

◎ 論 文

응력집중부를 갖는 표면균열재의 균열길이 변화에 따른 피로거동

남 기 우* · 김 선 진*

(94년 12월 20일 접수)

The Fatigue Behavior by Variety of Crack Length of Surface Cracked Plate with Stress Concentration Part

K.W. Nam · S.J. Kim

Key Words : Fatigue(피로), Leak before break(파단전누설), Penetration behavior(관통거동), Surface crack(표면균열), Crack length(균열길이), Stress intensity factor(응력확대계수), Stress Concentration(응력집중)

Abstract

Surface defects in structural members are apt to be origins of fatigue crack growth, which may cause serious failure of whole structures. Most structure has a part where stress concentrates such as welded joints, corner parts, etc. And then, analysis on crack growth and penetration from these defects, therefore, is one of the most important subjects for the reliability of LBB design.

The present paper has performed an experimental and analysis on the fatigue crack propagation by variety in crack length of surface cracked plate with stress concentration part. The crack growth behavior can be explained quantitatively by using Newman-Raju equation and the stress partitioning method proposed by ASME B&P Code Sec. XI.

The stress concentration factor K_t has affected on the crack growth. The crack growth after penetration depends upon the initial front side crack length.

1. 서 론

손상허용설계에서 LBB(leak before break)라는

것을 배관, 압력용기, tank등에 있어서 안전성을 필요로 하는 구조물의 설계에 사용되게 되었다. LBB는 구조물에 균열이 발생하여도 사용기간중

* 정회원, 부산수산대학교 공과대학.

에 중대한 파손에 이르지 않는 것이 보증되면 좋다는 생각을 기본으로 하고 있다. LBB에서는 배관 또는 용기의 내벽에 존재하는 3차원균열이 성장하여 판두께를 관통하므로써 내용물이 누설할 때, 배관 또는 용기가 불안정파괴하지 않음은 물론이고, 균열이 관통한 후에도 일정기간 또는 어떤 크기의 균열성장까지 불안정파괴를 일으키지 않는 것이 요구되고 있다. 따라서 표면에 발생한 미소균열이 성장해서 판두께를 관통하기까지의 수명과 관통시의 균열형상 변화, 더우기 균열관통후의 성장거동을 정밀하게 평가하는 것이 필요하다. 표면균열이 관통하기까지에 관한 연구는 다방면으로부터 활발한 연구가 실시되어, 유용한 결과가 많이 얻어져 그 특성은 거의 해명되었다고 할 수 있다. 그러나, 표면균열이 판두께를 관통하여 완전한 2차원 관통균열이 되기까지의 균열성장거동에 관한 연구⁽¹⁾는 거의 없으며 불분명한 점이 많다. 그래서, 저자⁽²⁾⁽³⁾는 균열관통후의 응력확대계수평가 모델을 제안하여, 평활재 및 응력집중재의 균열 성장거동을 정량적으로 평가할 수 있었다.

이와같은 상기의 실험들은 표면균열길이가 반원형인 경우에만 실시하였다. 그러나 LBB설계의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 균열길이를 변화시켜 균열의 성장거동과 관통거동을 정량적으로 평가하는 것은 매우 중요하리라 생각된다. 따라서, 전보⁽⁴⁾에서는 평활재의 표면균열길이와 깊이를 변화시켜 조사한 결과, 관통 및 관통후의 균열성장거동은 표면균열길이에 더욱 의존한다는 것을 알았다.

본 논문에서는, 응력집중부에 표면균열을 갖는 표면균열재의 실험결과와 표면균열길이 변화에 의한 피로수명과 균열관통거동을 검토하고, 그 특성을 해명하였다.

2. 실험 및 계산방법

시험편은 인장강도 996.4MPa, 항복응력 943.4MPa, 연신율18.3%의 기계적 성질을 갖는 3%NiCrMo강으로, 화학성분(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.

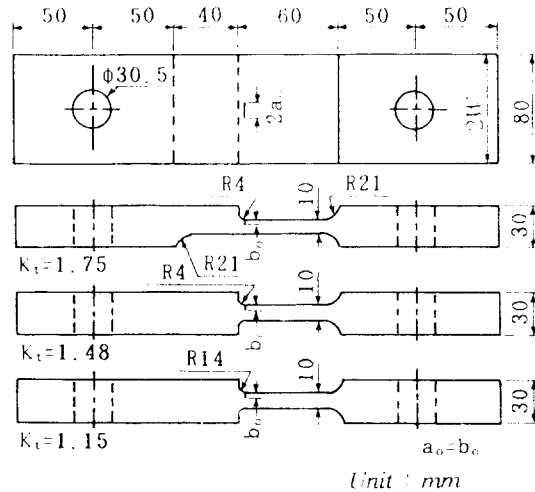


Fig. 1 Dimensions of specimens ; all dimensions in mm

Table 1. Test condition and results

Speci. No.	t mm	W mm	a ₀ mm	b ₀ mm	$\Delta\sigma_T$ MPa	K _t	a _p mm	N _p cycle	N _f cycle	N _{abr} cycle
TAC-1	10	40	2	2	198.6	1.15	13.95	148,130	179,990	31,860
TAC-2	10	40	2	2	176.5	1.48	16.40	167,870	302,210	34,340
TAC-3	10	40	2	2	176.5	1.75	16.80	213,210	241,310	28,100

t : thickness

W : plate width

a₀ : half of initial front side crack length

b₀ : initial depth crack length

$\Delta\sigma_T$: range of gross stress

K_t : stress concentration factor

a_p : front side crack length at penetration

N_p : penetration cycle

N_f : fracture cycle

N_{abr} : fracture cycle of back side crack length after penetration

시험편은 Fig. 1과 같이 응력집중을 일으키기 위하여 필렛을 갖는 것이고, 필렛의 지단부 최대응력 위치에 반경 $a_0=2.0\text{mm}$ 의 반원노치를 방전가공하였다. 시험편의 응력분포는 유한요소법으로 해석하였고, 각 시험편의 응력집중계수 K_t 는 1.15, 1.48 및 1.75이다. 시험편의 치수 및 시험조건은 Table 1에 나타낸다.

피로시험은 전기유압식 피로시험기를 사용하여, 실온대기중에서 실시하였다. 피로시험 조건은 하중파형 정현파, 주파수 1-12Hz, 응력비 $R=0.1$ 의 하중제어로 인장-인장 피로시험을 하였다. 시험편의 반원노치를 가공한 쪽(전면)의 균열길이 $2a_s$, 균열이 관통한 쪽(후면)의 균열길이 $2a_b$ 는 쌍안실체현미경을 사용하여 전후면의 일정균열 성장(1.5-2.0mm)마다 측정하였다. 또, 균열길이 b 는 Beach Mark법에 의하여 파단 후에 측정하였다.

Table 2. Calculation results

Speci. No.	a_0 mm	b_0 mm	$a_p(I/II)$ mm	$N_p(I/II)$ cycle	$N_r(I/II)$ cycle	$N_{abr}(I/II)$ cycle
TAC-1	2	2	14.87	225,140	245,680	20,540
			16.23	266,930	283,400	16,470
	2.7	2	14.88	189,870	210,350	20,480
			16.23	266,680	243,000	16,320
	4	2	14.95	145,200	165,310	20,110
			16.29	175,500	191,700	16,200
	8	2	15.67	77,500	95,100	17,600
			16.87	95,430	110,000	14,570
			19.76	32,500	41,590	9,520
			20.48	39,670	47,600	8,410
TAC-2	2	2	16.22	240,000	266,600	26,600
			21.18	428,500	440,750	12,250
	2.7	2	16.22	202,200	228,700	26,500
			21.19	366,200	378,400	12,200
	4	2	16.28	155,000	181,280	26,280
			21.20	287,900	300,000	12,200
	8	2	16.83	83,800	107,380	23,580
			21.43	162,800	174,300	11,500
	16	2	20.46	35,800	48,320	13,130
			23.53	69,100	76,200	7,970
TAC-3	2	2	18.97	167,800	185,230	17,430
			23.42	253,700	262,220	8,520
	2.7	2	18.97	143,500	160,900	17,400
			23.42	220,000	228,800	8,800
	4	2	19.00	112,300	129,560	17,260
			23.43	176,500	185,000	8,500
	8	2	19.35	62,900	79,000	16,100
			23.58	103,150	111,360	8,210
	16	2	22.08	26,960	36,340	10,170
			25.17	44,180	49,160	6,070

I : method I, II : method II

한편 계산은 실험에 사용한 각 시험편에 대하여, 균열깊이 $b_0=2.0\text{mm}$ 로 일정하게 유지하였고, 표면 초기 균열길이 a_0 만 변경하였다. 계산에 사용한 초기 균열길이 및 계산결과를 Table 2에 나타낸다.

3. 응력확대계수의 평가

전보⁽⁵⁾에서 설명하였듯이 복잡한 응력장에 있어서 임의의 응력분포를 인장응력 σ_m 과 굽힘응력 σ_b 로 분해하는 방법으로서 ASME B&P Code Sec.XI⁽⁶⁾의 방법이 유명하다. 이 방법으로 응력을 분해하여 응력확대계수를 평가하는 방법을 I방법이라 부르기로 한다. 그리고 Fig. 2에서와 같이 $S_1=S_2$ 가 되도록 직선AA'를 그어서, 응력을 분해하여 응력확대계수를 평가하는 방법을 II방법이라 부르기로 한다.

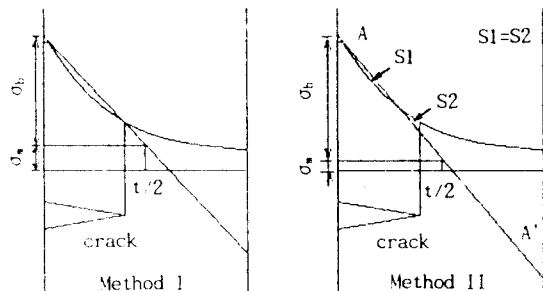


Fig. 2 Stress distribution and its partitioning method into membrane and bending stress

표면균열 관통전의 응력확대계수 평가는 I방법 및 II방법에서의 분해응력을 Newman-Raju⁽⁷⁾식에 대입하여 평가하였다. 이때, 표면의 굽힘응력 σ_b 성분만은 0.8배⁽⁸⁾하여 평가하기로 하였다. 그리고, 균열관통후의 응력확대계수 K_{A^c} , K_{D^c} 의 평가는 균열이 관두계를 관통한 후의 균열형상과 개구상황을 모델화한 Fig. 3의 A점 및 D점에서 다음과 같은 평가식을 사용하였다⁽²⁾.

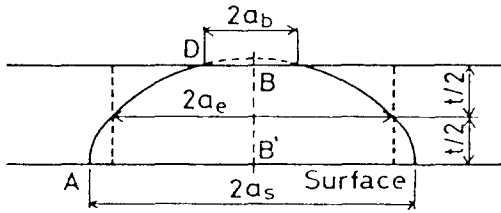


Fig. 3 Crack model to evaluate the stress intensity factor after penetration

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

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

여기서 a_s 및 a_b 는 각각 전면 및 후면에서의 균열길이, a_e 는 판두께 중앙부에서의 균열길이를 나타낸다. $a_e = 0.5\sqrt{(3a_s^2 + a_b^2)}$, $\eta_s = a_s/W$, $\eta_b = a_b/W$, $F(\eta) = (1 - 0.5\eta + 0.370\eta^2 - 0.044\eta^3) / \sqrt{1-\eta}$.

$\delta(a) = 4\sigma a(1 - \nu^2) V(\eta)$, ν 는 포아송비,
E는 종탄성계수,

$$V(\eta) = (-0.071 - 0.535\eta + 0.169\eta^2 + 0.020\eta^3 - 1.071(1/\eta) \log(1-\eta))$$

4. 결과 및 고찰

4.1 피로균열의 전파거동

실험 및 계산에서 얻어진 a - N 곡선의 일례를 Fig. 4에 나타낸다. 그림에서 □는 TAC-3 실험결과이고, 점선은 초기 표면균열길이 변화에 따른 계산결과이다. X표시는 I방법, 점선표시는 II방법에 의한 계산결과이다. 이러한 계산은 위에서 설명하는 피로균열 전파법칙, Newman-Raju식 및 식(1), (2)에 의하여 얻어진 a - N 곡선이다. 이 그림에서는 균열발생수명등의 영향을 없애기 위하여, 실험 및 계산에서 초기 표면균열길이가 1.3mm진전했을 때의 반복수를 0으로 하였다. 또한 계산에서의 균열 길이는 표면균열길이가 1.3mm진전하였을 때, 실

험에서 얻어진 균열깊이를 모든 표면균열길이에 적용하였다.

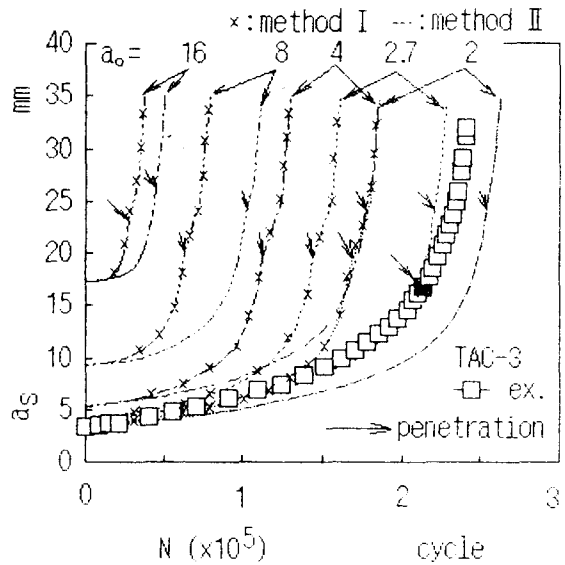


Fig. 4 Comparison of crack growth by variety of crack length

이 그림에서 피로균열전파는 균열이 후면에 관통한 후에도 전면에서의 균열진전은 일정한 성장을 나타내고 있다. 그리고 표면균열길이 $a_0=2.0$ mm를 보면, 계산은 실험 결과와 유사한 진전경향을 나타내고 있다고 생각된다. 그림에서 →는 균열이 후면에 관통한 때를 나타내고 있다. 이 그림에서 수명의 평가는 I방법이 II방법보다 단수명을 나타내며 안전측의 평가를 하고 있다. 이것으로서 I방법을 하한, II방법을 상한으로서 수명평가를 할 수 있다고 생각된다. 그리고, 초기 표면균열길이 변화에 따른 수명은 초기 표면균열길이가 길어질수록 현저한 감소경향을 나타내고 있다.

4.2 피로균열 관통후의 거동

균열관통후의 성장특성을 Fig. 5에 나타낸다. 그림에서 실험 및 계산의 반복수는 균열이 후면에 관통한 때를 0으로 하였다. 이와같이 응력집중재에 있어서도, 후면에서의 균열성장특성은 평활

재의 경우와 같이 A, B, C의 3영역으로 나누어지는 것을 알 수 있다. A영역은 균열관통직후의 부분으로, 이 영역에서는 갑자기 균열이 발생하여 10^{-4} mm/cycle 정도의 속도 또는 그 이상의 지극히 빠른 속도로서 균열이 성장하고 있다. 이 영역의 균열길이를 Δa_{ba} 로 나타낸다. B영역에서는 어느 구간에 걸쳐서 균열은 거의 일정한 응력확대계수의 변동폭(TAC-1:60MPam^{1/2}, TAC-2:75MPam^{1/2}, TAC-3:62MPam^{1/2})으로 성장하고 있다. 이 영역을 정속도영역이라고 하고, a_b -N곡선을 최소자승법에 의해 직선근사해, 그 직선과의 평균오차가 1%까지의 영역을 정속도영역으로 하였다. B영역에서의 평균균열 전파속도 da_b/dN 은 초기표면 균열길이가 길어짐에 따라서 더욱 빠른 전파속도⁽⁴⁾를 나타내었다. C영역은 정속도영역을 지나서 후면의 균열속도가 가속하고, 전면의 균열길이에 접근해가는 영역이다.

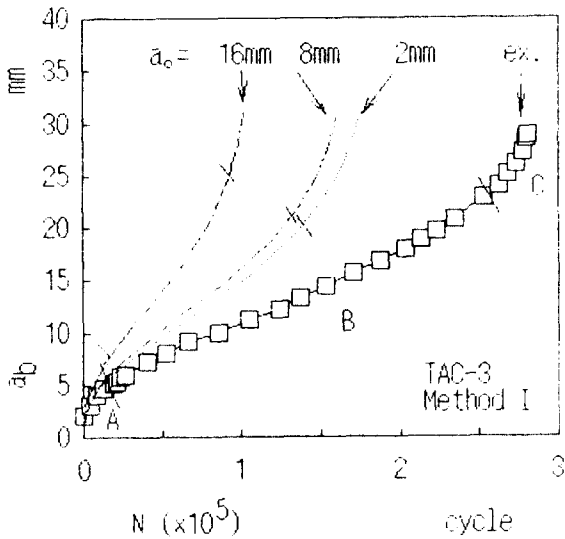


Fig. 5 Comparison of crack growth on back side after penetration by variety of crack length

계산에서 얻어진 A영역의 균열길이 Δa_{ba} 와 관통시 전면의 균열길이 a_p 와의 관계를 Fig. 6에 나타낸다. ▼표는 평활재의 계산결과이다. 이 그림에서 균열

길이 Δa_{ba} 는 관통시 표면의 균열길이에 의존하고 있는 것을 알 수 있다. 그림에서 점선은 초기표면 균열비가 $b_0/a_0=1$ 인 실험에서 얻어진 결과⁽⁹⁾이다. 계산과 실험이 다른 것은, 시험편형상에 따라서 관통시의 전면균열길이가 계산이 실험보다 길기 때문이다.

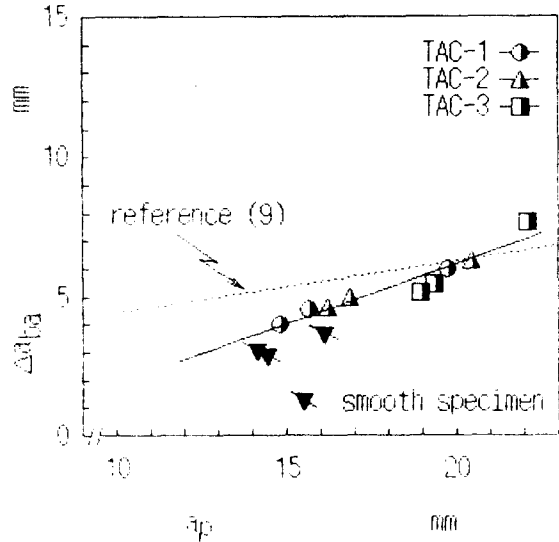


Fig. 6 Comparison of crack length at penetration with "A" stage length on back side

이상에서 얻어진 균열관통후의 성장특성을 Fig. 7에 나타내면, A, B, C영역의 특성은 다음과 같은 경향을 알 수 있다.

(1) A영역에서의 균열전파길이는 Fig. 5, 6에서 알 수 있듯이 초기표면 균열길이에 따라서 상당히 다르지만, 그 길이는 관통시 관통시의 전면균열길이에 비례하는 경향을 알 수 있다.

(2) B영역에서의 균열전파속도는 초기표면 균열길이가 길어짐에 따라서 빠른 경향을 나타내었다.

(3) 초기표면 균열길이가 짧을 때에는 Fig. 7에서와 같이 A영역은 짧고, B영역은 긴 경향을 나타내고 있다. 그러나, 초기표면 균열길이가 길어짐에 따라서 A영역은 길어지고, B영역은 짧아지는 경향이다.

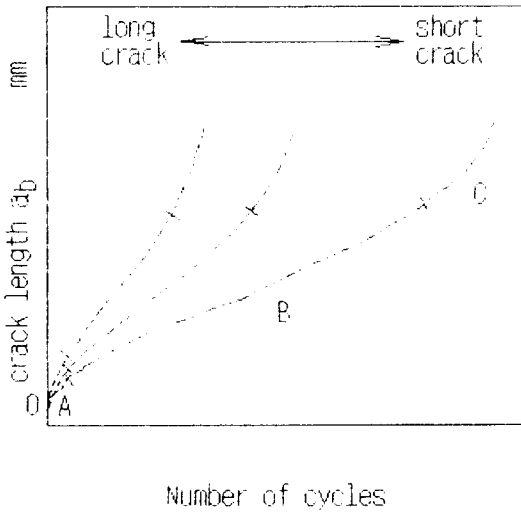


Fig. 7 Model of crack growth on back side by variety of crack length

4.3 피로균열 형상

실험에서 얻어진 피로파면의 거시적양상을 Fig. 8에 나타낸다. Fig. 8의 파면(a)는 응력집중계수 K_t 가 1.75인 TAC-3시험편에서의 결과이다. 이와같은 파면에서, K_t 가 크게 됨에 따라서 피로균열형상이 타원화하는 경향을 알 수 있었다. 더우기 균열관통후의 Beach Mark형상은 거의 반타원의 일부로 되어 있는 것을 알 수 있었다. Fig. 8(b)-(k)는 TAC-3시험편에서의 응력분포를 Fig. 2의 방법으로 분해하여, Newman-Raju의 식에 대입하여 얻은 응력확대계수 및 식(1), (2)로 평가된 응력확대계수의 변동폭을 사용하여 계산에서 얻어진 균열형상이다. 이와같은 계산에서 표면에서의 굽힘 응력성분은 0.8배로 하였다. 또한 이때의 피로균열 전파법칙으로서 3%NiCrMo강의 평활재시험편에서 얻어진 다음식을 사용했다.

$$da/dN \text{ (mm/cycle)} = 9.97 * 10^{-10} (\Delta K)^{3.33} \text{ (Mpa}\sqrt{\text{m}})$$



(a) $a_o = 2.0\text{mm}$



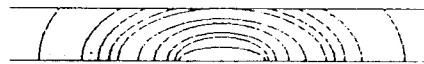
(b) $a_o = 2.0\text{mm}$



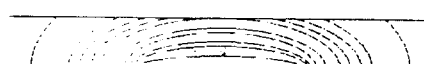
(c) $a_o = 2.7\text{mm}$



(d) $a_o = 4.0\text{mm}$



(e) $a_o = 8.0\text{mm}$



(f) $a_o = 16.0\text{mm}$

method I



(g) $a_o = 2.0\text{mm}$



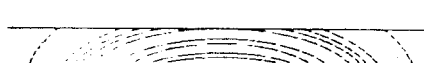
(h) $a_o = 2.7\text{mm}$



(i) $a_o = 4.0\text{mm}$



(j) $a_o = 8.0\text{mm}$



(k) $a_o = 16.0\text{mm}$

(a) experiment (TAC-3)

(b)-(k) calculations

Fig. 8 Fatigue crack shapes.

All b_o in 2.0 mm

Fig. 8(a)와 같은 beach mark로부터 얻어진 종횡비(aspect ratio)와 계산에서 얻어진 종횡비를 비교하여 Fig. 9에 나타낸다. $a_0=2.0\text{mm}$ 인 실험치와 계산치를 비교한 경우, I방법에 의한 종횡비는 실험치와 극히 좋은 일치를 나타내고 있다. 그리고 응력분해법에 의한 차이를 보면, Fig. 2와 같이 II방법이 I방법보다 굽힘응력을 크게 평가하기 때문에 II방법에 의한 종횡비는 I방법에 의한 값보다 적게 되어 있다. 이러한 경향은 응력집중계수 K_t 가 클수록 실험치와 비교하여 II방법이 작은 값을 나타내고 있다. 즉, 관통시의 전면관통길이는 II방법이 I방법에 의한 값보다 길게 평가되고 있다. 또 초기 표면균열길이가 길어질수록 깊이 방향의 균열진전이 표면방향의 균열진전보다 빠른 경향을 알 수 있으며, 판두께 관통시의 균열형상은 초기표면 균열길이가 $a_0=8.0\text{mm}$ 이하에서는 I방법과 II방법에서 각각 거의 유사한 것을 알 수 있다.

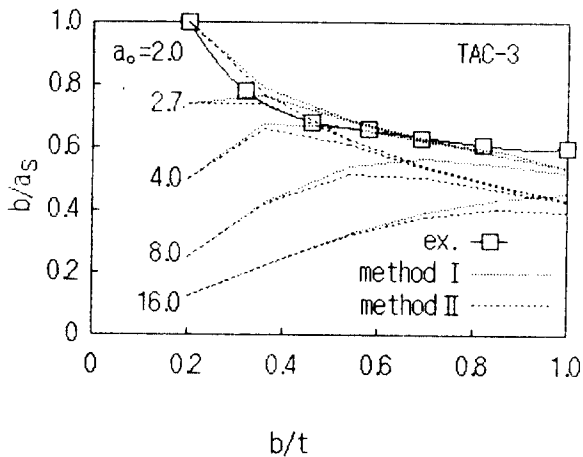


Fig. 9 Comparison of method I aspect ratio and method II aspect ratio

LBB설계에 있어서는 균열관통시의 균열길이는 중요한 것이다. 그래서 관통시 표면의 균열길이 a_0 와 초기표면 균열길이 a_0 를 비교하여 Fig. 10에 나타낸다. 이 그림에서 초기표면 균열길이가 길어짐

에 따라서 균열관통시의 균열길이가 점점 길게 됨을 알 수 있다.

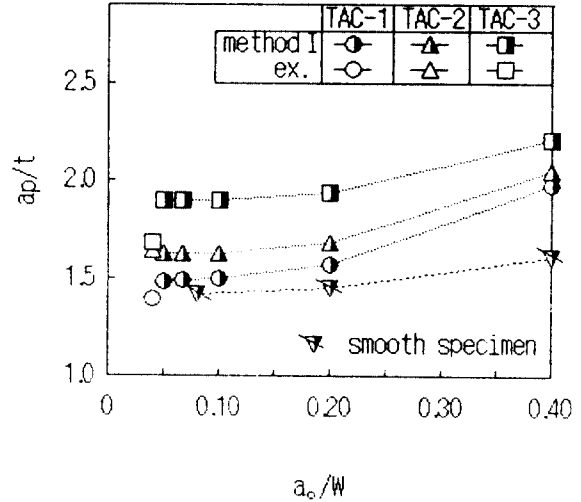


Fig. 10 Comparison of crack length at penetration with initial surface crack length

이와같은 것은 $0.2 < a_0/W$ 에서 응력집중계수 K_t 에 관계없이 같은 경향임을 알 수 있다. 그리고 응력집중계수 K_t 가 증가함에 따라서 같은 초기균열임에도 불구하고 균열관통시의 균열길이는 길게됨을 나타내며, 평활재의 균열길이보다 현저하게 길게 평가하고 있다. 또한, $a_0=2.0\text{mm}$ 의 실험결과도 역시 응력집중계수 K_t 가 증가함에 따라서 관통균열길이가 길게 되는 경향을 보여주고 있다. 실험의 관통균열길이가 계산보다 짧게되는 것은 균열이 성장함에 따라서 작용하는 면외굽힘응력이 실험에 사용한 치구에 의하여 억제되었기 때문이라고 생각된다. 이와같이 응력집중계수 K_t 에 의한 영향을 고려할 때, 구조물에서는 응력집중부를 최대한 억제하여야 될 필요성이 있는 것이라 생각된다.

4.4 응력확대계수의 변동폭 ΔK 에 의한 평가

응력확대계수의 변동폭 ΔK 와 시험편의 전면 및

후면에서 얻어진 피로균열 전파속도와와의 관계를 Fig. 11에 나타낸다.

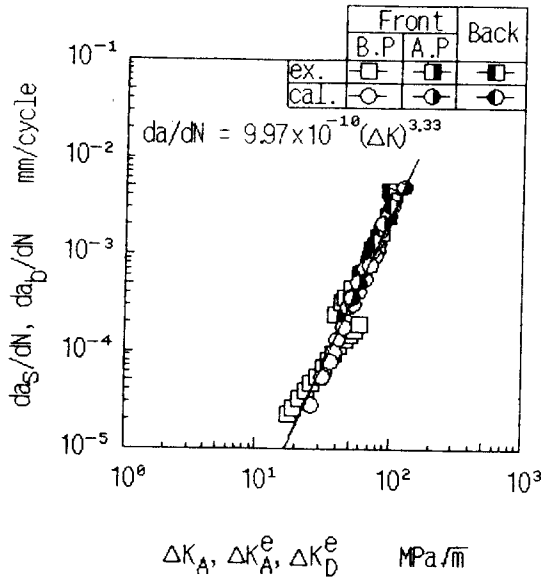


Fig. 11 Crack growth versus stress intensity factor range for front and back sides

이때의 응력분해는 I방법에 따랐다. 또 균열 관통후의 ΔK 를 평가할 때, 식(1), (2)의 응력은 전보(5)에서와 같은 이유에 의하여 응력집중효과를 무시한 공칭응력을 사용하였다. 그림중에서 환기호는 균열 관통이전(Before Penetration, B.P)의 실험 및 계산의 결과이고, 반검은 기호는 각각 전면 및 후면에 있어서 균열관통후(After Penetration, A.P)의 실험 및 계산의 결과이다. 그리고 그림중의 실선은 응력집중이 없는 표면균열재의 실험에서 얻어진 결과이다. 이것으로 부터, 응력집중재의 실험 및 계산의 결과는 평활재의 실험결과와 좋은 일치를 보이고 있다고 생각된다.

시험편의 전면에서 피로균열이 1.3mm성장하여 후면에 관통하기까지의 반복수(N_p), 파단반복수(N_f) 및 균열관통 후 파단하기까지의 후면의 반복수(N_{abf})를 초기균열길이에 대하여 Fig. 12에 나타낸다. 실험치도 비교하기 위하여 각각에 대하여

환기호로 나타내었다. 이 그림에서 초기 표면균열 길이가 증가함에 따라서 N_p , N_f 는 현저한 감소현상을 나타내고 있으며, 응력집중계수 K_t 에 의한 영향은 점점 감소하고 있다. 또한 $a_0=2.0\text{mm}$ 의 실험치와 계산치는 좋은 일치를 보이고 있다고 생각된다. 그리고 N_{abf} 도 초기균열길이가 증가함에 따라서 감소하는 경향은 같은 현상이다. 그러나, $a_0=2.0\text{mm}$ 에서 실험치보다 단수명인 것은 균열관통시 전면에서의 균열길이가 실험보다 길게됨으로서 후면의 균열길이가 가속하여 전면균열길이에 접근하고자 하기 때문에 수명이 짧게된다.

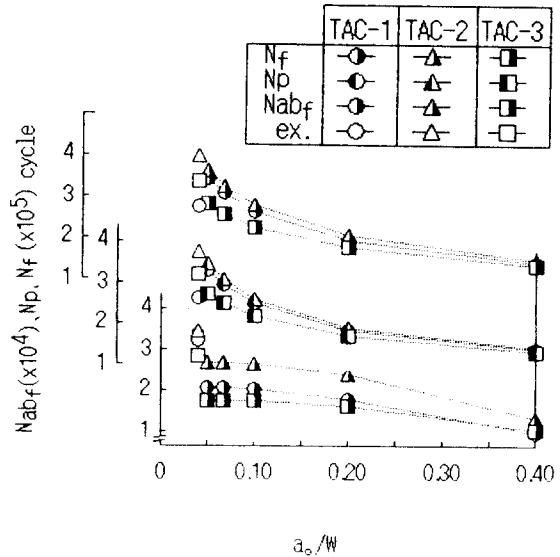


Fig. 12 Comparison of fatigue life with initial surface crack length

I방법과 II방법에 대한 N_p/N_f 및 N_{abf}/N_f 의 비를 비교하여 Fig. 13에 나타낸다. 이 그림에서 I방법의 N_p/N_f 짧게, N_{abf}/N_f 는 길게 평가하고 있다. 이것은 Fig. 2에서 설명하였듯이 응력분해시 II방법의 경우, 굽힘응력을 크게 평가하기 때문에 N_p 는 길게 평가되고, 따라서 관통시의 균열길이가 길게 되었다. 그리고, N_{abf} 는 관통시의 균열길이가 길게 되므로서 관통후 후면의 균열길이가 가속하여 전

면균열길이에 접근하고자 하기 때문에 수명이 짧게 된다. 이것으로 부터 본 연구에서 사용한 시험편과 같은 응력분포의 경우에는 I방법에 의한 수명을 하한, 또 II방법에 의한 수명은 상한으로 주어지는 경향이 있다고 할 수 있다.

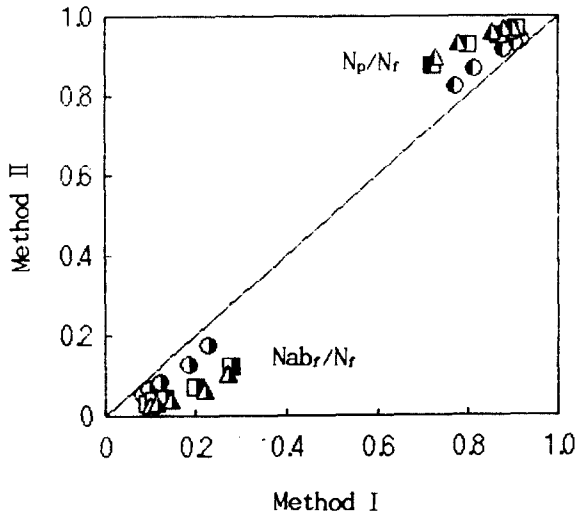


Fig. 13 comparison of method I and method II in fatigue life

5. 결 론

3%NiCrMo강을 사용하여, 응력집중부에 표면균열을 갖는 판의 초기표면 균열길이 변화에 의한 피로수명과 균열관통거동을 상세히 검토하였다.

피로수명은 초기표면 균열길이가 증가함에 따라서 현저하게 감소하며, I방법이 II방법보다 안전측의 평가를 하고 있다. 응력을 ASME규격의 방법(I방법)에 의해서 인장응력과 굽힘응력성분으로 분해하여, 그 값을 Newman-Raju의 응력확대계수 평가식에 대입하여(단, 전면에서의 굽힘응력성분은 0.8배로 대입) 얻어진 ΔK 로 설명되었다. 이러한 방법으로 얻어진 da/dN 과 ΔK 과의 관계는 실험 및 계산 모두 평활재에서 얻어진 da/dN - ΔK 관계와

일치하였다. 관통시의 전면 균열길이는 응력집중계수 K_t 에 의존하였다.

참 고 문 헌

- 1) 坂田信一, 岡村 隆, 夏本邦夫, 町田 進, 深倉壽一, "BWR一次系Stainless鋼配管の健全性評價-第4報 表面龜裂の板厚貫通後の進展評價" 日本原子力學會要旨集(第1分冊), pp.187, 1986
- 2) K.Ando, S.Fujibayashi, K.W.Nam, M.Takahashi and N.Ogura, "The fatigue life and crack through-thickness behaviour of a surface-cracked plate (for the case of tensile load)" JSME Int. J. Vol.30, pp.1898-1905, 1987
- 3) 남 기우, "고장력강의 피로수명과 균열관통거동에 관한 연구" 대한기계학회논문집, 제5권 제6호, pp. 1990-2001, 1991
- 4) 남 기우, 엄 윤성, "평활시험편에 있어서 균열형상비 변화에 따른 표면균열의 피로수명과 균열관통거동" 한국어업기술, 제28권 제2호, pp. 197- 207, 1992
- 5) 남 기우, "응력집중 표면균열의 성장 및 관통거동" 대한기계학회 '92년도 춘계학술강연회 논문집(I), pp. 25, 1992
- 6) ASME (1987) Boiler and pressure vessel code. Sec.XI.
- 7) J.C.Newman, Jr and I.S.Raju, 'An empirical stress intensity factor equation for the surface crack" Engng. Fract. Mech. Vol. 15, pp. 185- 192, 1981
- 8) 吉澤弘泰, 齊藤正博, 小泉和夫, 坂田信一, 結城良治, 金澤 武, "BWR一次系Stainless鋼配管の健全性評價-第5報 配管の表面龜裂進展解析法" 日本原子力學會要旨集(第1分冊), pp. 188, 1986
- 9) 南 起祐, 宮里直矢, 安藤 柱, 小倉信和, "疲勞龜裂の板厚貫通舉動とその寸法效果" 日本壓力技術, 第28卷 第4號, pp. 193, 1989