

# 인장 굽힘피로를 받는 부재의 피로수명과 균열관통

남 기 우\*

(1993년 11월 30일 접수)

## Fatigue Life and Penetration Behaviour of Material under Combined Tension and Bending Stress

Ki-Woo Nam\*

Key Words : Leak Before Break(LBB) (파단전누설), Estimation Method of Stress Intensity Factor after Penetration(관통후 응력확대계수 평가법), Eccentricity(편심량), Surface Crack(표면균열), Combined Tension and Bending Stress(조합된 인장과 굽힘응력)

### Abstract

The leak-before-break(LBB) design on the large structures such as ship's hull, tank structure, pressure vessels etc. is one of the most important subjects for the evaluation and the assurance of safety. In these structures, various loads are acting. In some structural members, therefore, out-of-plane stress due to bending often may become with in-plane stress due to stretching. In the present report, the characteristics of fatigue life and penetration behaviour from a surface cracked plate under combined tension and bending have been studied experimentally and analytically by using eccentricity. Estimation of fatigue crack growth was done with the Newman-Raju formula before penetration, and with the stress intensity factor after penetration proposed by the author. Calculated aspect ratio showed the good agreement with the experimental result. It was also found that particular crack growth behaviour and crack shape after penetration can be satisfactorily evaluated using the K solution proposed.

### 1. 서 론

원자력발전 플랜트, LNG 탱크선과 같이 중요한 압력용기 구조물에서는 Leak Before Break(LBB)

설계법이 주목을 받고 있다.<sup>1), 2)</sup> 이것은 일종의 Fail Safe 설계로서, 만약에 내용물이 누설하는 균열이 발생하여도, 대규모 파괴가 일어나지 않도록 충분한 강도와 인성을 가진 재료를 사용하여 전제를 하고 있다. 이와같은 LBB설계에 있

\* 부산수산대학교 재료공학과

어서는 표면에 발생한 미소 균열이 성장하여 판 두께를 관통하기까지의 관통 수명, 관통 시의 균열 형상 및 균열관통후의 성장 특성을 세밀하게 평가 할 필요가 있다. 평활재가 인장응력이나 굽힘응력을 받는 경우, 표면 균열의 성장 거동에 관해서는 많은 연구자들에 의하여 특성이 거의 해명되어 있다.<sup>3)</sup> 그러나 표면 균열이 관통해서 완전한 2차원균열이 되기까지의 거동에 관해서는 해명되지 못한 점이 많다.<sup>4), 5)</sup> 그래서 균열관통후의 응력확대계수 평가 모델을 제안<sup>6)</sup>하여 균열관통후의 거동을 정량적으로 평가할 수 있었다.<sup>7), 8)</sup> 그런데 이러한 연구들은 평활재나 응력집중재에 관한 것이고, 실제 구조물에 있어서는 구조적불연속부 또는 공작오차등이 존재한 부분에서는 인장응력 이외에 굽힘응력을 받는 경우가 있다. 그 때문에 조합응력하에서의 연구도 활발하게 행하여져 왔다. 그러나 LBB설계의 관점에서 균열관통후의 거동에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

그래서 본 연구에서는 LBB설계의 기초자료를 얻기 위하여 인장과 굽힘의 조합응력을 받는 표면균열재의 피로수명과 균열관통후의 거동에 대하여 검토하였다.

## 2. 시험편 및 실험 방법

사용한 재료는 3%NiCrMo steel로서, 기계적성질은 항복응력 943.4MPa, 인장강도 996.4MPa, 연신율 18.3%이고, 화학적성분(wt%)은 C : 0.3, Si : 0.32, Mn : 0.48, P : 0.012, S : 0.008, Ni : 3.1, Cr : 1.32, Mo : 0.45, V : 0.11이다. 시험편의 형상과 치수를 Fig. 1에 나타낸다. 시험편의 인장응력과 굽힘응력은 Fig. 1과 같이 시험부의 중앙 축과 하중 축의 편심량을 변화시킴으로서 조합응력을 얻게 하였다. 또, 시험편의 면외변형을 자유스럽게 하기 위하여, Fig. 2와 같이 상하단을 핀으로 고정하여 시험기에 장착하였다. 시험편에는 반경 $a_0$ 의 반원 노치를 방전 가공으로 가공하였다. 시험편의 치수 및 시험 조건을 Table 1에 나타낸다.

피로시험은 전기유압식피로시험기를 사용하였다. 이때, 주파수는 1~12Hz의 정현파이며, 응력비는 0.1 및 0.5로서 실온대기중에서 실시하였다.

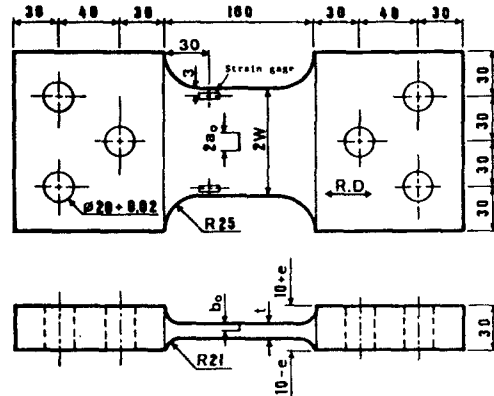


Fig. 1 Specimen geometries ; all dimensions in mm

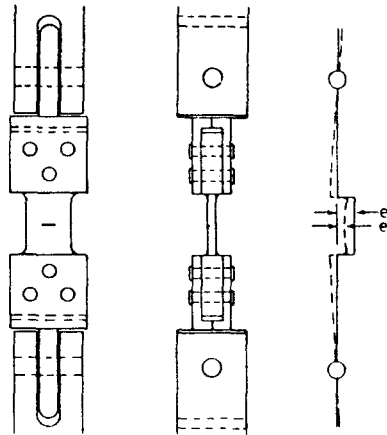


Fig. 2 Joint appearance and deformation aspect

시험편의 초기 노치를 가공한 축(앞면) 및 균열이 관통한 축(뒷면)에서의 균열 길이  $2a_0$  및  $2a_n$ 는 실체현미경을 사용하여 측정하였다. 또, 균열 깊이  $b$ 는 beach mark method에 의하여 파단 후에 측정하였다.

## 3. 응력확대계수의 평가

인장응력 및 굽힘응력은 시험편 앞뒷면의 4곳에서 strain gage를 사용하여 측정하였다. 대표적인 측정의 일례를 Fig. 3에 나타낸다. 여기서

Table 1. Specimen geometries and stress conditions

Specimen	Specimen geometry				Stress $\Delta\sigma_m$ (MPa)	Eccentricity e (mm)	Stress Ratio R
	t (mm)	2W (mm)	2a <sub>0</sub> (mm)	b <sub>0</sub> (mm)			
C-1	10	70	10	5.0	126	-0.2	0.1
C-2	10	70	10	5.0	126	0.6	0.1
C-3	10	70	10	5.0	126	2.3	0.1
C-4	10	70	2	1.0	126	3.0	0.1
C-5	10	70	10	5.0	70	-0.1	0.5
C-6	10	70	10	5.0	70	1.0	0.5
C-7	10	70	5	2.5	70	3.0	0.5

가로측은 하중이고, 세로측은 strain이다. 이것은 R=0.5, e=3.0mm인 C-7시험편에서 균열관통후 앞면 및 뒷면의 균열 길이가 각각 a<sub>s</sub>=19.3mm, a<sub>b</sub>=3.0mm일 때 측정된 것이다. 이 그림에서 편심에 의한 영향으로 앞면 및 뒷면에서의 strain량에 상당한 차이를 알 수 있다. 이와 같은 측정결과에서 응력변동폭의 인장 성분  $\Delta\sigma_m'$  및 굽힘 성분  $\Delta\sigma_b'$ 는  $\sigma = E\epsilon$ 의 관계를 사용하여 앞면 및 뒷면에서의 응력진동폭  $\Delta\sigma_{FS}$ ,  $\Delta\sigma_{BS}$ 를 구한 후, 다음 식을 사용하여 결정하였다.

$$\Delta\sigma_m' = (\Delta\sigma_{FS} + \Delta\sigma_{BS}) / 2 \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta\sigma_b' = (\Delta\sigma_{FS} - \Delta\sigma_{BS}) / 2 \dots\dots\dots (2)$$

응력확대계수의 평가에는 일반적으로 공칭응력이 사용된다. 그러나, 식(1), (2)에서 얻어진 측정응력은 균열이 존재하기 때문에 공칭응력과는 다르다. 그래서 공칭인장응력  $\Delta\sigma_m$ 으로서는  $\Delta\sigma_m = \alpha \times \Delta\sigma_m'$ 가 되도록 보정계수  $\alpha$ 를 결정하였다. 이것으로부터 공칭굽힘응력  $\Delta\sigma_b$ 는  $(\alpha \times \Delta\sigma_b')$ 로 주어진다. 이때의  $\alpha$ 는 균열 길이에 따라서 변하는 값이다.

위에서 얻어진 공칭굽힘응력 ( $\Delta\sigma_b$ )과 공칭인장응력 ( $\Delta\sigma_m$ )의 비 ( $\Delta\sigma_b / \Delta\sigma_m$ )와 앞면의 균열 길이 a<sub>s</sub>와의 관계를 Fig. 4에 나타낸다. 여기서 화살표는 판두께 관통시의 앞면 균열 길이이다. 이 그림에서 균열이 증가함에 따라서 굽힘응력성분이 감소하고, 균열이 판두께를 관통한 후에는 0에 가까워지는 것을 알 수 있다. 그리고 감소의 경

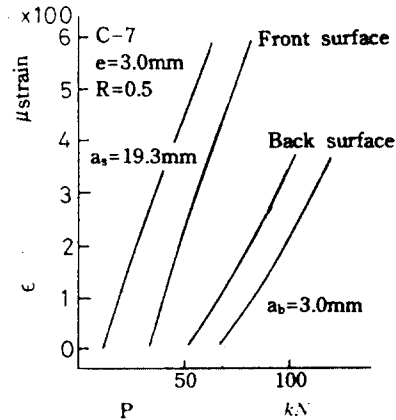


Fig. 3 Typical example of strain measurements

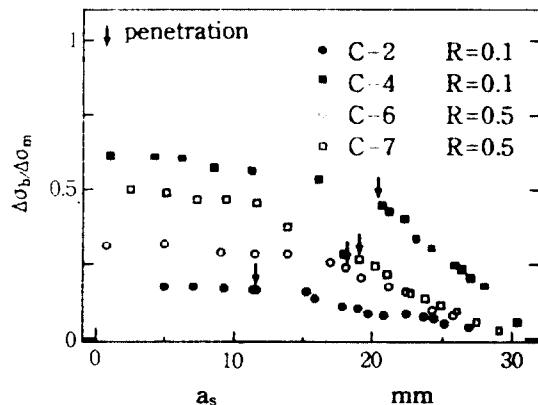


Fig. 4 Relations between a<sub>s</sub> and bending stress ratio

향은 편심량이 클수록 큰 것을 알 수 있다. 또한, 본 실험의 범위에서  $(\Delta\sigma_m - \Delta\sigma_b)$ 는 0보다 크다.

이와같은 그림에서 균열이 성장하지 않은 때의 굽힘응력의 실험 값과 재료 역학에 의한 계산값  $(\Delta\sigma_b = \Delta Pe/Z)$ 을 비교하면, 실측값이 계산값보다 상당히 낮은(약30%)값을 나타낸다. 이러한 원인은 Fig. 2와 같이 시험편의 상하를 편으로 시험기에 고정시켰기 때문에 하중이 증가함에 따라서 시험편이 변형하여 유효한 편심량이 감소한 것이라 생각한다. 이것은 Fig. 3의 하중-스트레인 선도가 비선형인 경향과도 일치한다.

표면 균열의 응력확대계수는 Newman-Raju의 식<sup>9)</sup>으로 구하였다. 그러나 본 실험과 같이 인장과 굽힘의 조합응력을 받는 경우, 관통후의 응력확대계수를 평가하는 방법이 제안되어 있지 않다.

그래서 이와 같은 경우의 응력확대계수는 인장 응력성분에 대한 평가식과 면외 굽힘하중을 받는 경우의 2차원관통균열 평가식<sup>10)</sup>을 조합함으로써 평가하기로 하였다. 균열이 판두께를 관통한 후의 균열형상을 모식화한 그림을 Fig. 5에 나타낸다. 이와 같은 모델에 의하여 인장응력을 받는 관통균열의 응력확대계수 평가방법을 제안하였다.<sup>6)</sup> A점, D점에서 응력확대계수  $K_A^m, K_D^m$  평가식은 다음과 같이 주어진다.

$$K_A^m = \delta(a_c) / \delta(a_s) \sigma_m \sqrt{\pi a_s} F \dots\dots\dots (3)$$

$$K_D^m = \delta(a_c) / \delta(a_b) \sigma_m \sqrt{\pi a_b} F \dots\dots\dots (4)$$

한편, 굽힘응력성분<sup>10)</sup>에 대한 Fig. 5의 A점, D점에서 응력확대계수  $K_A^b, K_D^b$ 는 각각 앞면 및 뒷면에서의 균열 길이를 사용하여 다음식으로 평가하였다.

$$K_A^b = \sigma_b \sqrt{\pi a_s} F \dots\dots\dots (5)$$

$$K_D^b = \sigma_b \sqrt{\pi a_b} F \dots\dots\dots (6)$$

따라서 식(3), (4), (5), (6)에 의하여, 인장과 굽힘의 조합응력을 받는 관통 균열 Fig. 5의 A점, D점에서 응력확대계수  $K_A, K_D$ 는 다음 식과 같이 주어진다.

$$\text{앞면에서는 } K_A = K_A^m + K_A^b \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{뒷면에서는 } K_D = K_D^m + K_D^b \dots\dots\dots (8)$$

여기서,  $a_s$  및  $a_b$ 는 각각 앞면 및 뒷면의 균열 길이,  $a_c$ 는 판두께중앙부의 균열 길이로서  $a_c = 0.5 \sqrt{3a_s^2 + a_b^2}$ 이다. 또,  $F(\eta) = (1 - 0.5\eta + 0.370\eta^2 - 0.044\eta^3) / \sqrt{1 - \eta}$ 로서  $\eta_s = a_s/W$  또는  $\eta_b = a_b/W$ 를 대입하여 얻어진 값이다.  $\delta(a) = 4\sigma a(1 - \nu^2) / E \cdot V(\eta)$ 이고,  $\nu$ 는 포아슨비,  $E$ 는 종탄성계수,  $V(\eta) = -0.071 - 0.535\eta + 0.169\eta^2 + 0.020\eta^3 - 1.071(1/\eta) \log(1 - \eta)$ 이다.

그리고, 굽힘 성분의 보정계수  $F(\eta)$ 는 「무한 판의 균열이 굽힘을 받는 경우, 보정계수는 인장, 면내전단 및 면외전단하중에 대한 보정계수와 동일하다.<sup>11)</sup>」라고 하는 것에 의하여 인장성분의 보정계수를 사용하였다.  $\Phi(I)$ 는 판두께 영향을 나타내고, 판두께, 균열 길이 및 포아슨비의 함수이다. 아주 얇은판( $t/a \rightarrow 0$ )에서는  $(1 + \nu)/(3 + \nu)$ 에 근접하고, 아주 두꺼운판( $t/a \rightarrow \infty$ )에서는 1에 근접해 간다.<sup>10)</sup>

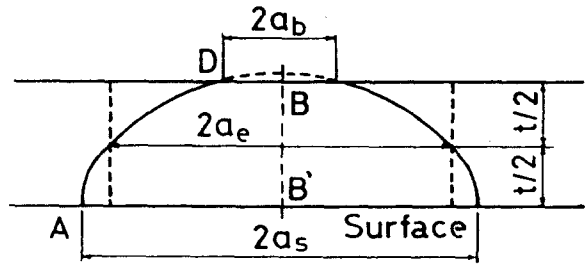


Fig. 5 Crack model to evaluate the stress intensity factor after penetration

### 4. 실험결과 및 고찰

#### 4.1. 피로 균열 형상

인장과 굽힘의 조합응력을 받는 표면균열재의 시험편에서 얻어진 피로 파면의 모습을 Fig. 6에 나타낸다. Fig.6의 (a), (c)는 각각 응력비  $R=0.1$  (C-4),  $R=0.5$ (C-7)일 때, 편심량  $e=3.0\text{mm}$ 에서 얻어진 것이다. 큰 편심량에 의한 굽힘응력의 작용이 증가하여 피로균열이 상당히 타원화되어 있는 것으로 판단된다. 이와같이 균열관통후의 균

열진전형상이 거의 반타원의 형상을 나타내는 것은, 저자들이 관통 후의 응력확대계수 평가식을 유도할 때 가정한 「균열은 판두께를 관통한후에도 반타원의 형상을 유지하고, 앞면균열길이는 언제나 타원의 장경으로 한다」<sup>6)</sup>라고 하는 것은 인장과 굽힘의 조합응력을 받는 표면균열재에도 타당한 것이라고 말할 수 있다. Fig. 6의 (b), (d)는 공칭인장응력과 공칭굽힘응력을 사용하여 Newman-Raju 식, 식(7), (8) 및 뒤에서 설명하는 피로균열전파식(9), (10)을 사용하여 계산에서 얻어진 균열 형상이다.

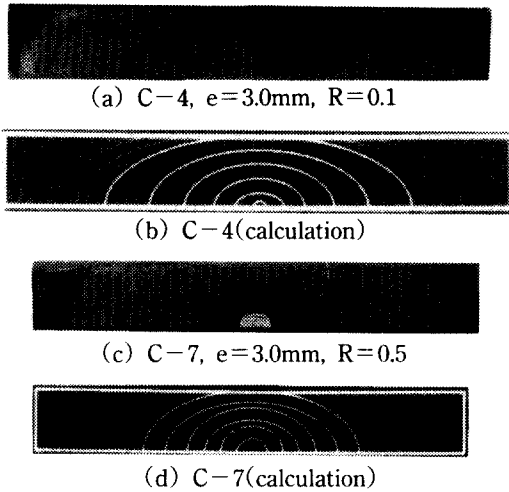


Fig. 6 Fatigue fracture surfaces

Fig. 6과 같은 피로파면의 beach mark에서 얻어진 균열의 종횡비( $b/a_s$ )와 계산에서 얻어진 균열의 종횡비( $b/a_s$ )를 비교하여 Fig. 7에 나타낸다. 여기서  $a_s$ 는 표면에서의 균열 길이 절반,  $b$ 는 균열 깊이이다. 이 그림에서 관통시의 균열 종횡비( $b/a_s$ )는 편심량 및 응력비에 관계없이 거의 유사한 값을 나타내고 있다. 그리고, 실험과 계산의 경우는 아주 좋은 일치를 나타내고 있다. 이와같은 이유는 Fig. 2와 같이 시험편의 면외변형을 자유로 하였기 때문에, 해석조건에 일치하였다고 생각되어 진다. 이것으로부터, 표면균열재의 피로시험을 실시할 때는 단부의 구속조건을 충분히

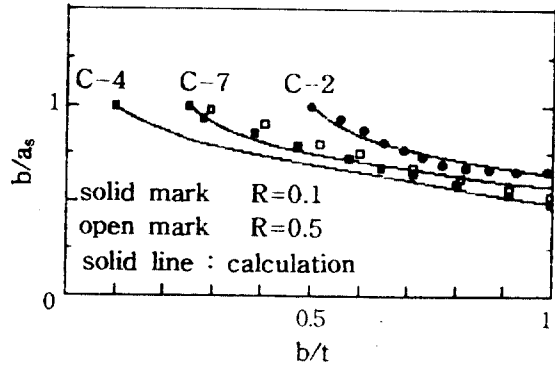


Fig. 7 Comparison of experimental values of crack growth with calculated ones

고려하여야 된다고 말할 수 있다.

인장 및 응력집중을 받는 경우, 판두께 중앙부의 유효균열길이는  $a_e = 0.5\sqrt{3a^2 + a_s^2}$ 가 되는 가정이 아주 좋게 성립하였다. 그러나, 굽힘응력을 받는 경우에도 이 가정이 성립하는가를 알아보기 위하여 Fig. 6의 과단면에서 앞면 및 뒷면의 균열 길이를 측정하여  $a_e = 0.5\sqrt{3a^2 + a_s^2}$ 에서 계산한 값과 판두께 중앙부에서 실측한 실험값을 비교하여 Fig. 8에 나타낸다. 이것으로부터 계산값과 실험

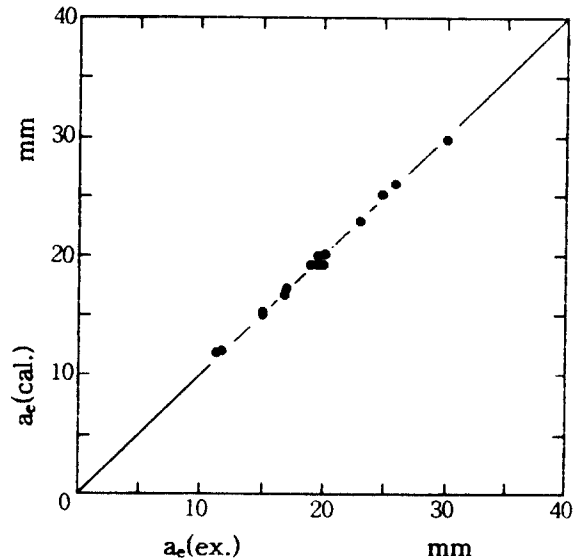


Fig. 8 Comparison of experimental values of aspect ratio growth with calculated ones

값은 매우 좋은 일치율을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 따라서, 인장과 굽힘의 조합응력을 받는 경우에도 판두께중앙부의 균열길이는  $a = 0.5\sqrt{3a_s^2 + a_b^2}$ 로 평가할 수 있다는 것을 알았다.

4. 2. 피로 균열 전파

실험에서 얻어진 N-a곡선의 대표적인 일례를 Fig. 9에 나타낸다. 이것은 C-4시험편으로 편심량  $e=3.0\text{mm}$  응력비  $R=0.1$ 에서 얻어진 것이다. 이 그림에서는 균열발생수명등의 영향을 제거하기 위하여 표면에서의 균열 길이가 1.3mm 진전하였을 때의 하중반복수를 0으로 하였다. 그리고, 화살표는 앞면의 균열이 진전하여 판두께를 관통한 때를 나타낸다. 앞면에서의 균열전파거동(N-a<sub>s</sub>곡선)은 균열이 뒷면에 관통한 후에도 특별히 큰 변화는 없고, 연속적인 성장 거동을 나타내고 있다. 이것에 대하여 뒷면에서의 균열 전파 거동(N-a<sub>b</sub>곡선)은 매우 빠른 균열 성장 거동을 나타내며, 앞면의 균열 길이에 접근하여 파단 되었다.

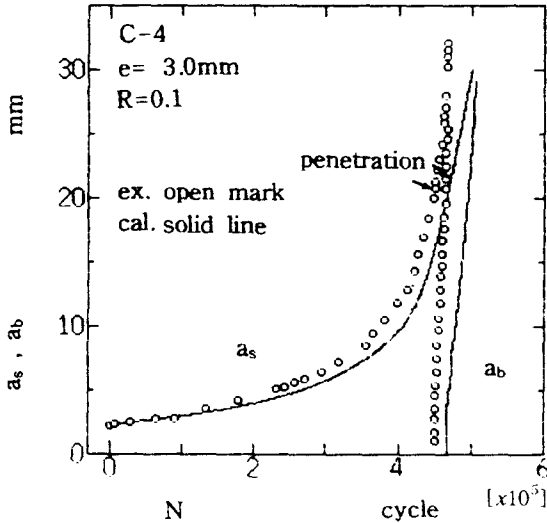


Fig. 9 Comparison of experimental values of  $a_s$  with calculated ones at plate thickness center after penetration

균열이 관통한 후, 뒷면의 전파특성을 세밀하게 검토하기 위하여 N-a<sub>b</sub>곡선을 확대하여 Fig. 10에

나타낸다. 각 응력비의 결과에서 편심량이 증가함에 따라서 균열관통에서 파단까지의 하중반복수는 짧게 되는 것을 알 수 있다. 또, 인장과 굽힘의 조합응력을 받는 경우에도 뒷면의 균열성장 특성은 인장응력이나 응력집중만을 받는 경우와 같이<sup>6)</sup> 3영역으로 나누어지는 것을 알았다. a영역은 균열관통 직후의 부분으로 갑자기 균열이 발생하여 매우 빠른 속도로 균열이 성장하고 있다. 이 때의 균열길이는 a영역의 균열성장량으로써  $\Delta a_{ba}$ 로 나타낸다. b영역의 균열성장은 어느 구간

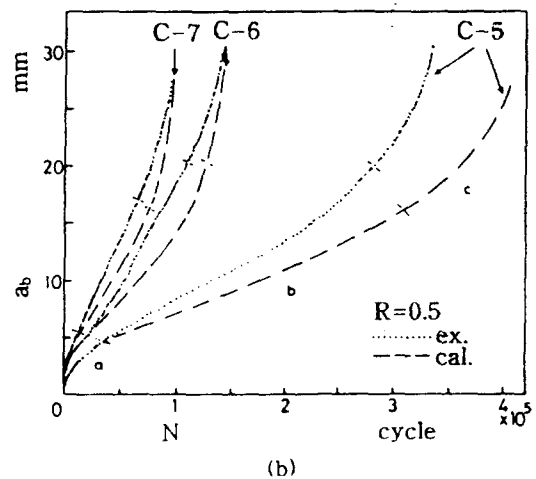
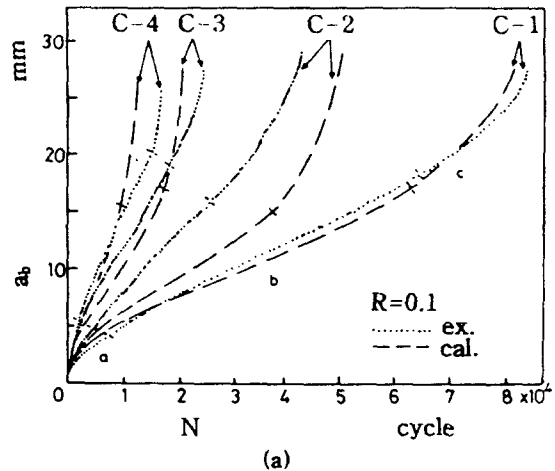


Fig. 10 Comparison of experimental values of crack growth at back surfaces after penetration with calculated ones

(a)  $R=0.1$  (b)  $R=0.5$

에 걸쳐서 거의 일정한 속도로 성장하고 있다. 이 구간을 최소자승법으로 직선근사하여 평균오차 1%까지를 정속도영역이라 하고, 평균균열전파속도를  $da_b^*/dN$ 로 나타내기로 한다. 그리고 이 때의 균열길이는 b영역의 균열성장량으로써  $\Delta a_{bb}$ 로 나타낸다. c영역은 정속도영역을 지나서 뒷면의 균열성장속도가 가속화하여 앞면의 균열길이에 접근하여 파단에 이르는 영역이다.

균열관통시 앞면의 균열길이  $a_p$ 나 a영역의 균열성장량인  $\Delta a_{ba}$ 는 LBB설계에 있어서 중요한 것이다. 그래서 균열관통시 앞면의 균열길이  $a_p$ 와 Fig. 10의 (a), (b)에서 얻어진 a영역의 균열성장량인  $\Delta a_{ba}$ 의 관계를 Fig. 11에 나타낸다. 또 전보<sup>6)</sup>에서 얻어진 인장응력 및 응력집중을 받는 시험편에서 얻어진 결과도 나타낸다. 이 그림에서 굽힘응력 성분 및 응력집중이 크짐에 따라, 관통시 앞면의 균열길이  $a_p$ 는 인장응력만 받는 평활재 보다 길다. 또 관통후 a영역의 균열성장량인  $\Delta a_{ba}$ 는 응력비에 관계없이 관통시 앞면의 균열길이  $a_p$ 에 의존하고,  $a_p$ 가 길어짐에 따라서  $\Delta a_{ba}$ 는 약간 길어지는 경향을 나타낸다.

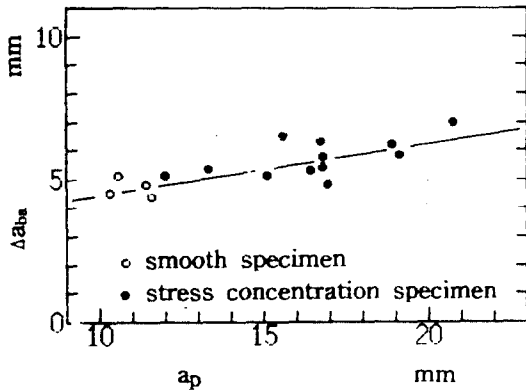


Fig. 11 Relation of crack length  $\Delta a_{ba}$  on first stage after penetration between crack length  $N_p$  at penetration on front surface

균열이 관통하기 전은 Newman-Raju식으로, 균열관통후는 식(7), (8)을 사용하여 얻어진 응력확대계수의 변동폭 (관통전 앞면에서의 응력확대

계수의 변동폭  $\Delta K$ , 관통후 앞면에서의 응력확대계수의 변동폭  $\Delta K_A$ , 관통후 뒷면에서의 응력확대계수의 변동폭  $\Delta K_D$ )과 시험편의 앞면 및 뒷면에서 얻어진 피로균열전파속도 ( $da_a/dN$ ,  $da_b/dN$ )와의 관계를 Fig. 12에 나타낸다. 응력확대계수의 변동폭의 평가에 있어서 응력  $\Delta\sigma$ 는 앞에서 설명한 공칭인장응력과 공칭굽힘응력을 사용하였다.

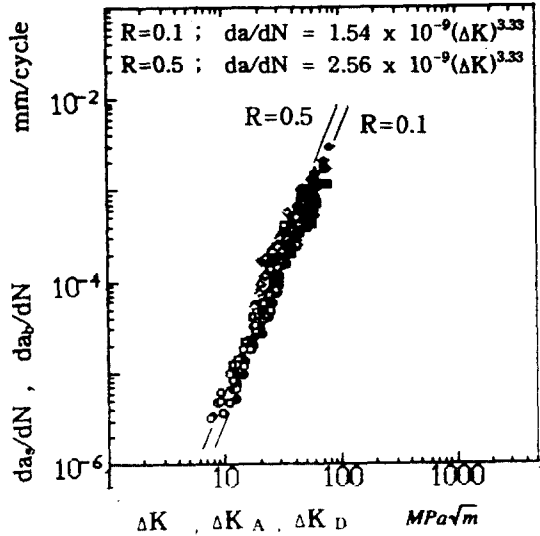


Fig. 12 Crack growth rate versus stress intensity factor range

그림에서 검은기호(●, ■, ◆)는 R=0.1의 결과이고, 흰기호(○, □, ◇)는 R=0.5의 결과이다. 이것으로부터 피로균열전파속도는 균열관통전 (Before Penetration) 또는 균열관통후 (After Penetration)를 막론하고 다음과 같이 정리될 수 있는 것을 알았다.

$$R=0.1 ; da/dN = 1.54 \times 10^{-9} (\Delta K)^{3.33} \dots \dots \dots (9)$$

$$R=0.5 ; da/dN = 2.56 \times 10^{-9} (\Delta K)^{3.33} \dots \dots \dots (10)$$

여기서  $da/dN$ 의 단위는 mm/cycle이고,  $\Delta K$ 의 단위는  $MPa\sqrt{m}$ 이다.

### 4.3. 실험값과 계산값의 비교

식(7), (8)의 타당성을 검토하기 위하여, Fig.

10에서 a영역의 균열성장량 $\Delta a_{ba}$  및 b영역의 균열성장량  $\Delta a_{bb}$ 를 측정하여 실험값과 계산값을 비교하여 Fig. 13에 나타낸다. 이 그림에서 실험값이 약간 길게 나타나고 있지만, 각각에서 두개의 값을 제외하고는 전체적으로 응력비에 관계없이 실험과 계산이 좋은 일치를 나타내고 있다고 할 수 있다.

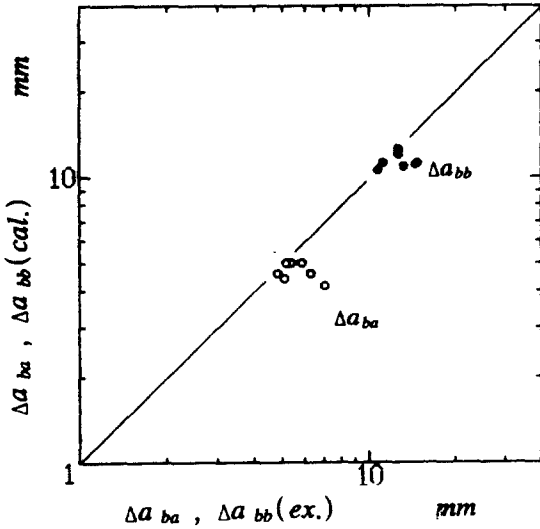


Fig. 13 Comparison of experimental values of  $\Delta a_{ba}$ ,  $\Delta a_{bb}$  with calculated ones

다음으로 뒷면 a영역에서의 평균적전파속도 ( $\Delta a_{ba}/\Delta N$ ) 및 정속도영역에서의 균열전파속도 ( $da_b^*/dN$ ) 관계를 Fig. 14에 나타낸다. 이것에서 실험값과 계산값은 매우 좋은 일치를 나타내고 있음을 알 수 있다.

인장과 굽힘의 조합응력을 받는 표면피로균열이 1.3mm 성장하여 뒷면에 관통하기까지의 하중반복수( $N_p$ )와 균열이 관통하여 뒷면의 균열길이 15mm에 도달하기까지 하중반복수( $N_{ab=15mm}$ )의 실험값과 계산값을 비교하여 Fig. 15에 나타낸다. 피로균열관통수명 $N_p$ 는 실험값과 계산값이 대단히 좋은 일치를 나타내고 있다. 한편, 균열관통후의 뒷면 하중반복수( $N_{ab=15mm}$ )도 좋은 일치를 보이고 있다고 할 수 있다.

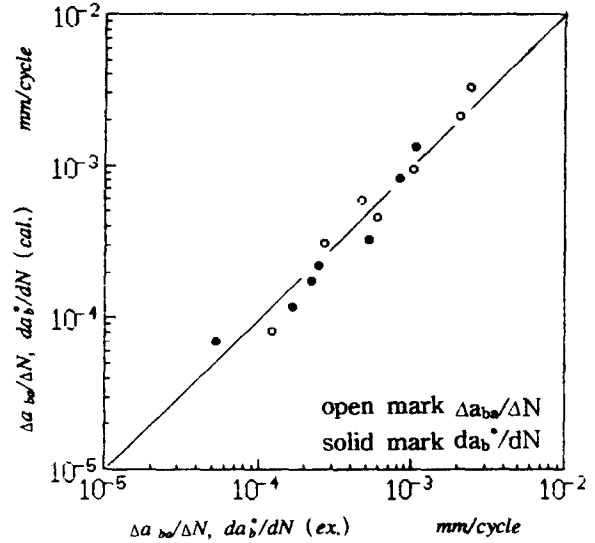


Fig. 14 Comparison of experimental values of  $\Delta a_{ba}/\Delta N$ ,  $da_b^*/dN$  with calculated ones

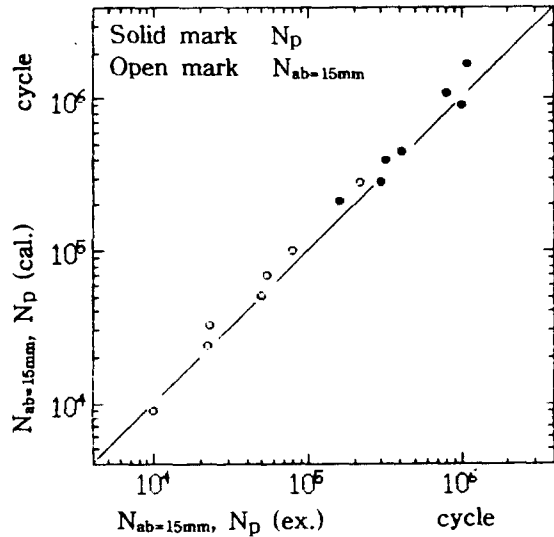


Fig. 15 Comparison of experimental values of  $N_p$ ,  $N_{ab=15mm}$  with calculated ones

이것으로부터 식(7), (8)에 의한 응력확대계수의 평가식과 식(9), (10)에 의한 피로균열전파 법칙을 사용하여 인장과 굽힘에 의한 표면균열재의 피로수명과 균열관통거동을 정량적으로 평가



할 수 있다고 결론지을 수 있다.

## 5. 결 론

3%NiCrMo steel을 사용하여, 인장과 굽힘의 조합응력을 받는 표면균열재의 피로수명과 균열 관통거동을 검토한 결과는 다음과 같다.

피로파면은 편심량이 클수록 편평화하고, aspect ratio는 실험값과 계산값이 좋은 일치를 나타내었다. 그리고, 응력확대계수의 평가는 균열이 관통하기까지는 Newman-Raju식으로, 관통후는 인장응력 및 굽힘응력을 받는 경우의 응력확대계수 평가식을 조합하는 것에 의하여 평가하였다. 본 연구에서 제안된 관통후의 응력확대계수 평가식과 피로균열전파법칙을 사용하여, 판두께 관통후의 특이한 피로균열전파특성을 편심량의 함수로서 정량적으로 평가할 수 있다.

이 논문은 1993년도 한국학술진흥재단의 공모 과제(지방대학육성) 연구비에 의하여 연구되었으며, 관계자 여러분께 감사드린다.

## 참고문헌

- 1) IMO Resolution A 328(IX)) (1975) Code for the construction and equipment of ships carrying liquefied gases in bulk.
- 2) ASME (1987) Boiler and pressure vessel code. Sec. XI.
- 3) M. Kawahara and M. Kurihara (1975) A preliminary study on surface crack growth in a combined tensile and bending fatigue process, Jap. Soc. of Nav. Archit. 137, 297-306 (in Japanese)
- 4) B. Ruttenauer, W. Setz and L. Grueter (1983) Further considerations on the development of surface cracks under stable crack extension, Z. Werkstofftech 14, 41-44
- 5) M. D. Gilchrist, M. I. Chipalo and R. A. Smith (1992) Shape development of surface defects in tension fatigued finite thickness plates, Int. J. Pres. Ves. & Piping 49, 121-137
- 6) 남 기우 (1991) 고장력강의 피로수명과 균열 관통 거동에 관한 연구, 대한기계학회논문집, 15, 1991-2001
- 7) K. W. Nam, K. Ando, Y. Sakai and N. Ogura (1992) Leak-before-break conditions of plates and pipes under high fatigue stresses, Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 15, 809-824
- 8) K. W. Nam, K. Ando and N. Ogura (1993) The effect of specimen size on the behaviour of fatigue-crack-penetration, Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 16, 767-779
- 9) J. C. Newman, Jr. and I. S. Raju (1981) An empirical stress intensity factor equation for the surface crack, Eng. Fract. Mech., 15, 185-192
- 10) R. J. Hartranft and G. C. Sih (1968) Effect of plate thickness on the bending stress distribution around through cracks, J. Math. Phys. 47, 276-291
- 11) G. C. Sih (1977) Mechanics of fracture, 3, 25, Noordhoff Int. Publi. Leyden