

미소균열측정과 성장특성에 관한 연구 A Study of Small Fatigue Crack Measurement and Crack Growth Characteristics

이종형*, 소윤섭**, 김윤곤**, 임춘규**, 이상영***
Jong-Hyung Lee, Yoon-Sub So, Yun-Gon Kim,
Chun-Kyoo Lim, Sang-Young Lee

<Abstract>

The objective of this paper is to examine the detection limit, growth characteristics and notch curvature radius in short crack problem. Measurement techniques such as ultrasonic method and back-face strain compliance method were adapted. The fatigue crack growth rate of the short crack is slower than that of a long crack for a notched specimen. The short crack is detected effectively by ultrasonic method. A short surface crack occurs in the middle of specimen thickness and is transient to a through crack when maximum crack depth is larger than the notch curvature radius.

Keywords : Crack Initiation, Fatigue, Short Crack, Stress Intensity Factor

1. 서 론

파괴역학의 발달의 역사는 중대한 파괴사고의 발생과 밀접한 관계가 있다. 특히 취성파괴(brittle fracture)는 아무 예고도 없이 돌연 일어나므로 많은 인적, 물적 손해를 초래하게 한다. 파괴역학은 고체재료에 힘이 가해졌을 때 생기는 변형과 파괴와 같은 재료의 역학적 거동(mechanical behavior of materials)을 연구하는 학문이다. 이 경우 재료라는 것은 철, 압석,

토양과 같이 자연계에 존재하는 것은 물론, 인간사회의 여러 가지 요구를 실현하기 위하여 만들어서 사용하는 것을 모두 가리킨다. 따라서 파괴역학은 우리들의 요구에 적합한 재료와 그것을 사용한 부품, 장치, 기계, 구조물을 공학체계 속에서 어떻게 만들 것인가 하는 공학적 사고에 근거를 두고 있다.

원래 금속재료가 파괴를 일으키는 데는 파괴의 핵이라고도 볼 수 있는 크랙의 존재가 전제조건이 된다. 파괴는 제조과정을 거쳐 부재 내

* 정회원, 금오공과대학교 기계공학부 교수
일본 동경공업대학 대학원 졸업
730-701 구미시 양호동 1번지
** 금오공과대학교 대학원 생산기계공학과
*** 한국폴리텍VI대학 교수

* Professor, School of Mechanical Engineering, KIT
TEL : 054)478-7394 FAX : 054)478-7319
E-mail : leejh@kumoh.ac.kr
** Student, School of Mechanical Engineering, KIT
*** Professor, Korea Polytechnic VI colleges

에 존재하고 있던 미소한 크랙, 또는 초기에는 존재하고 있지 않더라도 사용 중에 어떠한 원인에 의하여 발생하고 점차로 또는 급속하게 성장하는 결과로 일어나는 것이다. 따라서 파괴 과정은 크랙의 발생(crack nucleation)과 크랙의 전파(crack propagation) 또는 크랙의 성장(crack growth)의 2개 과정으로 이루어진다. 이와 같이 실제로 사용되고 있는 기계나 구조물의 부재 내에는 크랙이 존재하는 경우가 많다. 따라서 크랙을 포함하는 부재의 강도특성을 취급하는 학문분야의 필요성이 인식되게 되었다.

2. 파괴인성

2.1 균열재의 파괴강도

균열과 같은 결함을 갖는 부재에 어떤 하중이 부하되면 균열을 기점으로 해서 그 이상으로 하중이 증가하지 않고 급격히 균열이 전파되어 파괴된다. 이와 같은 균열재의 일방향 부하에 대한 저항치를 파괴인성(fracture toughness)이라 한다. 균열재의 파괴강도는 평활재의 강도인 항복강도 또는 인장강도와는 일치하지 않는다. 일반적으로 고강도재료는 파괴인성이 작기 때문에 어느 길이의 균열을 가지면 항복강도 또는 인장강도가 큰 재료가 이들이 작은 재료보다 낮은 강도를 나타내게 된다. 즉, 고강도재료를 사용해서 안전한 설계를 했다는 기계부재가 그 중에 결함이 있다든지 또는 어떤 원인으로 균열이 발생한 경우에는 역으로 위험한 설계를 한 것이 되고 파괴사고의 원인이 된다. 따라서 고강도재료에서는 파괴인성의 고려가 필요하다.

평활재의 항복강도는 응력으로 표현되고 균열재의 강도인 파괴인성은 응력확대계수 등과 같은 파괴역학 파라미터로 표현된다. 균열재의 파괴에 대한 구동력은 응력과 균열치수가 조합된 파라미터에 의해서 표시되어야 한다. 이 대표적인 파라미터가 응력 σ 와 균열치수의 평방근 \sqrt{a} 의 곱 $\sigma\sqrt{a}$ 에 비례하는 응력확대계수라 불리는 파괴역학적 파라미터이다.

파괴인성이 응력확대계수와 같은 파괴역학적 파라미터의 한계치로 표현된 이유는 균열재의 불안정 파괴한계는 Griffith의 이론으로 논하는 것이 가능하며, 균열이 불안정적으로 전파하기

위해서는 균열면적의 미소증분 dA 에 대해 변형률 에너지 또는 보다 일반적인 역학적 전계에서 해방된 위치에너지 $-dU_E$ 가 새로운 균열면을 형성하는데 필요로 하는 에너지 dU_S 보다 크게 되어야 한다. 이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$-\frac{dU_E}{dA} \geq \frac{dU_S}{dA} \dots\dots\dots (1)$$

γ_s 를 단위면적당의 표면에너지로 하면 식의 우변은 $2\gamma_s$ 와 같다. 또 좌변은 에너지 해방률이라 부르고 ζ 로 나타낸다. 에너지 해방률의 차원을 보아 균열진전력이라고도 부른다.

ζ 와 $2\gamma_s$ 를 사용해서 $\zeta \geq 2\gamma_s$ 로 나타낼 수 있다. 이것을 일반화한 것이 Griffith의 불안정 파괴발생조건이다. 단, 실제재료에서는 균열선단에 소성변형이 생기기 때문에 그 때의 소성표면일 γ_p 가 첨가되고 γ_s 는 $\gamma_s + \gamma_p$ 로 된다. 통상 $\gamma_s \gg \gamma_p$ 이므로 $\zeta \geq 2\gamma_p$ 로 된다는 응력확대계수 K 에 대응하므로 균열재의 불안정 파괴의 구동력으로 K 를, 또 그 저항치로 파괴인성 K_c 를 채용할 수 있는 근거가 되고 있다.

2.2 균열선단의 응력장

균열을 갖는 부재가 부하를 받는 경우를 균열의 변형모드는 Mode I, Mode II, Mode III의 3개의 독립적인 변형양식으로 분류된다. Mode I은 개구형(Opening mode)이라 부르고 실제 가장 중요한 균열의 변형양식이다. Mode II 및 Mode III은 각각 면내 전단형 및 면외 전단형(중 전단형)이라 부른다. 이와 같은 균열선단근방의 응력은 선형탄성이론에 의해 구해지는데 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_{ij} = \frac{C_1}{\sqrt{r}} f_{ij}^{(1)}(\theta) + C_2 f_{ij}^{(2)}(\theta) + C_3 \sqrt{r} f_{ij}^{(3)}(\theta) + \dots\dots\dots (2)$$

균열선단의 아주 가까운 곳의 응력을 생각하면 r 을 0에 접근시켜감에 따라서 제1항이 제2항 이하에 비해서 아주 크게 되고 제2항 이하의 상대적으로 무시할 수 있으므로 응력은 제1항만으로써 근사시킬 수 있다.

즉,

$$\sigma_{ij} = \frac{C_1}{\sqrt{r}} f_{ij}^{(1)}(\theta) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(1)}(\theta) \dots\dots\dots (3)$$

이 제1항의 계수 C_1 에 $\sqrt{2\pi}$ 를 곱한 값 $C_1 \sqrt{2\pi}$ 를 K 로 나타내고 K 를 응력확대계수 (Stress intensity factor)라 부른다.

일반적으로 무한평판의 경계면에서의 균열길이 $2a$ 가 발생한 경우 응력확대계수는 $K = \sqrt{\pi} \cdot \sigma \cdot \sqrt{a}$, 유한평판에서의 응력확대계수 $K = F \sigma \sqrt{\pi a}$ 로 나타낸다. 이 때 F 는 균열재의 절대치수에 의존하지 않고 부재형상과 하중점의 위치를 나타내는 치수비만으로 결정되는 무차원 계수이며, 상사형의 부재에서는 F 의 값은 서로 같다.

3. 응력확대계수

3.1 응력확대계수(Stress Intensity Factor)

무한평판에 균열이 존재할 때 균열선단에 대한 응력분포를 극 좌표계 (r, θ)로 나타내면 다음과 같다.

$$\sigma_{ij} = \frac{C_1}{\sqrt{r}}(\theta) + \sum_{n=1}^{\infty} C_n r^{\left(\frac{n-1}{2}\right)} f_{nij}(\theta) \dots\dots\dots (4)$$

식(4)에서 C_1, C_n 은 부재나 균열의 형상, 치수에 의해 변하고 또한, 외력에 비례하는 계수이며 $f_{1ij}(\theta), f_{nij}(\theta)$ 등은 변형양식 및 응력선분 σ_{ij} 에 의하여 결정되는 함수이다. 식(4)에서는 제1항만이 $r \rightarrow 0$ 일 때 $r^{1/2}$ 의 특이성 (singularity)을 가지며 제2항 이하는 특이성을 갖지 않는다. 따라서 균열길이 a 에 비하여 r 가 충분히 작은 범위에서는 균열선단 근방의 응력분포를 제1항만으로 근사적으로 표현할 수 있다. 식(4)에서 $r \rightarrow 0$ 일 때 $r^{-1/2}$ 의 특이성을 갖는 제1항,

즉,

$$\sigma_{ij} = \frac{C_1}{\sqrt{r}} f_{ij}(\theta) \dots\dots\dots (5)$$

$$\sigma_{ij} = \sigma \frac{\sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} f_{1ij}(\theta) = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} f_{1ij}(\theta) \dots\dots\dots (6)$$

로 표시할 수 있으며 균열선단의 응력장은 K 값에 지배를 받는다. 여기서 $K = \sigma \sqrt{\pi a}$ 가 되며 이 파라미터 K 를 응력확대계수(SIF)라 하며³⁾, 반 무한평판에서는 일반적으로 $K = F \sigma \sqrt{\pi a}$ 로 표

현된다. 이는 외부에서 가해지는 하중(공칭응력), 균열길이 및 구조물의 기하학적형상 등의 함수로 표시되며, 균열체가 균열로 인해 파괴에 이르는데 저항하는 정도를 나타내는 매개변수라 할 수 있다.

3.2 Through-thickness crack에서의 응력확대계수

균일 인장응력하에서 무한평판, 관통균열에서의 응력확대계수는 $K = \sigma \sqrt{\pi a}$ 이다.

반 무한평판에서

$$K = Q \sigma \sqrt{\pi a} \dots\dots\dots (7)$$

여기서 Q 는 접선보정계수(tangent correction factor)로

$$Q = \left(\frac{2w \tan \frac{\pi a}{2w}}{\pi a} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (8)$$

와 같이 표시되는 형상계수이다. Fig. 1은 관통균열이 있는 반 무한평판이며, Table 1에는 보정계수 Q 의 solution을 나타내었다.

Table 1. Correction factors for a finite width plate containing a through thickness crack

a/W	$F(a/W)$
0.074	1.00
0.207	1.02
0.275	1.03
0.337	1.05
0.410	1.08
0.466	1.11
0.500	1.12
0.535	1.15
0.592	1.20

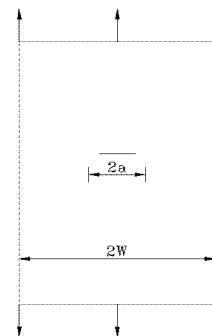


Fig. 1 Finite width plate containing a through thickness crack.

3.3 표면균열(Surface crack)에서의 응력확대계수

일정한 인장응력이 작용하고 있는 평판에 손톱모양의 표면균열에 대한 응력확대계수 K 는 다음 식으로 나타낸다¹⁾.

$$K = 1.12\sigma\sqrt{\pi a} \dots\dots\dots (9)$$

여기서 Q는 보정계수로 $Q = \frac{\sigma_0}{\sigma}$ 이고, σ_0 는 자유표면계수이다.

$$\sigma_0 = \int_0^{\pi/2} [1 - (\frac{c-\sigma}{\sigma})^2 \sin^2 \theta]^{m/2} d\theta \dots\dots\dots (10)$$

3.4 Single-edge notch에서의 응력확대계수

균일 인장응력하의 반 무한평판에서의 한쪽 에지(가장자리)노치에 대한 응력확대계수는 다음과 같다.

$$K = \sigma\sqrt{\pi a}f(\frac{a}{w}) \dots\dots\dots (11)$$

Fig. 2는 한쪽 에지노치를 가진 반 무한평판이며 Table 2에서 보정계수인 $f(a/w)$ 의 함수값을 나타내었다.

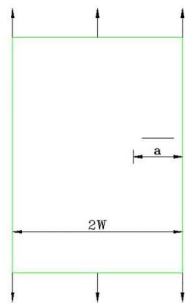


Fig. 2 Single edge notched plate of finite width.

Table 2. Correction factors for single edge notch plate

a/W	$F(a/W)$
0.10	1.15
0.20	1.20
0.30	1.29
0.40	1.37
0.50	1.51
0.60	1.68
0.70	1.89
0.80	2.14
0.90	2.46
1.00	2.86

3.5 Double-edge notch에서의 응력확대계수

균일 인장응력하의 반 무한평판에서의 양쪽 에지(가장자리)노치에 대한 응력확대계수는 다음과 같다. 여기서 상수 1.2122는 자유표면 보정계수(free-surface correction factor)이다¹⁾.

Fig. 3은 양쪽 에지노치를 가진 반 무한평판을 나타내었다.

$$K = 1.2122\sigma\sqrt{\pi a} \dots\dots\dots (12)$$

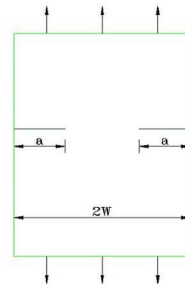


Fig. 3 Double edge notched plate of finite width.

4. 응력집중계수(Stress concentration Factor)

4.1 응력집중(Stress Concentration)

균열단면 부재가 아닌 경우 단면이 급격히 변화하는 부분에 응력분포 상태가 불규칙해진다. Fig. 4에 나타낸 것과 같이 노치가 있는 단면 위의 어떤 점(point)에서 평균응력보다 훨씬 큰 응력이 걸린다는 것을 의미하는데, 이러한 현상을 응력집중이라 하며, 여기에 교번, 반복 응력까지 걸친다면 그 부분에서부터 서서히 진행형 균열이 생긴다^{4),5)}.

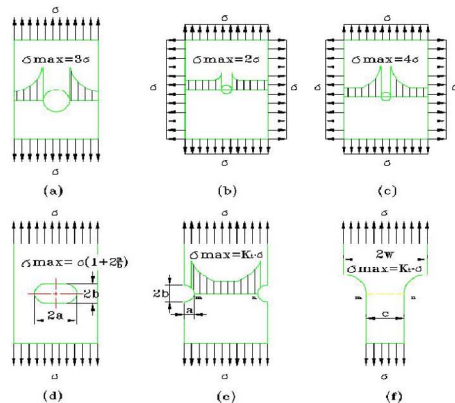


Fig. 4 Stress concentration.

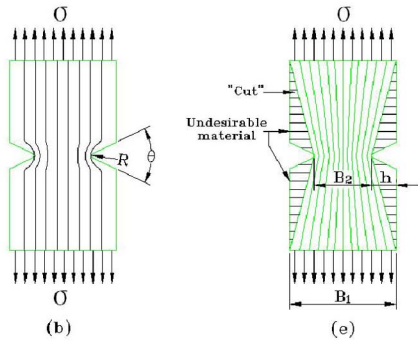


Fig. 5 Stress concentration analysis by lines of constant force.

Stream line에 의한 응력집중 해석, 응력집중 분산, 재료의 절약방법 등을 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었고, 응력집중에 의해 발생된 잔류응력은 Fig. 7에 나타내었다.

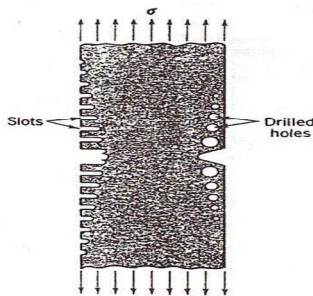


Fig. 6 Two ways of relieving stress concentration.

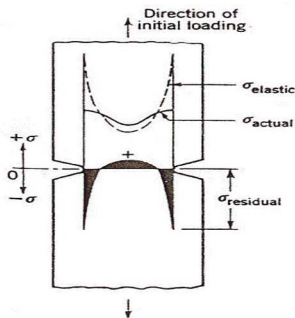


Fig. 7 Residual stresses caused by stress concentration.

4.2 응력집중계수의 정의(Definition of K_t)

응력집중계수 K_t 는 최대응력과 공칭응력의

비로서 표시되며 응력집중계수의 정의는 Fig. 8과 다음 식으로 나타내었다⁶⁾.

$$K_t = \frac{\text{ notch부분의 최대응력 } (\sigma_{max})}{\text{ 공칭응력 } (\sigma_n)} \dots\dots\dots (13)$$

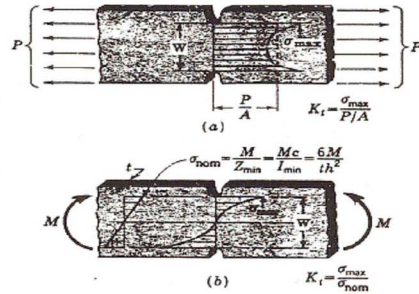


Fig. 8 Definition of stress concentration factor.

5. 노치선단 응력장 사이의 유사성

(Similarities between notch-tip stress fields)

5.1 Creager 와 Paris의 표현

Fig. 9의 극 좌표계를 사용한 노치선단에서의 종축응력분포에 대한 Creager와 Paris의 표현은^{7),8)}

$$\sigma_{y(r,\theta,\rho)} = \frac{\rho}{\sqrt{2\pi r}} \left(\frac{\rho}{2r} \right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) + \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] \dots\dots\dots (14)$$

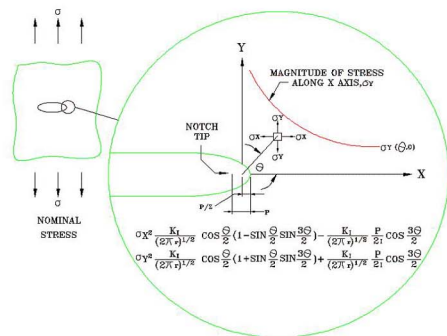


Fig. 9 Schematic illustration of the elastic stress field distribution near the tip of an elliptical notch.

여기서 ρ 는 노치선단 곡률반경이며, K_I 는 모드I의 변형모드에 대한 응력확대계수이다. 응력집중계수 K_t 와 노치선단 곡률반경 ρ 의 두

파라미터에 의해 묘사된 탄성 노치선단 응력장 사이의 유사성을 활용하여 노치선단에서의 중축응력 σ_y 의 계산을 위한 잘 알려진 표현은 원형 노치에 대한 것으로 다음과 같다.

$$\sigma_y = \sigma_n \left[1 + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{x}{\rho} \right)^{-2} + \frac{3}{2} \left(1 + \frac{x}{\rho} \right)^{-4} \right] \dots\dots\dots (15)$$

여기서 w 는 노치선단으로부터 측정된 거리이다. Usami에 의해 일반화된 타원형 노치에 대한 표현은

$$\sigma_y = \frac{K_t \sigma_n}{3} \left[\left(1 + \frac{1}{2} \frac{x}{\rho} \right)^{-2} + \left(1 + \frac{3}{2} \frac{x}{\rho} \right)^{-4} \right] \dots\dots\dots (16)$$

표준상태에서 식(15)과 식(16)은 $\sigma_{max} = K_t \sigma_n$ 에 의해 일치한다는 것은 명백하다.

또한, Creager와 Paris 연구에 근거한 노치선단에서의 중축응력성분 σ_y 는

$$\sigma_y = \frac{K_t \sigma_n}{2} \left[\left(1 + 2 \frac{x}{\rho} \right)^{-1/2} + \left(1 + 2 \frac{x}{\rho} \right)^{-3/2} \right] \dots\dots\dots (17)$$

식(18)은 K_t 와 무관하게 $x/\rho < 0.2$ 에서 충분한 근사값을 제공하나, 보다 큰 거리 $x/\rho > 0.2$ 일 때 상당보정계수 f 는 다음과 같이 수정되어야 한다²⁾.

$$f = 1 + \frac{\tan\left(\frac{\pi}{2K_t}\right)}{2.8} \left(\frac{x}{\rho} - 0.2 \right) \dots\dots\dots (18)$$

$x/\rho = 0.2$ 일 때, $f = 1$ (일반적으로 $x/\rho \leq 0.2$ 일 때 $f = 1$)

$$x/\rho > 0.2 \text{ 일 때, } f = 1 + \frac{\tan\left(\frac{\pi}{2K_t}\right)}{2.8} \left(\frac{x}{\rho} - 0.2 \right)$$

Table 3은 $x/\rho > 0.2$ 일 때 상당보정계수 f 의 해(solution)이다.

Appendix.1은 보정계수 f 의 계산을 위한 프로그람이다.

식(17)과 식(18)을 활용한 표준화된 응력분포는

$$\frac{\sigma_y}{K_t \sigma_n} = \frac{1}{2} f \left[\left(1 + 2 \frac{x}{\rho} \right)^{-1/2} + \left(1 + 2 \frac{x}{\rho} \right)^{-3/2} \right] \dots\dots\dots (19)$$

제안된 식(19)는 노치로부터 진전하는 미소균열에 대한 탄성응력확대계수를 평가하는데 활용될 수 있다.

5.2 Lukas & Klesnil의 표현

Newman의 수치적 결과에 유래되고 Lukas와 Klesnil에 의해 제안된 해석 식은 다음과 같다⁹⁾.

$$\sigma_y = K_t \sigma_n \left[1 + \left(4.5 \frac{x}{\rho} \right)^{-1/2} \right] \dots\dots\dots (20)$$

$$\frac{\sigma_y}{K_t \sigma_n} = \left[1 + \left(4.5 \frac{x}{\rho} \right)^{-1/2} \right] \dots\dots\dots (21)$$

5.3 Weiss의 표현

Neuber's의 응력장 해(solution)에 기초한 Weiss의 표현에 의한 노치선단 부근에서의 중축응력 성분은 다음과 같다.

Table 3. Values of correction factor for $x/\rho \geq 0.2$

x	0.03	0.06	0.09	0.12	0.15	0.3	0.45	0.6	0.75	0.9	1.05	1.2
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
$f = 1 + \frac{\tan(\pi/2K_t)}{2.8} \left(\frac{x}{\rho} - 0.2 \right)$	1	1	1.004	1.008	1.01	1.03	1.05	1.07	1.10	1.12	1.14	1.16

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

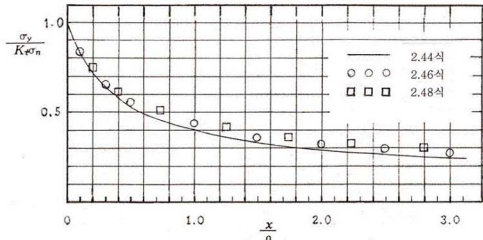
x	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
x/ρ	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
$f = 1 + \frac{\tan(\pi/2K_t)}{2.8} \left(\frac{x}{\rho} - 0.2 \right)$	1	1	1.007	1.014	1.02	1.06	1.09	1.13	1.17	1.20	1.24	1.27

(b) Bluntest notch ($a = 9, b = 3, \rho = 1.0, K_t = 7.9$)

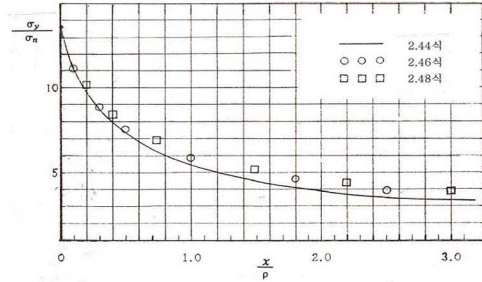
$$\sigma_y = \sigma_{\max} \left(\frac{\rho}{\rho + 4x} \right)^{-1/2} \dots\dots\dots (22)$$

$$\frac{\sigma_y}{K_t \sigma_n} = \left(\frac{\rho}{\rho + 4x} \right)^{-1/2} \dots\dots\dots (23)$$

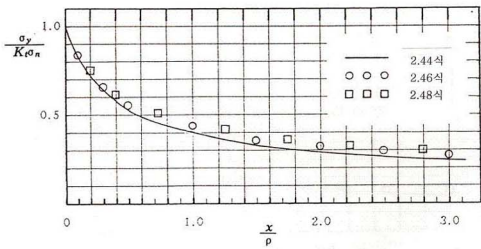
Table 4는 식(19), 식(21), 식(23)의 무차원 형태의 응력분포 해를, Fig. 10와 Fig. 11은 무차원 원량의 응력분포를 나타내었다.



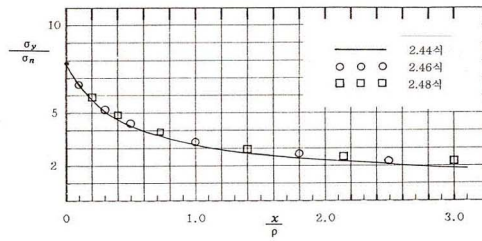
(a) DEN (a=9, b=1.64)



(a) DEN (a=9, b=1.64)



(b) DEN (a=9, b=3.0)



(b) DEN (a=9, b=3.0)

Fig. 10 Dimensionless stress distributions.

Fig. 11 Dimensionless stress distributions.

Table 4. Dimensionless solutions of stress distribution

a = 9 b = 1.64 rho = 0.3 K _t = 13.6	x	0.03	0.06	0.09	0.12	0.15	0.3	0.45	0.60	0.75	0.90	1.05	1.30
	x/rho	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	1.004	1.008	1.01	1.03	1.05	1.07	1.10	1.12	1.14	1.16
	(19) 식	0.84	0.72	0.64	0.58	0.54	0.40	0.33	0.29	0.26	0.24	0.23	0.21
(21) 식	0.83	0.73	0.65	0.60	0.55	0.43	0.36	0.32	0.29	0.26	0.24	0.23	
(23) 식	0.85	0.75	0.67	0.62	0.58	0.45	0.38	0.33	0.30	0.28	0.26	0.24	

(a) DEN (a=9, b=1.64)

a = 9 b = 3 rho = 1.0 K _t = 7.9	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/rho	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	1.007	1.014	1.02	1.06	1.09	1.13	1.17	1.20	1.24	1.27
	(19) 식	0.84	0.72	0.65	0.59	0.54	0.41	0.34	0.30	0.28	0.26	0.25	0.24
(21) 식	0.83	0.73	0.65	0.60	0.55	0.43	0.36	0.32	0.29	0.26	0.24	0.23	
(23) 식	0.85	0.75	0.67	0.62	0.58	0.45	0.38	0.33	0.30	0.28	0.26	0.24	

(b) DEN (a=9, b=3.0)

6. 결 론

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 에지노치에서 가장 크므로 한쪽 에지노치가 가장 위험한 것임을 의미한다.
3. 양쪽 에지노치에서의 미소균열에 대한 응력 확대계수 K 는 응력집중계수 K_t 와 노치곡률 반경 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.
5. sharp 에지노치의 미소균열에서는 Creager, Paris 표현에 의한 응력확대계수 계산 근사식이 오차가 가장 작다.

후 기

2006년도 금오공대 학술연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) Stanley, T. Rolfe and John, M. Barson, "Fracture and Fatigue Control in Structure" Applications of Fracture Mechanics, pp.34-40(1977)
- 2) 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)
- 3) 김상철, "破壞力學", 대우학술총서 자연과학, No. 22, 민음사, pp.13-30, 124-125(1985)
- 4) 劉憲一, 李根明, "材料力學", 成文社, pp.71-74(1979)
- 5) A.C. Ugural and S.K. Fenster, "Advanced Strength and Applied Elasticity", Elsevier New York. Oxford, pp.75-78(1981)
- 6) F.R. Shanley, "Mechanics of Materials", McGraw-Hill Book co. New York, pp.326-335(1957)
- 7) S.A. Meguid, "Engineering Fracture Mechanics", Elsevier Applied Science LTD, pp.43-45, 130-159(1989)
- 8) C. S. Shin, "A Discussion on Various Estimations of Elastic Stress Distributions and Stress Concentration Factors for Sharp edge Notches", Int. J. Fatigue 8. No 4 pp.234-237(1986)
- 9) P. Lukas, "Stress Intensity Factor for Small Notch Emanating Cracks", Eng. Fract. Mech 26, pp.471-473(1987)

(2006년 10월 26일 접수, 2007년 2월 23일 채택)