

# 평활시험편에 있어서 균열형상비 변화에 따른 표면균열의 피로수명과 균열관통거동

남 기 우 · 엄 윤 성

부산수산대학교  
(1992년 5월 6일 접수)

## The Fatigue Life and Penetration Behavior by Variety of Aspect Ratio on Smooth Specimen

Ki-Woo, NAM and Yoon-Sung, UM

National Fisheries University of Pusan

(Received May 6, 1992)

Fatigue life and penetration behavior were examined analytically by variety of initial front face crack length and initial crack depth. The fatigue crack shape before penetration is almost semielliptical, and the aspect ratio by calculation using the Newman - Raju's formula is smaller than the value obtained by the experiment. It is found that the crack growth behavior on the back surface after penetration is unique and can be divided into three stage a, b and c. By using the K value proposed by the authors, particular crack growth behavior and the change in crack shape can be evaluated quantitatively. It is found that fatigue life and penetration behavior were more dependent on initial front face crack length than initial crack depth.

### 1. 서 론

오늘날, 에너지 관련의 Plants<sup>1),2)</sup>, 기기류<sup>3)</sup>에 서는 보다 높은 안전성과 경제성 향상의 관점에서 LBB(Leak Before Break) Design이 주목 받고 있다. 이 LBB Design의 개념은 불안정파 괴에 앞서서 내용물의 누설이 일어나는 상태를 보증하고자 하는 것이다.

표면균열이 관통하기 까지에 대해서는 다방면 으로부터 활발한 연구가 실시되어, 유용한 결과<sup>4)</sup>

가 다수 얻어져 있다. 그러나 표면균열이 판 두께를 관통해서, 완전한 2차원 관통균열이 되기까지의 균열성장거동이나 균열개구량에 관한 연구<sup>5)~9)</sup>는 불분명한 점이 많다. 그 때문에 피로균열의 판두께 관통후의 거동을 정량적으로 평가하는 것은 곤란하였다. 그래서 저자들은 균열이 판 두께를 관통한 후의 응력확대계수를 간단히 평가하기 위한 Model<sup>10),11)</sup>을 제안하였다. 또 그것에 의해 여러가지 형상을 갖는 시험편<sup>12)~14)</sup>의 경우에 있어서 균열성장 특성, 균열형상변화 및 균열

의 개구성상이 상당히 정량적으로 평가될 수 있다는 것을 알았다.

그런데 이상의 연구는 반원형의 균열을 갖는 시험편에 대한 실험이 주였다. 그래서 본 논문에서, 인장응력을 받는 시험편의 초기 표면 균열 길이 및 초기 균열깊이를 여러가지로 변화시켜서 피로수명과 균열관통후의 거동을 실험 및 계산적으로 검토하여 보았다.

## 2. 실험방법 및 계산조건

시험편은 인장강도 873Mpa, 항복응력 824Mpa, 연신율 39%의 기계적 성질을 갖는 80kg급 고장력강(HT80)이고, 그의 화학성분(wt%)은 C: 0.12, Si: 0.29, Mn: 0.98, P: 0.014, S: 0.005, Cu: 0.16, Cr: 0.62, Mo: 0.32, V: 0.05이다. 시험편은 판폭 2W=50mm, 판두께 t=10mm이며, 판폭중앙부 표면의 반원노치는 방전가공에 의해 반경 a<sub>0</sub>=2.0mm로 가공하였다. 피로시험은 전기유압식 피로시험기를 사용하여, 실온대기중에서 실시하였다. 피로시험시의 제어는 하중파형은 정현파, 주파수는 1-10Hz, 응력비는 R=0.1의 하중제어로 하였다. 시험편

의 반원노치를 가공한 측(전면)의 균열 길이 2a<sub>0</sub>, 균열이 관통한 측(뒷면)의 균열 길이 2a<sub>b</sub>는 쌍안실체현미경을 사용하여 일정균열 성장마다 측정했다. 또, 균열깊이 b는 Beach Mark법에 의해서 파단 후에 측정했다.

한편 계산조건은 실험과 같은 조건 즉 두께 t=10mm, 판 폭 2W=50mm의 평판중에 존재하는 표면균열 관통 전후의 거동을 작용응력 σ<sub>T</sub>=24kgf/mm<sup>2</sup>, 응력비 R=0.1을 사용하여 계산하였다. 계산에 사용한 표면균열의 형상인 초기 표면균열 길이 a<sub>0</sub> 및 균열 깊이 b<sub>0</sub>는 일괄해서 Table 1에 나타낸다. 계산한 균열형상은 제 8예이다. 실험 및 계산의 결과는 함께 Table 1에 나타낸다.

## 3. 응력확대계수의 평가방법

피로균열이 판 두께를 관통하기 이전의 응력확대계수는 Newman-Raju<sup>10)</sup>의 식으로서 평가하였다.

한편 Fig. 1과 같이 균열이 판 두께를 관통한 후의 A점, D점에서의 응력확대계수 K<sub>A</sub><sup>e</sup>, K<sub>D</sub><sup>e</sup>는 저자<sup>10),11)</sup>들이 제안한 아래 식으로 평가하였다.

Table 1. Crack geometry and calculation results

cal. condition : t=10mm, 2W=50mm, σ<sub>T</sub>=24kgf/mm<sup>2</sup>

	a <sub>0</sub> (mm)	b <sub>0</sub> (mm)	N <sub>P</sub> (cycle)	N <sub>f</sub> (cycle)	N <sub>abf</sub> (cycle)	a <sub>P</sub>
ex.	2.0	2.0	119,000	133,400	14,400	11.25
cal.	2.0	0.4	184,947	193,046	8,099	14.18
	2.0	2.0	164,608	173,170	8,562	14.15
	2.0	4.0	130,653	139,475	8,822	13.91
	2.0	6.0	97,361	107,747	10,386	13.30
	0.67	2.0	284,731	293,313	8,582	14.13
	1.0	2.0	243,700	252,144	8,444	14.14
	5.0	2.0	66,792	74,759	7,967	14.46
	10.0	2.0	17,896	23,013	5,117	16.08

a<sub>0</sub>: initial front crack length, b<sub>0</sub>: initial depth crack length, N<sub>P</sub>: penetration cycle, N<sub>f</sub>: failure cycle, N<sub>abf</sub>: failure cycle of back face crack length after penetration, a<sub>P</sub>: front face crack length on penetration

평활시험편에 있어서 균열형상비 변화에 따른 표면균열의 피로수명과 균열관통거동

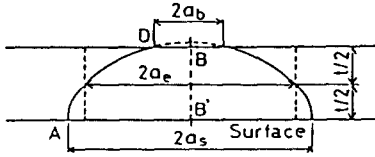


Fig. 1. Model used for evaluating the stress intensity factor after penetration.

$$K_A^e = \delta(a_e) / \delta(a_s) \sigma \sqrt{\pi a_s} \cdot F(\eta_s) \quad (1)$$

$$K_D^e = \delta(a_e) / \delta(a_b) \sigma \sqrt{\pi a_b} \cdot F(\eta_b) \quad (2)$$

여기서  $a_s$  및  $a_b$ 는 각각 전면 및 뒷면에서의 균열 길이,  $a_e$ 는 판두께 중앙부에서의 균열 길이,  $\eta_s = a_s / W$ ,  $\eta_b = a_b / W$ 이다. 또  $F(\eta) = (1 - 0.5\eta + 0.370\eta^2 - 0.044\eta^3) / \sqrt{1 - \eta}$ 이다. 더우기  $\delta(a)$ 는 아래식으로서 주어지는 개구변위이다.

$$\delta(a) = 4\sigma a(1 - \nu^2) / E \cdot V(\eta) \quad (3)$$

여기서  $\nu$ 는 포아송 비,  $E$ 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.

저자들은 식(1), (2)를 유도할 때, 다음과 같이 3가지 가정을 설정하였다.

(a) 균열은 판두께를 관통한 후에도 반타원형상을 유지하고,  $a_s$ 는 언제나 반타원의 장경이다. 따라서 판 두께 중앙부의 균열 길이  $a_e$ 는 아래 식으로 주어진다.

$$a_e = \sqrt{(3a_s^2 + a_b^2)} / 2 \quad (4)$$

(b) 균열 관통후는 균열중앙부 즉 Fig. 1의 BB' 선상의 개구변위량은 판의 전면, 뒷면 및 중앙부에서 같다고 가정한다.

(c) Fig. 1의 균열중앙부에 있어서 개구변위  $\delta(a_e)$ 는 판 폭  $2W$ 의 판 중앙에 길이  $2a_e$ 의 2차원 관통균열이 있을 때, 균열중앙부에 있어서 개구변위량과 같은것 이라고 가정한다. 따라서  $\delta(a_e)$ 는 아래 식과 같이 주어진다.

$$\delta(a_e) = 4\sigma a_e(1 - \nu^2) / E \cdot V(\eta) \quad (3)$$

상기 (a)~(c) 가정의 타당성을 실험적으로 검토하였다<sup>10),15)</sup>. 실험에서 얻어진 파면의 일례를

Fig. 9(a)에 나타낸다. 이와 같은 실험에서 얻어진 파면의 beach mark로부터  $a_e$ 를 실측하였다. 한편 실측된  $a_s$ 와  $a_b$ 를 (4) 식에 대입하여 얻어진  $a_e$ 값과 실측된  $a_e$ 값을 비교해서 Fig. 2에 나타낸다. 이 그림에는 문헌(12, 13, 14, 15)의 data를 이용하여 인장과 굽힘응력을 받는 경우, 응력집중부에 있어서의 결과 및 대형시험편의 결과도 나타내었다. 이것에 의해 실측된  $a_e$ 와 식(4)에 의한  $a_e$ 는 여러가지 실험조건에 대하여 좋은 일치를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 앞의 가정 (a)는 타당한 것이라고 말할 수 있다.

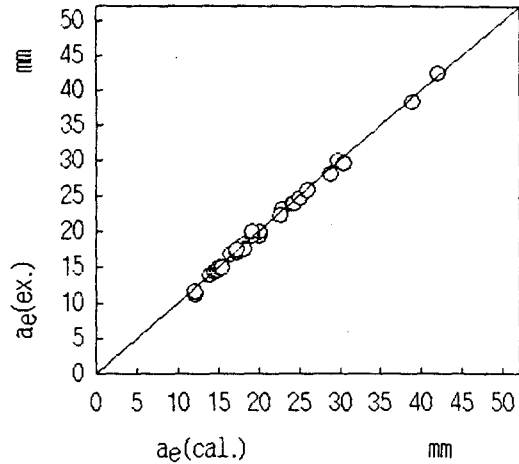


Fig. 2. Comparison of experimental and calculated values of crack length at mid thickness.

다음에 가정 (b), (c)의 타당성을 검토하기 위하여 균열 관통후의 개구변위를 시험편의 전면 및 뒷면에서 계측 하였다. 개구변위의 계측은 균열로부터  $Y$ mm 떨어진 중앙집중에서 실시하였다. 이때  $Y$ 값은 10mm로 하였다. 이값을  $\Delta_{10}$ 으로 나타내기로 한다.

한편 판 폭  $2W$ 에 균열 길이  $2a$ 의 이차원 관통 균열  $\Delta_v$ 는 다음 식으로 주어진다<sup>17)</sup>.

$$\Delta_v = \frac{2\sigma Y}{E} \left\{ \frac{\pi a / 2W}{\sin(\pi a / 2W)} \right\}^{1/2} \times \left\{ (4W / \pi Y) \cosh^{-1} \left\{ \frac{\cosh(\pi Y / 2W)}{\cos(\pi a / 2W)} \right\} \right\}$$

$$-\frac{1+\nu}{\left\{1+\left[\frac{\sin(\pi a/2W)}{\sinh(\pi Y/2W)}\right]^2\right\}^{1/2}+\nu} \quad (5)$$

(3) 식은  $Y=0$ 의 경우에 해당한다.

식(5)에 의한 이론값과 실험값을 비교해서 Fig. 3에 나타낸다. 그림중의 실선은 식(5)에  $Y=10mm$ 를 대입했을 때의 값이다. 이 그림에 의하면 전체적인 경향으로서는 이론값과 실험값이 거의 일치하여, 식(3)으로 개구변위  $\delta(a_e)$ 를 상당히 정확하게 평가할 수 있는 것을 알았다. 그러나 엄밀하게 말하면  $a_e$ 가 작을 때, 즉 균열이 관통한 후 얼마되지 않는 경우에는 뒷면의  $\Delta_{10}$ 이 약간 작은 값이 되어 있는 것을 알 수 있다. 이상에 의해, 가정 (b), (c)는  $a_e$ 가 상당히 작은 경우를 제외하고는 타당한 것이라고 생각된다. 이것으로 부터 반복응력이 항복응력에 비해 낮은 경우에는 균열관통 후의 균열개구면적, 내용물의 누설량을 식(3)으로 평가할 수 있는 것이라고 결론되어 진다. 그러나 반복응력이 항복응력에 가까운 경우나 높은 경우에는 식(3)은 적용되지 않고 저자<sup>18)</sup>들이 고응력 실험에 제한한 식을 사용할 필요가 있다.

실험에서 있어서 식(1), (2)로 평가된 응력확대계수의 변동 폭과 초기균열 길이  $a_0=2.0mm$ 로 일정할 때, 균열 길이  $b_0$ 를 2.0, 4.0, 6.0mm로 변화시킨 경우에 식(1), (2)로 계산된 응력확대계수의 변동폭을 비교해서 Fig. 4에 나타낸다. Fig. 4에서, ● mark가 식(1)에 의한  $K_A^e$ 이고, ○가 식(2)에 의한  $K_D^e$ 이다. 또 그림4중에서  $\Delta$ 으로 표시된 점은 Newman-Raju의 식에 있어서  $b=t$ 일 때의  $\Delta K_D^e$ 이다. 식(1)에 의한  $\Delta K_A^e$ 는 전면에서의 균열 길이  $a_s$ 가 증가함에 따라 직선적으로 증가하고 있다. 그러나 식(2)에 의한  $\Delta K_D^e$ 는  $a_b=0$ 일 때 무한대이지만, 그 후  $a_b$ 가 증가함에 따라서 급격히 저하하고,  $a_b=5-12mm$  근처에서 최소값을 나타내고 있다.

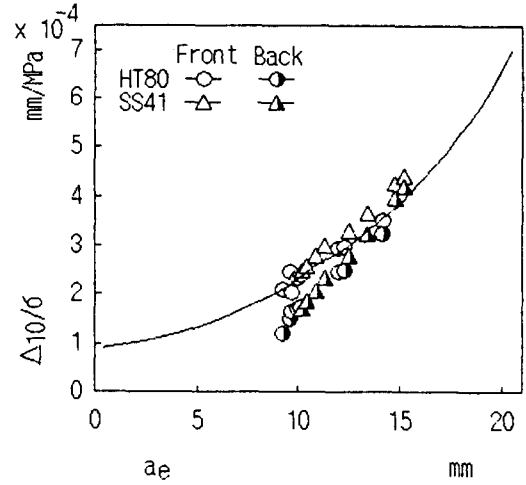


Fig. 3. Comparison of experimental and calculated values of crack opening displacement between center points 10mm away from crack.

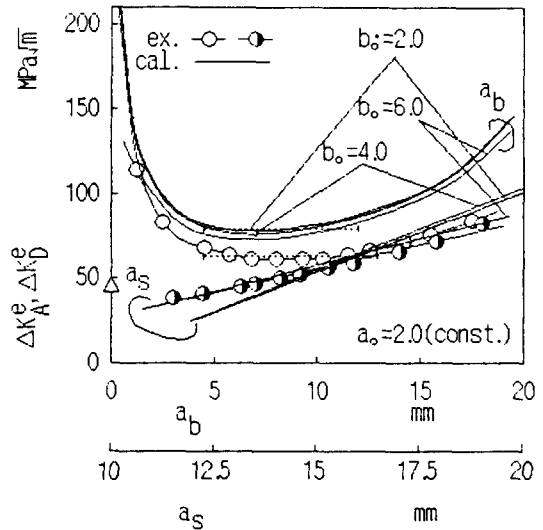


Fig. 4. Crack length on both face ( $a_s$ ,  $a_b$ ) versus stress intensity factor range given by formula (1)(2).

그러나  $a_b$ 가 그 이상 증대하면  $\Delta K_D^e$ 도 증대하는 경향을 나타내고 있다. 또 그림중에서 점선으로 표시한 수평선은 뒤에서 설명하는 정속도영역의 폭과 그 때의 평균균열전파속도로 부터 피로균열전파법칙 식(7)에 의해서 산정된  $\Delta K_D^e$ 값을 나타낸 것이다. 한편 계산

된 결과에 있어서도, 실험과 유사한 경향을 나타내고 있다. 그러나  $a_0$ 가 5-10mm 근처에서 최소값을 나타내고, 그 후 실험값보다는 상승의 정도가 약간 큰것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 7의 계산결과에서 균열이 판 두께를 관통하여 어느 정도 균열이 성장한 후, 빠른균열의 진전과도 잘 일치하고 있다. 이것에 의해  $\Delta K_A^e$ ,  $\Delta K_D^e$ 의 경향은 실험과 계산을 막론하고 잘 대응하고 있는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 피로균열의 전파거동

인장응력을 받는 표면노치 시험편의 실험 및 계산에서 얻어진  $N$ - $a$  곡선을 Fig. 5, 6에 나타낸다. Fig. 5는  $a_0=2.0mm$  일정의, Fig. 6은  $b_0=2.0mm$  일정의 결과이다. Fig. 5, 6에서는 균열발생 수명 등의 영향을 없애기 위하여, 전면에서의 균열 길이가 1.3mm 진전했을 때의 반복수를 0으로 했다. 전면에서의 균열전파거동( $N$ - $a$ 곡선)은 균열이 뒷면을 관통한 후에도 특별하게 큰 변화는 없고, 연속적인 성장을 나타내고 있다. 이것에 대하여 뒷면에서는 지극히 빠른 균열성장거동을 나타내고 있다. 한편 그림중의 실선은 피로 균열전파법칙 식(7), Newman-Raju의 식과 식(1), (2)에 의한 응력확대계수의 변동폭  $\Delta K$ 를 사용해서 personal computer에서 계산한 것이다. 이 경우에 있어서도 균열 발생 수명등의 영향을 없애기 위하여, 전면에서의 균열 길이가 1.3mm 진전했을 때의 반복수를 0으로 하였다. Fig. 5에서 초기균열 길이  $a_0$ 가 일정할 때, 초기균열길이  $b_0$ 가 깊어짐에 따라, 또 Fig. 6에서 초기균열 길이  $b_0$ 가 일정할 때, 초기균열길이  $a_0$ 가 길어짐에 따라 균열 관통 수명 및 파단수명이 짧아지는 것을 알 수 있다. 이 그림에서 피로하중을 받는 표면균열 재에 있어서 균열관통수명 및 파단수명은 균열의

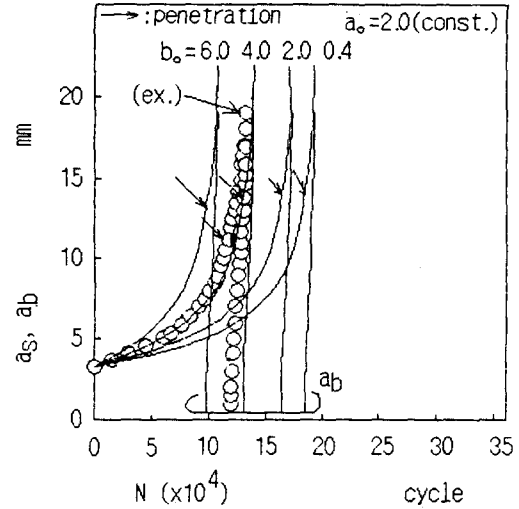


Fig. 5. Comparison of crack growth by variety of crack depth for  $a_0=2.0mm$  constant.

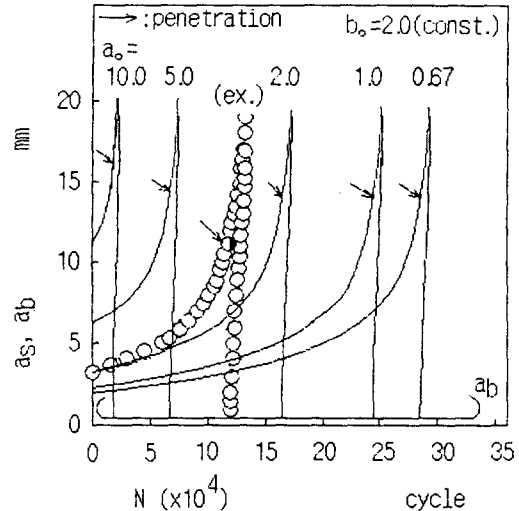


Fig. 6. Comparison of crack growth by variety of crack length for  $b_0=2.0mm$  constant.

깊이보다 표면길이에 더욱 의존한다는 사실은 저자들의 보고<sup>18)</sup>와 일치하는 것이다. 여기서  $\rightarrow$ 는 균열이 뒷면을 관통한 때를 나타낸다.

Fig. 7은 균열관통 후에 있어서 전면 및 뒷면에서의 균열성장특성을 나타낸 것이다. 이것에 의하면 뒷면에서의 균열성장특성은 대

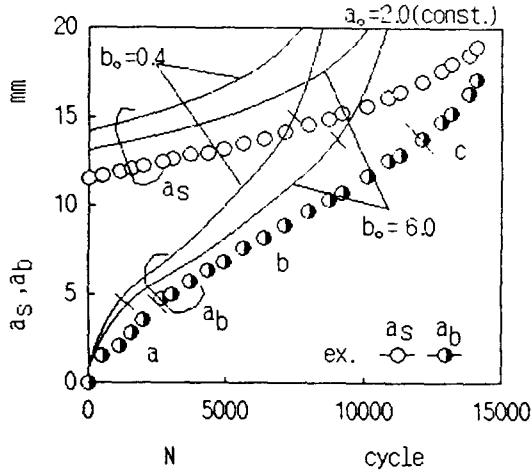


Fig. 7. Comparison of experimental and calculated values of crack growth after penetration (for  $a_0 = 2.0\text{ mm}$  constant).

략  $a, b, c$ 의 3영역으로 나누어지는 것을 알 수 있다.  $a$ 영역은 균열관통직후의 부분으로, 이 영역에서는 갑자기 균열이 발생하여  $10^{-3}\text{ mm/cycle}$  정도 또는 그 이상의 지극히 빠른 속도로서 균열이 성장하고 있다.  $a$ 영역에 이은  $b$ 영역에서는 어느 구간에 걸쳐서 균열은 거의 일정한 속도로서 성장하고 있다. 이후는 이 영역을 정속도영역이라고 하고,  $N-a_b$  곡선을 최소자승법에 의해 직선 근사하여, 그 직선과의 평균오차 1%까지의 영역을 정속도영역으로 하였다. 또 이  $b$ 영역에서의 평균균열전파속도를  $da_b^*/dN$ 로 나타내기로 한다.  $c$ 영역은 정속도영역을 지나서 뒷면의 균열속도가 가속되고, 전면에서의 균열 길이에 접근해가는 영역이다. 이 영역을 가속영역이라고 부르기로 한다.

실험에서 얻어진 정속도영역의 평균균열전파속도  $da_b^*/dN$ 와 gross stress의 변동폭  $\Delta\sigma$ 와의 관계를 Fig. 8에 나타낸다. 이것에 의하면,  $da_b^*/dN$ 와  $\Delta\sigma$ 와의 사이에는

$$da_b^*/dN = C_0 (\Delta\sigma)^n \quad (6)$$

로 되는 지수법칙이 있는 것을 알았다. 여기서,  $C_0$ 와  $n$ 은 재료정수이다. 더우기, 지수  $n$

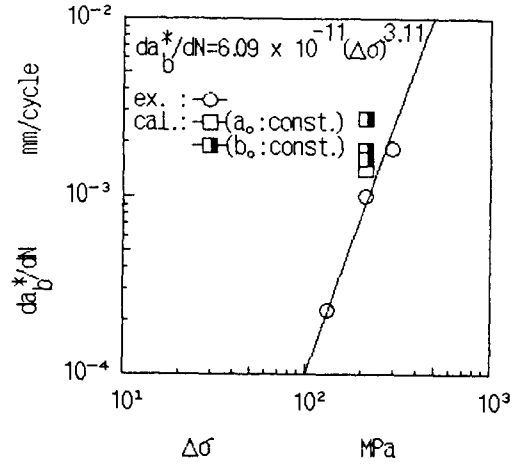
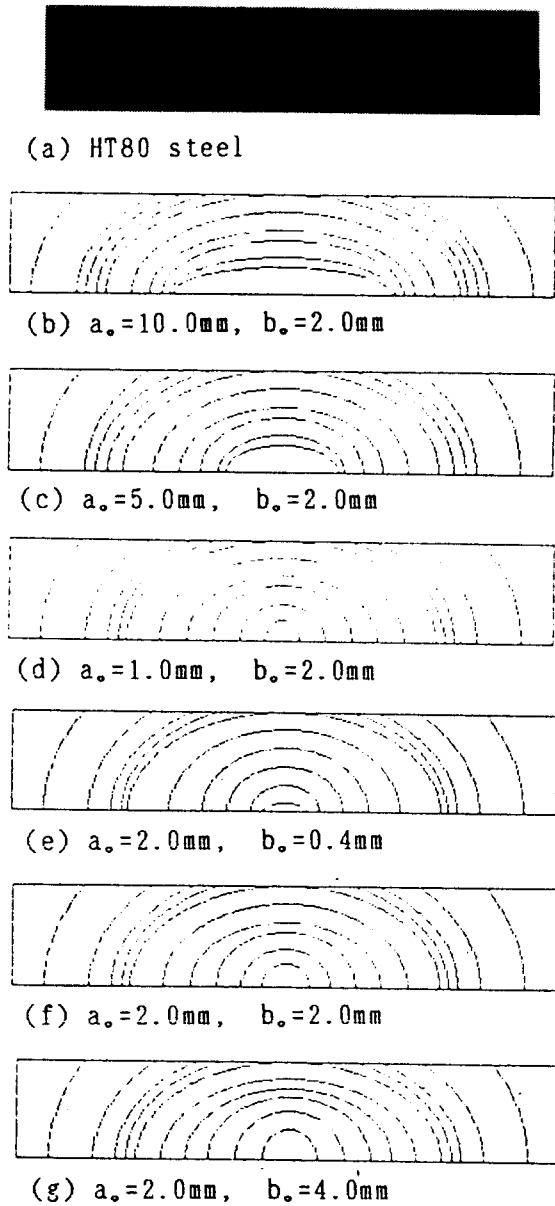


Fig. 8. Range of gross stress versus crack propagation rate on constant rate stage.

은 3.11로서, 다음에서 설명하는 피로균열 전파법칙  $\{da/dN = C(\Delta K)^m\}$ 에 있어서  $\Delta K$ 의 지수  $m = 3.11$ 과 일치하고 있다. 계산에서 얻어진 결과도 표면균열이 가장 긴  $a_0 = 10\text{ mm}$  ( $a_0/W = 0.4$ )의 경우가 약간 빠른 것을 제외하고는 실험결과<sup>(10,11)</sup>와 좋은 일치를 보이고 있다.

실험 및 계산에서 얻어진 피로파면의 거시적양상을 Fig. 9에 나타낸다. Fig. 9의 (a)는 초기노치반경  $a_0$ 가  $2.0\text{ mm}$ 때의 실험결과이다. 또 Fig. 9의 (b)~(g)는 앞에서 설명하는 방법에 의해 계산에서 얻어진 균열형상이다. Fig. 9의 (a)와 같은 beach mark로부터 얻어진 aspect ratio( $b/a_s$ )와 personal computer에 의해 계산에서 얻어진 aspect ratio를 비교해서 Fig. 10 (a), (b)에 나타낸다. Fig. 10(a)는 초기균열길이  $a_0$ 가  $2.0\text{ mm}$ 로 일정할 때의 결과이고, Fig. 10(b)는 초기균열길이  $b_0$ 가  $2.0\text{ mm}$ 로 일정할 때의 결과이다. 실험에서의 피로균열은 반원에 가깝고, 균열관통시에 있어서도 실측된 aspect ratio가 약 0.95이다. 이것에 대하여 계산에서 얻어진 aspect ratio는 균열이 성장함에 따라서 반타원형으로 되어 관통시의 값은 약 0.63~0.77



(a) experiment  
(b)-(g) calculations

Fig. 9. Fatigue crack shapes.

이고, 균열형상에 관계없이 계산값이 상당히 작게 되어 있다. 저자들이 보고<sup>14)</sup>한 양단을 핀으로 지지한 인장과 굽힘응력을 받는 시험편의 경우에는 굽힘응력의 크기에는 관계없

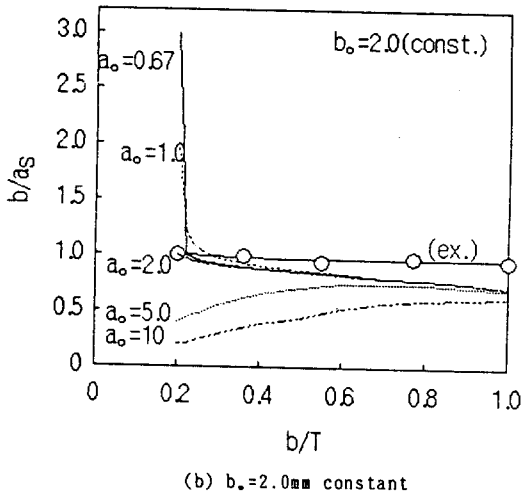
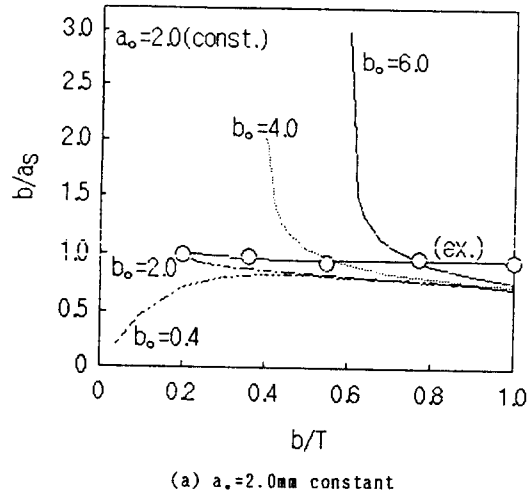
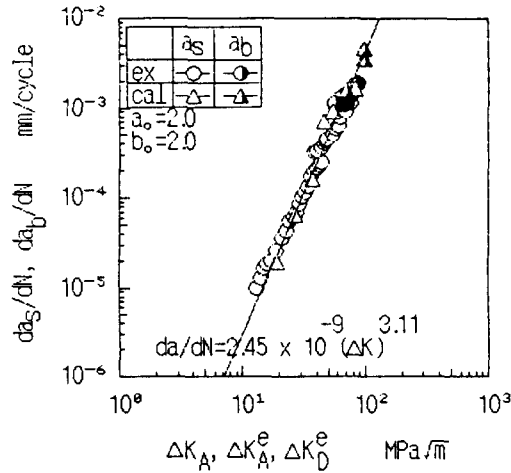


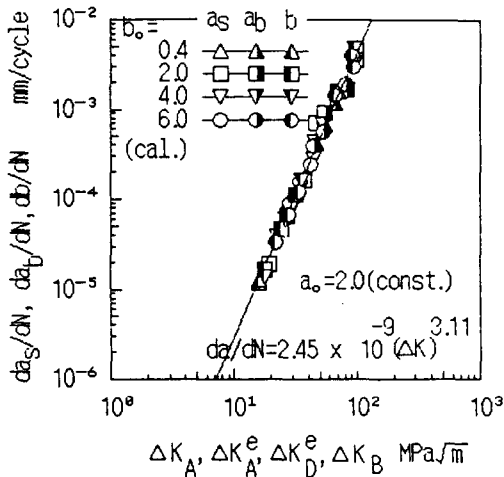
Fig. 10. Comparison of experimental and calculated aspect ratio.

이 실험에서 얻어진 aspect ratio는 계산값과 좋은 일치를 나타내었다. 이것으로부터 본 실험의 경우에는 시험편 양단의 구속에 의해서 시험편의 면외변형이 구속되었기 때문에 실험치의 aspect ratio가 큰 값을 나타내었다고 생각된다.

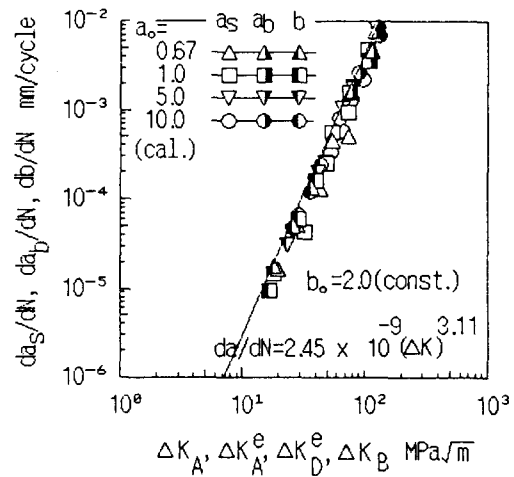
실측된 aspect ratio와  $N-a$  곡선 및 식 (1), (2)등을 사용하여 얻어진  $da/dN$ 와  $\Delta K$ 와의 관계를 Fig. 11 (a), (b), (c)에 나타낸다. Fig. 11 (a)는  $a_o=2.0mm$ ,  $b_o=2.0mm$  일 때의 실험과 계산의 결과를 합해서 나타



(a) Comparison of ex. and cal. for  $a_0=b_0=2.0\text{mm}$



(b)  $a_0=2.0\text{mm}$  constant(cal.)



(c)  $b_0=2.0\text{mm}$  constant(cal.)

Fig. 11. Crack growth rate and stress intensity factor range for front and back faces.

낸 것이다. 이 경우 실험과 계산을 막론하고 좋은 일치율을 나타내고 있다고 생각된다. 그리고 Fig. 11 (b)는  $a_0=2.0\text{mm}$ 일 때, 초기 균열 깊이를 변화시킨 경우의 계산 결과이고, Fig. 11 (c)는  $b_0=2.0\text{mm}$ 일 때, 초기 균열 깊이를 변화시킨 경우의 계산결과이다. 각각의 그림에서  $a_s$ 는 균열이 판 두께를 관통하기 이전 및 이후의 전면 균열길이에 대한 결과이고,  $a_b$ 는 균열이 판 두께를 관통한 후, 뒷면의 균열길이에 대한 결과이다. 또한

$b$ 는 균열 깊이방향의 결과이다. 이것에 의하면  $da/dN$ 와  $\Delta K$ 와의 관계는 시험편의 초기 균열치수 또는 균열관통 전후에 관계없이 아래 식으로 잘 정리될 수 있는 것을 알았다.

$$da/dN = 2.45 \times 10^{-9} (\Delta K)^{3.11} \quad (7)$$

#### 4.2 균열의 성장 및 관통거동

시험편의 전면에서 피로균열이 1.3mm 성장하여 관통하기까지의 반복수( $N_p$ )와 균열이



관통해서 뒷면에서의 균열 길이가 전면의 균열 길이에 접근하여 파단하는 파단반복수 ( $N_f$ )의 실험치와 계산치를 초기균열 길이  $a_0$ 와 초기균열 깊이  $b_0$ 에 대하여 Fig. 12에 나타낸다.

계산에서 얻어진 피로균열 관통수명 ( $N_p$ ) 및 파단반복수 ( $N_f$ )는 균열 길이 및 깊이가 커짐에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 이러한 감소비율은 균열 길이보다는 표면균열 길이 쪽이 현저한 감소 경향을 나타내고 있다. 따라서 구조물에 있어서 피로수명은 균열깊이도 관여하지만, 그것보다는 표면균열길이에 더욱 의존<sup>18)</sup> 한다는 사실을 알 수 있다. 한편 실험에 있어서의 결과는 계산보다 약간 짧은 수명을 나타내고 있다.

다음은 전면의 균열이 뒷면에 관통하고 나서 뒷면의 균열 길이가 성장하여 전면의 균열길이에 접근하여 파단될 때 까지의 뒷면 균열길이 성장에 대한 반복수  $N_{abf}$ 를 초기균열 길이  $a_0$ 와 초기균열 깊이  $b_0$ 에 대하여 Fig. 13에 나타낸다. 이 그림에서 초기균열 길이가 길어짐에 따라  $N_{abf}$ 가 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 표면의 균열 길이가 길어짐에 따라 관통 후, 뒷면의 균열 길이가 매우 빠른 속도로 전면의 균열 길이에 접근

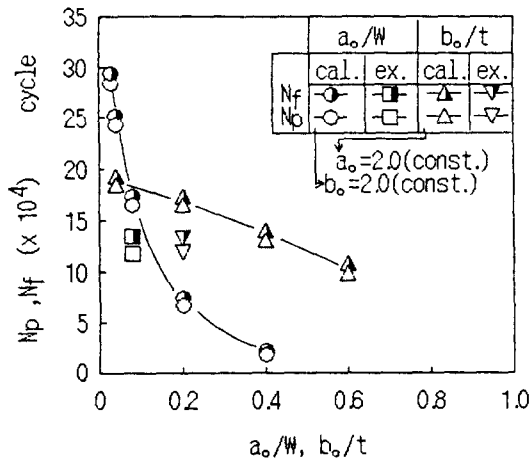


Fig. 12. Penetration cycle and failure cycle versus initial crack length and depth.

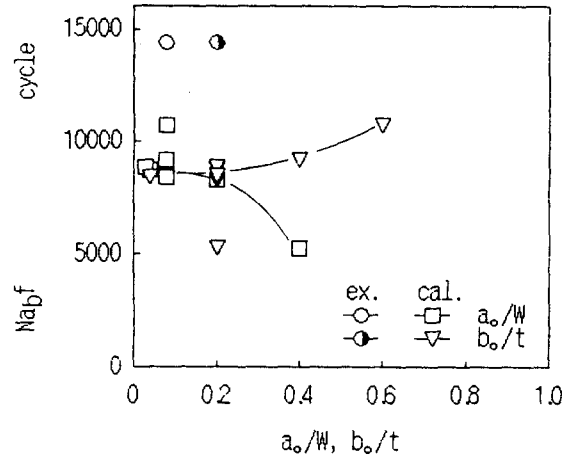


Fig. 13. Failure cycle of back face crack length after penetration versus initial crack length and depth.

하고자 하기 때문이다. 한편 초기균열깊이는 깊어짐에 따라  $N_{abf}$ 가 증가함을 알 수 있다. 이것은 균열깊이가 깊어짐에 따라 관통시 전면균열 길이가 짧기 때문이다.

LBB설계에 있어서 균열 관통 때의 표면에서의 균열 길이  $a_p$ 는 중요한 것이다. 그래서 관통시 표면에서의 균열 길이  $a_p$ 를 초기균열 길이  $a_0$ 와 초기균열 깊이  $b_0$ 에 대하여 Fig. 14에 나타낸다. 초기균열 길이  $a_0$ 는 균열 길이가 길어짐에 따라 관통시의 균열길이가 길게 되는 것을 알 수 있다. 그러나 초기균열 깊이  $b_0$ 는 깊어 짐에 따라서 관통시의 균열길이가 짧게 되는 것을 알 수 있다. 한편 실험의 경우는 계산결과보다 적은 것을 알 수 있다. 이런 이유는 4.1절에서 언급하였다.

식 (1), (2)에서 얻어지는 응력확대계수에 의해 균열관통 후의 균열 형상이 어느 정도 정확하게 평가 될 수 있는가를 검토하기 위해 Fig. 7과 같은  $N-a$  곡선에서 뒷면과 전면에서의 균열 길이 비  $b_0/a_0$ 를 각 균열형상에 대하여 구한 계산값과 실험값을 비교하여 Fig. 15에 나타낸다. 이것은 동일한  $a_0$ 에 대하여 계산값과 실험값을 비교한 것이다. 실험에 있어서는 균열이 성장함에 따라  $a_0/a_s$ 의

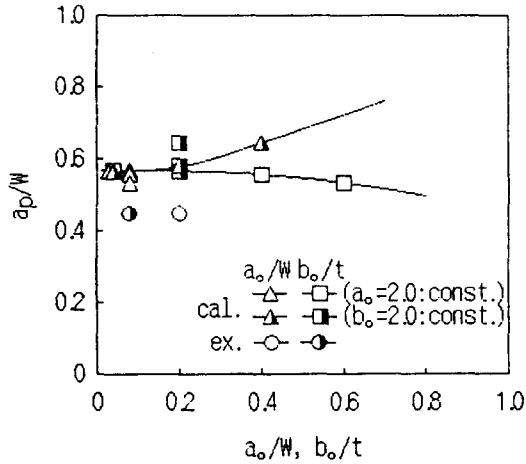


Fig. 14. Crack length on penetration versus initial crack length and depth.

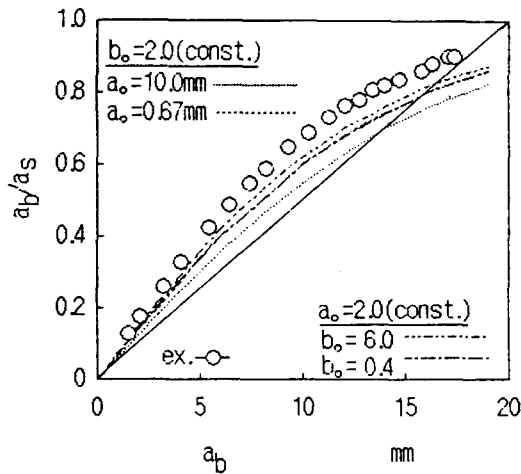


Fig. 15. Crack length ratio  $a_b/a_s$  versus back face crack length  $a_b$ .

값이 크게 증가하다가 파단시점에 가까워짐에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있다. 한편 초기표면 균열 길이가 증가함에 따라  $a_b/a_s$ 는 감소하는 경향을 나타내고, 초기균열길이가 증가함에 따라  $a_b/a_s$ 는 실험값에 가까워지는 것을 알 수 있다. 이러한 것으로 부터 식 (1), (2)로서 얻어지는 응력확대계수에 의해 균열관통후의 균열형상을 정도 좋게 평가가 가능하리라 생각된다.

## 5. 결 론

HT80강을 사용해서 인장응력을 받는 표면 균열 시험편에 대한 실험 및 실험과 같은 조건하에서 초기표면균열 길이와 초기균열 깊이를 변화시켜서 피로수명과 균열관통거동을 검토 한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 피로균열이 관두계를 관통한 측(뒷면)에 있어서의 균열성장거동은 실험 및 계산에 관계없이 특이한 것이고,  $a, b, c$ 의 3영역으로 구분되었다.

(2) 균열 관통후의 응력확대계수 평가식과 피로균열 전파법칙을 사용함으로써, 관 두계 관통후의 특이한 피로균열전파 특성을 실험 및 계산에 관계없이 정량적으로 평가할 수 있는 것을 알았다.

(3) 균열관통 수명 및 파단수명은 초기균열 길이 보다는 초기표면 균열 길이에 더욱 더 의존하는 것을 알았다.

(4) 인장을 받는 표면균열 시험편의 피로 파면 형상은 거의 반원에 가깝고, Newman-Raju의 응력확대계수 평가식을 사용하여 계산에 얻어진 aspect ratio비는 실험에 비해 작은 값을 나타내었다.

## 참 고 문 헌

- 1) IMO Resolution A328 (IX)(1975): Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk. Adopted on 12 Nov., 1.
- 2) 矢川元其·桑原和夫·高橋由起夫(1984): 輕水爐配管のLBB成立成と設計合理化, 最近の動向, 原子力工業, 30-11, 36.
- 3) 高橋 克·熊谷義一·十河 宏(1981): 高壓容器破壊事例解析への破壊力學の適用, 壓力技術, 19-1, 16.
- 4) 川原正言·栗原正好(1975): 表面き裂の疲労

- による伝播成長過程に関する予備的考察, 137, 297.
- 5) 飯野 暢・阪野賢治・上村 武・小林頼光(1975) : 疲労き裂の進展を考慮した構造物の安全性評価に関する考察, 石川島播磨技報, 15-4, 459.
  - 6) 真谷提郎・牛島正夫・今村成雄・阪井大輔・平田隆明(1974) : LNG Tank用9%Ni鋼Tank材の疲労き裂伝播特性, 造船学会論文集, 136, 267.
  - 7) J.G. Kaufman, R. J. Bucci and R. A. Kelsey (1980): Fracture Mechanics Aspects of the Structural Integrity Technology of Spherical Aluminum Containment Vessels for LNG Tankers. 102-7, 303.
  - 8) 坂田信二・岡村 隆・榎本邦夫・町田 進・深倉寿一(1986) : BWR 一次系Stainless鋼配管の健全性評価, 日本原子学会要旨集(第1分冊), 187.
  - 9) T. Sakai, H. Takashima, K. Tanaka, H. Matsumae and H. Yajima (1975): Studies on Nine Percent Nickel Steel for Liquefied Natural Gas Carriers. ASTM STP 579, 205.
  - 10) 安藤 柱・藤林伸平・南 起祐・高橋雅之・小倉信和(1986) : 表面き裂材の疲労寿命とき裂貫通挙動(第1報 引張荷重を受ける場合), 日本機械学会論文集, 52-483, 2463.
  - 11) K. Ando, S. Fujibayasi, K. W. Nam, M. Takahasi and N. Ogura (1987): The Fatigue Life and Crack Through Thickness Behavior of a Surface-Cracked plate (For the Case of Tensile load). JSME Inter. J., 30-270, 1898.
  - 12) 南 起祐・藤林伸平・安藤 柱・小倉信和(1987) : 表面き裂材の疲労寿命とき裂貫通挙動(第2報 応力集中の効果), 日本機械学会論文集, 53-487, 444.
  - 13) K. W. Nam, S. Fujibayasi, K. Ando and N. Ogura (1988): The Fatigue Life and Crack Through Thickness Behavior of a Surface-Cracked plate (Effect of Stress Concentration). JSME Inter. J., 32-2, 272.
  - 14) 南 起祐・松井健太郎・安藤 柱・小倉信和(1989) : 表面き裂材の疲労寿命とき裂貫通挙動(第3報 引張り)と曲げの組合せ応力を受ける場合), 日本機械学会論文集, 55-516, 1740.
  - 15) 南 起祐・宮里直矢・安藤 柱・小倉信和(1989) : 疲労き裂の板厚貫通挙動とその寸法効果, 圧力技術, 27-4, 193.
  - 16) J. C. Newman, Jr. and I. S. Raju (1987): An Empirical Stress - Intensity Factor Equation for the Surface Crack. Eng. Fract. Mech., 15-1, 185.
  - 17) J. Eftis, and H. Liebowitz (1972): On the modified Westergaard Equations for Certain Plane Crack Problems. Int. J. Fract. Mech., 8-4, 383.
  - 18) 南 起祐・酒井 讓・安藤 酒・小倉信和(1988) : 繰り返し荷重を受ける平板および配管のLBB条件に関する研究・圧力技術, 26-5, 300.