

◎ 論 文

# 2 1/4 Cr-1 Mo鋼의 작은 表面균열의 成長에 관한 基礎的 研究<sup>+</sup>

徐 昌 敏\* · 姜 用 求\*\*

## A Basic Study on Growth Characteristics of the Small Surface Crack in 2 1/4 Cr-1 Mo Steel

Chang Min Suh and Yong Goo Kang

**Key Words:** Fatigue Crack(疲勞균열), Constant Crack Length Curve(등균열길이곡선), Artificial Fit(人工缺陷), Temper Color Method(템퍼칼라법), Crack Face Aspect(균열면 형상), Aspect Ratio(형상비), Semielliptical Crack(반타원형 균열), Stress Intensity Factor (應力擴大係數)

### Abstract

Fatigue tests by axial loading ( $R=0.05$ ) were carried out to investigate fatigue crack growth characteristics of small surface cracks in 2 1/4 Cr-1 Mo steel at room temperature by using flat specimens with a small artificial pit.

All the data of the fatigue crack growth rate obtained in the present test are determined as a function of the stress intensity factor range about a semi-elliptical crack, so that the application of linear fracture mechanics to the surface fatigue crack growth and to the fatigue crack growth into depth, and all the data obtained from tests were discussed in comparison with the data of Type 304 stainless steel and two type of mild steel under the same test conditions.

The obtained results are as follows:

- 1) When the cycle ratios are same, surface fatigue crack length and its depth are almost same and fall within a narrow scatter band in spite of different stress levels.
- 2) Relations of the surface fatigue crack growth rate ( $da/dN$ ) and fatigue crack growth rate into depth ( $db/dN$ ) to its stress intensity factor range ( $\Delta K_{Ia}$ ,  $\Delta K_{Ib}$ ) can be plotted as a straight line at log-log diagram without dependence of stress level and coincide with the data of part-through crack in various steels.

### 1. 緒 論

構造物이나 機械部品の 破壞原因을 고찰해 보면 여러 破壞原因中 疲勞에 의한 경우가 가장 많다. 특히 重要的 構造物인 原子爐, 高壓탱크, 高壓配管系, 車軸 및 항공기등의 破壞가 表面에 存在 가능한 작은

表面缺陷에서 發生한 작은 表面균열에 의한 경우가 많은 것으로 分析<sup>1-9)</sup>됨에 따라 이에 대한 研究의 必要性이 더욱 증대되고 있다. 또한 非破壞 檢査技術의 발달과 더불어 破壞力學의 概念에 의한 機器의 設計, 檢査 및 安全性評價를 위하여 작은 表面균열에 대한 데이터는 工業的 및 工學的으로 絶실히 要求됨에 따

<sup>+</sup> 1986년도 한국해양공학회 추계 학술대회 발표(1986년 12월)

\* 正會員, 慶北大學校 工科大学 機械工學科

\*\* 正會員, 金烏工科大学 機械工學科

라 이에 關한 研究가 최근 관심의 主對象이 되고 있다.

缺陷評價에 關한 規格으로서, 原子爐 壓力容器 및 배관계통을 主 적용대상으로 疲勞균열성장에 關하여 本격적으로 조사한 것은 1973년 ASME의 Code, Sec. XI<sup>1)</sup>이 최초이다. 이는 線形破壞力學의 應用에 의하여 작은 균열에 대한 許容疲勞균열길이를 설정하고, 이것을 넘는 균열에 대해서 전파과정의 해석과 취성파괴에 대한 한계길이를 계산한 것이며, 表面균열과 内部균열을 解析의 對象으로 하고 있다.

따라서 최근에는 작은 표면균열의 成長에 대해서도 應力擴大係數  $K$  등의 因子를 사용한 破壞力學의 인해석방법의 확장·응용에 關한 研究가 進行되고 있다.<sup>2-10)</sup>

本 研究에서는 工學的 및 工業的으로 그 研究의 重要性이 인정되는 작은 表面疲勞균열의 成長學動을 조사하기 爲하여 2 1/4 Cr-1 Mo 압력용기鋼材를 使用하였다. 試驗片은 지름 0.5mm, 깊이 0.5mm의 작은 表面缺陷을 人工的으로 加工하여 引張軸荷重疲勞試驗( $R=0.05$ )을 실시하여 表面上과 깊이 方向으로 發生·成長하는 表面균열을 實驗的으로 調查 研究하여 304 스테인레스鋼材<sup>11)</sup>와 두가지의 軟鋼材<sup>10-12)</sup>의 成長特性과 比較 檢討하였다.

2. 試驗片 및 實驗方法

本 實驗에 使用된 試驗片 材料는 壓力容器材로 널리 使用되는 2 1/4 Cr-1 Mo(A387) 鋼이며 그 化學成分 및 機械的 性質은 Table 1 및 Table 2와 같다. 試驗片은 2 1/4 Cr-1 Mo 鋼 厚板에서 균열成長方向이 壓延方向과 一致하도록 切斷제취하였으며 그 形狀과 크기는 Fig.1과 같다. 시험편은 機械加工후 에머리 페이퍼 800번까지 研磨한 후 試驗片 中央 平滑部表面에 작은 表面缺陷(지름 0.5mm, 깊이 0.5mm)을 다이얼 게이지가 부착된 소형 精밀드릴링머신을 使用하여 0.5mm $\phi$  드릴로 加工하고, 다시 에머리 페이퍼 1200번 까지 가볍게 재 연마한 후 비핑하였다. 人工缺陷은 표면테프리카 및 광학현미경으로 加工精密度를 확인하여 +4% 以內인 試驗片만 實驗에 使用하였다.

Table 1 Chemical composition (wt. %)

Alloy	C	Mn	Mo	Ni	Cr	Si	P	S
A387 (2 1/4 Cr-1 Mo)	0.15	0.42	0.95	0.10	2.24	0.30	0.006	0.003

Table 2 Mechanical properties

$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_{ut}$ (MPa)	Elongation (%)	Reduction in area (%)
435	508	27	70

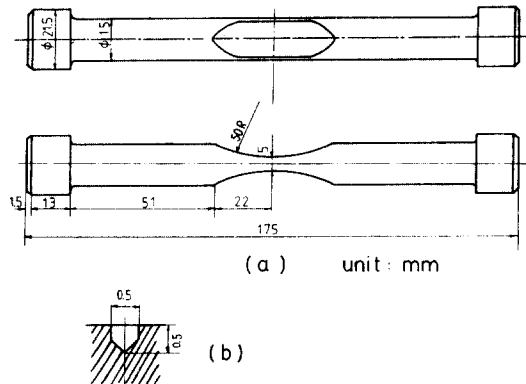


Fig. 1 Configuration of specimen and pit

- (a) specimen for fatigue test
- (b) configuration of the pit drilled on the center of the specimen

疲勞試驗은 電氣油壓式 疲勞試驗機(MTS, 10 ton)를 使用하였고, 大氣中에서 應力比  $R=0.05$ 의 荷重制御疲勞試驗을 실시하였다. 荷重波形은 주파수 10 Hz의 正弦波를 使用하였다.

表面균열길이  $2a$ 는 一定反復數( $N_f$ 의 5~7%)마다 試驗機를 일시 정지시키고 레프리카를 채취 보관하고, 광학현미경을 使用하여 高精密度로 測定하였다. 또 表面缺陷의 길이  $b$  및 균열면 형상은 비치마크 (beach mark)법과 텀퍼칼리(temper color)법을 使用하여, 表面균열길이  $2a$ 를 개입시켜 길이  $b$ 를 決定하는 方法을 利用하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 應力-荷重反復數 特性

Fig.2에 本實驗에서 얻은 작은 人工缺陷材의 인장축하중疲勞試驗( $R=0.05$ )에 의한 상온의  $S-N_f$ 곡선 ( $\circ, \bullet$ )을 公稱應力의 最大應力  $\sigma_{max}$ 와 破斷反復數  $N_f$ 로 나타낸다. 이 선도상에는 本 研究에서 실시된

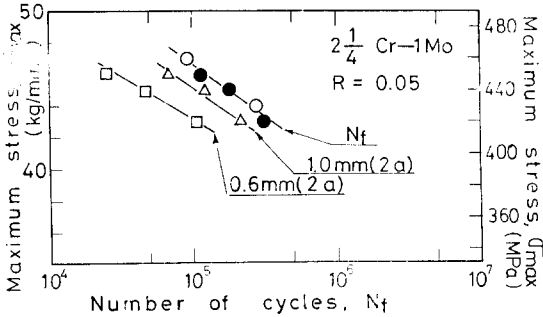


Fig. 2 The number of load cycles for the specified crack length at later stage of the fatigue life

應力の 범위를 나타내고 있다. 또 작은 表面균열의 發生時期와 성장거동을 조사하기 위하여 Fig.2 상에는  $S-N_f$  곡선상에 ●으로 나타낸 세가지 應力레벨 즉  $\sigma_{max} = 421, 441, 451 \text{ MPa}$ 에 한하여  $2a$ 가 어떤 一定值로 되는 反復數를 연결한 等균열길이 곡선을 병기하였다. 즉 Fig.2 상에는 균열길이 어떤 一定值로 되는 反復수  $N$ (즉  $2a = 0.6 \text{ mm}$ (□로 表示)와  $1.0 \text{ mm}$ (△로 表示))을 연결한 等균열길이 곡선과 破斷반복수  $N_f$ 를 表示한다.

이 等균열길이 곡선은  $S-N_f$  곡선과 거의 平行하고  $N_{2a} = \text{const.}$   $N_f$ 간의 比는 應力레벨에 큰 影響없이 거의 一定하며, 이 傾向은 연장材<sup>10,12)</sup> 스테인레스 강材의 結果<sup>11)</sup>와도 잘 일치한다. 이상의 結果는 破壞力學的인 疲勞壽命의 豫測과 檢査에도 有用하다.

3.2 疲勞균열의 發生 및 成長變動

Fig.2 상의  $S-N_f$  곡선상의 데이터중 세가지 應力레벨 즉  $\sigma_{max} = 421, 441, 451 \text{ MPa}$ 에 한하여 疲勞균열의 發生 및 成長變動을 조사하여 Fig.3에 나타내었다. Fig.3상에는 表面균열길이  $2a$ 의 半인  $a$ 와 反復수  $N$ 와의 特性과 길이  $b$ 와  $N$ 의 特性을 同時에 나타낸다.  $a-N$ 特性은 應力레벨에 따라 각각 △, ○, □로 表示하고  $b-N$ 特性은 각각 ▲, ●, ■로 表示하였다.

人工缺陷에서의 表面균열의 發生時期는 壽命의 10% 以前에 發生하여 反復수의 增加와 더불어 서서히 增加하며 작은 노치를 포함한 균열의 長이가  $0.6 \text{ mm}$ 가 될 때 세가지 應力레벨은 각각  $3 \times 10^4, 5.6 \times 10^4, 11 \times 10^4$ 의 反復수에 달하며 疲勞壽命의 後期에서는 급격히 增加하는 傾向을 나타내었다. Fig.4a,

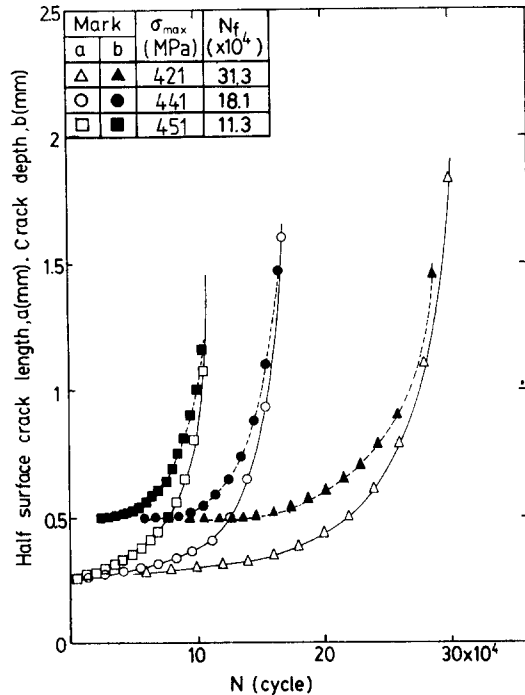


Fig. 3 Propagation behaviors of fatigue crack initiated from a notch for 2 1/4 Cr-1 Mo steel

Fig.4b는 각각 表面길이  $2a$ , 길이  $b$ 와 反復수  $b/N_f$ 와의 關係를 나타낸다. 또 이 곡線에는 比較를 하기 위하여 SUS 304材<sup>11)</sup>, S15C(G,H)<sup>10,12)</sup>材의 자료도 同時에 밴드로 表示하였다. 이 압력용기鋼材의 작은 결함에서 發生하는 疲勞균열은 Fig.4와 같이 壽命의 10% 以前이고  $2a = 0.6 \text{ mm}$ 일 때 壽命의 20~30%에 달하고  $2a = 1 \text{ mm}$ 일 때 疲勞壽命의 67%~72%에 달한다. 이러한 成長變動은 SUS 303材, 두가지의 S15C材 보다 成長速度가 낮은 것을 알 수 있다. 그러나 Fig.4와 같이  $2a, b-N/N_f$  곡線으로 나타내면 應力레벨에 거의 의존하지 않고 좁은 분산밴드내에 데이터가 모이는 特性을 알 수 있고 反復數比의 增加에 따라 圓滑하게 增加함을 알 수 있다. 이와같은 成長特性은 SUS 304材,<sup>11)</sup> S15C材<sup>10,12)</sup>의 결과와도 일치하는 傾向을 나타내고 있다. 이와같은 特性을 利用하면  $S-N_f$  곡선과 균열의 成長曲線을 용이하게 추정가능함이 다른 보고서에 보고될 예정이다.<sup>13)</sup> 따라서 Fig.3 및 Fig.4와 같은 表面균열길이  $2a$  및 길이  $b$ 의 자료를 利用하여 그 成長速度와 破壞力學的의 因子인 應力擴大係數에 의하여 비교·검토하였다.

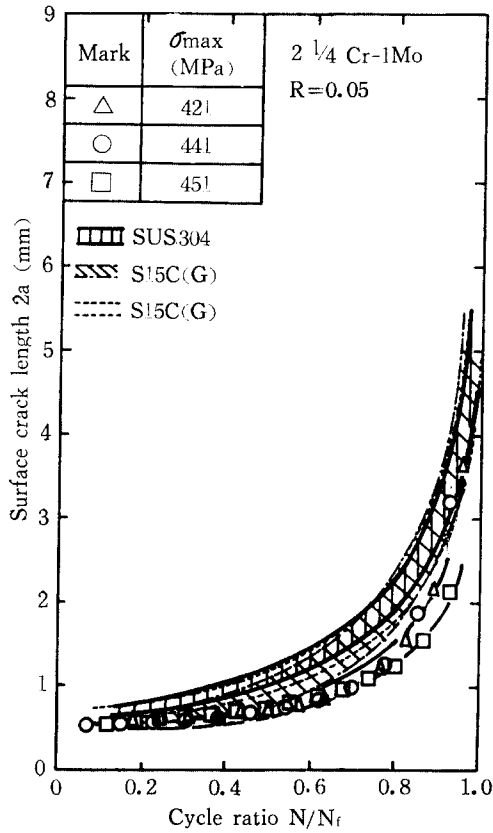


Fig. 4a Relation between surface crack length and the cycle ratio

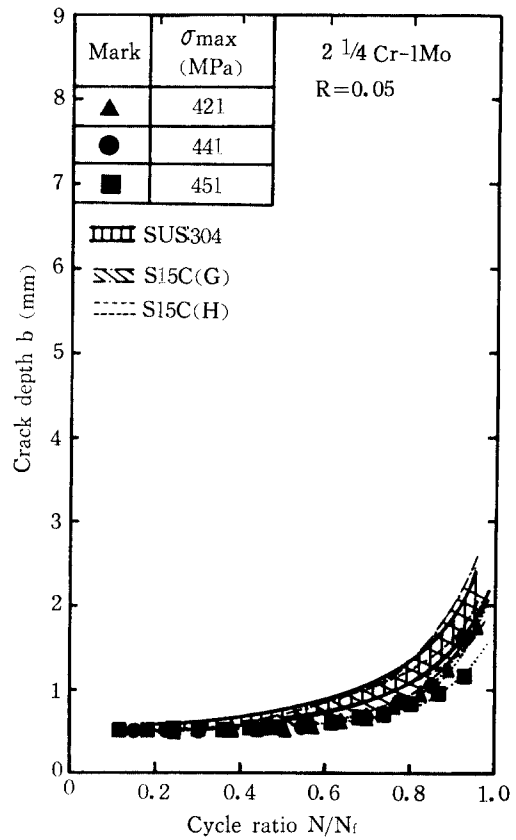


Fig. 4b Relation between crack depth and the cycle ratio

### 3.3 균열면 形狀의 變化

本 研究에 의하면 平滑材에서 發生·成長하는 작은 表面균열은 全 壽命을 통해서 試驗片 表面 및 荷重軸에 대해서 應力배분과 무관하게 거의 直交된 平坦한 破面을 形成하고 이 二次元 形狀은 試驗片 表面과 균열前緣이 直交하는 半圓에 가까운 形狀을 가짐을 알 수 있다. 또한 작은 表面缺陷試驗片도 균열이 成長함에 따라 半圓에 가까운 形狀으로 됨을 알 수 있다.

이와 같은 데이터를 使用하여 疲勞균열의 表面길이와 깊이의 형상비(aspect ratio)  $b/a$  즉 균열면 形狀의 균열 成長에 따른 變化를 Fig.5에 나타낸다. Fig.5상에는 材料에 따른 균열형상비를 서로 比較하기 위하여 SUS 304材, S15C(G,H)材를 同時에 나타내었다. 이 데이터에서 다음과 같은 사항을 알 수 있다.

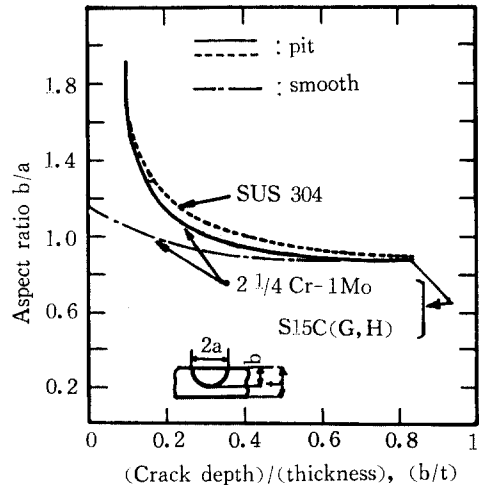


Fig. 5 Relation of aspect ratio ( $b/a$ ) with the ratio of crack depth versus the thickness of specimen

첫째, 균열의 성장과 더불어  $b/t$ 가 0.4以上에서  $b/a$ 가 약 0.9의 거의 半圓에 가깝게 된다.

둘째, 균열의 성장과 더불어  $b/a$ 가 서서히 저하하고  $b/t$ 가 0.5이상은 平偏化 되는 경향을 나타낸다.

3.4 작은 表面균열 成長特性的 破壞力學的 整理

上記의 모든 結果를 基礎로 하여 작은 人工 表面 缺陷材에서 發生·成長하는 작은 表面균열의 成長特性을 發生 直後에서부터 破斷에 이르는 전 과정에 關하여 破壞力學的 評價를 시도하였다. 이때 成長速度에 對해서 以下의 두가지 方法으로 정리를 실시하여 그 結果를 Figs.6, 7, 8에 나타낸다.

應力擴大係數는 Shah-Kobayashi의 반타원형균열의

$\Delta K$ 식<sup>15)</sup>을 使用하였고 自由表面의 影響을 나타내는  $\phi$ 值는 완전타원적분으로 아래와 같은 식을 利用하여 求하였다.

$$\Delta K_I = \frac{1.12\Delta\sigma\sqrt{\pi b}}{\phi} \left( \left( \frac{b}{a} \right)^2 \cos^2\psi + \sin^2\psi \right)^{1/4} \quad (1)$$

$$\phi = \int_0^{\pi/2} \left( 1 - \frac{a^2 - b^2}{a^2} \sin^2\psi \right)^{1/2} d\psi \quad (2)$$

표면방향의 疲勞균열의  $\Delta K_{Ia}$ 는  $\psi=0$ 일 때의  $\Delta K_I$ 의 값이며 깊이방향의 疲勞균열(最深點)에서의  $\Delta K_{Ib}$ 는  $\psi=\pi/2$ 일 때의  $\Delta K_I$ 의 값으로 된다.

1) 人工缺陷材에서의 疲勞균열의 成長特性

a)  $\Delta K_{Ia} - da/dN$  特性

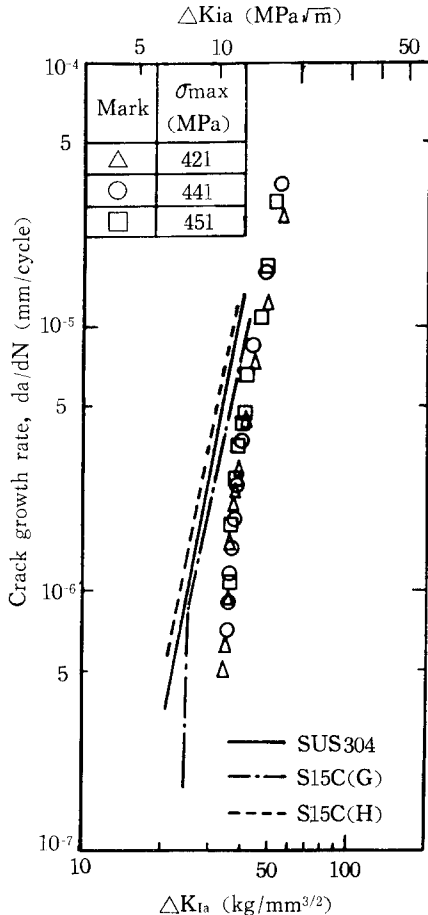


Fig. 6 Dependence of the growth rate of small fatigue crack upon the stress intensity factor range,  $\Delta K_{Ia}$

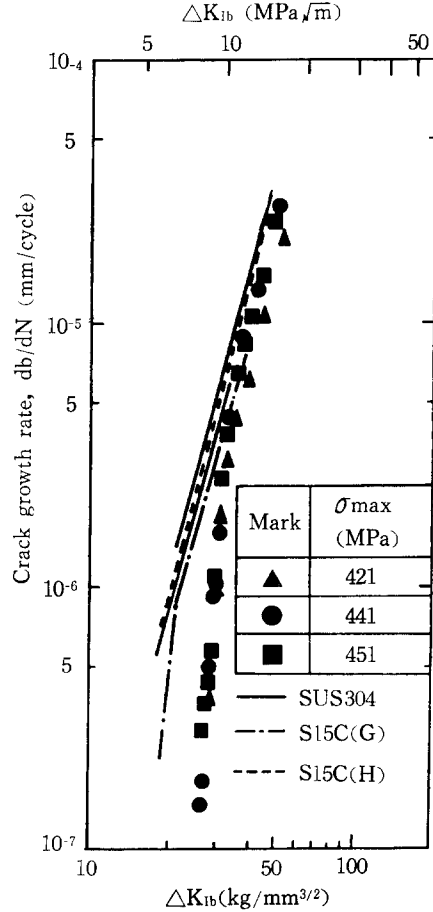


Fig. 7 Dependence of the growth rate of small fatigue crack upon the stress intensity factor range,  $\Delta K_{Ib}$

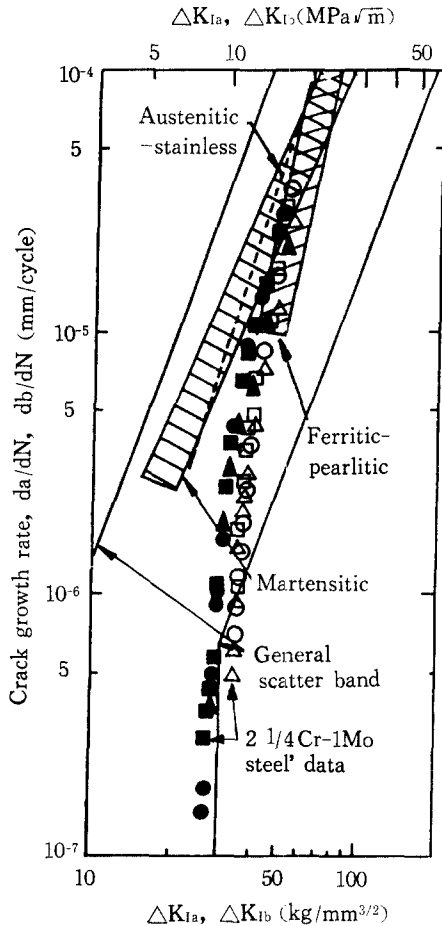


Fig. 8 Superposition of crack growth rate data of 2 1/4 Cr-1Mo steel on the general fatigue crack growth scatter band for various steels and Barsom's scatter band

Fig.6은 表面균열의 表面上의 응력확대계수 범위  $\Delta K_{Ia}$ 와 균열의 表面길이의 成長速度  $da/dN$ 의 特性을 나타낸다. 이때 식(2)의  $\phi$ 値는 Simpson式을 使用하여 數値積分 하였다. 세가지 응력레벨하에서 發生·成長한 작은 表面균열의  $da/dN$ 는  $\Delta K_{Ia}$ 에 잘의 존하며 또한 응력레벨의 차이에 따른 應力依存性이 發生하지 않고 좁은 밴드 內에 잘 모이고 있다.

$\Delta K_{Ia}$ 値 11~12MPa를 전후로 하여 線圖의 기울기가 약간 달라짐을 알 수 있다. 이는 균열發生初期 人工缺陷의 影響으로 앞에서 언급한 바와 같이 疲勞균열發生初期 단계에서는 人工缺陷部 表面에서 부터 균열이 發生하여 점차 깊이方向으로 확장되어 가나 加工된 人工缺陷에 의하여 결함이 없을 경우보

다 表面方向의 균열성장速度가 달라질 것으로 예상 된다.

$\Delta K_{Ia}$ 値가 12를 넘어 서면 결함부를 포함하는 완전한 반타원형 균열이 형성되고 그 以後에는 表面方向 및 깊이方向으로 同時に 균열이 成長하므로 앞의 경우보다 表面균열의 成長速度가 느려진 것으로 생각된다.

人工缺陷의 影響이 적은 安全成長의 영역을 밴드로 생각하여 균열成長速度를 求하면 아래 식으로 표현 할 수 있다. 즉

$$\Delta K_{Ia} > 12 \text{ MPa}$$

$$da/dN = C (\Delta K_{Ia})^m$$

$$(C = 1.9 \times 10^{-11} \sim 1.3 \times 10^{-11}, m = 5.7)$$

Fig.6 상에는 본 研究와 같은 작은 人工缺陷의 成長擧動의 特性과 SUS 304鋼 및 두가지 연강재(G, H)의 結果를 同時に 나타낸다.

2 1/4 Cr-1 Mo鋼材는 세가지 비교자료보다 同一한  $\Delta K_{Ia}$ 値에 비하여 균열의 成長速度가  $\Delta K_{Ia}$ 値가 15 MPa 以下에서는 낮은 경향을 나타내었다.

b)  $\Delta K_{Ib}$  -  $db/dN$  特性

깊이方向의 균열길이  $b$ 의 成長速度  $db/dN$ 와  $K_{Ib}$  (식(1)에서  $\psi = \frac{\pi}{2}$ 일 때의  $\Delta K_I$  값)와의 關係를 양대수지에 나타낸 結果가 Fig.7 이다.  $\Delta K_{Ib}$  -  $db/dN$  사이에는 양대수지에서 線形的인 關係가 成立되며  $db/dN = C (\Delta K_{Ib})^m$  으로 표현할 수 있다. 이때 安全成長영역을 밴드로 나타내어  $C, m$  값을 求하면 다음과 같다.

$$C = 1 \times 10^{-11} \sim 1.6 \times 10^{-11}$$

$$m = 5.0$$

또한 Fig.7 上에는 SUS 304鋼, 두가지 연강材 (G, H)의 結果도 同時に 비교하였다.  $\Delta K_{Ib}$ 値가 11 MPa 以下에서는 2 1/4 Cr-1 Mo鋼材가 낮은 成長速度를 나타내지만 11MPa 以上의 값에서는 세가지 비교자료와 비슷한 成長特性을 나타내었다.

2) 貫通大균열의 데이터와의 比較

本 實驗에서 求한 2 1/4 Cr-1 Mo 鋼材의 작은 表面균열材에 대한  $da/dN \sim \Delta K_{Ia}$  선도와  $db/dN \sim \Delta K_{Ib}$  선도를 貫通大균열材의 데이터<sup>14)</sup>와 비교·검토하기 위하여 Fig.8에 중첩시켜 나타내었다. 貫通大균열의 데이터는 一般的인 여러가지 鋼材에 대한  $da/dN \sim \Delta K_I$ 의 關係線圖를 분산밴드로 나타내고 있으며 또한 特定 鋼材에 대한 關係線圖를 좁은 밴드 및 점선으로 나타내고 있다. 本 實驗에서 使用한 압력용기

鋼材의 작은 表面균열에 대한 데이터는 그림에서 나타난 바와 같이 貫通대균열의 데이터선도와 不限界應力擴大係數범위 사이를 연결시켜 주는 교량역할을 하고 있음을 알 수 있다. 또한 작은 表面균열材 데이터는 貫通대균열材의 분산밴드내에 잘 포함되나 人工缺陷材의 表面方向으로의 균열성장初期단계에서는 분산밴드를 약간 벗어나는 경향을 보이고 있다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 균열성장初期 단계에서는 균열의 성장이 人工缺陷에 의해 큰 영향을 받는 관계에 기인한다.

#### 4. 結 論

압력용기鋼인 2 1/4 Cr-1 Mo材料에 實構造物에 存在 가능한 작은 人工缺陷(지름 0.5mm, 길이 0.5mm)을 加工하여 常溫에서 應力比  $R=0.05$ 의 하중제어 疲勞試驗을 실시하여 表面疲勞균열의 舉動을 破壞力學的으로 研究하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

1) 應力레벨의 차이에도 불구하고 表面缺陷에서 發生·成長하는 균열길이 및 균열깊이는 같은 반복수비( $N/N_f$ )에서는 좁은 밴드내에 모이며 비슷한 特性을 갖는다.

2) 表面균열길이 및 균열깊이의 成長速度  $da/dN$  및  $db/dN$ 를  $\Delta K_{Ia}$  및  $\Delta K_{Ib}$ 로 整理한 結果 應力레벨의 차이에 따른 應力依存성이 크게 發生하지 않고 線形的인 관계가 成立하며 貫通대균열의 자료와도 일치하는 경향을 나타내었다.

#### 參 考 文 獻

- 1) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. XI Appendix A, 1977
- 2) De Los Rios, E.R., Z. Tang and K.J. Miller, "Short Crack Fatigue Behavior in a Medium Carbon Steel," *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* 7, pp.97-108, 1984
- 3) Morris, W.L., "The Noncontinuum Crack Tip Deformation Behavior of Surface Microcracks," *Metall. Trans. 11A*, pp.1117-1123, 1980
- 4) Landgraf, R. W., J. Morrow and T. Endo, "Determination of the Cyclic Stress Strain Curve" *J. Mater.* 4, pp. 176-188, 1969
- 5) Brown, C.W. and M.A. Hicks, "A Study of Short Fatigue Crack Growth Behavior in Titanium Alloy" IMI 685. *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.* 6 pp. 67-76, 1983
- 6) De Los Rios, E.R., Hussain, J. Mohamed, and K.J. Miller, "A Micro-Mechanics Analysis for Short Fatigue Crack Growth," *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.* 8, pp.49-63, 1985
- 7) 結城良治·北川英夫·徐昌敏·持田郁夫, "高溫におけるステンレス鋼の表面き裂の疲勞き裂成長特性," *材料*, 第 31-344, pp.500-504, 1982
- 8) Kitagawa, H., C.M. Suh et al., "Mechanical and Non-Mechanical Categories in Fatigue Study—A Stand Point in Small Surface Crack Problems in Fatigue—" *ASME, AMD-Vol.* 47 pp.167-184, 1981
- 9) 北川英夫·結城良治·徐昌敏, "小さな人工缺陷からの疲勞き裂成長舉動," *日本材料學會の第14回疲勞 Symp.*, pp.26-30, 1980
- 10) Kitagawa, H., S. Takahashi, C.M. Suh and S. Miyashita, "Quantitative Analysis of Fatigue Process—Micro Cracks and Slip Line Under Cyclic Strain," *ASTM STP* 675, pp.420-449, 1979
- 11) 徐昌敏·金奎南, "SUS 304강의 상온하 표면균열의 發生 成長거동에 관한 연구," *대한기계학회논문집* 제8-3 pp.195-200, 1984
- 12) 金奎南·徐昌敏外 3명, "연강의 고온표면 피로 균열의 成長舉動에 관한 研究," *대한기계학회논문집* 제7-4, pp.425-433, 1983
- 13) Suh, C.M and H. Kitagawa, "Crack Growth Behaviour of Fatigue Microcracks in Low Carbon Steels." *Fatigue, Fract. Engng. Mater., Structure*, in printing, 1987
- 14) Fuchs, H.O. and R.I. Stephens, "Metal Fatigue in Engineering" John Wiley & Sons, New York pp.87, 1980
- 15) Kobayashi, A.S., "Crack Opening Displacement in a Surface Flawed Plate Subjected to Tension or Plate Bending," *Proc. Second Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials, ASM, ICM-II*, pp.1073-1077, 1976