

◎ 論 文

피로하중을 받는 표면균열재의 관통거동 및 지연거동⁺

남 기 우*
(1991년 6월 4일 접수)

Retardation Behavior and Crack-Through-Thickness of a Surface-cracked Specimen under Cyclic Load

Ki Woo Nam

Key Words : Fatigue Life(피로수명), Retardation Behavior(지연거동), Through-Thickness(두께관통), Stress Intensity Factor(응력확대계수), Retardation Factor(지연계수)

Abstract

Fatigue life and retardation behavior after through-thickness were examined experimentally by using a CT specimen and surface-cracked specimen.

The material used was 3% Ni-Cr-Mo steel. The fatigue crack shape before through-thickness is almost semicircular, and the measured aspect ratio is larger than the value obtained by calculation using the K value proposed by Newman-Raju. It is found that the crack growth behavior on the back side after through-thickness is unique and can be divided into three stages a, b and c. A retardation parameter has been used successfully to predict the growth of cracks in specimen, and in this time, retardation factor is 4.3. By using the crack propagation rule considering on retardation state and the K value proposed by the authors, the remarkable crack growth behavior and the change in crack shape can be evaluated quantitatively.

1. 서 론

최근 액화가스 운반선¹⁾, 원자력발전 Plant²⁾, 초고압화학 Plant³⁾ 등에 있어서는 안전성 및 경제성향상의 관점에서, LBB설계법(Leak Before Break

Design)이 주목받고 있다. 이 LBB 설계법이라는 것은, 만일의 경우에 있어서도, 내용물의 누설이 불안정파괴에 앞서서 일어날 것을 보증하는 것으로서, 일종의 Fail safe design이라고 말할 수 있다.

이와같은 LBB설계법에 관련해서, 표면균열이 판두께를 관통하기까지의 수명과 관통시의 균열 현

* 정희원, 부산수산대학교 공과대학

상등에 관하여는 많은 연구자들⁷⁾에 의하여 활발하게 연구되어져 왔다. 한편 균열관통 후의 거동을 평가하는 것은 LBB설계와 구조물의 건전성 평가상 대단히 중요하다고 생각되어, 저자들에 의하여 일련의 연구⁸⁻¹³⁾가 수행되어 왔다. 그러나, 이것들은 일정하중을 받는 경우의 연구이고, 실제 구조물에 적용되고 있는 변동하중하의 연구에 대해서는 많은 연구¹⁴⁻¹⁷⁾가 있지만, 그들 대부분은 단일과대하중에 의한 균열진전의 지연현상 연구이다. 한편, 압력용기 및 고압배관등에 있어서는 표면균열이 관통하여 내용물이 누설한 시점에서, 운전을 중지하는 것보다 경제성을 고려하여 운전압력을 서서히 떨어뜨려, 가능한한 운전을 계속하면서 대책을 강구할 필요가 있을 것이다. 이러한 경우를 고려하여, 표면균열재에 있어서 균열관통후에 작용하중을 감소시킴으로서 발생하는 지연현상에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

그래서 본 연구에 있어서는 CT시험편을 사용하여 지연계수를 결정하고, 표면균열시험편을 사용하여, 피로균열관통 거동과 균열관통 후의 지연거동을 파괴역학적으로 검토하였다.

2. 재료 및 실험방법

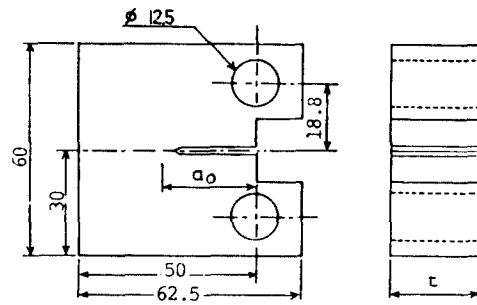
사용한 재료는 3% Ni-Cr-Mo강이고, 화학적 성분과 기계적성질을 각각 Table 1과 Table 2에 나타낸다. 시험편은 지연계수를 구하기 위한 Fig. 1(a)와 같은 CT시험편과 Fig. 1(b)와 같은 표면균열시험편을

Table 1 Chemical composition of test material(wt %)

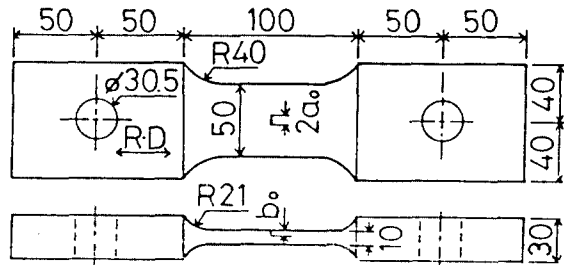
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
0.03	0.32	0.48	0.012	0.008	3.1	1.32	0.45	0.11	-

Table 2 Mechanical properties of test material

Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongaion (%)
943	996	18



(a) Compact tension specimen



(b) Surface crack specimen

Fig. 1 Dimensions of specimens

사용하였다. 표면균열시험편에는 방전가공에 의하여 반경 a_0 의 반원노치를 가공하였다. 시험편의 치수와 시험조건을 Table 3과 Table 4에 나타낸다.

피로시험은 전기유압식 피로시험기를 사용하여, 실온대기중에서 실시했다. 이 때의 제어로서, 하중파형은 정현파, 반복속도는 1~12Hz, 응력비는 $R=0.1$ 의 응력제어로 하였다. CT시험편과 표면균열시험편의 노치를 가공한 측(앞면) 및 균열이 관통한 측(뒷면)의 균열길이는 쌍안실체현미경을 사용하여 측정하였다. 그리고, 표면균열시험편의 균열길이 b 는 beach mark법에 의하여 파단후에 측정하였다.

Tbale 3 Specimen dimension and test condition (CT Specimen)

Specimen No.	Specimen Geometry			Stress Conditon K_{max} ($Mpa \sqrt{m}$)	Crack Length a (mm)	Extent of Yield Zond R_{yat} (mm)	Remark
	t (mm)	W (mm)	a_0 (mm)				
CT-1	10	50	26	31	26.0	0.0600	start
				38→22	28.9	0.0939→0.0308	decrease
				24→39	30.15	0.0372→0.0985	increase
				46→35	32.0	0.1340→0.0793	decrease
CT-2	25	50	14	33	14.0	0.0686	start
				38→22	17.1	0.0924→0.0301	decrease
				25→39	19.95	0.0412→0.0985	increase
				47→31	23.1	0.1390→0.0635	decrease
CT-3	25	50	14	46→36	29.0	0.1370→0.0807	decrease
				33	14.0	0.0686	start
				38→20	16.9	0.0909→0.0269	decrease
				24→45	20.05	0.0373→0.1270	increase
CT-4	25	50	24	53→27	23.2	0.1810→0.0477	decrease
				33→64	26.1	0.0686→0.2570	increase
				78→40	28.95	0.3820→0.1000	decrease

Table 4 Spcimen dimension and test conditon (Surface crack specimen)

Specimen No.	Specimen Geometry			Stress Condition $\Delta\sigma$ (Mpa)	Crack Leight a_b (mm)
	t (mm)	2W (mm)	2 a_0 (mm)		
TA-1	10	50	4	317	
TA-2	10	50	4	265	
TA-3	10	50	4	318→247	3.6
TA-4	10	70	4	227→114	5.0
TA-5	10	70	10	227→127	4.6

3. 응력확대계수의 평가방법

CT시험편에 있어서 응력확대계수 평가에는 Newman의 식¹⁸⁾을 사용하였다. 그리고, 표면균열시험편의 응력확대계수 평가에는 피로균열이 관통하기 전에는 Newman-Raju의 식¹⁹⁾으로 평가하였다. 한편 Fig. 2와 같은 균열이 판두께를 관통후의 A점과 D점에서의 응력확대계수 K_A^e , K_D^e 는 저자들이 제안한 다음식⁸⁾으로 평가하였다.

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

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

여기서 a_s 및 a_b 는 각각 앞면 및 뒷면에서의 균열길이, a_c 는 판두께 중앙부에서의 균열길이로서 $a_c = \sqrt{3a_s^2 + a_b^2} / 2$ 를 나타낸다. 또, $\eta_s = a_s / W$, $\eta_b = a_b / W$, $F(\eta) = (1 - 0.5\eta + 0.370\eta^2 - 0.044\eta^3) / (1 - \eta)$ 이다.

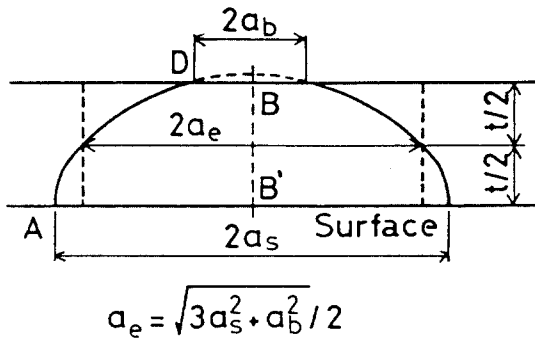


Fig. 2 Model used for evaluating the stress intensity factor after through thickness cracking

4. 피로균열의 전파법칙과 지연거동

피로균열진전에 있어서 da/dN 와 ΔK 사이에는 다음식과 같은 간단한 함수관계가 성립하는 것이 알려져 있다.

$$da/dN = C \times (\Delta K)^m \dots\dots\dots (3)$$

여기서 C 및 m은 재료정수이다.

그러나 지연현상이 발생하면, (3)식의 피로균열 전파법칙에서 지연현상을 고려하여야 할 것이다. 그래서, 본 연구에서는 Fig. 3과 같은 Wheeler의 Model²⁰⁾을 사용하여, 지연현상에 대한 피로균열 진전은 다음과 같이 주어진다.

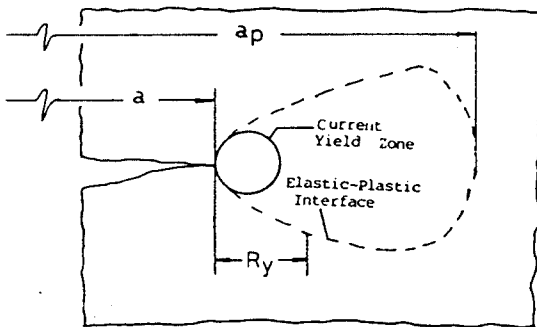


Fig. 3 Retardation model of wheeler

$$da/dN = C_p \times C \times (\Delta K)^m \dots\dots\dots (4)$$

여기서 $C_p = [R_y / (a_p - a)]^n : a + R_y < a_p$
 $C_p = 1 : a + R_y \geq a_p$
 R_y : 부하 하중하의 소성영역 범위
 $a_p - a$: 균열선단에서 탄소성경계까지의 거리
 n : 지연계수이다.

점선은 고하중을 가한 후의 항복영역을 나타내고, 실선은 현재 부하 하중하의 항복영역이다. 그리고, 지연계수 n은 실험적으로 결정하여야 한다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1 지연계수

Table 3과 같은 조건하에서 실시된 CT시험편의 대표적인 균열전파 선도를 Fig. 4에 나타낸다. 여기서 점선으로 나타낸 계산은 Fig. 5에서 얻어진

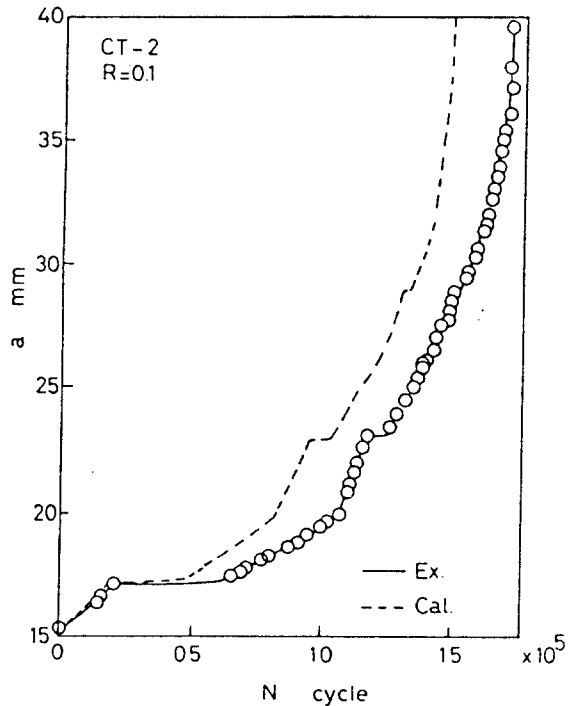


Fig. 4 Comparison of experimental and calculated values of crack growth for a CT specimen

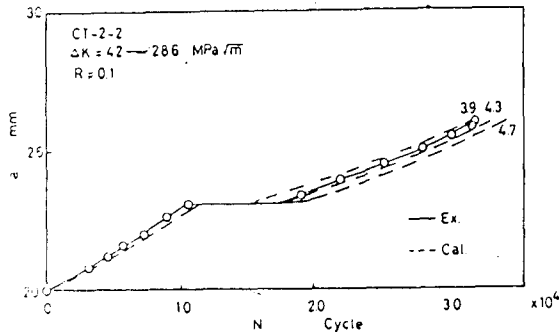


Fig. 5 Comparison of experimental and calculated values of retardation region

지연계수 $n=4.3$ 과 Newman의 응력확대계수 표시식 및 (4)식의 피로균열전파법칙을 사용한 결과이다. 피로균열전파법칙으로서는 CT시험편에서 얻어진 다음식을 사용하였다.

$$da/dN = 6.48 \times 10^{-8} (\Delta K)^{2.29} \dots\dots\dots (5)$$

실험에서 얻어진 하중의 감소에 의한 지연부분만을 확대하여 대표적인 것을 Fig. 5에 나타낸다. 그리고, 그림에서 지연계수를 $n=3.9, 4.3, 4.7$ 로 변화시켜서, 계산한 결과를 함께 나타낸다. 이것에 의하면 전체적으로 $n=4.3$ 의 경우가 좋은 일치를 보이고 있다고 생각된다. 그래서 이후의 계산을 여기서 얻어진 지연계수를 사용하여 계산을 하기로 한다.

지연계수 $n=4.3$ 을 사용하여 personal computer에서 계산한 결과의 실험결과를 비교하여 Fig. 6에 나타낸다. 여기서 N_{R3mm} 는 지연현상이 발생하기 전후 3mm의 반복수이다. 이 결과에서 CT-3시험편의 2점을 제외하고 나면 전체적으로 좋은 일치를 보이고 있다. 이 2점은 하중감소폭이 큼으로 인하여, 압축잔류응력의 영향이 크게 작용한 것이라고 생각된다. 이 점에 대하여는 앞으로 더욱 상세한 검토의 여지가 있다.

하중을 감소시킨 후, 지연현상이 계속되는 기간의 반복수를 N_R 로 한다. 그리고, 지연현상발생 직후의 지연 Parameter를 C_{PO} , 이 때의 응력확대계수 변동폭을 ΔK_{RR} 로 하면, 지연유효응력확대계수 변동폭 ΔK_{RE} 를 다음과 같이 정의한다.

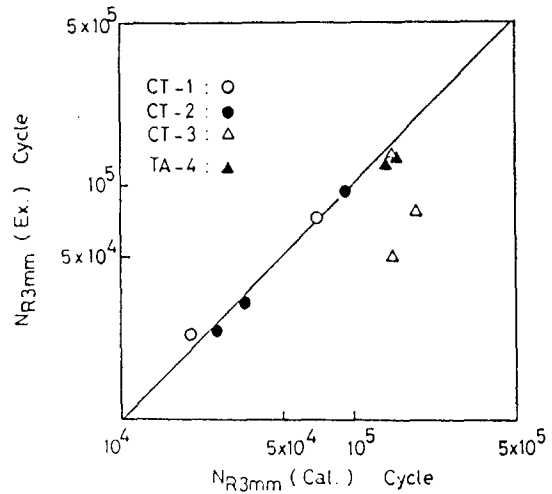


Fig. 6 Comparison of experimental and calculated values of retardation life (N_{R3mm})

$$\Delta K_{RE} = C_{PO} \times K_{RR} \times (1-R) \dots\dots\dots (6)$$

(6)식에 의한 결과를 Fig. 7에 나타낸다. 이 그림에서 ΔK_{RE} 의 값이 증가함에 따라서 N_R 의 값이 감소함을 알 수 있다. 즉 N_R 은 ΔK_{RE} 의 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

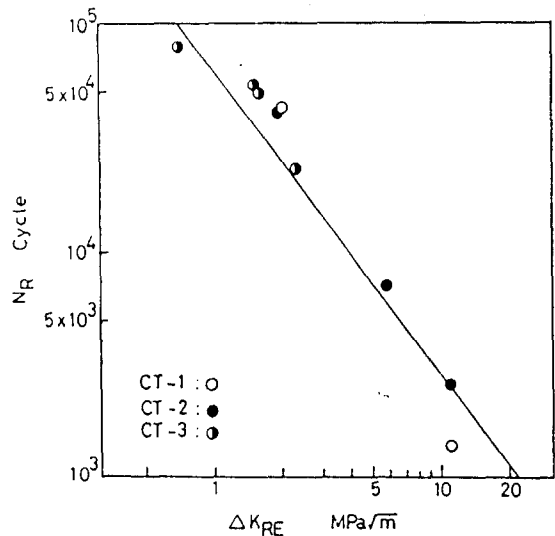


Fig. 7 Comparison of N_R and ΔK_{RE}

5. 2 피로균열 전파거동

실험에서 얻어진 피로균열 전파곡선의 일례를 Fig. 8에 나타낸다. Fig. 8에서는 균열발생수명등의 영향을 고려하여 앞면에서의 균열길이가 1.3mm 진전한 때의 반복수를 0으로 했다. 또 그림중의 점선은 뒤에서 설명하는 방법에 의하여 Personal computer에서 얻어진 N-a 곡선이다. 앞면에서의 균열 전파특성은 균열이 뒷면에 관통한 후에도 특별히 큰 변화는 없고, 거의 연속적인 거동을 나타내고 있다. 이것에 대하여, 뒷면에서는 극히 빠른 균열 성장속도를 나타내고 있다.

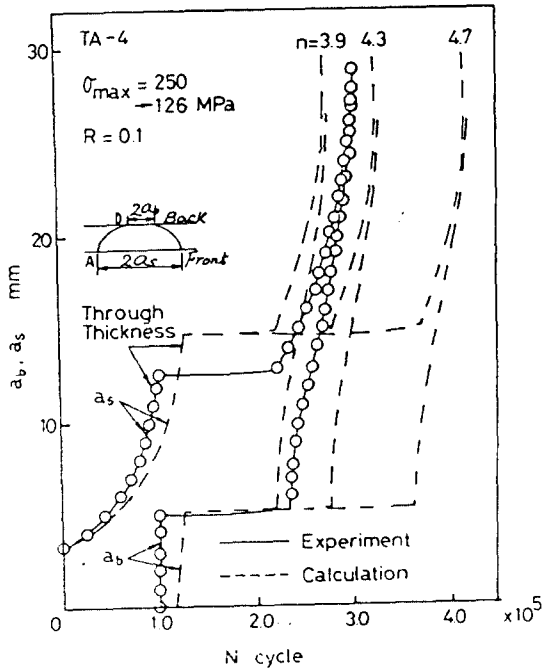


Fig. 8 Comparison of experimental and calculated values of crack growth for a surface crack specimen

이것을 상세히 나타내기 위해서, 균열관통 후의 곡선을 확대해서 Fig. 9에 나타낸다. 이 그림은 뒷면에서의 균열길이 a_b 가 5mm 진전하였을 때, 부하하중을 227MPa에서 114MPa로 감소시킨 경우이다. 균열길이 a_b 가 5mm일 때 하중을 감소시킨

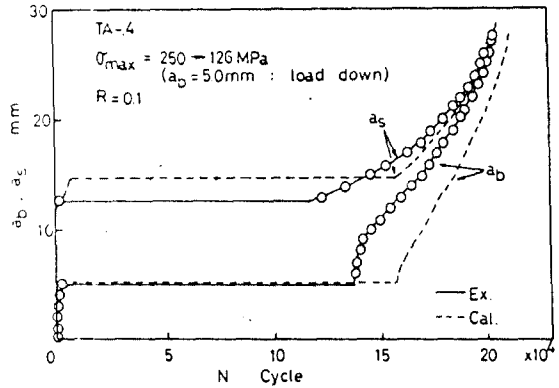


Fig. 9 Comparison of experimental and calculated values of crack growth after-through-thickness cracking for a surface crack specimen

것은, 관통시 앞에서의 균열길이 a_t 와 관통후 뒷면에서의 a 영역 균열길이 a_{ba} 의 상관관계¹²⁾에 의하여 a 영역과 b 영역의 경계부분에 해당하기 때문이다. 이 그림에 의하면 뒷면에서의 균열전파 특성은 대략 3영역으로 나누어 지는 것을 알았다. a 영역은 관통직후의 부분으로서 균열의 성장이 극히 빠르고, b 영역은 어느구간에 걸쳐서 거의 일정한 성장속도를 나타내고 있다. 이후는 이 영역을 정속도 영역이라고 부르기로 하고, 이 영역에서의 평균균열 전파속도를 da_b^*/dN 로 나타내기로 한다. c 영역은 정속도영역을 지나서 뒷면에서의 균열성장속도가 가속화해서 앞면에서의 균열길이에 접근해가는 영역이다.

정속도영역에서 얻어진 균열전파속도 da_b^*/dN 와 Gross stress의 변동폭 $\Delta\sigma$ 와의 관계를 Fig. 10에 나타낸다. 이것에 의하면 da_b^*/dN 와 $\Delta\sigma$ 와의 사이에는

$$da_b^*/dN = A_\sigma (\Delta\sigma)^K \dots\dots\dots (7)$$

로 되는 지수법칙이 성립함을 알 수 있다. 여기서 A_σ 와 K 는 재료정수이다. 더우기 지수 K 는 3.33이고, 이는 뒤에서 설명하는 피로균열전파법칙의 ΔK 지수 $m=3.33$ 과 좋은 일치성을 보이고 있다.

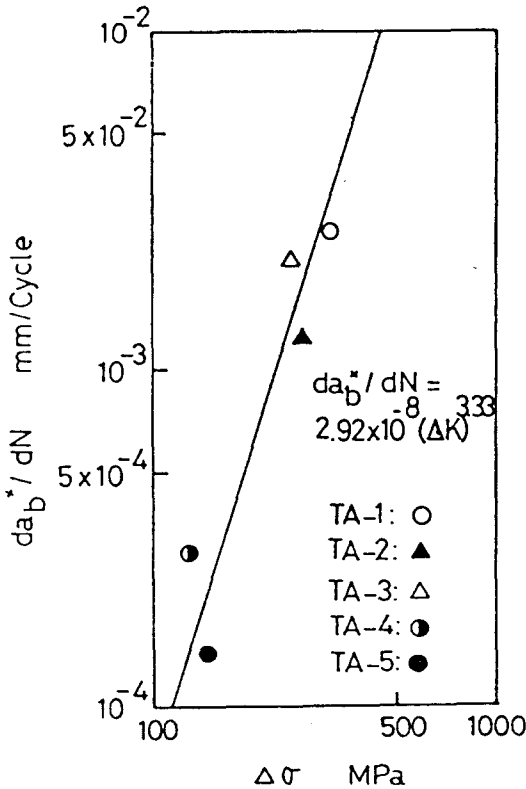


Fig. 10 Range of gross stress versus crack propagation rate at constant rate stage

피로파면에서 얻어진 aspect ratio(b/a_s)의 변화를 Fig. 11에 나타낸다. 이 그림에서 점선은 (3)식의 피로균열전파법칙과 Newman-Raju에 의한 응력

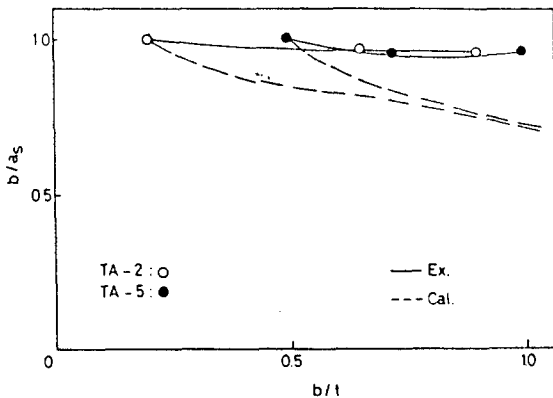


Fig. 11 Comparison of experimental and calculated aspect ratios

확대 계수의 표시식을 사용하여 얻어진 aspect ratio이다. 이 때의 피로균열전파 법칙으로서는 다음 식을 사용하였다.

$$d/dN = 1.53 \times 10^{-9} (\Delta K)^{3.33} \dots\dots\dots (8)$$

이 그림에서 피로균열은 반원에 가깝고, 균열판 동시에 있어서도 실측된 aspect ratio가 0.95전후인 것에 대하여, 해석에서 얻어진 aspect ratio는 0.75 전후까지 저하하여, 실험보다 균열이 현저하게 편평한 것을 알 수 있다. 이것은 시험편양단을 고정하여, 실험을 실시함으로써 균열진전에 따르는 굽힘 응력성분을 구속하였기 때문이라고 생각된다.

5.3 응력확대계수의 변동폭 ΔK 에 의한 피로균열 전파거동의 평가

CT시험편에서는 Newman의 식으로서, 표면균열

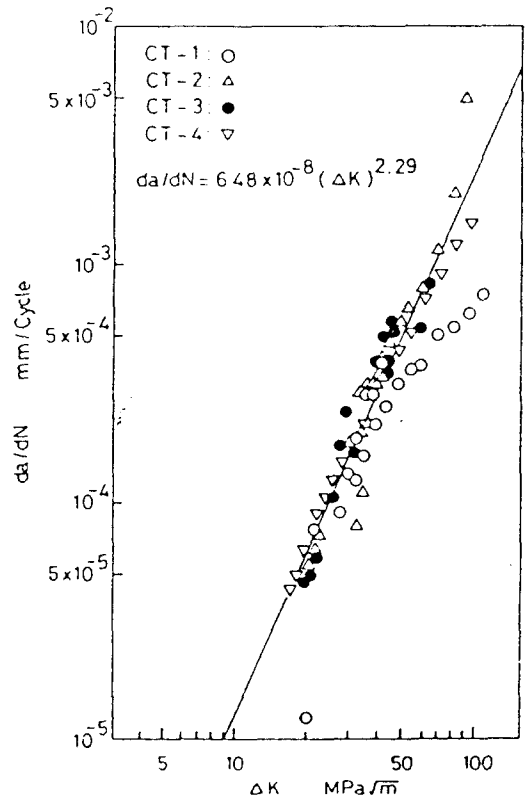


Fig. 12 Crack growth rate versus stress intensity factor range of CT specimen

시험편에서는 균열이 관통하기 전은 Newman-Raju의 응력확대계수 평가식으로, 관통후는 (1), (2) 식을 사용하여 얻어진 응력확대계수의 변동폭 ΔK 와 피로균열전파속도와와의 관계를 Fig. 12, 13에 나타낸다. 이것에 의하면, 피로균열전파속도는 CT시험편에서는 (5)식으로서, 표면균열시험편은 균열관통전후를 불구하고 (8)식과 같이 ΔK 로 정리될 수 있다는 것을 알았다.

Fig. 13에는 beack mark에서 얻어진 균열깊이 방향으로의 전파속도 da/dN 와 Newman-Raju의 식에 대입해서 얻어진 최심점에서의 ΔK , 즉 ΔK_B 와의 관계를 나타낸다. 또한 Fig. 13중의 실선을 표면에서 얻어진 균열전파선도이다. Fig. 13의 결과는 Fig. 12에 나타난 앞뒤면에서의 전파속도와 좋은 일치치를 보이고 있다.

앞면에서의 피로균열이 1.3mm 성장해서 뒷면에

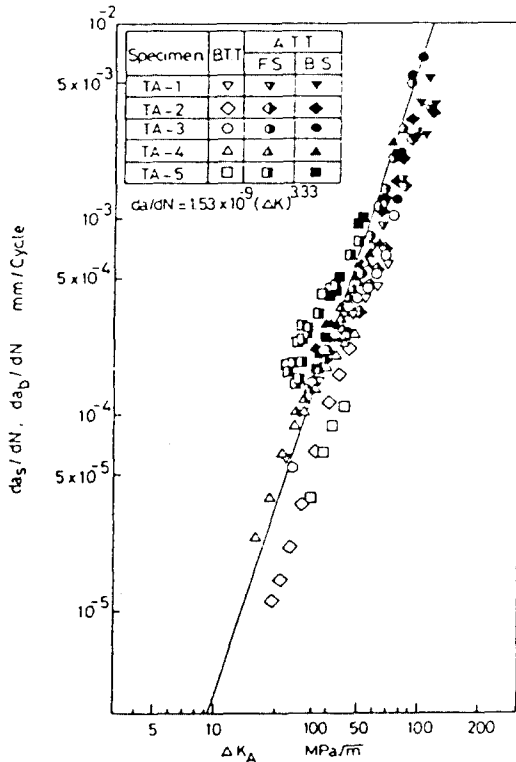


Fig. 13 Crack growth rate versus stress intensity factor range on front and back faces of surface crack specimen

관통하기 까지의 반복수(N_T)와 균열이 관통하고 나서 뒷면에서의 균열길이가 15mm에 달하기까지 지연반복수도 고려한 하중반복수($N_{ab}=15mm$)의 실험치와 계산치를 비교하여 Fig. 14에 나타낸다.

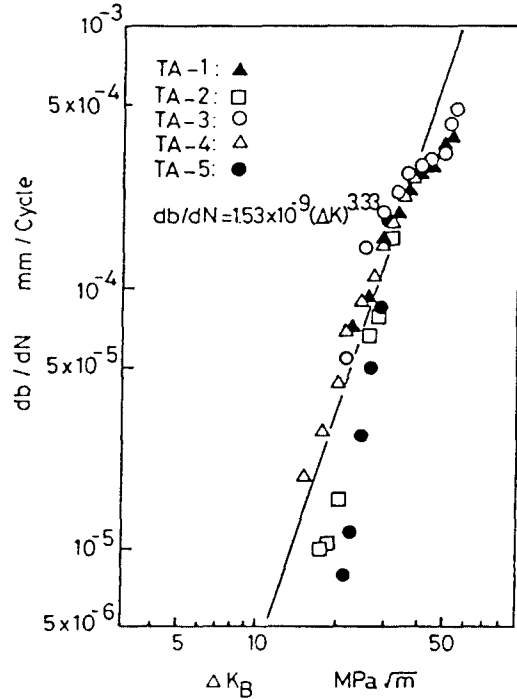


Fig. 14 Crack growth rate versus stress intensity factor range on crack depth of surface crack specimen

실험과 계산에서 얻어진 피로균열관통수명 N_T 는 대체적으로 좋은 일치치를 보이고 있다. 한편 N_{ab} 에 대하여도 전체적으로 양자가 좋은 일치치를 보이고 있다고 말할 수 있다. 이것으로부터 저자들이 제안한 균열관통 후의 응력확대계수평가식(1), (2)와 지연현상을 고려한 피로균열전파법칙 식(4)를 사용해서 표면균열재의 피로수명과 균열관통 거동을 정량적으로 평가할 수 있다고 생각되어 진다.

6. 결 론

3% NiCrMo강을 사용하여, 인장을 받는 CT시험편 및 표면균열시험편의 피로수명과 균열관통후의

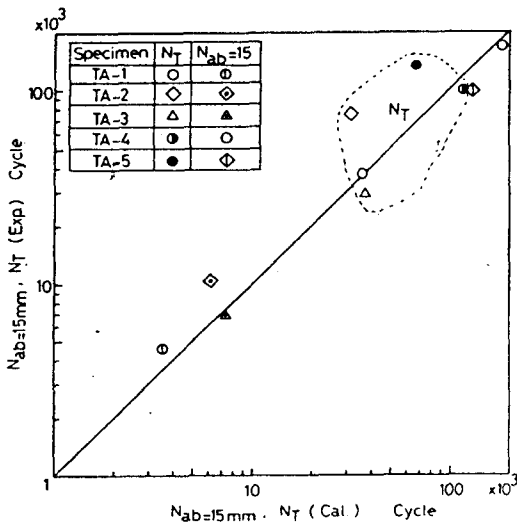


Fig. 15 Comparison of experimental and calculated values of N_T and $W_{ab=15mm}$

지연거동을 검토한 결과 다음과 같은 결론이 얻어졌다.

- (1) CT시험편에 있어서, wheeler model을 사용하여 지연거동을 정량적으로 평가 할 수 있었다. 또한 표면균열시험편에 있어서도, 균열관통 후의 지연거동을 wheeler model에 의하여 정량적으로 평가 할 수 있었다. 이때 지연형상계수는 모두 $n=4.3$ 이다.
- (2) 피로균열이 관통한 축(뒷면)에서의 균열성장은 특이하고, a, b, c의 3영역으로 나누어졌다.
- (3) 균열관통후의 응력확대계수 평가식(1), (2)와 지연현상을 고려한 피로균열전파법칙(4) 식을 사용함으로써 관통후 특이한 피로균열전파특성을 정량적으로 평가도리 수 있음을 알았다.
- (4) 인장을 받는 표면균열시험편의 피로파면 형상은 거의 반원에 가깝고, Newman-Raju의 응력확대계수 평가식을 사용해서 얻어지는 aspect ratio에 비하여 약간 큰 값이 얻어졌다.

참고문헌

1) IMCO [현 : IMO(1983년개정)] Resolution, A 328(IX), p. 191, 1975

- 2) 失川の 2명, 원자력공업, 30-11, p. 36, 1984
- 3) 岩館의 3명, 일본기계학회논문집, NO. 86-07 93B, NO. 86-0794B, 1986
- 4) 金沢의 2명, 일본조선학회논문집, 132, p. 395, 1972
- 5) 川原의 1명, 일본조선학회논문집, 137, p. 297, 1975
- 6) Cruse, T. A., 외 2명, ASTM STP 631, p. 174, 1977
- 7) Hodulak, L., 외 3명, ASTM STP 677, p. 399, 1979
- 8) 安藤의 4명, 일본기계학회논문집, 52-483, A. p. 2463, 1986
- 9) Ando, K., 외 4명, JSME Int. J., 30-270, p. 18 98, 1987
- 10) 南起祐의 3명, 일본기계학회논문집, 53-487, A, p. 444, 1987
- 11) NAM, K. W., 외 3명, JSME Int. J., 31-2, p. 272, 1988
- 12) 南起祐의 3명, 일본기계학회논문집, 55-516, A, p. 1740, 1989
- 13) 南起祐의 3명, 일본고압력기술, 27-4, p. 193, 1989
- 14) Matsuoka, S., 외 2명, Eng. Fract. Mech., 8, p. 507, 1976
- 15) Bathias, C., 외 2명, Eng. Fract. Mech., 10, p. 409, 1978
- 16) 城野의 3명, 일본재료학회논문집, 32-363, p. 1383, 1983
- 17) von Euw, E. F. J., 외 2명, ASTM STP 513, p. 230, 1972
- 18) Newman, J. C., Jr., ASTM STP 560, p. 105, 1974
- 19) Newman, J. C., Jr., and Raju, I. S., Eng. Fract. Mech., 11, p. 817, 1979
- 20) Wheeler, O. E., ASME Series D, 94, p. 181, 1972