

〈論 文〉

압력용기 소재에서의 표면균열의 피로균열 성장특성에 관한 연구

허용학* · 이주진* · 한지원** · 김종집*** · 문한규*

(1989년 6월 23일 접수)

A Study on Fatigue Crack Growth Characterization of Surface Crack in Pressure Vessel Materials

Yonghak Huh, Joo-Jin Lee, Ji-Won Han, Jong Jip Kim and Hangue Moon

Key Words : Surface Crack(표면균열), Crack Opening Load(균열 열림하중), Crack Opening Ratio(균열 열림비), Effective Stress Intensity Factor(유효응력강도계수), Crack Growth Rate(균열 성장율)

Abstract

Cracks found in pressure vessels have been reported to be mostly semi-elliptic surface cracks. The fatigue crack growth behaviour of the surface cracks on pressure vessel materials, SPV 50Q and API 5A-K55, was studied with the consideration of the crack opening character. To determine the crack opening loads for the surface cracks, the displacement/strain were measured at three positions; the center and the side of the surface crack, the back face of the specimen using CMOD gauge and strain gauges. The experimental results showed that the crack opening load levels measured at the side of the surface crack were generally a little higher than those measured at the back face. As for the crack growth rates at the different parts of the surface crack, the experiments also showed that, if ΔK_{eff} is used, the exponent n of the Paris' law obtained were the same for the rear and the side parts of the surface cracks.

1. 서 론

압력용기를 비롯한 장치설비 요소에는 일반적으로 제작과정이나 사용중 환경적 요인에 의해 작은 결함이 발생된다. 이 작은 결함은 흔히 표면균열의 형태로 나타나고 있으며, 그 표면균열은 반타원의 형태를 띠고 있는 것이 일반적이다. 이러한 표면균

열의 피로진전 및 수명평가를 위하여 LFM의 개념에 따른 균열성장율(da/dN)과 응력강도계수의 폭(ΔK)의 관계로서 평가되는 방법이 많이 적용되고 있다^(1~5).

표면균열의 진전을 평가하기 위해서는 표면균열의 2차원적인 성장에 대한 즉, 균열의 표면방향으로의 진전과 균열의 깊이방향으로의 진전이 평가되어야 하며, 좀 더 정확한 성장예측을 위한 각각의 방향에 대한 균열열림점의 평가가 뒤따라야 한다. 표면균열의 표면과 깊이방향에 대한 균열열림점에 대한 평가는 측정의 어려움으로 많이 이루어지지

*정회원, 한국표준연구소 재료응용연구실

**성균관대학교 대학원

***한국표준연구소 재료응용연구실

못하고 있었으며, Newman과 Raju⁽⁶⁾은 균열열림 비 $\{U = (K_{max} - K_{op}) / (K_{max} - K_{min})\}$ 을 0.9로 가정하였고, 후에 Fleck등⁽⁷⁾이 표면과 깊이방향에 대해 균열열림값 측정을 시도하였고, Jolles와 Tortoriell⁽⁴⁾는 Fleck등⁽⁷⁾의 실험 결과를 이용하여 표면균열 진전을 평가하였다.

본 연구에서는 압력용기 소재인 SPV 50Q와 고압강관 소재로 사용하는 API 5A-K55에서의 표면균열의 표면방향과 깊이방향 또한 두께 평균에 대한 균열열림을 스트레인 게이지와 CMOD(Crack Mouth Opening Displacement)게이지를 이용하여 측정 비교하였다. 또한 표면균열의 균열 열림하중을 측정위치에 따라 평가하고, 본연구에 사용한 두 소재에 대해 균열 열림을 고려한 표면균열 진전평가가 각 방향에 대해 이루어졌다.

2. 시편 및 실험방법

2.1 실험재료 및 시편의 형상

본 연구에서 사용한 소재는 50mm 두께의 SPV 50Q와 8mm 두께의 API 5A-K55이다. SPV 50Q는 압연가공품으로 연성이 좋고 파괴인성치가 높아 보일러 또는 가스 저장 탱크의 소재로 널리 사용되고 있고 API 5A-K55는 압연가공품으로 연신율이 높아 고압강관 소재로 주로 쓰이고 있다. Table 1에 각 소재의 화학적 성분을 나타내었고 Table 2에 기계적 성질을 나타내었다. 소재의 압연가공에 따른 이방성을 보기 위해 Table 3과 같이 충격시험을 압연방향 (L)과 압연수직방향 (T)의 시편에 대해 실시하였다.

Table 1 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	1.40	0.016	0.005	0.28	0.16	0.15	0.04

Table 2 Mechanical properties

Properties	Material	API 5A-K55	SPV 50Q
Young's modulus	(GPa)	196.8	201.5
Yield strength	(MPa)	304	519
Tensile strength	(MPa)	431	629
Elongation	(%)	44.9	24.6
Reduction of area	(%)	67	64.8

Table 3 Charpy impact values(kJ/m²)

Direction	Material	API 5A-K55	SPV 50Q
L-direction		1118	1254
T-direction		693	872

시편은 압연방향과 평행방향으로 채취하여 두께는 API 5A-K55는 7mm, SPV 50Q에서는 6.5mm가 되도록 가공하였으며, 형상과 재원은 Fig. 1과 같다. 표면균열은 시편의 중앙에 압연방향과 수직으로 장반경(c)이 4mm, 단반경(a)이 2mm가 되는 반타원형 전극으로 방전가공(EDM)한 후, 피로하중을 가하여 예비균열을 형성시켰다.

2.2 실험장치 및 실험방법

피로균열 열림을 측정하기 위하여 컴퓨터를 이용한 시스템을 구성하였으며, 그 모식도는 Fig. 2와

같다. 시편의 피로균열진전은 유압식 만능재료시험기(MTS, 용량 : 25ton)을 이용하였으며, 하중데이터는 로드셀과 증폭기를 통해 증폭되어 A/D 변환기를 통해 디지털신호로 컴퓨터에 입력된다. 또한 시편의 변위는 CMOD 게이지 혹은 스트레인 게이지의 출력을 증폭기와 A/D(Analog/Digital) 변환기를 이용하여 컴퓨터에 입력된다. 컴퓨터 프로그램은 어셈블러로 작성되었으며, 최대 100kHz로 변환되는 신호를 획득한다. 획득된 데이터는 컴퓨터 프로그램에 의해 하중과 감산 변위 ΔV 의 그래프를 플로터로 도시화되며, 이 하중-감산 변위곡선의 기울기 천이점을 균열 열림점으로 결정한다(Fig. 3).

피로하중은 응력비 R이 0.1인 일정하중으로 제

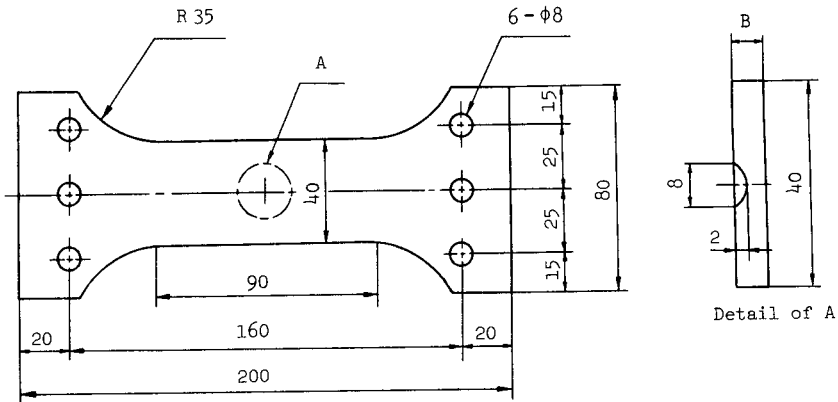


Fig. 1 Dimensions of the specimen with surface crack

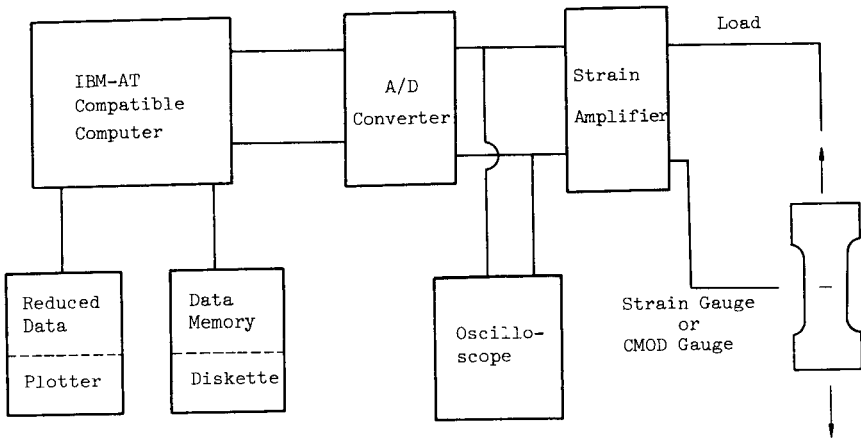


Fig. 2 A schematic diagram of the computerized system for measuring the crack closure

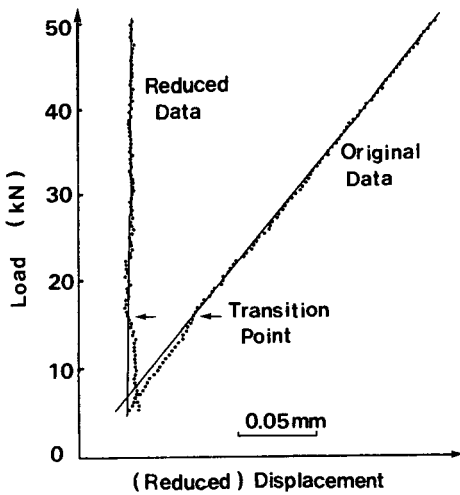


Fig. 3 A Schematic diagram of reduced displacement plot for crack closure determination

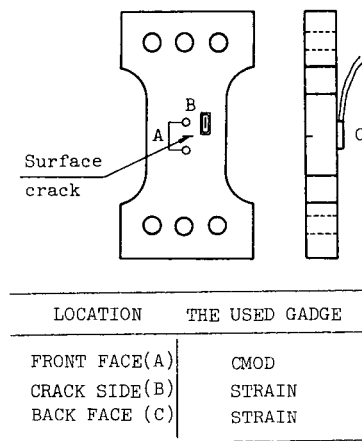


Fig. 4 Locations of the measurement for crack closure

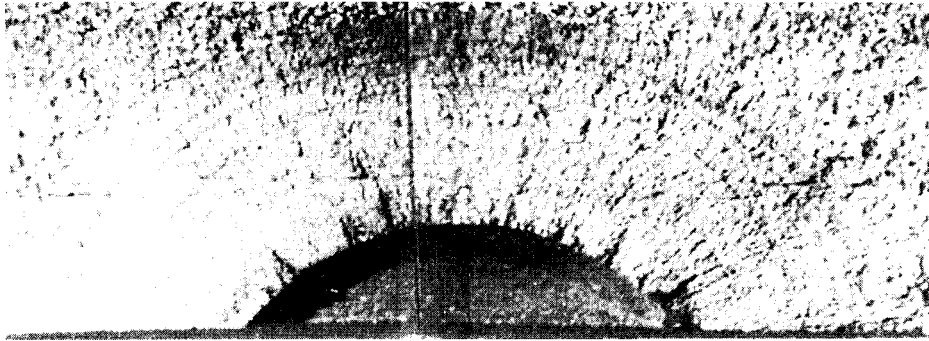


Fig. 5 Fracture surface of surface crack

어하였으며, 10Hz의 되풀이 속도로 대기중에서 실시하였다. 표면균열의 성장방향에 따른 균열 열림의 변화를 측정하기 위하여 Fig. 4와 같이 세 위치에서 변위가 측정되었다. 위치 A(front face)에서 표면균열의 중심선 변위(위치 A)를 CMOD게이지를 이용하여 측정하였으며, 위치 B(crack side)에서 균열의 표면선단열과 위치 C(back face)에서 균열의 깊이방향 시편표면의 변위를 스트레인 게이지를 부착하여 균열 열림을 측정하였다.

표면균열의 내부균열성장을 측정하기 위하여 Fig. 5와 같은 비치마크(beach mark)를 형성시켰으며, 표면에서는 이동현미경을 이용하여 균열의 성장을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 표면균열의 균열열림

표면균열의 각 위치에서 측정된 하중-CMOD 및 하중-변형률의 데이터로부터 균열열림점을 찾기 위하여 하중-감산변위/변형률로 도시화시킨 예가 Fig. 6과 같다. 균열의 완전열림에 따른 컴플라이언스(compliance)의 천이점이 이 그래프에서는 감산변위/변형률값이 영에서 이탈되는 점(Fig. 6의 T점)으로 나타나게 된다. 균열의 진전에 따라 측정된 균열 열림값의 변화를 Fig. 7,8에 소재 API 5A-K55에 대해, Fig. 9,10에 소재 SPV 50Q에 대해 나타내었다. 표면균열에 대한 응력강도계수는 Newman과 Raju⁽⁹⁾가 제안한 식을 사용하여 계산하였다. Fig. 8,10에서 균열성장에 따른 균열열림비 K_{op}/K_{max} 의 변화를 살펴보면, 균열길이비 c/t 가 0.8보다 큰 범위에서 위치 A와 위치 B의 균열

열림비는 큰 변화없이 거의 일정한 값을 보이고 있고, 위치 C의 균열열림비는 c/t 가 1.0을 기준으로 거의 일정한 값에서 증가하는 경향을 보이고 있다. 균열열림비를 평균치로 정리하면 Table 4와 같다.

위치 B(crack side)에서 측정된 균열열림비의 값이 위치 A(crack mouth)와 위치 C(back face)에서 값보다 다소 크게 나타나고 있는데, 이는 위치 B는 평면응력상태의 영향을 받고 위치 A 및 C는 두께평균의 평면변형 상태의 영향을 많이 받는 결과에 기인되는 것으로 볼 수 있다. 이는 Fleck

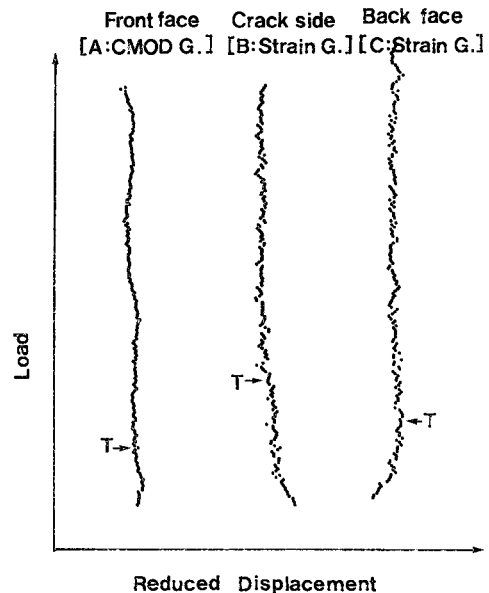


Fig. 6 A typical reduced displacement data for API 5A-K55

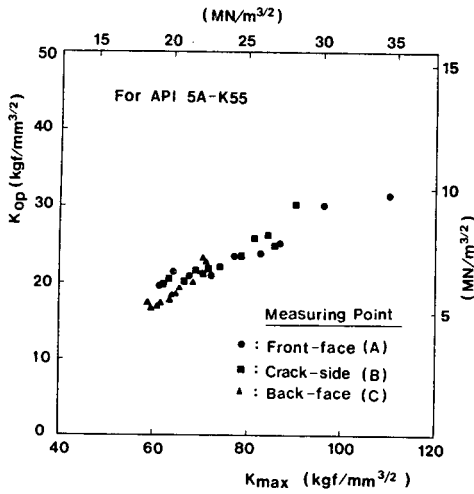


Fig. 7 Variations of K_{op} with K_{max} for API 5A-K55

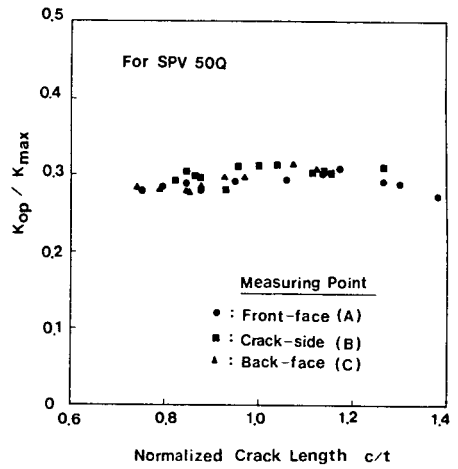


Fig. 10 Variations of K_{op}/K_{max} with c/t for SPV 50Q

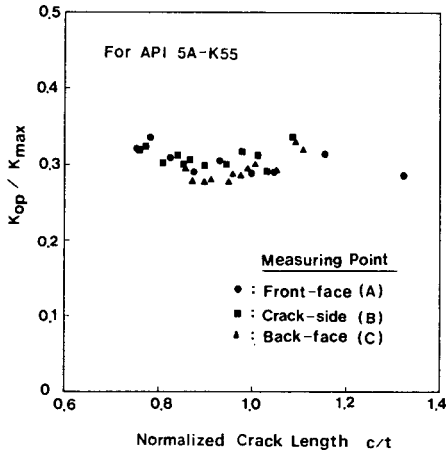


Fig. 8 Variations of K_{op}/K_{max} with c/t for API 5A-K55

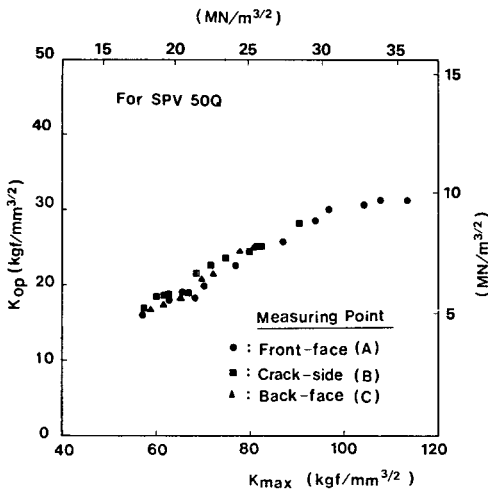


Fig. 9 Variations of K_{op} with K_{max} for SPV 50Q

Table 4 Summary of crack opening measurement data

Materials	Range in crack length ratio (c/t)	Averaged opening load ratio	
		Measured location*	K_{op}/K_{max}
API 5A-K55	0.8-1.4	A	0.30
	0.8-1.4	B	0.31
	0.8-1.0	C	0.28
SPV 50Q	0.8-1.4	A	0.29
	0.8-1.4	B	0.30
	0.8-1.0	C	0.28

*Measured locations are shown in Fig. 4

등⁽⁷⁾의 균열열림의 측정결과와 같은 경향을 보여주는 결과이다. 위치 C에서 측정된 균열열림비가 균열길이비에 c/t 가 1 이후에 증가하는 경향은, 균열의 성장에 따라 균열길이방향의 잔류응력이 감소되므로 이에 의한 인장응력의 영향이 증가되어 균열열림값이 커진 것이다. 이는 Schijve⁽⁸⁾와 Newman⁽⁹⁾의 인장응력의 영향이 증가할 때 균열열림값이 커진다는 예측결과와 같은 경향을 보여주고 있다.

3.2 표면균열의 피로균열 진전특성

표면균열의 균열진전의 크기는 비치마크를 만들어 측정하였으며, 각 소재에 대한 결과는 Fig. 11과 같이 표면균열의 표면방향(c)과 깊이방향(a)의

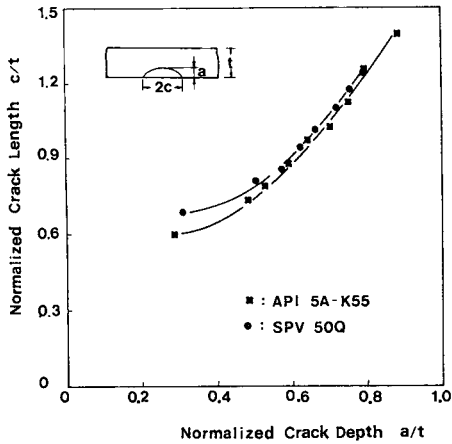


Fig. 11 Observed shape of surface crack in plates under uniform fatigue loading

길이를 시편의 두께 t 로 각각 무차원화시켜 도시하였다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 초기에 가공 부위의 영향을 벗어난 후에는 a/c 의 변화가 거의 선형적으로 나타나고 있어, 균열의 표면길이의 측정에 의해 깊이방향 길이를 추정할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 11에서 얻어진 표면균열의 균열성장곡선과 Fig. 8, 10의 균열열림비로부터 da/dN (dc/dN) - ΔK (ΔK_{eff})의 관계를 얻을 수 있다. Fig. 12, 13에 본 연구에서 사용된 소재들에 대한 균열성장속도 관계를 나타내었고, 다른 압력용기 소재들에 표면균열 성장속도⁽¹⁰⁾를 비교하여 표시하였다. 본 연구에서 측정된 두 소재들의 표면균열성장은 방향에 따라 특이성을 보이고 있다. 즉 표면방향의 균열성장속도 dc/dN 이 깊이방향의 성장속도 da/dN 에 비해 다소 크게 나타나고 있는데, 이는 Table 3에서 보는 바와 같이 소재의 압연가공에 따른 이방성에 기인되는 결과로 판단된다. 이러한 경향은 Fig. 13에 나타난 비슷한 압력용기 소재들에 대한 표면균열의 성장시험⁽¹⁰⁾에서도 같은 결과로 나타나고 있음을 알 수 있다.

일반적으로 Paris관계식의 n 값은 성장방향에 대해 같은 값으로 가정하여 사용하고 있다. 그러나 Fig. 10에서는 ΔK 에 대한 dc/dN 과 da/dN 의 기울기가 다르게 나타남을 알 수 있는데 성장방향에 따라 다른 n 값을 Fig. 5에 나타난 각 방향의 균열열림 값을 고려한 ΔK_{eff} 에 대해 표시하면 두 n 값이 거의 같은 값으로 나타나게 된다. 즉 표면방향

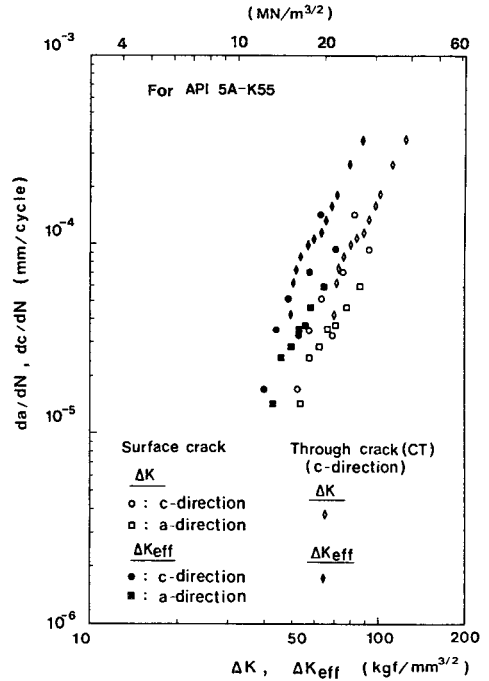


Fig. 12 Fatigue crack growth rate in API 5A-K55

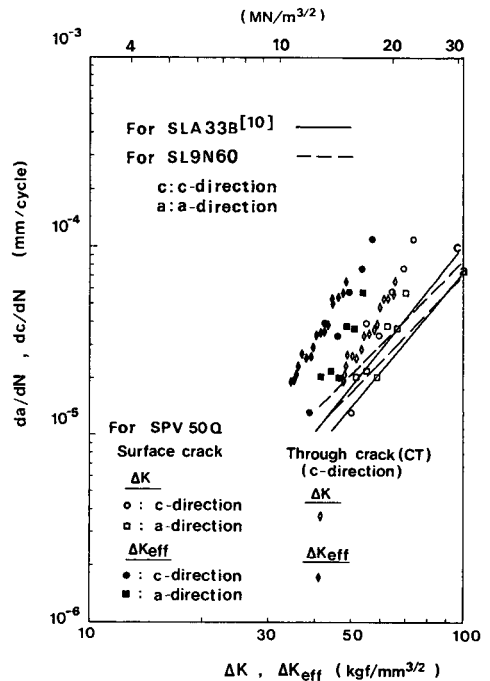


Fig. 13 Fatigue crack growth rate in SPV 50Q and similar materials

에 대해서는 균열표시방향 선단인 위치 B에서 측정된 균열열림값을, 깊이 방향에 대해서는 평면변형상태인 시편깊이방향의 영향이 나타나는 위치 C에서 측정된 균열열림값을 고려하여 정리하고, 그 관계를 최소자승법(least square method)로 선형피팅하면 성장률 관계식이 다음과 같이 표시된다.

$$da/dN = 2.037 \times 10^{-9} (\Delta K_{eff})^{3.467}$$

$$dc/dN = 3.543 \times 10^{-9} (\Delta K_{eff})^{3.467}$$

여기서 da/dN , dc/dN 은 mm/cycle, 그리고 ΔK_{eff} 는 MPam^{1/2}의 단위이다.

Fig. 11은 소재 SPV 50Q의 표면균열의 성장속도를 ΔK (ΔK_{eff})에 대한 도시한 그림인데, 소재 SPV 50Q도 API 5A-K55와 같이 깊이방향의 균열 성장과 표면방향의 균열성장의 n 값이 차이나게 나타나고 있다. 그러나 각 방향의 균열열림을 고려하여 균열성장을 나타내면 API 5A-K55 소재와 같이 두 방향의 균열성장의 n 값이 거의 일치된다. 그 관계를 최소자승법으로 선형피팅하면 다음과 같다.

$$da/dN = 5.669 \times 10^{-11} (\Delta K_{eff})^{4.679}$$

$$dc/dN = 9.018 \times 10^{-11} (\Delta K_{eff})^{4.679}$$

여기서 da/dN , dc/dN 은 mm/cycle, 그리고 ΔK_{eff} 는 MPam^{1/2}의 단위이다. 각각의 소재에 대해 압연수직방향(T)으로 균열이 성장하도록 CT 시편을 만들어 관통균열의 성장과 표면균열의 성장속도를 비교하여 보면 Fig. 10과 11에서 나타나는 바와 같이 표면균열의 같은 성장방향인 dc/dN 과 거의 일치함을 알 수 있고, 각각의 균열 열림을 고려한 경우에 대해서도 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 결 론

고압강관의 소재로 이용되는 API 5A-K55와 압력용기소재인 SPV 50Q의 표면균열에 대한 피로균열 전진특성을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 표면균열의 균열달림을 고려하지 않는 피로균열성장평가 즉 da/dN (혹은 dc/dN) $\sim \Delta K$ 관계에서 표면방향의 Paris상수 n 이 깊이방향 n 보다 다소 크게 나타나고 있으나, 각 위치의 균열달림을 고려하여 평가한 da/dN) $\sim \Delta K_{eff}$ 관계에서는 표면방향의 Paris상수 n 과 깊이방향 n 이 같게 나타나고 있다.

(2) 표면균열의 표면방향의 피로균열성장은 균열 방향이 깊이방향에 비해 다소 빠르게 나타나고 있다.

(3) 표면균열의 균열열림하중은 측정위치에 따라 다소 차이가 나며, 표면균열 뒷면에서 측정된 균열열림비 K_{op}/K_{max} 는 균열이 증가함에 따라 약간 증가하는 경향을 보이고 균열면 옆선단과 균열중앙 하중선위치에서 측정된 균열열림비 K_{op}/K_{max} 는 거의 일정한 방향을 보이고 있다.

(4) 표면균열의 열림하중비는 깊이방향의 평균치가 표면방향의 평균치보다 다소 낮게 나타난다.

參 考 文 獻

- (1) Cruse, T.A., Meyers, G.J., and Wilson, R.B., 1977, "Fatigue Growth of Surface Cracks", ASTM STP 631, pp. 174~189.
- (2) Chang, J.B. 1979, "Part-Through Crack Fatigue Life Prediction", ASTM STP 687, pp. 156~167.
- (3) Müller, H.M., Müller, S., Münz, D., and Newmann, J., 1986, "Extension of Surface Cracks During Cyclic Loading", ASTM STP 905, pp. 625~643.
- (4) Jolles, M. and Tortoriello, V., 1983, "Geometry Variations During Fatigue Growth of Surface Flaws", ASTM STP 791, pp. I-297-I-307.
- (5) 서창민, 권오현, 이정주, 1987, "작은 표면 결함에 서 발생, 성장하는 표면균열의 성장특성에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제11권, 제 2 호, pp. 191~197.
- (6) Newman, J. and Raju, I. 1981, "An Empirical and Stress Intensity Factor Equation for the Surface Crack", Engineering Fracture Mechanics, 15, pp. 185~192.
- (7) Fleck, N.A., Smith, I.F.C., and Smith, R.A., 1983, "Closure Behaviour of Surface Crack", Fatigue of Engineering Materials and Structures, Vol. 6, No. 3, pp. 225~239.
- (8) Schijve, J., 1981, "Some Formulas for the Crack Opening Stress Level", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 14, pp. 481~465.
- (9) Newman, J.C., 1984, "A Crack Opening Stress Equation for Fatigue Crack Growth", International Journal of Fracture Vol. 24, pp. R131~R135.
- (10) 恒成利康, 高杉俊二, 仁瓶寛太, 1982, "平底円筒タンクの側板-アニュラープレート隅角部の曲げ強度および疲勞強度", 川崎重工技報, 第80號.