

<論 文>

軟鋼의 高温 表面疲勞균열 成長舉動에 관한 研究

金奎南* · 徐昌敏** · 結城良治***
北川英夫*** · 姜成守*

(1983年7月19日 接受)

A Study on Propagation Behaviors of Surface-Fatigue-Crack in
the Mild Steel at Elevated Temperatures

Giu-Nam Kim, Chang-Min Suh, Ryoji Yuuki,
Hideo Kitagawa and Sung-Su Kang

Abstract

Fatigue tests by axial loading ($R=0.1$) were carried out to investigate fatigue crack growth properties of small surface cracks in mild steel at room temperature, 250°C and 400°C, by using flat specimens with a small artificial pit.

All the data of the fatigue crack growth rate obtained in the present tests are determined as a function of the stress intensity factor range, so that the applicability of liner fracture mechanics to the fatigue crack growth of surface cracks at elevated temperatures is investigated and discussed in comparison with the data of type 304 stainless steel at room temperature and elevated temperature.

The obtained results are as follows:

- 1) Relations of both surface fatigue crack length and its depth to cycle ratio fall within a narrow scatter band in spite of different stress levels.
- 2) The $\Delta\sigma\sqrt{\pi a}-da/dN$ relation of surface fatigue crack growth at room temperature is independent of the stress level and can be plotted as a straight line at log-log diagram, but the relation at 400°C depends partly on the stress level.
- 3) Relations of the fatigue crack growth into depth $d(2b)/dN$ and its stress intensity factor range ΔK_I , accounted for the aspect ratio variation, fall within a narrow scatter band for wide range of the applied stress levels. And $\Delta K_I/E-d(2b)/dN$ relations of mild steel at different stress level coincide relatively well with the data of type 304 stainless steel.
- 4) The value of aspect ratio obtained by a beach mark method and a temper coloring method approaches about 0.9 in common with crack growth and it is independent of stress level and temperatures.
- 5) The equi-crack length curve is parallel to $S-N_f$ curve at elevated temperatures.

* 正會員, 釜山大學校 工科大學 機械工學科

** 正會員, 慶北大學校 工科大學 機械工學科

*** 東京大學 生産技術研究所

1. 序 論

요즈음 산업활동의 급속한 發展과 더불어, 構造物의 大型化, 材料의 加혹한 使用條件下에, 構造物 및 機器는 그 종류, 기능, 使用環境이 나날이 多樣化되고 있다. 또한 오늘날 치열한 技術경쟁하에 安全에 대한 社會의 強力한 요청에 호응하기 위해서는, 構造物의 設計 및 安全性 評價에는 단순히 材料의 引強張度 및 降伏點에 適當한 安全을 加미한, 즉 許容應力을 基礎로 하는 종래의 設計法으로서는 이를 만족시키기에 곤란하다. 따라서 構造物의 檢査, 보수, 健全性 評價 및 機器의 수명에 應급의 技術問題를 解決할 수 있는 기준설정이 가능한 해석적인 근거를 基本으로 하는 새로운 安全性 評價法의 확립이 필요시 되고 있다. 이는 最近에 發達하여 工學으로 널리 적용되는 破壞力學의 概念을 導入하여, 構造物 및 機器의 破壞·破損에 대한 安全性을 실증적 근거로 하는 지식을 축적하고 그 特性을 충분히 分析·解析함이 必要하다.

構造物은 各各의 機能·構造·使用環境·溫度影響 등에 의하여 發生하는 破壞·손상의 종류·형식은 多種多樣 하지만, 實構造物에 가장 높은 빈도로 生기는 것은 疲勞균열손상이다¹⁾. 이것은 材料의 破壞現象으로 일국 면에 지나지 않지만, 構造物의 檢査, 保守, 安全性評價 上으로 極히 重要한 基本과정이고 構造物의 수명을 예측·추정하기 위한 基礎的 解析 模型이 된다.

缺陷評價에 關한 規格으로서, 原子爐 壓力容器 및 配管 系統을 主 적용대상으로 疲勞균열성장에 關하여 本 격적으로 調査한 것은 1973 年 ASME 的 Code, Sec. XI²⁾이 최초이다. 이는 線形破壞力學의 應用에 依하여 작은 균열에 對한 許容疲勞길이를 설정하고, 이것을 넘 는 균열에 對해서 전과과정의 해석과 취성파괴에 對한 한계길이를 계산한 것이며, 表面균열과 内部균열을 解析의 對象으로 하고 있다.

이 두 균열을 比較하면 表面균열쪽이 일반적으로 有 害도가 크며, 應力分布상으로도 불리한 조건에 있다. 사실 表面은 加工에 依한 요철 및 노치가 형성되는 일이 많고, 高溫에 따른 영향, 環境에 依한 부식, 응력 부식균열, 액체 및 固體와의 접촉등에 依한 表面손상 은 더불어 不리한 要因으로 된다. 이러한 表面균열의 發生·成長特性은 高溫하에 作動하는 高溫機器에 있어 서는 溫度에 따른 材質의 變化와 더불어 더욱 검토 해야 할 과제³⁾⁴⁾⁵⁾이다. 이러한 高溫下의 表面균열의 疲勞 균열성장에는 高溫環境, 크리프, 金屬學的 影響등

많은 요인에 기인하며, 실온과는 다른 고온 특유의 現象도⁵⁾ 豫想된다. 그러나 室溫에 對한 最近의 연구 데이터의 축적에 比較하면, 종래의 연구대상으로 되어왔던 大型 貫通균열에 關한 高온 피로균열 성장 特性에 關한 研究를 제외하고는 實驗上·解析上의 근란에 依하여 선진국에서도 高온에 關한 表面균열의 研究例는 적고 또한 研究報告를 거의 찾아 볼 수 없는 것이 현실 정이다⁶⁾⁷⁾.

本 研究에서는 以上과 같은 상황에 특히 구조물의 설계 및 안전성 평가상에 문제 가 되는 일이 많은 표면균열에 關하여 軟鋼(S15C)材의 常溫 및 高溫(400°C, 250°C)의 引張-軸荷重($R=0.1$)疲勞試驗을 실시하여 작은 表面균열의 發生·成長特性을 實驗으로 조사·연구하여, 그것에 破壞力學의 확장· 적용의 가능성 및 그 한계 문제점에 關하여 검토하고자 한다.

2. 實驗方法

試驗片은 直徑 25mm의 軟鋼 熱間壓延丸棒이고, 이것으로부터 Fig. 1(a)와 같은 형상의 引張-軸荷重의 疲勞試驗片을 제작 하였다. 이때 平滑試驗片은 機械加工 한 後 中央平滑部를 연마지 2000번 까지 연마한 後 산화크롬분말로써 버핑하였다.

本 연구에서는 試驗片 中央 表面에 加工한 작은 피트형 人工 缺陷에서 發生·成長하는 表面 균열의 成長 特性과 $S-N_f$ 特性에 關하여 조사 하였다. 人工 缺陷은 直徑 0.5mm, 길이 0.5mm이며, 이 形狀을 Fig. 1(b)에 나타낸다. 이 缺陷은 試驗片의 成形加工後, 시험편의 中央平滑部에 다이알게이지가 부착된 小形 정밀드릴머시인을 使用하여 0.5mmφ 드릴로 加工하고 光學顯微鏡으로 그 加工精密度를 確認 하였다. 또한 잔류응력을 제거하기 爲하여 400°C에서 한시간 熱處理한 後 空冷 시켰다.

疲勞試驗은 電氣油壓式 疲勞試驗機(MTS, 10 톤)에 依하고 常溫과 高溫의 大氣中에 應力比 $R=0.1$ 의 荷重制御 疲勞試驗을 실시 하였다. 荷重波形은 常溫에서는 900cpm의 正弦波를 使用하고, 高溫에서는 疲勞損傷이 가장 큰 正鋸齒狀波(上昇時間/下降時間=7.78)⁸⁾로 周波數 400cpm 一定으로 실시 하였다. 加熱方法은 高周波 誘導加熱코일(JHS-100型, 最大 10KW 可變式)을 使用하고, 試驗溫度는 400°C와 250°C 一定 溫度를 유지 시켰으며 온도는 시험편 중앙 表面상에 접합시킨 熱傳對에 依하여 $\pm 5^\circ\text{C}$ 以內로 調整 하였다.

작은 人工 缺陷에서 發生하는 균열의 表面길이 2a는

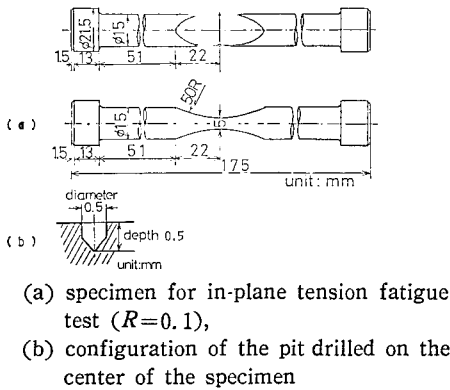


Fig. 1 Configuration of the specimen and pit

焦點距離가 긴 移動式 顯微鏡을 使用하여 測定 하였다. 表面균열의 길이방향의 균열길이 b 및 균열면형상(aspect ratio) b/a 의 測定은 넵퍼컬러法和 비치마크法을 併用하고 表面균열이 $2a$ 를 개입시켜 균열길이 b 를 決定 하는 方法을 취하였다. 이 方法에 의하여 表面균열의 길이방향의 成長速度 $d(2b)/dN$ 를 구하고, 이 成長舉動을 破壞力學的인 개념을 도입하여 定量的으로 조사 하며 SUS 304의 高溫(538°C)의 데이터와도 比較·檢討한다. 또한 疲勞試驗片중에 破斷面 觀察이 요구되는 破面은 SEM에 의하여 高溫疲勞破面の 프랙토그래피에 대해서도 조사하였다.

3. 高溫下의 機械的 性質

本 實驗에 使用된 재료의 化學成分은 Table 1과 같다. 또한 KS 14-A형 인장시험편을 사용하여 常溫 및 高溫(250°C, 400°C, 500°C)下에서 引張速度 3mm/min로 一定하게 引張 시킬 때 얻어진 荷重變形 線圖를 Fig. 2(a)에 나타내며, 이러한 高溫下의 기계적 성질을 Table 1에 나타낸다.

이러한 高溫의 機械的 性質을 0.2%炭素鋼의 研究結果¹⁹⁾와 比較하여 Fig. 2(b)에 나타낸다. 본 시험편의 靑熱脆性의 溫度範圍는 약 200~350°C이므로 이 溫度範圍에서는 靑性이 크게 감소하고 있으며, 引張強度 및 降伏點에는 다소의 차이만이 存在 하였다. 500°C

Table 1 Chemical composition and mechanical properties

Chemical composition, wt, %							
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.15	0.23	0.43	0.020	0.024	0.14	0.05	0.07

Mechanical properties*				
Temperature °C	Yield point kg/mm ²	Tensile strength kg/mm ²	Elongation %	Reduction in area %
Room temp.	31.0	46.7	36.5	68.7
250	28.9	51.1	18.6	62.1
400	22.1	48.7	28.3	64.7
500	—	45.9	38.8	72.1

* KS 14-A type tensile specimen

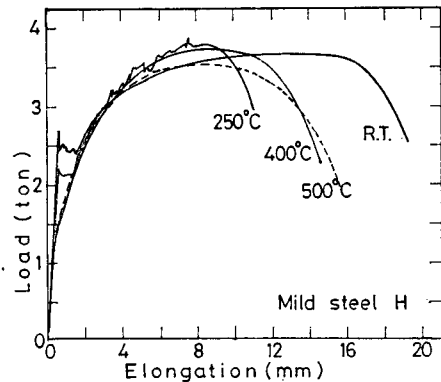


Fig. 2(a) Load-elongation curves for mild steel H

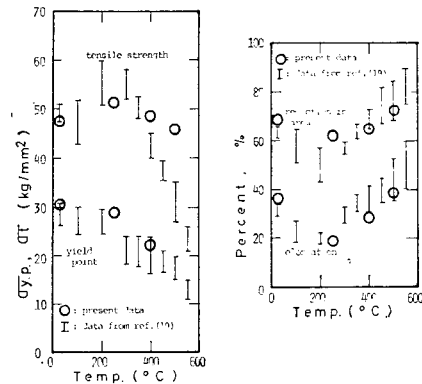


Fig. 2(b) Variation of mechanical properties at elevated temperatures

에서는 引張強度는 多少 감소 하지만 靑性이 점차 증가하고 있다.

특히 Fig. 2(a)의 250°C의 곡선상에는 鋸齒狀의 곡선이 많이 나타나고 있지만, 이것은 炭素 및 窒素 등의 溶質原子와 轉位의 相互作用에 의한 결과로 分析되고 있다¹⁹⁾.

4. 人工 缺陷材의 S-N 特性

Fig. 3(a)에 본 실험에서 얻은 軟鋼(H材라 칭함)의

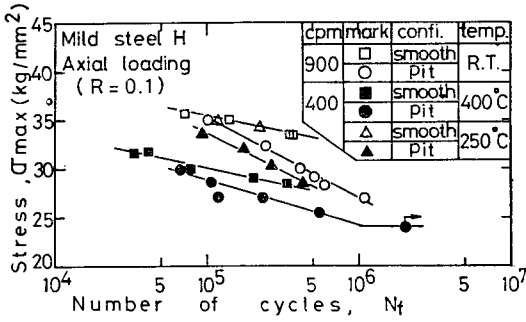


Fig. 3(a) Relation between maximum stress, σ_{max} , and the number of cycles to fracture N_f .

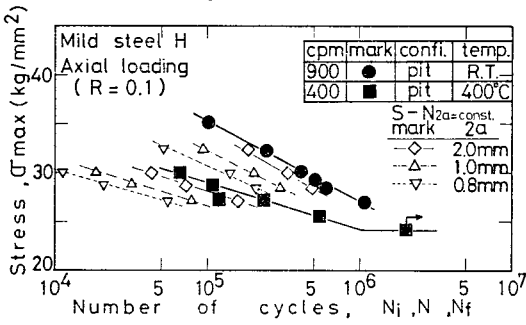


Fig. 3(b) The number of load cycles for the specified crack length at later stage of the fatigue life

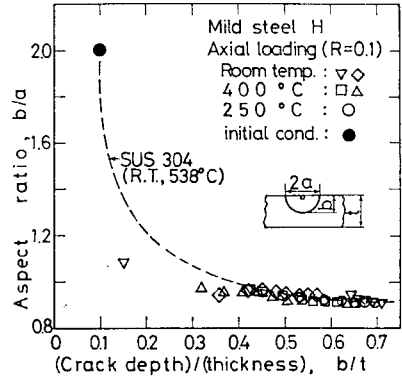


Fig. 4 Relation of aspect ratio (b/a) with the ratio of crack depth versus the thickness of specimen (b/t) for axial loading

5. 疲勞균열의 균열면 형상의 변화

피트재에서의 疲勞균열은 피트중심을 통하여 荷重方向에 垂直한 平面과 피트벽과의 交線에 따라서 發生하고 連結해서 한개의 疲勞균열면을 형성한다. 균열表面길이 $2a$ 와 깊이 b 의 비로 된 균열面形狀의 균열성장 에 따른 變化를 常溫 및 高溫을 포함하여 Fig. 4에 나타낸다. Fig. 4에 나타낸 점선은 SUS 304 스테인레스

平滑材와 人工 피트材의 引張一軸荷重 疲勞試驗($R=0.1$)에서 公稱應力의 最大應力 σ_{max} 와 反復數 N_f 에 의한 $S-N_f$ 特性을 나타낸다. 이와같이 작은 人工 피트에 의하여 切缺感도가 높고 常溫 및 高溫(250°C, 400°C)에서 疲勞強度가 低下함은 注目할 가치가 있다.

또 平滑材의 高溫에서의 疲勞強度도 400°C에서는 250°C에 비하여 온도에 의한 低下가 현저하며, 250°C의 平滑材의 데이터는 常溫의 것과 차가 없었다.

Fig. 3(b)는 人工 피트재의 常溫 및 高溫의 $S-N_f$ 곡선에 表面길이 $2a$ 가 어느 一定한 값으로 되는 反復數 N 를 연결한 等균열길이 곡선을 併記한 것으로써, 균열발생 반복수 $N_i(2a=0.8mm$ 로 정의함), 균열길이 $1mm, 2mm$ 로 될 때의 疲勞反復數 N 를 동시에 나타낸다. 이 等균열 곡선은 常溫, 高溫함께 $S-N_f$ 곡선에 거의 平行하고 $N_i, N_{2a=const.}, N_f$ 간의 비는 應力 레벨에 관계없이 거의 一定하며, 이 경향은 常溫의 軟鋼의 結果⁹⁾¹¹⁾ 및 高溫의 SUS 304 結果⁷⁾와도 잘 一致한다. 이러한 특성은 破壞力學的인 疲勞壽命의 豫測과 檢査에도 대단히 有用하다.

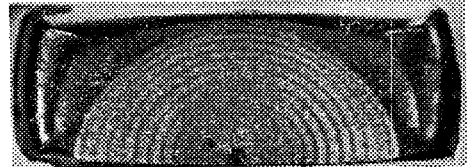


Fig. 5(a) Photo showing typical example of beach marked fatigue fracture surface of specimen with a pit (Axial Loading, $R=0.1$, type 304 stainless steel, sine wave, 10 Hz, room temp. in air)

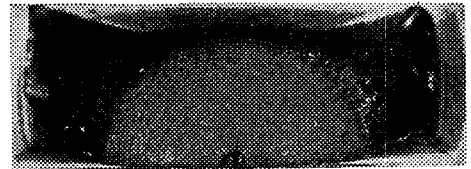


Fig. 5(b) Photo showing the relation of surface crack length and depth on the fatigue fracture surface with a pit (Axial Loading, $R=0.1$, SUS 304, sawtooth wave, 400cpm, 538°C in air, $\sigma_{max} = 30.76kg/mm^2$)

鋼의 常溫 및 高溫(538°C)의 데이터이다. 이때 비치마크법에 의한 예와 고온 피로 파단에 생긴 균열면 형상의 예를 Fig. 5(a)(b)에 각각 나타낸다. 이러한 데이터로부터 다음과 같은 결과가 얻어졌다.

- 1) 균열成長과 함께 b/a 가 급速히 低下하여 偏平化되고 b/t 가 0.4 이상에서 b/a 가 0.9인 거의 半圓에 가깝게 된다. 이 경향은 常溫과 高溫이 같고, 더우기 軟鋼 G材¹¹⁾, SUS 304⁷⁾와 같은 경향을 취하였다.
- 2) 應力레벨에 따른 균열형상비의 變化에 미치는 영향은 거의 없었다.

6. 反復數比와 疲勞균열의 成長舉動

人工 피트材의 常溫 및 高溫에서 發生하는 疲勞균열의 表面길이 $2a$ 및 깊이 b 에 대한 疲勞反復數比 N/N_f 와의 關係를 整理하여 表面길이의 데이터는 Fig. 6(a), (b), (c)에, 깊이의 데이터는 Fig. 7(a), (b), (c)에 나타낸다. Fig. 6, 7상에는 SUS 304의 데이터⁷⁾와 軟鋼 G材의 데이터¹¹⁾도 동시에 나타낸다. 이와같은 자료로부터 다음과 같은 것을 알 수 있다.

- 1) 각 온도의 데이터는 比較的 좁은 分散帶內에 모인다. 또한 이러한 경향은 SUS 304⁷⁾이나 軟鋼 G材¹¹⁾에서도 얻어졌다.
- 2) 균열은 N/N_f 가 0.2 혹은 그 以前에 發生하여 破斷까지 圓滑하게 連續的으로 成長한다.

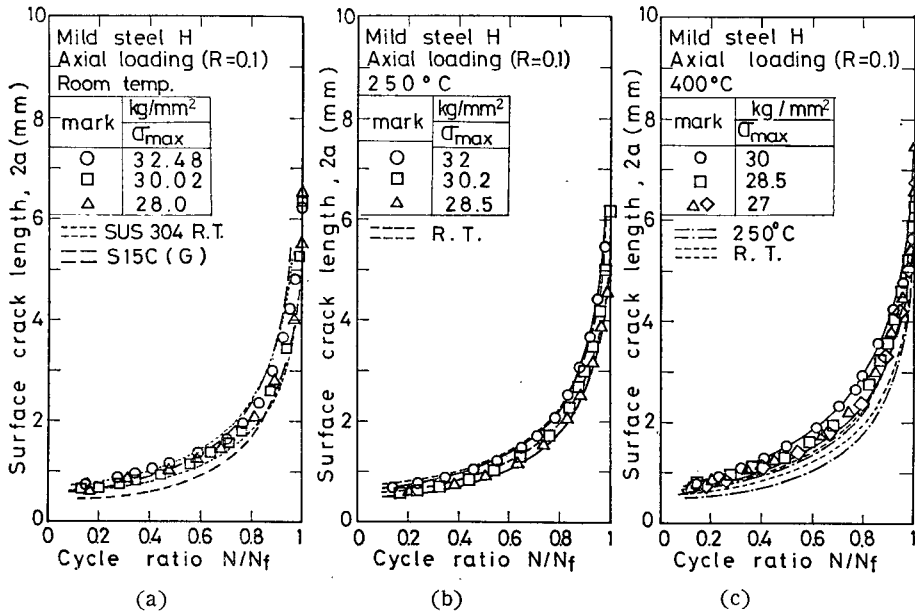
以上과 같이 疲勞壽命의 80%가 均열成長에 접하고 $2a-N/N_f$, 혹은 $b-N/N_f$, 特性에 應力依存性이 적은 것은 均열균열이 曲線이 각각 $S-N_f$ 곡선에 거의 平行으로 될 것임을 示唆하고 있다¹⁰⁾¹¹⁾. 더우기 高溫의 데이터와 常溫의 데이터가 거의 비슷한 平行 直線群으로 되는 것이 흥미롭다.

7. 疲勞균열 成長速度의 破壞力學的 整理

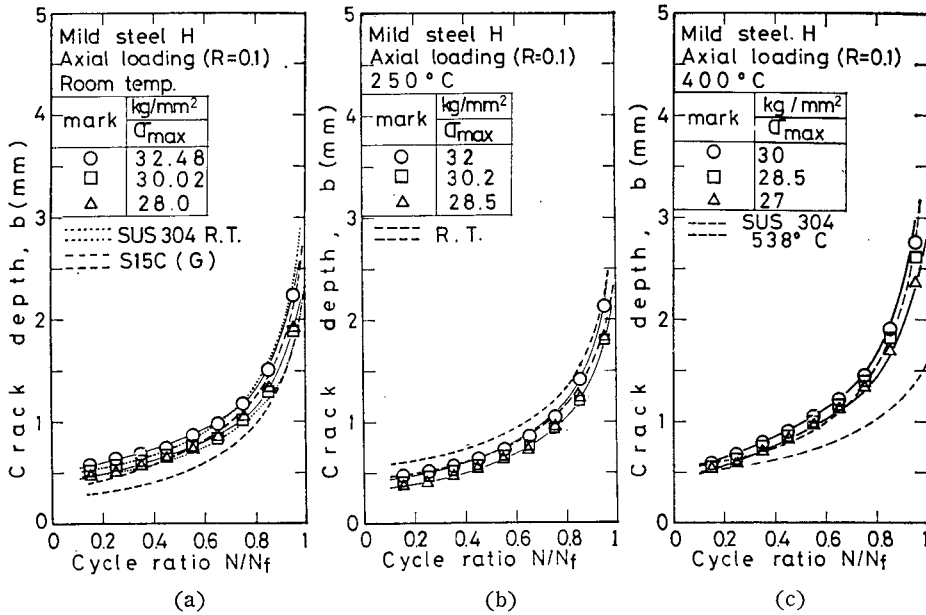
表面 缺陷에서 發生하고 單獨으로 成長하여 破斷에 달한 表面길이 $2a$ 와 最深點의 均열길이 b 의 兩者의 成長特性에 대하여 각각의 破壞力學的인 評價를 시도한다. 이것은 破壞力學的의 수법상, 均열성장 기구상, 應用上의 諸 理由에 의한다.

7.1. $\Delta\sigma\sqrt{\pi a}-d(2a)/dN$ 特性

Fig. 6에 나타낸 疲勞균열의 表面길이의 성장곡선에 서 피트의 均열發生 直後를 제외하고 均열성장 速度를 정리해서 $\log(\Delta\sigma\sqrt{\pi a})$ 와 $\log(d(2a)/dN)$ 의 關係를 Fig. 8(a), (b), (c)에 나타낸다. Fig. 8(a)는 常溫下의 데이터이고, Fig. 8(b)는 高溫下의 데이터이며, Fig. 8(c)는 이것을 一括하여 나타낸다. 常溫과 250°C에서는 各 實驗條件별로 거의 直線으로 되고, 應力依存性은 거의 없어지고 統一的인 整理가 可能하며 SUS 304의 결과⁷⁾와도 잘 일치하고 있다.



(a) at room temperature, (b) at 250°C in air, (c) at 400°C in air
Fig. 6 Relation between surface crack length and the cycle ratio

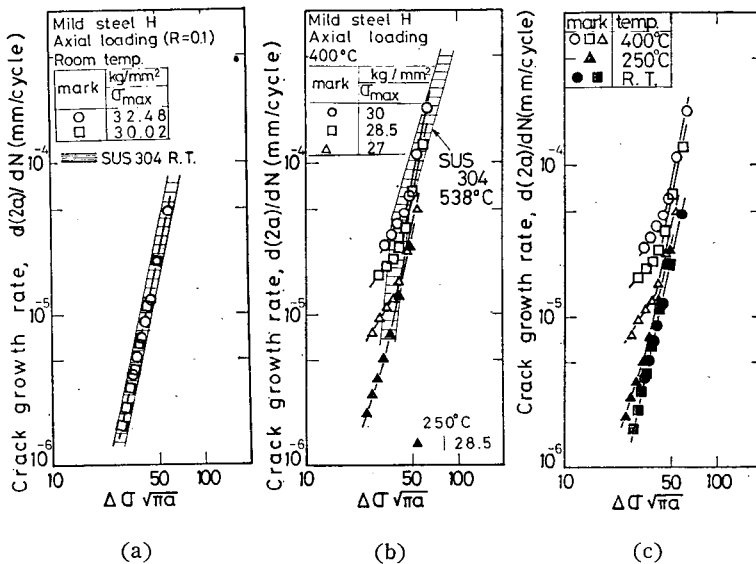


(a) at room temperature, (b) at 250°C in air, (c) at 400°C in air
Fig. 7 Relation between crack depth and the cycle ratio

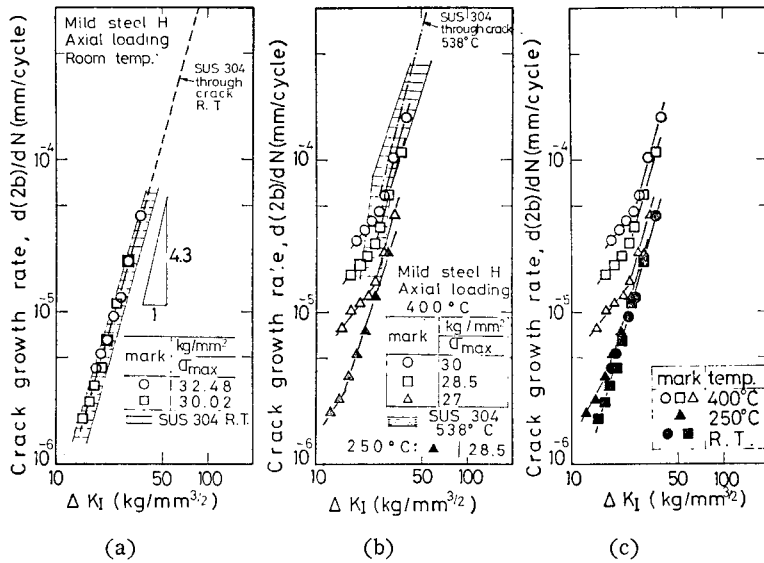
400°C에서는 세 應力레벨에서는 균열 성장의 초기에는 應力依存性이 나타나지만, 538°C의 SUS 304의 범위에 포함되고 각각의 應力레벨에 따라 절점이 있는 직선으로 되었다. 이 절점은 高溫疲勞試驗에서 나타나는 現象으로 材質의 延化, 酸素어미크(attack)에 의한 영향등¹²⁾으로 分析되고 있다.

7.2. $\Delta K_I - d(2b)/dN$ 特性

다음에 피로균열의 最深點의 均열깊이 b 의 成長速度를 고려하여 본다. 이 경우 성장하는 均열은 試驗片의 내부에 있고 외부에서 관찰할 수 없기 때문에 Fig. 5와 같은 例로 整理한 Fig. 4와 같은 均열형상면과의



(a) at room temperature, (b) at 250°C, 400°C in air, (c) plot of (a), (b)
Fig. 8 Dependence of the growth rate of small fatigue surface cracks upon $\Delta\sigma\sqrt{\pi a}$



(a) at room temperature, (b) at 250°C, 400°C in air, (c) plot of (a), (b)
Fig. 9 Dependence of the growth rate of small fatigue surface cracks initiated at a pit upon the stress intensity factor range ΔK_I

데이터로부터 구한다. 즉 Fig. 4 상에 표시된 點線의 曲線을 使用하여 表面길이 2a를 代入하여 피로균열의 길이 b를 定하는 方法을 使用 하였다.

本 研究의 表面 半橢圓균열의 ΔK_I 의 解로서는 Kobayashi 解¹³⁾의 多項式 近似式에 의하여 表面균열의 最深點의 ΔK_I 를 求하여 $\Delta K_I - d(2b)/dN$ 特性을 Fig. 9 (a), (b), (c)에 나타낸다. Fig. 9에는 本 實驗의 結果와 比較하기 위하여 SUS 304의 表面균열⁷⁾의 $\Delta K_I - d(2b)/dN$ 特性도 동시에 나타내었다. Fig. 9(a)와 같이 平板의 常溫 表面균열의 最深點의 成長特性은 應力 레벨에 關係없이 한개의 直線關係로 되고, SUS 304의 常溫의 成長特性과도 잘 일치한다.

이와같은 傾向은 降伏應力을 넘은 應力下에서도 작은 表面缺陷에서 發生하는 疲勞균열 成長特性은 貫通 均열과 같이 破壞力學的인 評價가 可能함을 나타낸다. 軟鋼의 高溫試驗의 結果도 스테인레스鋼 304의 表面 均열의 데이터와 貫通均열의 데이터와 같은 범위내에 整理되고 있다. 다만 400°C에서 均열의 초기에 생기는 應力의존성은 試驗片의 반복 스트레인(cyclic strain)을 직접 측정하여 계산하는 cyclic strain intensity factor range ΔK_I ¹⁴⁾¹¹⁾을 使用 한다면 常溫의 여러 結果⁹⁾¹⁰⁾들과 고온의 데이터가 더욱 잘 정리될 것으로 추정 되지만, 本 高溫試驗에서는 實驗上의 問題點으로 이러한 정리방법은 불가능하여 다음과 같은 방법으로 정

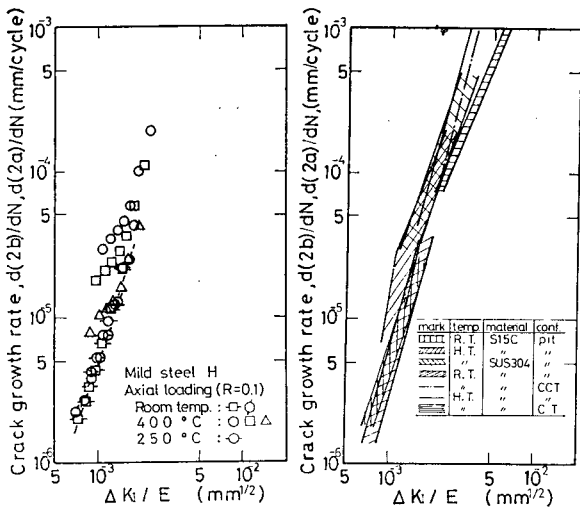
리하여 보았다.

즉 ΔK_I 의 값을 彈性係數 E로 나눈 종래의 彈性스 트레인 擴大係數로 정리하여 보기로 한다. 이때 상에서는 $E=2.07 \times 10^4$ kg/mm², 250°C, 400°C의 高溫에 대해서는 SUS 304의 高溫性質¹⁵⁾¹⁸⁾을 참고하여 각각 $E=1.82 \times 10^4$, $E=1.7 \times 10^4$ 으로 계산하여 $\Delta K_I/E$ 를 구하였다. Fig. 10(a)는 本 研究에서 얻은 데이터를 $\Delta K_I/E$ 로 정리한 결과이고, Fig. 10(b)는 本 研究의 結果와 比較하기 위하여 스테인레스鋼 304의 데이터⁷⁾와 다른 연구 結果¹⁶⁾를 동시에 나타내었다.

Fig. 10(a)의 정리 結果는 Fig. 9(a), (b), (c)의 結果보다 有限幅내에 모든 실험 데이터가 정리됨을 알 수 있다. Fig. 10(b)의 다른 데이터와의 比較에서는 常溫 및 高溫데이터가 比較의 다른 연구 結果⁷⁾¹⁶⁾와도 잘 일치함을 알 수 있다.

8. SEM에 의한 破斷面 觀察

本 研究中에 人工피트材의 400°C, $\sigma_{max}=25.5$ kg/mm², $N_f=5.42 \times 10^5$ 인 試驗片에 대하여 그 피로파단 면을 SEM으로 관찰하여 Fig. 11에 나타낸다. Fig. 11(a), (b)는 表面에서 각각 1.5mm인 곳과 3mm인 破面을 나타내며, 常溫의 軟鋼에서 관찰되는 不規則한 延性 줄무늬(ductile striation)을 나타낸다. Fig. 11은



(a) present data, (b) comparison of the present data to data from reference (7), (16).
Fig. 10 Dependence of the growth rate of fatigue surface cracks upon K_I/E

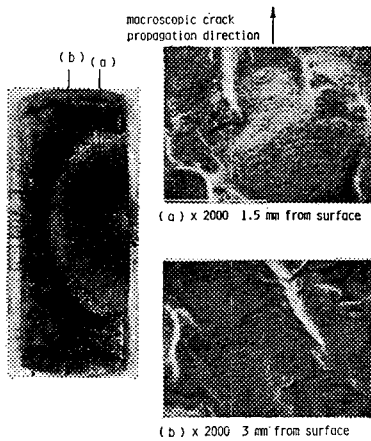


Fig. 11 SEM of oxide growth and striations on fracture surface (mild steel S15C, A.L., $R=0.1$, 400°C, 400cpm, sawtooth wave, $\sigma_{max}=25.5 \text{ kg/mm}^2$)

400°C의 고온이므로 산소이온에 의한 산화물 성장 (oxide growth)가 현저하며, 때때로 제 2차 균열이 관찰되었다.

표면으로부터 3mm인 Fig. 11(b)(균열성장속도는 약 $7.2 \times 10^{-5} \text{ mm/cycle}$)의 쪽이 Fig. 11(a)의 쪽(약 $2 \times 10^5 \text{ mm/cycle}$)보다 줄무늬의 폭이 크며 명확하게

관찰되었다. 이것은 다른 보고서¹⁷⁾와 같이 명확한 微視的인 줄무늬를 측정함에 의하여 고온에서도 巨視的인 균열의 成長速度를 파악할 수 있음을 나타낸다. 또한 표면균열의 특징으로서 이러한 명확한 줄무늬를 관찰할 수 있는 폭이 貫通균열에 비해서 대단히 좁다는 특징도 있다.

9. 結 論

軟鋼에 작은 人工 缺陷을 加工한 작은 板狀試驗片을 사용하여 常溫, 250°C 및 400°C에서의 一軸引張疲勞試驗($R=0.1$)을 실시하고, 작은 表面균열의 疲勞균열 成長 特性을 조사한다. 본 연구에서 얻어진 피로균열성장률의 모든 데이터는 應力擴大係數 範圍로 整理하여, 高溫에서의 表面피로균열의 成長率을 파악하는데 線形破壞力學이 확장 적용될 수 있는가를 研究 · 調査하며 304 스테인레스鋼의 데이터와 비교 검토한다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) 피트에서 발생 · 성장하는 表面균열의 표면길이 및 최심점의 깊이를 反復比 N/N_f 로 정리하면 應力레벨의 차이에도 불구하고 좁은 分散帶內에 모였다.

2) 表面균열길이의 成長速度 $d(2a)/dN$ 를 $\Delta\sigma \sqrt{\pi a}$ 로 兩對數紙上에 整理한즉, 常溫에서는 應力依存性없이 한개의 直線으로 整理 되었지만, 400°C의 고온에서는 균열의 초기단계에서 應力依存성이 일부 存在 하였다.

3) 균열面形狀 變化를 고려한 表面균열의 最深點의 ΔK_I 치를 구하여 표면균열의 길이 방향 成長速度 $d(2b)/dN$ 와 兩對數紙上에 나타내면, 實驗應力이 降伏應力보다 높지만 대부분의 데이터가 좁은 分散帶內에 모였다. 또 $\Delta K_I/E$ 로 정리한즉, 304 스테인레스鋼의 데이터와도 비교적 잘 일치 하였다.

4) 비치마크법과 템퍼컬러법을 병용해서 표면균열의 균열면형상의 變化를 測定한 結果, 균열成長과 더불어 균열면형상비(b/a)의 變化는 약 0.9로 되고, 應力依存性和 溫度의 영향은 없었다.

5) 임의의 피로균열길이를 나타내는 等균열曲線은 反復應力-疲勞破斷數($S-N_f$) 曲線에 平行 하였다.

후 기

본 研究는 1982년도 산학협동재단의 연구비에 의하여 연구되었으며, 이에 관계자 여러분에게 謝意를 표하는 바입니다.

參 考 文 獻

- 1) 内野, 溶接構造物の疲労破壊とその防止, 日本經營幹部 seminar, 1971.
- 2) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. XI, Appendix A, 1977.
- 3) Pook, L.P. and A.A. Beveridge, Threshold for Fatigue Crack Growth in Ferritic Steels at 300°C, ASTM STP 520, pp.179-190, 1973.
- 4) Solomon, H.D. and L.F. Coffin, Effects of Frequency and Environment on Fatigue Crack Growth in A286 at 1100F, ASTM STP 520, pp.112-122, 1973.
- 5) Taira, S., S. Maruyama and M. Fujino, Effect of Temperature on the Rate of Fatigue Crack Propagation in Steels during Low Cycle Fatigue, Trans. ISIJ, Vol. 16, pp.146-152, 1976.
- 6) Kitagawa, H., C.M. Suh et al., Mechanical and Non-Mechanical Categories in Fatigue Study—A Standpoint in Small Surface Crack Problems in Fatigue—, ASME, AMD-Vol. 47, pp.167-184, 1981.
- 7) 結城良治, 北川英夫, 徐昌敏, 持田郁夫, 高温におけるスランレス鋼の表面き裂の疲労き裂成長特性, 材料, 第 31-344, pp.500-504, 1982.
- 8) Sidey, D. and L.F. Coffin, Jr., Low-Cycle Fatigue Damage Mechanisms at High Temperature, ASTM STP 675, pp.528-568, 1979.
- 9) 北川英夫, 徐昌敏; 軟鋼平滑材の回轉曲げ及び片振り引張り疲労における微小表面き裂の成長挙動(平滑材疲労の破壊力學的解析), 日本材料學會の第13回疲労 symposium, pp.10-14, 1979.
- 10) Suh, C.M., R. Yuuki and H. Kitagawa, Basic Study for the Detection and Evaluation of Micro-Surface-Fatigue-Cracks, Treaties of the Pan Pacific Symposium on NDT, Seoul, pp.233-247, 1978.
- 11) 北川英夫, 結城良治, 徐昌敏, 小さな人工缺陷からの疲労き裂成長挙動, 日本材料學會の第14回疲労 symposium, pp.26-30, 1980.
- 12) Jame, L.A. and E.B. Schwenk, Fatigue Crack Propagation Behavior of Type 304 Stainless Steel at Elevated Temperature, Metallurgical Transaction, Vol. 2, pp.491-496, 1971.
- 13) Kabayashi, 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.
- 14) Kitagawa, H., S. Takahashi, C.M. Suh and S. Miyashita, Quantitative Analysis of Fatigue Process—Microcracks and Slip Lines under Cyclic Strains, ASTM STP 675, pp.420-449, 1979.
- 15) Structural Alloys Handbook, Mechanical Properties Data, Massachusetts, pp.70,69, 1975.
- 16) 結城良治, 北川英夫, 持田郁夫, スランレス鋼の高温における疲労き裂成長特性—第1報—貫通き裂および表面き裂の疲労き裂成長挙動—, 東京大學生産技術研究所, 生産研究, 第 34-5, pp.167-170, 1982.
- 17) 徐昌敏, 結城良治, 北川英夫, 表面균열의 疲労 Fractography 及 破壊力學的 檢討, 大韓機械學會春季學術大會 抄錄集, pp.114-119, 1983.
- 18) Berling, J.T. and T. Slot, Effect of Temperature and Strain Rate on Low-Cycle Fatigue Resistance of AISI 304, 316, and 348 Stainless Steels, ASTM STP 459, pp.3-30, 1969.
- 19) 平修二, 大谷隆一, 材料の高温強度論, オーム社, pp.29-35, 1981.