

## 영역피해모델에 의한 균열 및 노치의 피로강도평가

김원범<sup>†\*</sup>, 백점기<sup>\*\*</sup>, 藤本由紀夫<sup>\*\*\*</sup>

부산대학교 생산기술연구소\*  
부산대학교 공과대학 조선해양공학과\*\*  
히로시마대학 선박해양공학과\*\*\*

### Inherent Damage Zone Model for Fatigue Strength Evaluation of Cracks and Notches

Won Beom Kim<sup>†\*</sup>, Jeom Kee Paik<sup>\*\*</sup> and Yukio Fujimoto<sup>\*\*\*</sup>

Research Institute of Industrial Technology, Pusan National University\*  
Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University\*\*  
Dept. of Engineering Systems, Hiroshima University\*\*\*

#### Abstract

Inherent damage zone model is presented to explain the fatigue properties near the fatigue limit and the crack growth threshold consistently. Inherent damage zone model assumes that the stress at a point which is located at a small distance,  $r_0$ , an inherent length of the material that represents the size of effective damage zone, from the crack initiation position governs the fatigue characteristics regardless of the geometric configuration of the specimen; smooth specimen, notched specimen or cracked specimens with short and long crack length. A special feature of the paper is using the exact stress distributions of notched and cracked specimens at the strength evaluations. Analytical elastic solutions by Neuber and Westergaard are employed for this purpose. Relationship between fatigue limit of smooth specimen and threshold stress of cracked specimen, occurrence condition of non-propagating crack at the root of elliptic notch and circular hole and relationship between stress concentration factor and fatigue notch factor are discussed quantitatively based on the proposed model.

※Keywords : Inherent damage zone model(영역피해모델), Fracture mechanics(파괴역학), Fatigue(피로), Small crack(미소균열), Non-propagating crack(정류균열), Notch(노치)

1. 서 언

본 연구에서는 평활재, 노치재, 균열재(미소균열 및 장균열)에 관계없이 이들의 피로한 또는 피로균열전하한계 부근의 강도를 통일적으로 설명할 수 있는 영역피해모델(Kim 1998, Fujimoto et al. 1998, Fujimoto et al. 1999, Fujimoto 2001)을 제안한다.

본 모델을 통하여, 피로균열은 주로 표면에서 발생하지만, 피로균열을 일으키는 피로손상은 표면의 최대응력에 의하여 지배되는 것이 아니라 어떤 특정영역 거리만큼의 내부의 응력에 의하여 결정된다고 하는 개념을 설명한다.

종래의 연구에서 노치저 근방의 응력구배나 균열발생정 근방의 어떤 영역의 피해가 피로손상에 관여한다는 것은 이미 지적되어 있다

예를 들면 Neuber(1937)는 노치저에 있어서 결정립 치수와 관련이 있는 재료고유의 피해영역(material block size) 개념을 제안하고 피로강도감소계수를 설명하고 있다. 또한 Ishibashi(1967)는 노치재의 노치저로부터  $\epsilon_0$  거리만큼 내부의 점의 응력이 평활재의 피로한과 동등하게 될 때 노치재의 피로한의 상태가 된다고 하여 노치재의 피로강도감소계수를 정성적으로 설명하였다.

그리고 균열에 대해서는 응력확대계수를 이용한 검토가 많이 이루어져 왔다(김제동 등 1996, 김창욱 등 2001a, 김창욱 등 2001b, 김창욱 등 2002a, 김창욱 등 2002b, 노인식과 임채환 1998, 전유철 등 2001).

한편 금속표면이나 부식피트등에서 발생하는 미소균열에 대해서는 선형파괴역학(LIFM)의 응력확대계수에 의한 정리가 곤란한 점이 지적되어져 있다(Lindley et al.1982, Tanaka 1984).

이 때문에 미소균열선단에 유효노치반경을 상정한 모델(Huang and Stein 1996), 균열선단부에 가상의 잠재균열을 상정하는 모델(Haddad et al. 1979, Tanaka 1984, Morita et al. 1991)과 부식피로균열발생수명에 대한 새로운 추정모델(김원범 1997)등이 제안되어져 있다.

본 연구에서 제안하는 모델은 Ishibashi(1967)의 개념과 기본적으로는 동일하나 Ishibashi 의 모델에서는  $\epsilon_0$  을 구하는 방법이 명확하지 않을 뿐만 아니라 또한 노치재에 한정하고 있다.

본 모델의 특징은 다음에 소개하는 본 모델의 정의에 따라 피로피해에 유효한 거리  $r_0$  를 파괴역학을 이용하여 정량적으로 도입하는 것이고, 본 연구에서 노치재의 해석에 있어서는 Neuber (1937)가 구한 타원 노치에 대한 해석해를, 균열의 해석에 있어서는 Westergaard (Okamura 1976)의 응력함수에 기초한 엄밀해를 이용하는 점에 있다. 2 장에서는 영역피해모델을 설명하고, 3 장에서는 이 모델을 이용하면

- (1) 평활재의 피로한과 균열재의 피로균열전하한계의 관계
- (2) 노치재의 정류균열현상
- (3) 노치재의 피로강도감소계수의 정량적인 설명이 가능한 점을 실험사실과 비교하여 나타낸다.

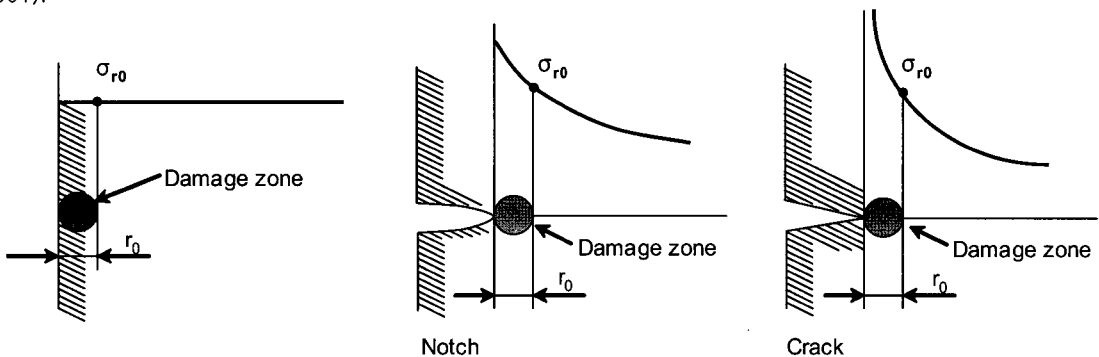


Fig. 1 Effective stress  $\sigma_r$  at the edge of inherent damage zones

2. 제안하는 모델

2.1 영역피해모델

본 연구에서 제안하는 영역피해모델은 균열발생 위치 (혹은 전파개시위치)로부터 어떤 특정거리만큼 내부로 들어간 점의 응력에 의하여 피로하한계 부근의 특성이 결정된다고 하는 개념이다. 모델의 요약은 다음과 같다.(Fig. 1 참조).

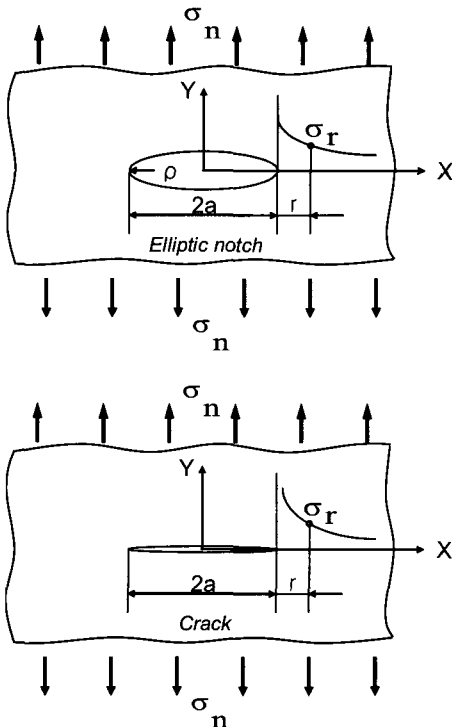
- (1) 노치저로부터 어떤 거리  $r_0$  내부로 들어간 점의 응력  $\sigma_{r,0}$  가 평활재의 피로한과 동등하게 될 때 노치재의 피로한의 상태로 된다.
- (2) 마찬가지로 균열재에서도 균열선단으로부터 거리  $r_0$  내부로 들어간 점의 응력  $\sigma_{r,0}$  가 평활재의 피로한과 동등하게 될 때 균열전파의 하한계 상태로 된다.
- (3) 피로피해에 유효한 거리  $r_0$  는 재료고유의 길이이다.

본 모델에서는 손상영역의 외면에서의 응력  $\sigma_{r,0}$  를 영역내부에서 손상이 활성화하기 위한 일종의 구동응력으로 정의한다. 따라서 손상영역내의 응력의 평균치(또는 적분치)가 피로피해에 유효하다고 하는 모델과는 차이가 있다. 손상영역의 치수  $r_0$  는 결정립 치수와 관계 있는 양이라고 생각되나 이것에 관한 메카니즘에 관해서 본 연구에서는 취급하지 않는다.

본 연구에서는 탄성론에 의한 해석해를 사용하므로 대상을 피로한이나 균열전파하한계 부근에 한정해서 검토한다.

2.2 노치 및 균열선단근방의 응력분포

Fig. 2 의 타원공을 가진 무한판에 무한원방에서 균일인장응력  $\sigma_n$  이 작용하는 경우 타원 장축 방향상의  $y$  축방향의 응력분포  $\sigma_r$  은 다음식으로 주어진다(Neuber 1937)



$$\frac{\sigma_r}{\sigma_n} = 1 + [\cosh u_0 / (2 \sinh^2 u)] \times [e^{u_0} \cdot (e^{2u_0} - 3)(1 + 0.5 \cdot \coth u) \cdot e^{-2u} + \cosh u_0 \cdot \coth u]$$

$$\coth u_0 = \sqrt{a/\rho}$$

$$u = \cosh^{-1}[(1+r/a) \cdot \cosh u_0] \tag{1}$$

여기서  $a$  는 타원의 장축의 길이의 1/2 을 나타내고,  $\rho$  는 타원선단의 곡률반경,  $r$  은 타원선단으로부터의 거리이다.

타원의 형상이 날카롭게 됨에 따라 선단근방의 응력분포는  $\rho \ll a, 0 \ll r \ll a$  의 범위에서 다음의 식으로 근사가 가능하다(Okamura 1976).

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_n} = \sqrt{\frac{a}{2r+\rho}} \left(1 + \frac{\rho}{2r+\rho}\right) + \left(\frac{\rho}{2r+\rho}\right) \tag{2}$$

Fig. 2 Stress distribution near elliptic notch and crack

한편 길이  $2a$ 의 관통균열을 가지는 무한판에, 무한원방에서 균일인장응력  $\sigma_n$ 이 작용할 경우의 균열연장선상의  $y$  축 방향의  $\sigma_r$ 은 다음 식으로 주어진다.

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_n} = \frac{a+r}{\sqrt{r(2a+r)}} \quad (3)$$

$r \ll a$ 의 조건하에서 위의 식을 급수 전개해서 제 1 항을 취하면 다음식이 얻어진다.

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_n} = \sqrt{\frac{a}{2r}} \quad (4)$$

(4)식의 근사도가 좋은 것은  $r \ll a$ 의 경우에 한정된다. 본 연구에서 특별히 언급하지 않는 한 노치에 대해서는 (1)식을, 균열에 대해서는 (3)식의 엄밀해를 사용한다.

### 2.3 피로피해에 유효한 거리 $r_0$

2.1 절의 가설에 따라 고유피해영역의 치수  $r_0$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다. (4)식의 근사가 가능한 긴 균열재에 대해서 균열선단으로부터  $r$ 의 위치의 응력범위(진폭의 2 배)  $\Delta\sigma_r$ 과 응력확대계수 범위  $\Delta K$ 의 관계는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta K = \Delta\sigma_n \sqrt{\pi a}$$

위의 식에 (4)식에 대입하면

$$\Delta K = \Delta\sigma_r \sqrt{2\pi r} \quad (5)$$

2.1 절의 가정으로부터  $\Delta\sigma_{r_0}$ 가 평활재의 피로 한응력  $\Delta\sigma_{w0}$ 와 동등하게 될 때  $\Delta K$ 는 균열전파 하한계  $\Delta K_{th}$ 와 일치하게 된다고 할 수 있으므로

$$\Delta K_{th} = \Delta\sigma_{w0} \sqrt{2\pi r_0} \quad (6)$$

이것을 풀면 유효거리  $r_0$ 가 다음과 같이 얻어진다.

$$r_0 = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{\Delta K_{th}}{\Delta\sigma_{w0}} \right)^2 \quad (7)$$

즉, (7)식의  $r_0$ 는 영역피해모델의 개념에 따라 얻어지는 피로피해에 유효한 거리이다.

## 3. 영역피해모델에 의한 피로강도추정

### 3.1 평활재의 피로한과 균열재의 전파하한계응력과의 관계

Fig. 2의 균열재에 있어서 균열선단으로부터  $r_0$ 의 위치의 응력  $\Delta\sigma_{r_0}$ 와 공칭응력  $\Delta\sigma_n$ 의 관계는 (3)식으로부터 다음식과 같이 된다.

$$\Delta\sigma_{r_0} = \frac{a+r_0}{\sqrt{r_0(2a+r_0)}} \Delta\sigma_n \quad (8)$$

2.1 절의 가정으로부터 균열전파하한계에서의  $\Delta\sigma_{r_0}$ 는 평활재의 피로한  $\Delta\sigma_{w0}$ 와 동등하다. 이때의  $\Delta\sigma_n$ 이 균열전파하한계응력  $\Delta\sigma_{th}$ 이다. 따라서 (8)식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{\Delta\sigma_{th}}{\Delta\sigma_{w0}} = \frac{\sqrt{r_0(2a+r_0)}}{a+r_0} \quad (9)$$

(9)식은 균열길이에 관계없이 성립하지만 특히 균열길이가 충분히 긴 경우에는 다음 식으로 근사가 가능하다.

$$\frac{\Delta\sigma_{th}}{\Delta\sigma_{w0}} = \frac{\sqrt{2r_0}}{\sqrt{a}} \quad (10)$$

Fig. 3은 종축을  $\Delta\sigma_{th}/\Delta\sigma_{w0}$ 로 두고, 횡축을 무차원화한 균열길이  $a/2r_0$ 로 두어 (9), (10)의 관계를 나타낸 그림이다.

그림에서  $a$ 가 zero에 접근하면  $\Delta\sigma_{th}/\Delta\sigma_{w0}$ 는 1.0에 접근하고 있다. 즉 균열길이가 zero인 극한에서는  $\Delta\sigma_{th}$ 는 평활재의 피로한  $\Delta\sigma_{w0}$ 와 일치한다. 또 균열이 길어질수록 (9)식과 (10)식은 일치하여 간다.

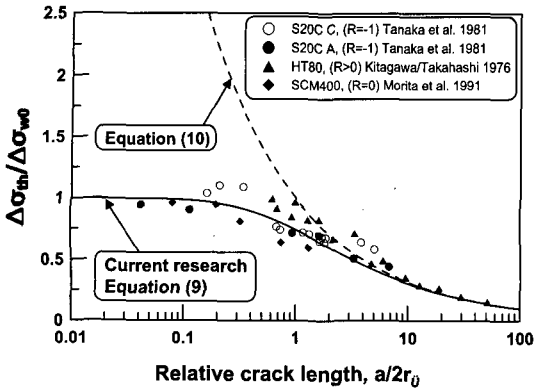


Fig. 3 Relative strength of fatigue limit  $\Delta\sigma_{th}/\Delta\sigma_{w0}$   
 $\Delta\sigma_{w0}$ : Fatigue limit of smooth specimen  
 $\Delta\sigma_{th}$ : Nominal stress for crack growth threshold

그림중의 실험점은 Tanaka et al.(1981), Kitagawa and Takahashi(1976), Morita et al.(1991)가 실시한 피로시험으로부터  $\Delta\sigma_{th}/\Delta\sigma_{w0}$ 를 구하여  $a/2r_0$ 와의 관계를 나타낸 것이고 (9)식은 실험 데이터와 잘 일치하고 있다. 여기서  $r_0$ 는 (7)식에 의하여 구하여지며, 그림중의 (9)식과 (10)식의 곡선의 차이는 장균열에 한해서 적용 가능한 (10)식을 적용범위를 넘어서 짧은 균열에 사용한 때문이다. 엄밀해인 (9)식을 사용하면 실험치와의 모순은 일어나지 않는다.

### 3.3 정류균열의 메카니즘

노치저의 반경  $\rho$ 가 작고 어떤값 이상의 응력집중률을 가지는 노치재에서는 피로한 근방에서 정류균열이 발생하는 것이 알려져 있다. 정류균열에 대해서는 각종의 실험적 검토가 이루어져 왔으나 (Society of Materials Science 1978) 그 메카니즘이 완전히 해명되어 있지는 않다.

본 연구에서는 제안하는 영역피해모델을 사용하여 정류균열이 어떻게 일어나는지 그 역학적 설명을 시도한다.

Fig. 4는 원방에서 인장응력  $\sigma_n$ 을 받는 타원노치와 동일길이의 균열의 선단근방의 응력분포를 모식적으로 나타낸 그림이다. 그림에서 균열선단의 응력이 노치저의 응력보다 큰 것은 당연하다. 그러나 선단으로부터  $r$ 거리 떨어진 위치의 응력

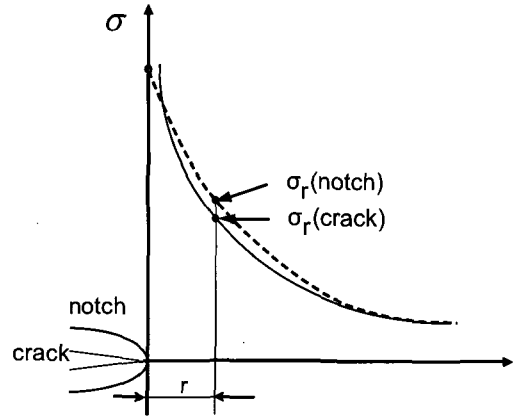


Fig. 4 Stress distribution near sharp notch root and crack tip under the same nominal stress

$\sigma_r$ 는 역으로 노치쪽이 크다. 노치저의 극히 근방에서의 응력의 역전은 노치저 반경  $\rho$ 가 작은 경우에 한해서 일어나는 현상이다.

Fig. 5는 반경  $a$ 가 0.5, 1 및 5mm의 타원노치에 있어서  $\rho$ 를 여러가지로 변화시켜서 노치저로부터  $r_0=0.06mm$ 의 위치에서의  $\sigma_{r0}$ 를 공칭응력  $\sigma_n$ 으로 무차원화하여 표시한 그림이다. 횡축의  $\rho=0$ 의 극한이 균열에 해당한다(그림중 crack으로 표시).

그림으로부터  $a=0.5mm$ 의 경우를 보면 균열에서는  $\sigma_{r0}/\sigma_n=2.23$  부근에 있지만 노치에서는  $\rho$ 가 0.1mm 내지 0.2mm 사이에서  $\sigma_{r0}/\sigma_n=2.55$  이고 균열의 경우보다도 상당히 크다. 이 경향은 어떠한  $a$ 에서도 볼 수 있다. 이것은 동일 길이의 「균열」과 「예리한 노치」의 피로한을 비교하는 경우, 「예리한 노치」의 피로한이 「균열」의 피로한(균열진전 한계응력)보다도 낮은 것을 의미한다. Yokobori et al.(1964)는 매우 예리한 V 노치( $\rho=0.051mm$ )와 피로균열의 피로한을 비교하고, 노치쪽이 균열보다도 피로한이 낮은 역전현상의 실험 예를 기술하고 있다.

이와 같이 노치의  $\sigma_{r0}$ 가 균열의  $\sigma_{r0}$ 보다 클 때, 노치저에서 일단 발생한 균열이 이후  $\sigma_{r0}$ 가 저하하는 것에 따라 정류할 가능성이 생긴다.

이러한 노치의 존재는 본 모델에 의하여 Fig. 6과 같이 추정 가능하다. 즉 Fig. 6에서 균열이나 노치로부터  $r_0$  위치에서의 응력을 비교하여 보면

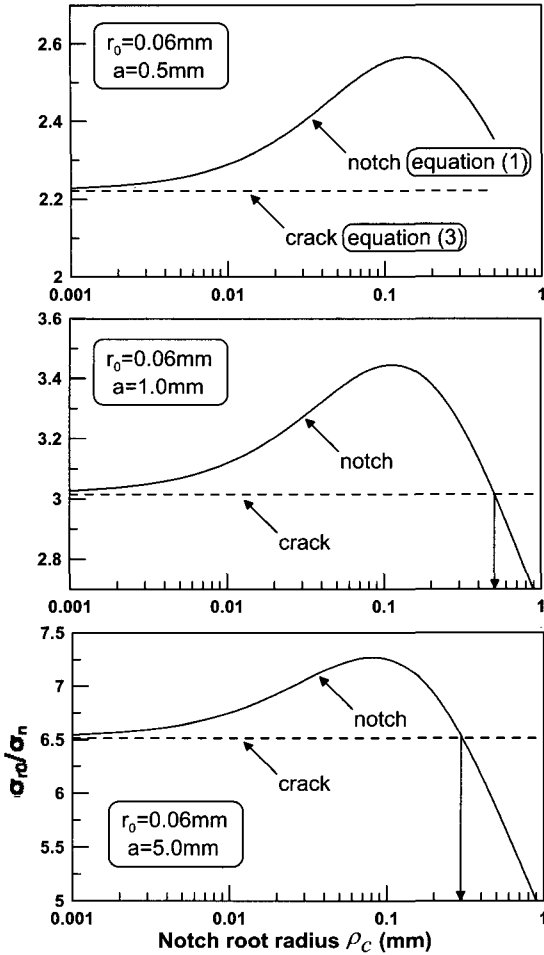


Fig. 5 Effective stress  $\sigma_{r_0}$  of notches with different root radius

보다 높은 응력을 가지는 예리한 노치의 존재를 파악할 수 있다.  $r_0$ 가 0.06mm 인 경우를 예로들면 노치저 반경이 0.3mm 인 경우 이 노치의  $\sigma_{r_0}/\sigma_n$ 는 균열의  $\sigma_{r_0}/\sigma_n$ 보다 큰 값을 가지게 되어 균열보다 낮은 피로한을 가지는 노치가 된다. 또, 노치저 반경이 0.5mm 인 경우는 노치의 길이에 따라 균열보다 높은  $\sigma_{r_0}$ 를 가질지 낮은  $\sigma_{r_0}$ 를 가질지 결정된다.

Fig. 5에서  $a=1.0\text{mm}$ 의 경우에는  $\rho \leq 0.5\text{mm}$ 에서 정류균열의 가능성이 있고 그 이상의  $\rho$ 에서는 응력의 역전은 생기지 않는다.  $a=5.0\text{mm}$ 의

경우에는  $\rho \leq 0.3\text{mm}$ 에서 균열정류의 가능성이 있다. 이렇게 정류균열이 생기는 가능성이 있는 한계의 노치저 반경을 여기서  $\rho_c$ 라고 둔다.

Fig. 7은 횡축을  $\rho_c$ , 종축을 타원반경  $a$ 로 두고 정류균열이 생기는 가능성이 있는 영역을 나타낸 그림이다. 이 영역은 종래의 실험데이터와 잘 일치한다. 예를 들면 Nishitani (1983)는 정류균열은  $\rho \leq 0.5\text{mm}$ 에서 생기는 경우가 많고,  $\rho$ 가 작을수록 생기기 쉽다고 하였다. 문헌에서  $a$ 가 수 mm 이상의 긴 노치재의 정류균열 데이터는 찾아볼 수 없었으나 과거의 저자의 경험으로부터 판단하면

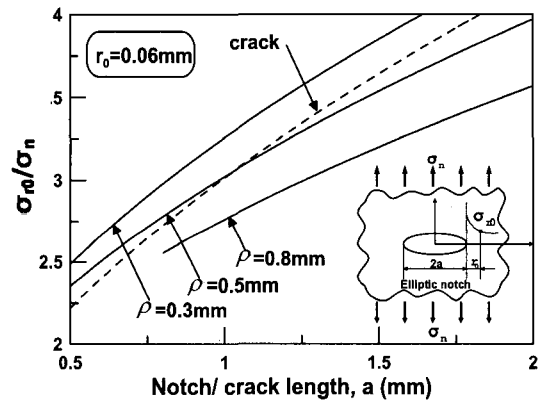


Fig. 6 Comparison of  $\sigma_{r_0}/\sigma_n$  between elliptical notches with different root radius and crack according to the length

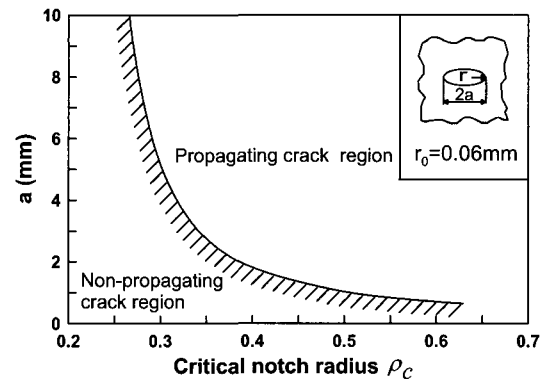


Fig. 7 Occurrence condition of non-propagating crack calculated for elliptic notches

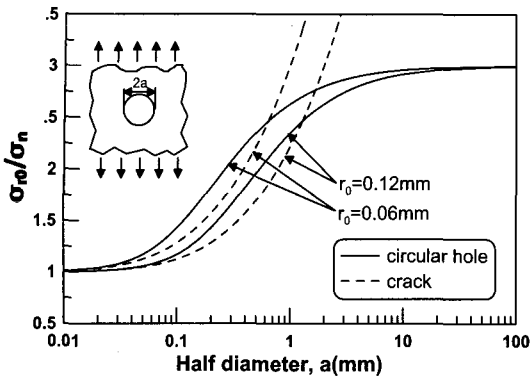


Fig. 8 Comparison of  $\sigma_{r_0}/\sigma_n$  between circular hole and crack with different  $r_0$  according to the diameter

긴 노치재에서도  $\rho$ 가 작으면 정류균열이 생길 수 있다고 사료된다. 문헌(Society of Materials Science 1978)에서도 응력집중이 클수록 정류균열은 생기기 쉽다고 서술되어있다. 이상으로부터 정류균열은 노치저 근방과 균열선단 근방에서의  $\sigma_{r_0}$ 의 역전 현상에 의하여 생긴다고 할 수 있다. Fig. 6에서는 타원과 균열의  $\sigma_{r_0}/\sigma_{w0}$ 의 비교를 하였고 Fig. 8은 원과 균열과의  $\sigma_{r_0}/\sigma_{w0}$ 의 관계를 비교한 그림이다. Fig. 8로부터 원에 대한 정류균열의 발생 가능 영역을 확인할 수 있다.

3.4 노치재의 피로강도감소계수  $K_f$

피로강도감소계수  $K_f$ 는 다음 식으로 정의되어져 있다.

$$K_f = \Delta\sigma_{w0} / \Delta\sigma_{n0} \quad (12)$$

여기서  $\Delta\sigma_{w0}$ 는 평활재의 피로한,  $\Delta\sigma_{n0}$ 는 노치재의 피로한이다. 피로강도감소계수에 대해서는 종래의 연구결과로부터 다음과 같은 것이 알려져 있다.

- (1) 응력집중계수가 2 정도로 작은 경우에는  $K_f$ 는 응력집중계수  $K_t$ 와 거의 일치하지만  $K_t$ 가 커짐에 따라서  $K_f < K_t$ 로 된다.
- (2)  $K_t$ 가 같고 노치저 반경  $\rho$ 가 다른 경우에는  $\rho$ 가 작은쪽이  $K_f$ 가 작다.

타원 노치에 대해서 고찰하여 보면 (1)식으로 부터  $K_f$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_f = \frac{\Delta\sigma_{w0}}{\Delta\sigma_{n0}} = 1 + [\cosh u_0 / (2 \sinh^2 u)] \times [e^{u_0} \cdot (e^{2u_0} - 3)(1 + 0.5 \cdot \coth u) \cdot e^{-2u} + \cosh u_0 \cdot \coth u] \quad (13)$$

한편 타원 노치의 응력집중계수  $K_t$ 는 (1)식에서  $r \rightarrow 0$ 로 하여 계산 가능하다.

Fig. 9는 균열의 반의 길이  $a$ 가 각각 1, 2, 4, 6mm 및 12mm 일 때  $\rho$ 를 여러가지로 변화시킨 타원 노치에 대해서  $K_t$ 와  $K_f$ 를 계산한 것이다. 그림 (a)는 유효거리를  $r_0 = 0.06mm$ , 그림(b)는

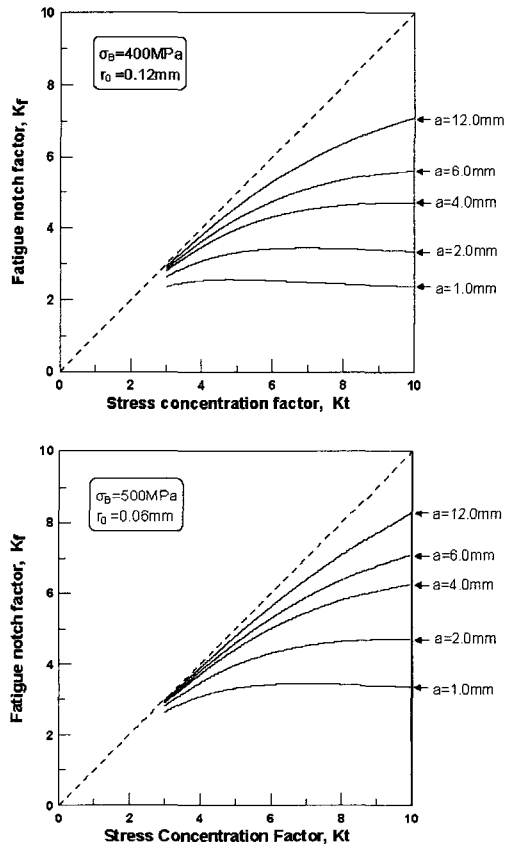


Fig. 9 Fatigue notch factor of elliptic notches

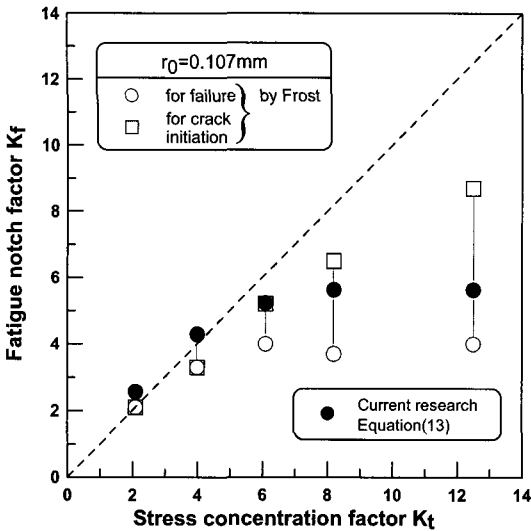


Fig. 10 Comparison of fatigue notch factor between present research and Frost's experiment

$r_0 = 0.12\text{mm}$  로 계산하였다. 전자의  $r_0$  는  $\sigma_B = 520\text{MPa}$  의 HT50 급에 해당하고 후자는  $\sigma_B = 400\text{MPa}$  로 SS400 급에 해당한다. 그림으로부터  $K_t$  가 커질수록  $K_f < K_t$  로 된다. 또  $K_t$  가 상사한 노치의 경우에는 치수가 작은 노치쪽이  $K_f$  가 작다. 이것은 종래의 실험결과와 일치한다. 또 그림 (a)와 (b)를 비교하면 동일한  $K_t$  의 경우에는 낮은 강도를 지닌 재료 쪽이  $K_f$  가 작은 것을 알 수 있다.

Fig. 10 은 Frost(1959)가 연강의 양쪽 V 노치 평판을 이용한 피로시험을 통하여 얻은  $K_f$  와  $K_t$  의 관계를 나타낸 것이다. 이 실험에서는 노치깊이는 일정하게 하고 노치저 반경을 여러 가지로 변화시키고 있다.  $K_f$  는 균열발생과 파단수명에 대해서 나타내고 있다. 그림중의 검은 기호는 저자의 방법으로 추정된  $K_f$  와  $K_t$  의 관계이고 균열발생과 파단수명의 실험 점의 중간에 위치하고 있다.

4. 결 언

본 연구에서 제안하는 영역피해모델은 피로균열 발생위치로부터 어떤 거리  $r_0$  떨어진 위치의 응력

$\sigma_{r_0}$  가 피로피해를 활성화 시키는 구동응력으로 작용하며, 이 응력에 의하여 피로하한계범위나 피로한 부근의 특성이 결정된다고 하는 개념으로

- (1) 평활재의 피로한과 균열재의 피로균열전파 하한계의 관계
- (2) 노치재의 정류균열현상
- (3) 노치재의 피로강도감소계수를 실험사실과 대비하여 정량적으로 설명하였고 본 연구의 결과로부터 본 모델의 개념의 타당함을 나타내었다.

본 모델은 Ishibashi(1967)가 제안한 모델과 그 본질에 있어서는 같다고 할 수 있으나 Ishibashi의 모델에서는 노치저로 부터의 위치를 나타내는  $\epsilon_0$  를 구하는 방법이 명확하지 않고 또한 노치 계수 문제에 국한하고 있다.

본 연구에서는 제안하는 모델은 평활재의 피로한과 장균열의 피로균열진전하한계치로부터  $r_0$  를 구하고 엄밀해에 주목하여 평가대상에 있어 평활재나 노치재 그리고 미소균열이나 장균열에 관계없이 피로한이나 피로하한계강도를 통일적으로 설명가능함을 나타내었다.

후 기

본 연구는 과학기술부지원 국가지정연구실 부산대학교 선채해양구조역학연구실에서 수행되었음

참 고 문 헌

- 김원범, 1997, “ 강재의 해수환경중에서의 피로 강도평가에 관한 연구, ” 히로시마대학 박사학위 논문 (일본어)
- 김제동, 이종원, 홍창호, 1996, “ 복수표면균열을 갖는 구조요소의 피로수명예측, ” 대한조선학회 논문집, 제 33 권, 제 4 호, pp. 75-86.
- 김창욱, 노인식, 반현호, 신병천, 2001a, “ 균열 계폐구 거동을 고려한 피로균열전파해석모델의 개발: 균열계폐구거동의 모형화, ” 대한조선학회 논문집, 제 38 권, 제 3 호, pp. 74-83.
- 김창욱, 노인식, 도관수, 신병천, 2001b, “ 균열 계폐구 거동을 고려한 피로균열전파해석모델의 개발: 수치계산, ” 대한조선학회 논문집, 제 38 권, 제 3 호, pp. 84-92.



- 김창욱, 노인식, 김대수, 2002a, “ 균열전파해석에 의한 선체의 피로수명평가법- 응력강도계수의 간이추정법-,” 대한조선학회 논문집, 제 39 권, 제 1 호, pp. 90-99.
- 김창욱, 노인식, 도관수, 2002b, “ 등가분포응력을 이용한 피로균열전파해석에 관한 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 39 권, 제 2 호, pp. 61-68.
- 노인식, 임채환, 1998, “ 경계요소-유한요소 혼합법에 의한 균열선단의 응력강도계수 계산 (제 1 보),” 대한조선학회 논문집, 제 35 권, 제 4 호, pp. 38-45.
- 전유철, 김유일, 강중규, 한종만, 2001, “ 피로실험 및 균열진전해석을 통한 용접부의 피로수명 예측에 관한 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 38 권, 제 3 호, pp. 61-68.
- Frost, N.E., 1959, “ A Relation Between the Critical Alternating Propagation Stress and Crack Length for Mild Steel,” Proc. Instrn. Mech, Engrs, Vol. 173, No.35, pp. 811-827.
- Fujimoto, Y., Kim, W.B., Shintaku, E. and Huang, F., 1998, “ Inherent Damage Zone Model for Fatigue Strength Evaluation,” Journal of The Society of Naval Architects of Japan, Vol. 184, pp. 315-323.
- Fujimoto, Y., Hamada, K. and Kim, W.B., 1999, “ Inherent Damage Zone Model for Strength Evaluation of Small Fatigue Cracks,” Proc. of the 13th Asian Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, Keelung Taiwan, pp. 223-232.
- Fujimoto, Y., Hamada, K., Shintaku, E. and Pirker, G., 2001, “ Inherent Damage Zone Model for Strength Evaluation of Small Fatigue Cracks,” Engineering Fracture Mechanics, Vol. 68, pp. 455-473.
- Haddad, M.H.El, Topper, T.H. and Smith, K.N., 1979, “ Prediction of Non Propagating Cracks,” Engineering Fracture Mechanics, Vol. 11, pp. 573-584.
- Huang, Y. and Stein, E., 1996, “ Shakedown of a Cracked Body Consisting of Kinematic Hardening Material,” Engineering Fracture Mechanics, Vol. 54, No.1, pp. 107-112.
- Ishibashi, T., 1967, Metal Fatigue and Prevention of Fracture, Youkendou, pp. 59(in Japanese).
- Kim, W.B., 1998, “ Intrinsic Damage Zone Model for Fatigue Strength Evaluation,” Proceedings of Symposium at Venture Business Laboratory, Hiroshima University, pp. 19-20(in Japanese).
- Kitagawa, H. and Takahashi, S., 1976, “ Applicability of Fracture Mechanics to Very Small Cracks or the Cracks in the Early Stage,” Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Mechanical Behaviour of Materials, pp. 627-631.
- Lindley, T., McIntyre, P. and Trant, P.J., 1982, “ Fatigue Crack Initiation at Corrosion Pits,” Metal Technology, Vol. 9, pp. 135-142.
- Morita, K., Kajimoto, K., Murai, R., Fujii, M. and Shimogouchi H., 1991, “ Effect of Flaws on Fatigue Strength of Cast or Forged Materials,” Journal of The Society of Naval Architects of Japan, Vol. 170, pp. 745-753(in Japanese).
- Neuber, H., 1937, Kerbspannungslehre, Verlag Von Julius Springer, Berlin, pp. 50 & pp. 149(in German).
- Nishitani, H., 1983, “ Measure of Stress Field in a Notch Corresponding to Stress Intensity Factor in a Crack,” Transaction of Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 48, No. 447, pp. 1353-1359.
- Okamura, H., 1976, Introduction of Linear Fracture Mechanics, Baihukan (in Japanese).
- Tanaka, K., Nakai, Y., and Yamashita, M., 1981, “ Fatigue Growth Threshold of Small Cracks,” Int. J. of Fracture, Vol. 17, No. 5, pp. 519-533.
- Tanaka, K., “ The Propagation of Small Fatigue Cracks,” 1984, J. Soc. Mater. Sci, Vol. 33, No. 371, pp. 961-972(in Japanese).
- Society of Materials Science, 1978, Design

Handbook of Metallic Materials, Youkendou, pp. 62 (in Japanese).

- Yokobori, T., Ishibashi, T. and Utoguchi, H., 1964, "Strength and Fracture of Metallic Materials," The Japan Institute of Metals, Maruzen, pp. 306 (in Japanese).



< 김 원 범 >



< 백 정 기 >



< 藤本由紀夫 >