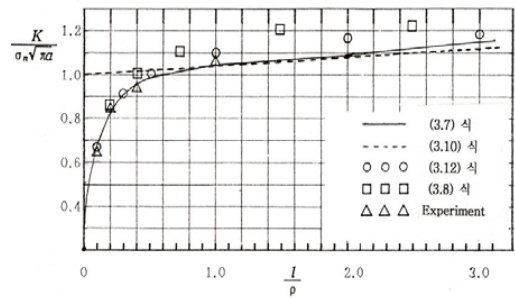
(a) DEN($a=9, b=1.64, \rho=0.3, K_t=13.6$)

x	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
x/ρ	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
f	1	1	$\frac{1.00}{7}$	$\frac{1.01}{4}$	1.02	1.06	1.09	1.13	1.17	1.20	1.24	1.20
Eq. 3.7	0.68	0.83	0.91	0.96	0.98	1.05	1.07	1.09	1.14	1.16	1.20	1.23
Eq. 3.10	0.67	0.84	0.91	0.98	1.00	1.10	1.13	1.17	1.18	1.16	1.16	1.18
Eq. 3.12	0.70	0.86	0.94	1.01	1.05	1.16	1.20	1.22	1.25	1.25	1.24	1.24
Eq. 3.8	$\frac{1.00}{4}$	$\frac{1.00}{8}$	1.01	1.02	1.02	1.04	1.06	1.08	1.10	1.12	1.14	1.16
Experimental Result	0.65	0.85	-	0.93	-	1.07	-	-	-	-	-	-

(b) DEN($a=9, b=3.0, \rho=1.0, K_t=7.9$)



(a) DEN($a=9, b=1.64, \rho=0.3$)



(b) DEN($a=9, b=3.0, \rho=1.0$)

Fig. 6. Dimensionless stress intensity factors.

3.2 피로균열진전(Fatigue Crack Growth)

과피 역학적 개념에 의하면 균열선단에서 응력-변형률이 금속의 거동을 지배하며, 균열선단에서의 응력-변형률의 성질을 응력확대계수로 표시되고 반복응력확대계수(응력확대계수 범위)와 피로균열 성장율과도 관계가 있다. 대부분 널리 인식된 피로균열성장과 적용하중은 Paris 식에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$da/dN = C(\Delta K)^m$$

$$\Delta K_{local} = K_t \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$$

여기서 ΔK 는 응력확대계수 범위이며 C와 m은 실험상수이다.

노치와 같은 응력집중부위에서 피로균열이 진전될 경우 피로균열성장 비(da/dN)는 다음식과 같다.

$$da/dN = C(\Delta K_{local})^m$$

$$\Delta K_{local} = K_t \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$$

여기서 $\Delta\sigma$ 는 공칭응력을 나타낸다.

균열길이 a 와 응력 반복수 n 의 관계로부터 균열진전속도 da/dN 을 결정하기 위하여 secant법⁽⁶⁾을 사용했으며, 즉 S-N곡선에서 인접하는 두 개의 균열길이 점을 직선으로 연결하고 이의 기울기로부터 da/dN 을 결정하여 실험에 적용하였다. Table 4.는 실험의 결과치($\rho=0.3$ 인 경우), Fig. 7.은 응력확대계수범위와 균열 성장률의 관계를 나타내었다.

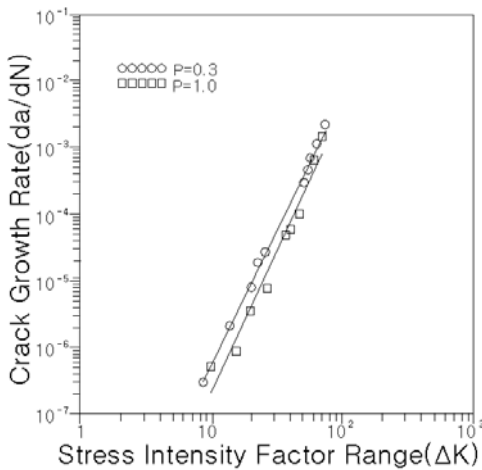


Fig. 7. Relationship between crack growth rate and stress intensity factor range.

Table 4. The data of da/dN and ΔK for DEN specimen

$\rho=0.3$ 경우	1	2	3	4	5
da/dN	2.0×10^{-6} (1/500,000)	1.0×10^{-5} (1/100,000)	6.25×10^{-5} (1/16000)	1.0×10^{-4} (1/10,000)	1.43×10^{-4} (1/7,000)
ΔK	8.5	13.74	19.85	23.12	25.82

4 결론

기계구조용 강재인 SM45C의 예리한(sharp) 양쪽 노치재의 미소균열에 대한 파괴 역학적 연구결과 및 실구조물에 존재 가능한 인공결함을 가공한 시험편을 사용하여 상온에서 응력비 $R = 0.05$ 로 피로시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다

1. 구조물이나 부재에 노치나 결함이 존재하면 응력집중이 발생하며 응력집중계수는 노치형상과 노치선단의 곡률반경에 따라 좌우되며 몇 가지 서로 다른 방법에 의한 계산이 가능하다.
2. 동일조건 하에서 내부균열인 관통균열과 표면균열인 한쪽 에지노치와 양쪽 에지노치 중 관통크랙에서 응력집중계수 K_t 값이 가장 작고, 한쪽 에지 노치에서 가장 크므로 한쪽 에지노치가 가장 위험한 것임을 의미한다.
3. 양쪽 에지노치에서의 미소균열에 대한 응력확대계수 K 는 응력집중계수 K_t 와 노치곡률반경 ρ 로 표현된 탄성응력장 해석에 근거한 세 가지 근사식으로 적용, 평가를 할 수 있다.
4. 미소균열은 균열성장률 법칙에 따르지 않지만 노치길이와 미소균열 길이를 포함하여 해석하고자 할 때는 균열성장률 법칙에 따르는 큰 균열에 대한 응력 확대 계수 K_L 로 평가 가능하다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문입니다.

참 고 문 헌

- 1) 李 樑, “固體力學”文運堂, pp.231-235(1984)
- 2) R. A. Smith and K. J. Miller, “Fatigue Cracks at Notches” Int.J.Mech. Sci.19, pp.11-12 (1977)
- 3) D. Kujawski, “Estimations of Stress Intensity Factor for Small Cracks at Notches” Fatigue Fracture Eng. Mater. Struct, Vol.14 No.10, pp.935-961(1991)
- 4) 崔善浩, 鄭善謨, “機械設計”螢雪出版社, pp. 16-38(1978)
- 5) F. R. Shanley, “Mechanics of Materials”, McGraw-Hill Book co. New York, pp.326-335(1957)
- 6) S. A. Meguid, “Engineering Fracture Mechanics”, Elsevier Applied Science LTD, pp.43-45, 130-159(1989)

(2007년 4월 25일 접수, 2007년 8월 24일 채택)