

(論 文)

압력용기 소재에서의 표면균열의 형상변화

허용학* · 이주진* · 이해무**

(1990년 1월 15일 접수)

Variation of Surface Crack Shape in Pressure Vessel Materials

Yonghak Huh, Joo-Jin Lee and Hae-Moo Lee

Key Words : Surface Crack(표면균열), Crack Aspect Ratio(균열 형상비), Averaged Stress Intensity Factor(평균 응력강도계수), Local Stress Intensity Factor(국부 응력강도계수), Shape Change(형상변화), Crack Opening Ratio(균열 열림비)

Abstract

Cracks present in pressure vessels have been reported to be mostly semi-elliptic surface cracks. The fatigue crack growth rates(FCGR) of surface cracks in the pressure vessel materials, API 5A-K55 and SPV 500, used in this study were showed to be different depending on the direction of propagation of the surface crack. An equation for the prediction of the shape change of the surface crack was obtained by combining the Paris' relations for each direction of surface crack extension and agreed well with the experimental data. And also FGGR in both materials were evaluated and prediction of the shape change of surface crack were made using averaged stress intensity factor.

1. 서 론

압력용기를 비롯한 구조물의 요소에서 흔히 발견되는 균열은 표면균열로서 대부분 반타원형의 균열 형상을 띄고 있다. 표면균열의 피로성장 분석 및 피로성장에 대한 형상변화 예측은 표면균열이 존재하는 구조물 요소의 안전성 평가중 중요한 일부분을 차지하며, 특히 압력용기나 배관의 파괴전 누설 조건(LBB: Leak-Before-Break)에 의한 평가에는 필수적인 과정이다.

피로하중에 의해 성장하는 표면균열의 형상변화의 해석은 일반적으로 균열 형상이 반타원형이며, 표면방향 성장률과 깊이방향 성장률은 LFM에 따른 Paris관계식, 혹은 이와 유사한 피로균열성장

관계식에 따른다는 가정에 기초를 둔다. 이러한 가정하에서 Hall등⁽¹⁾은 하한계 응력강도계수(K_{th})을 이용하여 균열 변화식을 제안하였고, Newman과 Raju⁽²⁾는 국부 응력강도계수(local ΔK)를 이용하여 식을 제안하였다. Jolles와 Tortoriello⁽³⁾는 등방성을 가정하여 균열단면을 고려한 형상변화 관계식을 발표하였고, Wu⁽⁴⁾에 의한 균열 형상의 근사해, 그리고 Müller 등⁽⁵⁾은 평균 응력강도계수(averaged K)에 의한 형상 변화식을 계속해서 발표하였다.

본 연구에서는 표면방향과 깊이 방향으로 표면균열의 피로성장률이 다르게 나타나고 있는 경우의 표면균열 형상변화를 표면균열의 균열 열림을 고려하여 해석할 수 있는 식이 수정 제안되었으며, 압력용기 소재에서 측정된 표면균열의 형상변화와 본 연구에서 제안된 형상 변화식에 의한 예측과 비교 분석하였다. 또한 균열 성장과 형상변화를 평균 응

* 정회원, 한국표준연구소 재료응용연구실

** 한국표준연구소 재료응용연구실

력강도계수에 대해 분석하였고 다른 표면균열 형상 변화식들^(1~5)에 의한 표면균열 형상변화해석이 같이 비교 검토되었다.

2. 표면균열의 형상변화식

Fig. 1과 같은 유한평판에 존재하는 반타원형 표면균열에 대해 표면방향의 장반경의 길이를 c , 깊이방향의 단반경의 길이를 a 로 표시하고 표면균열의 선단의 각 점 A, C에서 피로균열성장은 각각 Paris관계식을 만족한다고 가정을 하면, 각 방향의 성장을 관계식은 다음과 같이 표시된다.

$$da/dN = C_A (\Delta K_A)^n \tag{1}$$

$$dc/dN = C_C (\Delta K_C)^n \tag{2}$$

여기서 ΔK_A 와 ΔK_C 는 각각 A와 C점에서의 응력강도계수폭을 나타낸다. Paris지수 n 은 재료의 피로균열 전파기구에 따르므로 표면방향과 깊이방향에 대해 같은 값으로 가정할 수 있으며, 균열선단의 응력장에 따른 피로저항의 변화로 C_A 와 C_C 가 다른계수로 표시된다⁽⁴⁾.

피로균열 성장시 균열이 완전히 열릴 때, 즉 균열열림을 고려한 유효응력 강도계수 ΔK_{eff} 를 이용하여 표면균열의 각 방향균열 성장률을 표시하면 식(3), (4)와 같이 된다.

$$da/dN = C_A (\Delta K_{eff,A})^n \tag{3}$$

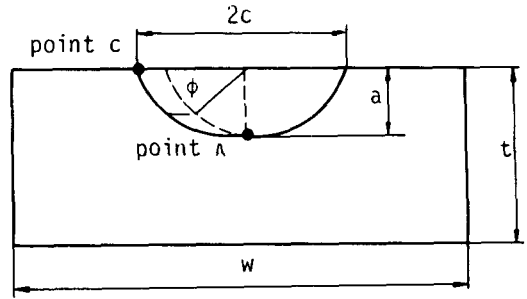


Fig. 1 Schematic shape of semi-elliptic surface crack

$$dc/dN = C_C (\Delta K_{eff,c})^n \tag{4}$$

이와같이 표면방향과 깊이방향에 대한 균열성장이 평가될 때에 표면균열의 형상변화 관계식은 Newman과 Raju⁽⁷⁾의 응력강도계수 평가식을 이용하여 식 (3)과 식 (4)를 연합하면 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} da/dc &= C_A/C_C (\Delta K_{eff,A}/\Delta K_{eff,c})^n \\ &= \frac{C_A}{C_C} \left(\frac{U_a F_A}{U_c F_c} \right)^n \\ &= \frac{C_A}{C_C} \left(\frac{U_a}{U_c} \frac{1}{(a/c)^{1/2} \{1.1 + 0.35(a/t)^2\}} \right)^n \end{aligned} \tag{5}$$

여기서 U_a 와 U_c 는 각각 깊이와 표면방향으로의 균열열림비 (crack opening ratio; $U = \Delta K_{eff}/\Delta K$)

Table 1 Summary of shape change equations

Authors	Ref.	Years	Shape change equation
Hall et al.	(1)	1974	$da/dN = C_a (K_{max,A} - K_{th})^m (\Delta K_A)^n$ $dc/dN = C_c (K_{max,c} - K_{th})^m (\Delta K_C)^n$
Newman & Raju	(2)	1979	$C_A = 1.1^n C_C$ $\frac{dc}{da} = \left(\frac{\Delta K_C}{1.1 \Delta K_A} \right)^n$
Jolles & Tortoriello	(3)	1983	$\frac{da}{dc} = \left(\frac{U_A F_A}{U_c F_c} \right)^n$ $\Delta K_{A,eff} = U_A \Delta K_A$ $\Delta K_{C,eff} = U_c \Delta K_C$
Wu	(4)	1985	$\frac{dc}{da} = \left\{ \left(\frac{a}{c} \right)^{1/2} \left[1 + 0.3182 \left(\frac{a}{t} \right)^2 \right] \right\}^n$ $\frac{a}{c} = f \left(\frac{a}{t}, \frac{a_o}{t}, \frac{a_o}{c_o} \right)$ Approximate analytical solution
Müller et al.	(5)	1986	$da/dN, dc/dN = C (\Delta K)^n$ for local ΔK and averaged ΔK $da/dc = (Y_A/Y_B)^n$

를 나타내며 F_A 와 F_C 는 각 방향의 수정계수이다.

표면균열의 피로성장에 대한 형상변화 관계식은 Table 1에 정리된바와 같이 많은 연구자들에 의해 제안되었으며, 각각의 계수 및 균열 열림은 가정하거나 일부추정치를 고려하여 분석되었다.

3. 시편 및 실험방법

3.1 실험재료 및 시편의 형상

표면균열 성장 측정을 위해 사용한 소재는 압력용기소재로 사용되는 SPV 50Q와 고압강관소재로 이용되는 API 5A-K55로 그 화학적 성분과 기계적 성질은 각각 Table 2 및 Table 3과 같다. 두 소재는 압연 가공품으로 압연의 영향을 보기위하여 압연방향(L방향)과 압연의 직각방향(T방향)으로 시편을 채취하여 샤르피 충격시험을 실시하였다.

표면균열의 형상변화를 측정하기 위하여 사용한 시편은 압연방향과 평행방향으로 채취하여 Fig. 2와 같은 형상으로 가공하였다. 표면균열은 시편의 중앙에 장반경(c)가 4mm, 단반경(a)가 2mm가 되는 반타원형의 전극으로 방전가공(EDM)하고 피로하중을 가하여 예비균열을 형성시켰다.

3.2 실험방법

표면균열의 균열성장실험은 표면균열의 진전은 유압식 재료시험기인 MTS(용량: 25ton)를 이용하였으며, 피로 하중은 응력비 R 이 0.1인 일정하중

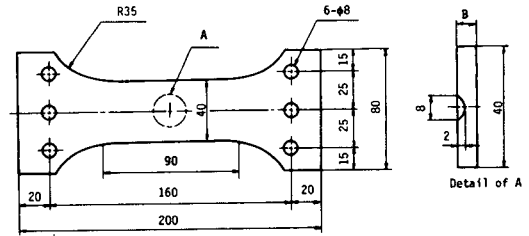


Fig. 2 Dimensions of the specimen with surface crack

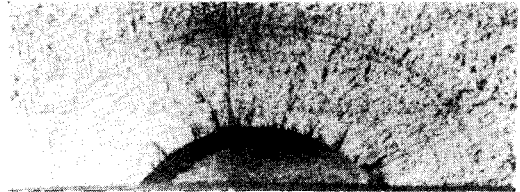


Fig. 3 Fracture appearance of surface crack with beach mark

으로 제어 하였고, 10Hz의 되풀이 속도로 대기중에서 실시하였으며, 표면방향과 깊이방향의 성장측정은 Fig. 3과 같이 비치 마크(beach mark)를 형성시켜 측정되었다.

피로균열진전에 따른 표면균열의 균열열림은 컴퓨터를 이용한 시스템을 구성하여 측정하였다⁶⁾. 표면균열의 성장방향에 따른 균열열림의 변화를 측정하기 위하여, 시편 앞면의 표면균열 중앙 부위와

Table 2 Chemical compositions(weight percentage)

Material \ Components	C	Mn	P	S	Si	Mo	Ni	V
API 5A-K55	0.3	1.4	0.04	0.06	—	—	—	—
SPV 50Q	0.14	1.4	0.016	0.005	0.28	0.16	0.15	0.04

Table 3 Mechanical properties

Material \ Properties	σ_{ys} (MPa)	σ_{UL} (MPa)	δ (%)	RA (%)	Charpy Impact (kJ/m ²)	
					T-direction	L-direction
API 5A-K55	304	431	44.9	67	693	1118
SPV 50Q	519	629	24.6	64.8	872	1254

Note) σ_{ys} : Yield strength, σ_{UL} : Ultimate strength
 δ : Elongation, RA : Reduction of area

균열 선단면, 그리고 시편의 뒷면의 균열 깊이방향으로의 균열 선단위치에서 균열 열림이 각각 측정되었다⁽⁶⁾.

4. 실험결과 및 해석

4.1 표면균열의 피로성장

표면균열의 성장측정은 피로균열을 성장시키면서 Fig. 3과 같이 비치마크를 형성시켜 표면균열의 깊이방향과 표면방향의 크기를 측정하였다. 측정된 각 방향의 균열 크기로부터 표면균열의 각 방향으로의 성장률 dc/dN , da/dN 을 응력강도계수 ΔK 에 대하여 구하였으며, Fig. 4와 Fig. 5에 소재 API 5A-K55와 SPV 50Q에 대한 성장률 곡선을 도시하였다. 또한 표면 방향과 깊이 방향으로의 유효 응력강도계수 ΔK_{eff} 는 각각 표면균열의 표면 선단면과 깊이방향의 시편 뒤에서 측정된 균열열림을 고려하여 평가하였으며⁽⁶⁾, 이때의 응력강도계수는 Newman과 Raju⁽⁷⁾의 해석결과를 이용하여 계산하였다. Fig. 4와 Fig. 5에 도시된 바와 같이 압

연 가공품인 두 소재에서 같은 ΔK_{eff} 에 대해 표면 균열의 표면 방향이 깊이 방향보다 다소 더 빠른 균열 성장률을 보이고 있다. 이는 Table 3에 나타난 바와 같이 소재의 압연 가공에 따른 재료의 성질 변화에 기인된 것으로 생각된다. 그러나 ΔK_{eff} 에 따른 피로균열 진전에서의 Paris의 지수 n 은 표면균열의 표면방향과 깊이방향에 대해서는 거의 같은 값을 보이고 있다. 본 연구에 사용된 두 소재에 대한 Paris관계식의 상수들을 Table 4에 정리하였다.

한편 Cruse와 Besuner⁽⁷⁾은 표면 균열에서 깊이 방향 또는 표면 방향으로의 균열성장을 평균 응력강도계수의 개념으로 평가하였으며, 평균 응력강도계수는 깊이 방향(Fig. 6(a))과 표면방향(Fig. 6(b))에 대해 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta \bar{K}_a = \frac{1}{\Delta S_A} \int_{\Delta S_a} \Delta K^2(\psi) dS_A \tag{6.1}$$

$$\Delta \bar{K}_c = \frac{1}{\Delta S_c} \int_{\Delta S_c} \Delta K^2(\psi) dS_c \tag{6.2}$$

여기서 균열면적 ΔS_A 혹은 ΔS_c 의 증분변화는 각

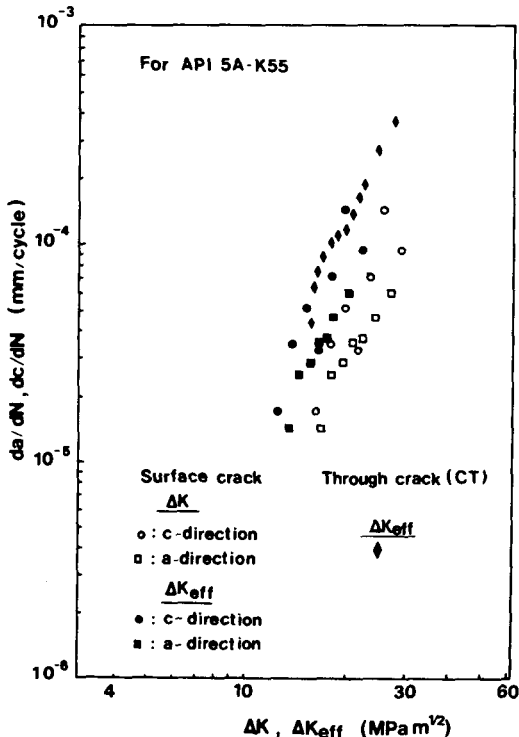


Fig. 4 Fatigue crack growth rate in API 5A-K55

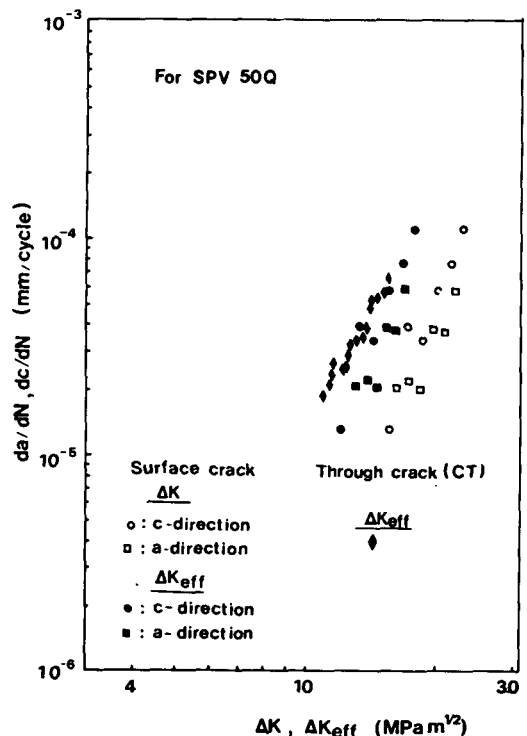


Fig. 5 Fatigue crack growth rate in SPV 50Q

Table 4 Parameters of paris relation

Material	n	C	
		a-direction	c-direction
API 5A-K55	3.47	2.04×10^{-9}	3.54×10^{-9}
SPV 50Q	4.58	5.67×10^{-11}	9.02×10^{-11}

Note) ΔK_{eff} : MPam^{1/2} $dc/dN, da/dN$: mm/cycle

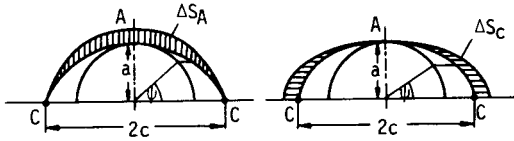


Fig. 6 Incremental change in crack area in calculating averaged ΔK

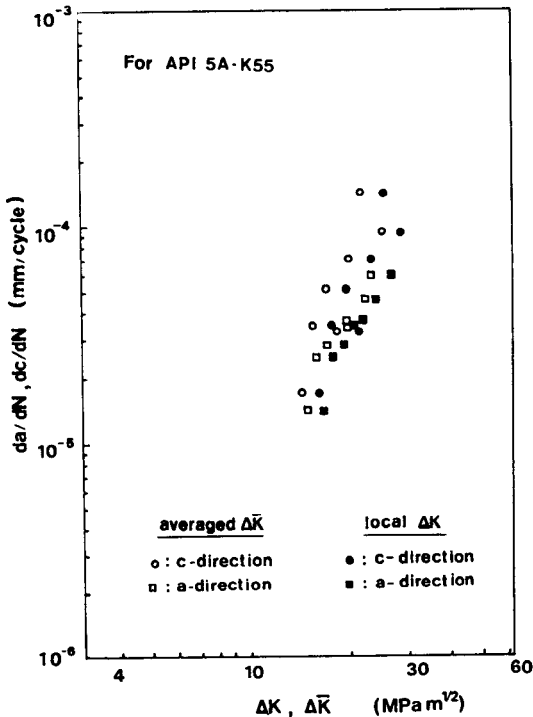


Fig. 7 Fatigue crack growth rate in API 5A-K55 using averaged ΔK

각 깊이방향(a) 혹은 표면방향(c)으로 균열성장이 있을 때의 값이다. Fig. 7과 Fig. 8은 API 5A-K55와 SPV 50Q의 표면균열성장을 평균 응력강도계수에 대해 도식한 결과이다. 본 연구에서의 표면균열에 대한 평균 응력강도계수는 국부 응력강도계수에

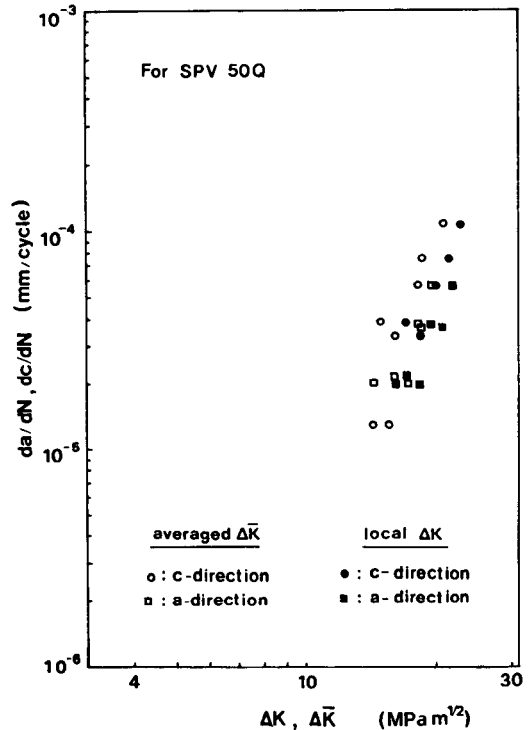


Fig. 8 Fatigue crack growth rate in SPV 50Q using averaged ΔK

비해 표면균열의 각 위치에서 다소 작게 평가되고 있으나, 각각의 응력강도계수에 대한 균열 성장율의 기울기는 거의 같게 나타나고 있음을 알 수 있다.

4.1 표면균열의 형상변화 예측

표면균열의 피로성장에 따른 형상 변화는 Table 1과 같은 여러 제안식을 이용하여 해석할 수 있으나, 본 연구에서의 표면균열의 성장의 방향에 따른 차이를 반영하며 균열 열림값을 고려할 수 있는 식 (5) 를 이용하여 형상 변화를 예측하고 표면균열의 측정 결과와 비교 분석을 하였다.

Fig. 9에 도시한 바와 같이 본 연구에 사용한 API 5A-K55와 SPV 50Q에 대한 표면 방향과 깊이 방향으로의 균열열림비의 비 U_c/U_a 는 각각 0.96과 0.965 얻어졌으며, Jolles와 Tortoriello⁽³⁾은 U_c/U_a 를 0.91로 가정하였다. 각각의 소재에서 측정된 균열 열림비의 비 U_c/U_a 를 이용한 식 (5)를 수치해법 Runge-Kutta법에 따라 해석하여 각 소재의 표면 균열의 형상을 예측하였으며, 이 결과는 Fig. 10과 Fig. 11에 도시한 바와 같이 실험 결과

와 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 또한 가정된 균열 열림을 고려한 Jolles와 Tortoriello⁽³⁾의 예측식에 의한 해석은 본 연구에 사용한 두 소재에 대해 실제 표면균열의 형상비 a/c 에 비해 과대평가하고 있으며, 본 연구에서 측정된 균열 열림비를 Jolles와 Tortoriello의 형상 변화 식에 이용하면 실제 균열 형상비를 과대 평가하고 있으나 앞의 가정치를 사용하였을 때 보다도 실제 형상비에 더 근접하고 있음을 알 수 있다.

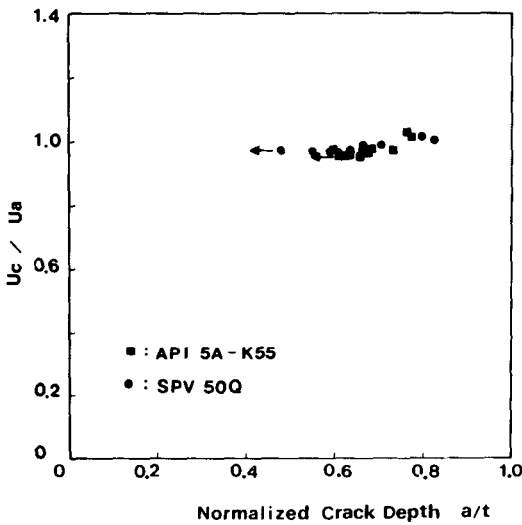


Fig. 9 Variation of U_c/U_a with crack extension

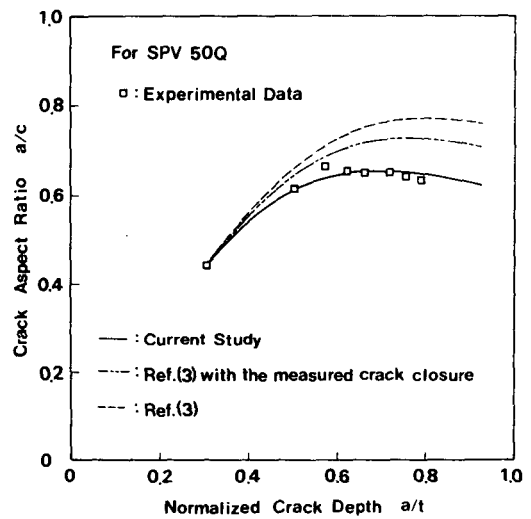


Fig. 11 Prediction of surface crack extension in SPV 50Q

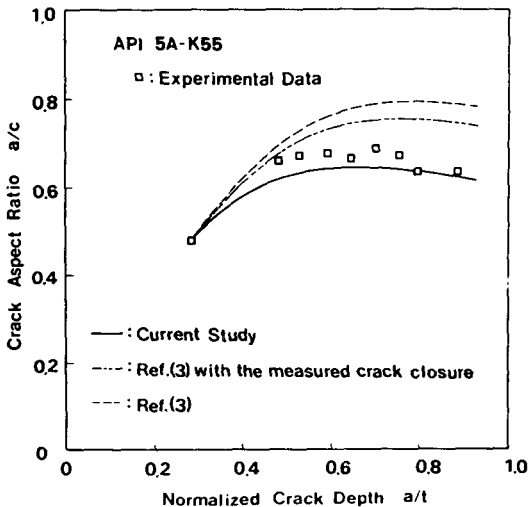


Fig. 10 Prediction of surface crack extension in API 5A-K55

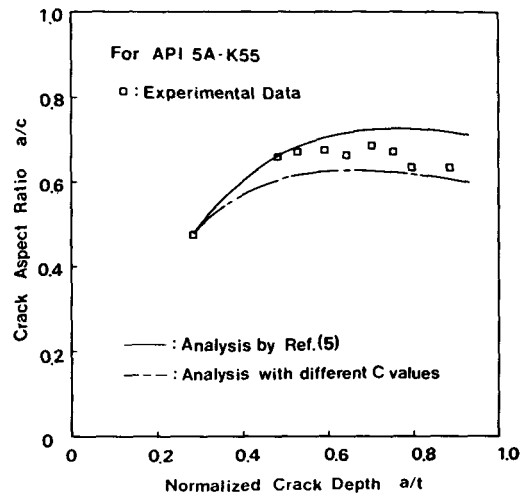


Fig. 12 Prediction of surface crack extension using averaged $\Delta \bar{K}$ in API 5A-K55

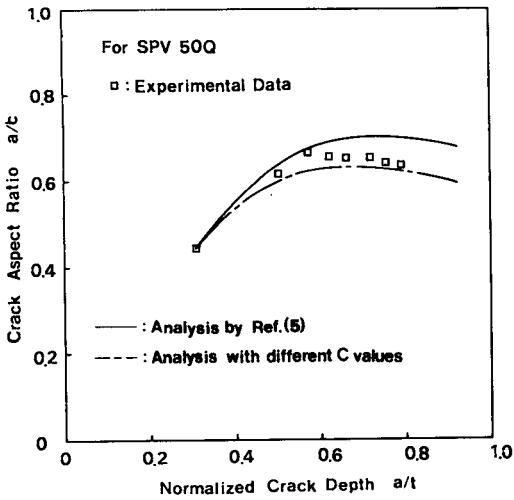


Fig. 13 Prediction of surface crack extension using averaged $\Delta \bar{K}$ in SPV 50Q

Fig. 12, 13는 평균 응력강도계수를 이용한 균열 전진의 평가, 즉 Fig. 7과 Fig. 8의 결과를 이용한 예측결과와 실험결과를 비교하여 도시한 그림이다. 평균 응력강도계수를 적용하고 소재를 등방성으로 가정한 Müller등⁽⁶⁾의 표면균열 형상 변화식에 의한 예측은 측정된 표면균열의 형상비에 대해 다소 크게 평가하고 있으며, 국부응력강도계수에 의한 해석과 같이 표면방향과 균열깊이방향의 Paris계수 C의 차이를 고려한 표면균열의 형상의 예측은 실험결과와 좀 더 근사하고 있음을 Fig. 12, 13에서 알 수 있다. 그러나 평균 응력강도계수를 기초로한 평가는 식 (5)에 따른 해석보다 균열의 형상비를 다소 작게 평가하고 있음을 보여주고 있다.

5. 결 론

압력용기 소재로 이용하는 두 소재 API 5A-K55와 SPV 50Q에서의 피로 하중이 작용하는 동안의 표면균열의 형상변화가 연구되었으며 다음과 같은

결론을 얻었다.

(1) 피로하중에 의해 성장하는 표면균열의 형상 변화에 대한 예측식이 균열 열림과 재료의 이방성을 고려하여 제안되었으며, 이에 따른 예측은 측정된 실험 결과와 잘 일치하였다.

(2) 평균 응력강도계수를 이용한 표면 균열 형상의 변화에 대한 해석은 등방성을 가정하면 균열 형상비를 과대 평가하고 있으며, 각 방향으로의 균열 성장율의 차이를 고려한 해석은 균열 형상비의 실험 결과에 더 근사하고 있다.

참 고 문 헌

- (1) Hall, L. R., Shah, R. C. and Engstrom, W. L., 1974, "Fracture and Fatigue Crack Growth Behavior of Surface Flaws Originating at Fasner Holes", AFFDL-TR-74-47, May.
- (2) Newman, Jr., J. C., and Raju, I. S., 1979, "Analyses of Surface Crack in Plates under Tension or Bending Loads", NASA TP 1578.
- (3) Jolles, M. and Tortoriello, V., 1983, "Geometry Variaton During Fatigue Growth of Surface Flaws", ASTM STP 791, pp. 1-297~1-307.
- (4) Wu Shang-xian, 1985, "Shape Change of Surface Crack During Fatigue Growth", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 22, No. 5, pp. 897~913.
- (5) Müller, H.M., Müller, S., Munz, D. and Neumann, J., 1986, "Extension of Surface Crack During Cyclic Loading", ASTM STP 905, pp. 625~643.
- (6) Huh, Y., Lee, J.J., Han, J., Kim, J.J., Moon, H., 1990, "A Study on Fatigue Crack Growth Characterization in Pressure Vessel Materials", KSME Vol. 14, No.1 p.9602.
- (7) Newman, J.C., Jr. and Raju, I., 1981, "An Emperical Stress Intensity Factor Equation for the Surface Crack", Engineering Fracture Mechanics, 15, pp.185~192.
- (8) Cruse, T.A. and Besuner, P.M. 1975, "Residual Life Prediction for Surface Cracks in Complex Structural Details", Journal of Aircraft, Vol. 12, pp. 369~375.