

<論 文>

STS 316 鋼의 低사이클 高溫 疲勞強度와 破壞舉動

吳世旭* · 李圭用** · 徐漢壽***

(1984年 1月 26日 接受)

Low Cycle Fatigue Strength and Fracture Behavior of STS 316 Stainless Steel at Elevated Temperature

Sae Wook Oh, Kyu Yong Lee and Han Soo Seo

Abstract

In the present paper, strain controlled low-cycle fatigue experiments were conducted under the conditions of constant total strain control with strain rate 40%/min at temperatures of 450°C, 500°C, 550°C, 600°C and 650°C to clarify the low-cycle fatigue strength and fracture behavior of the solution treated austenitic type 316 stainless steel. An electric servo-controlled hydraulic testing machine (Instron Model 1350) equipped with an electric furnace was used.

The effects of plastic strain range, elastic strain range, total strain range and crack behavior on high temperature fatigue life examination are as follows;

(1) The relationship between plastic strain range and high temperature fatigue life follows the Manson-Coffin equation $\Delta \epsilon_p \cdot N_f^\alpha = C_1$ and the value of α and C_1 are in the range of 0.432~0.629 and 29.483~58.043 respectively according to the temperature.

(2) The values of the exponent α in Manson-Coffin equation and the cyclic strain hardening coefficient m exist between the curves of Morrow and Tomkins.

(3) The intergranular cracks were observed at the temperature above 550°C, in the plastic strain range above 3% and at the cyclic frequency under 5 cpm.

(4) The initiation and propagation of cracks occurred independently or compositely at transgranulars, intergranulars and twin boundaries depending on temperature, plastic strain range and frequency.

1. 序 論

最近에 耐熱鋼材인 스테인레스鋼의 高溫 크리이프, 高溫疲勞 및 高溫 크리이프·疲勞 相互作用下의 高溫

強度와 破壞舉動等에 대한 幅 넓은 研究가 進行되고 있다⁽¹⁾.

高溫環境의 使用條件에 놓여지는 大部分의 構造物은 出力의 變動이나 溫度變化等에 따라 疲勞損傷等을 받는다. 이들의 高溫強度設計에 있어서는 材料의 低사이클 高溫 疲勞強度等을 고려해야 할 必要가 있으며 이에 관한 많은 實驗資料가 要請되고 있다⁽²⁾.

低사이클 高溫 疲勞壽命은 變形率幅, 應力幅, 溫度,

* 正會員, 東亞大學校 工科大學 機械工學科

** 正會員, 釜山水產大學 工學部 舶用機械工學科

*** 正會員, 東國大學校 大學院, 現 大宇通信(株)

變形率 速度, 雰圍氣 및 維持時間의 有無等 그 影響因子가 대단히 복잡하며 이들 因子들의 變動에 의한 影響을 크게 받는다^(3,4).

이들 影響因子들을 解析하는 方法으로는 여러가지가 提案되고 있다. 溫度에 대해서는 Larson-Miller 와 같은 파라미터法이 있고⁽⁵⁾, 反復速度에 대해서는 Coffin 의 周波數 修正에 의한 疲勞壽命의 整理法이 있다⁽⁶⁾. 反復 變形率 및 波形的 影響에 대해서는 Manson 의 變形率 分割法 등이 提案되어⁽⁷⁾, 그의 有效性을 강조하고 있으나 實驗資料의 부족과 物理學的 解析方法의 不充分等으로 아직 明確한 定說로 보기에 는 힘들다⁽⁸⁾.

오오스테나이트系 스테인레스鋼의 疲勞壽命에 대한 變形率 速度 依存性은 室溫에서는 나타나지 않으나 크리프 變形率이 無視되는 中間溫度 領域에서도 나타나며 一定 溫度를 超過하면 그 依存性이 減少한다⁽⁹⁾. 疲勞壽命이 溫度의 上昇 및 變形率 速度의 減少等에 따라 低下하는 現象은 疲勞損傷과 크리프 損傷의 相互作用에 의한 것으로 알려져 있다^(10,11,12). 한편 이와 같은 現象은 酸化等의 雰圍氣 環境에 의한다는 主張도 있어^(13,14) 活潑한 論議의 對象이 되고 있다.

國內에서는 變形率 制御의 高溫 疲勞實驗은 드물어 初期段階로 볼 수 있다. 筆者의 한 사람은 SUS 316 鋼의

高溫 低사이클 疲勞過程에 있어서 크랙 舉動의 反復速度 依存性에 관하여 變形率 制御로서 實驗하고 粒內·粒界 크랙의 遷移 舉動에 관한 周波數 依存性을 報告하였다⁽¹⁵⁾. 그리고 時效處理한 SUS 316 鋼의 高溫 低사이클 疲勞壽命에 미치는 粒界 析出物의 影響에 관하여 變形率 制御로서 實驗하고, 그 效果를 報告하였다⁽¹⁶⁾. 또한 오오스테나이트系 스테인레스鋼의 高溫強度 및 破壞舉動에 관한 論題로서 크리프 強度와 破壞舉動에 대한 時效處理의 效果를 報告하였다⁽¹⁷⁾. 筆者들은 오오스테나이트系 스테인레스鋼의 高溫強度와 破壞舉動을 體系의 으로 明白히 하고자 一連의 實驗을 계속하고 있다.

本 研究은 國產 STS 316 鋼의 高溫 低사이클 疲勞強度와 破壞舉動을 考察하고자 高溫 大氣中에서 變形率 制御에 의한 引張·壓縮 低사이클 疲勞試驗을 實施하였다. 全 變形率幅, 彈性 變形率幅 및 塑性 變形率幅과 疲勞壽命과의 關係를 一定 變形率 速度下에서 應力幅, 溫度 및 周波數의 影響과 破壞舉動을 考察하였다.

2. 實驗方法 및 裝置

2.1. 試驗片

本 實驗에 使用한 素材는 오오스테나이트系 스테인

Table 1 Chemical compositions(wt%)

Materials	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
STS 316	0.05	0.47	1.18	0.026	0.016	11.50	16.38	2.43

Table 2 Mechanical properties of materials

Materials	Tensile strength (kgf/mm ²)	Yield strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area(%)	Micro-Vickers Hv(100g)	Grain size (avg. dia.)
Raw	74.9	59.1	40.8	73.6	258	16 μ m
Solution treated	56.1	26.8	55.9	81.6	187	44 μ m

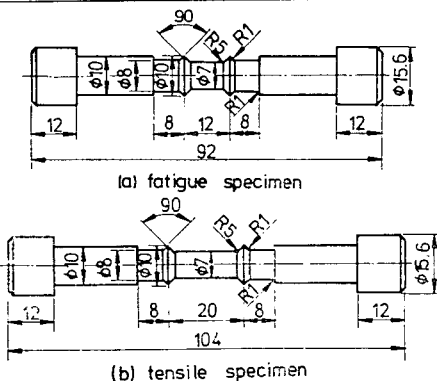


Fig. 1 Shapes and dimensions of specimens(mm)

레스鋼인 國產 STS 316 鋼이며 이를 1100°C에서 1時間 維持시켜 水中 急冷하여 溶體化 處理를 하였다. 그 化學的 組成과 機械的 性質은 各各 Table 1 및 Table 2 와 같다. 試驗片은 素材를 溶體化 處理한 후 Fig. 1 의 形狀으로 加工하였다.

2.2. 實驗方法

疲勞試驗은 加熱爐를 갖춘 電氣·油壓 싸어보식 疲勞試驗機(Instron 1350 型)를 使用하였다.

低사이클 高溫 疲勞試驗은 試驗溫度를 450°C, 500°C, 550°C, 600°C 및 650°C 로 하여 變形率 速度 $\dot{\epsilon}$ 를 40% /min 로 一定하게 하고 周波數 f (cpm)과 全變形率幅

$\Delta\epsilon_t$ 를 變化시켰다. 疲勞試驗의 荷重方法은 變形率制御로서 3角波形에 의하여 引張·壓縮 變形率($R=-1$) 荷重을 反復시켰다.

全變形率幅 $\Delta\epsilon_t$ 는 彈性 變形率幅 $\Delta\epsilon_e$ 와 塑性 變形率幅 $\Delta\epsilon_p$ 의 合으로 式 (1)과 같다.

$$\Delta\epsilon_t = \Delta\epsilon_e + \Delta\epsilon_p \quad (1)$$

變形率 速度 $\dot{\epsilon}_t$ 는 $\Delta\epsilon_t$ 의 週期時間에 관한 微分이므로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_t &= 2f\Delta\epsilon_t \\ &= 2f(\Delta\epsilon_e + \Delta\epsilon_p) \end{aligned} \quad (2)$$

3. 實驗結果 및 考察

3.1. 高温 引張試驗에서 溫度의 影響

高温 引張試驗은 Fig. 1(b)의 引張試驗片을 使用하여 40%/min의 變形率 速度로서 試驗하였다. 各 溫度別로 引張試驗의 結果는 Fig. 2와 같다.

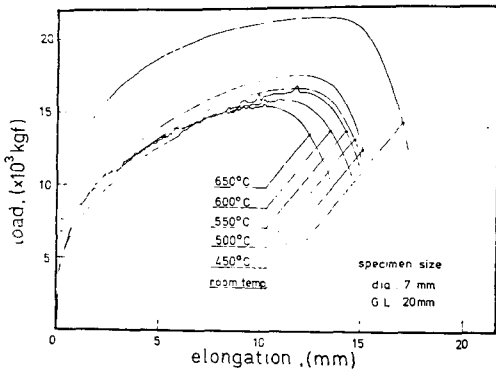


Fig. 2 Temperature effects on the flow curve of STS 316

最大荷重은 溫度 上昇에 따라 減少하고 550°C, 600°C, 및 650°C의 溫度範圍에서는 塑性變形的 過程에서 流動曲線이 圓滑하지 않는 돌니형의 曲線이 나타나고 있다. 이는 變形中 溶質原子에 의한 析出物의 形成으로 천천히 運動하고 있는 轉位가 잡히기도 하고 잘라버리기도 하는 過程에서 일어나는 Portevin-LeChatelier 效果⁽¹⁸⁾에 의하여 試驗中에 硬化와 降伏이 反復되는 變形 率硬化의 影響인 것으로 判이되고 있다.

Table 3 Modulus of elasticity of materials on high temperature

Temp. (°C)	450	500	550	600	650
Young's modulus (kgf/mm ²)	15850	15350	14850	14400	13800

各 試驗溫度에서 試驗片의 彈性係數 E 를 高温引張試驗으로서 測定한 結果를 Table 3에 나타낸다.

3.2. 變形率과 疲勞壽命의 關係式

塑性 變形率幅 $\Delta\epsilon_p$ 와 破損 反復數 N_f 사이에는 Manson-Coffin 式이 成立함이 잘 알려져 있다.

$$\Delta\epsilon_p \cdot N_f^\alpha = C_1 \quad (3)$$

여기서 α 와 C_1 은 材料, 溫度 및 變形率 速度에 따라 決定되는 常數이다.

$$\Delta\epsilon_e \cdot N_f^\beta = C_2 \quad (4)$$

이며, β 와 C_2 도 材料와 溫度 및 變形率 速度에 影響을 받는다.

荷重應力幅 $\Delta\sigma$ 와 塑性 變形率幅 $\Delta\epsilon_p$ 와의 關係는 式 (5)로 表示된다.

$$\Delta\sigma = C_3 \Delta\epsilon_p^m \quad (5)$$

m 과 C_3 는 溫度와 材料에 따라 定하여진다.

式 (3)과 式 (4)를 式 (1)에 代入하면

$$\Delta\epsilon_t = C_1 N_f^{-\alpha} + C_2 N_f^{-\beta} \quad (6)$$

이고, 式 (6)에 式 (5)를 代入하면 式 (7)을 얻는다.

$$\Delta\epsilon_t = C_1 N_f^{-\alpha} \{1 + 1/E C_1^{m-1} C_2 N_f^{-\alpha(m-1)}\} \quad (7)$$

또한 塑性 變形率幅 $\Delta\epsilon_p$ 는 式 (1)로 부터 다음과 같다.

$$\Delta\epsilon_p = \Delta\epsilon_t - \frac{\Delta\sigma}{E} \quad (8)$$

式 (8)의 彈性係數 E 는 Table 3으로 부터 얻고, $\Delta\sigma$ 는 各 疲勞試驗의 히스테리시스曲線에서 $N_f/2$ 인 位置의 값을 취하여 $\Delta\epsilon_p$ 를 구하였다.

3.3. $\Delta\epsilon_p$, $\Delta\epsilon_e$, $\Delta\epsilon_t$ 와 N_f 의 關係

各 試驗溫度別의 塑性 變形率幅과 破損 反復數의 關係를 最小 自乘法에 의하여 整理하고 圖示하면 Fig. 3과 같다. 各 直線은 式 (3)과 같은 Manson-Coffin 式에 의하여 잘 整理되고 있으며 試驗溫度가 上昇함에 따라 α 가 0.432로부터 0.629로 增加하고 破損 反復數인 疲勞壽命이 減少하는 傾向를 나타낸다.

이것은 一定溫度에서 破損壽命에 미치는 塑性 變形率幅의 影響이 크며, 一定 塑性 變形率幅에서는 溫度의 上昇이 破損壽命을 減少시킨다는 것을 알 수 있다.

Kanazawa^(21,22)들은 SUS 316 鋼에 대한 $\dot{\epsilon}_t=40\%/min$ 의 450°C 및 600°C의 疲勞試驗에서 α 를 各各 0.409 및 0.563으로 報告하였으며, Taira 등⁽²³⁾은 SUS 347 鋼에 대하여 700°C 以下の 溫度에서는 α 의 값이 0.50~0.53에 있다고 하였다. Berling 등⁽²⁾은 AISI 316

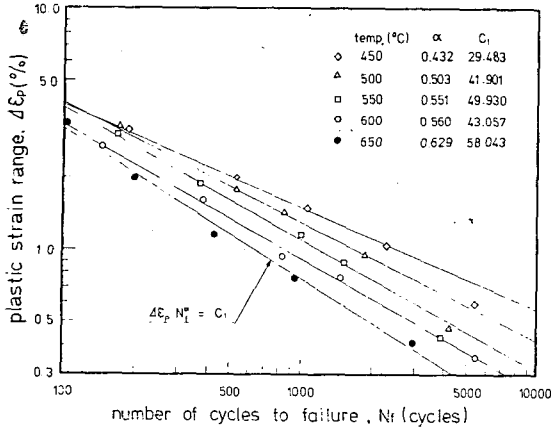


Fig. 3 Temperature dependence on plastic strain range vs. number of cycles to failure

鋼을 $\dot{\epsilon}_i = 4 \times 10^{-3} \text{sec}^{-1}$, $4 \times 10^{-4} \text{sec}^{-1}$ 및 $4 \times 10^{-5} \text{sec}^{-1}$ 로 430°C, 650°C 및 816°C 下에서 實驗에 結果 α 값이 0.493 으로부터 0.804 에 걸쳐 溫度 上昇에 따라 增加한 다고 報告하였다. 이러한 結果들은 本 實驗의 結果들 과 部分的으로 一致함을 알 수 있다.

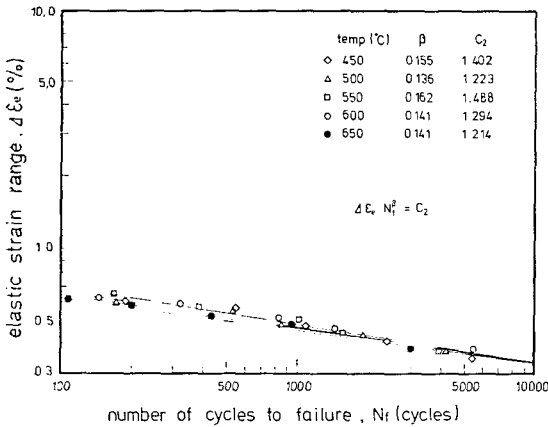


Fig. 4 Temperature dependence on elastic strain range vs. number of cycles to failure

Fig. 4는 彈性 變形率幅과 破損 反復數와의 關係를 兩對數 紙上에 整理한 것으로 式 (4)의 β 와 C_2 의 값을 구하여 表示하였다. 여기서 破損 反復數가 彈性 變形率幅의 減少에 따라 增加하고 있으나 彈性 變形率幅이 溫度의 高低에는 關係없이 거의 一直線에 集結하고 있다. Fig. 3과 Fig. 4에서 傾斜 α 는 β 에 비하여 큰 값을 나타내고, 또한 溫度의 影響을 크게 받는다. 이것은 式 (1) 및 式 (6)에 있어서 彈性 變形率幅은 溫度 依存性이 작고 塑性 變形率幅은 溫度 依存性이 크다는 것을 알 수 있다. 즉 疲勞壽命은 溫度 上昇에 따라 溫度 依存性을 크게 받아 減少한다.

Fig. 5는 全變形率幅 $\Delta \epsilon_t$ 와 破損 反復數 N_f 와의 關係를 兩對數 紙上에 圖示한 것으로 이는 式 (6)과 같이 塑性 및 彈性 變形率幅의 乘이므로 Fig. 3과 Fig. 4의 合과 같다.

Manson과 Halford⁽²⁴⁾는 式 (6)을 Fig. 5와 같이 表示하고 $\Delta \epsilon_t$ 와 N_f 의 關係에 대한 溫度의 影響을 考察 하였다. Fig. 5에서 보던 各 實驗值는 直線이 아닌 曲線을 나타내며 600°C 以上の 高溫일 수록 그 傾向이 增加한다. 또한 溫度의 上昇과 함께 疲勞壽命의 짧은 쪽으로 移動함을 알 수 있다. 이러한 結果는 Taira 들⁽²³⁾이 實驗한 SUS 347 鋼의 疲勞壽命의 溫度 依存性에서도 이와 비슷한 曲線 傾向을 表示하고 있다.

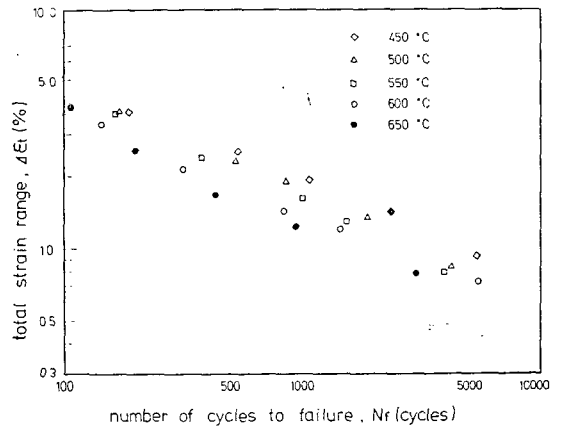


Fig. 5 Temperature dependence on total strain range vs. number of cycles to failure

3.4. 塑性 變形率이 應力變化에 미치는 影響
塑性 變形率幅 $\Delta \epsilon_p$ 의 크기에 따라 試驗片에 發生하는 應力幅 $\Delta \sigma$ 의 增加를 Fig. 6의 兩對數 紙上에 整理

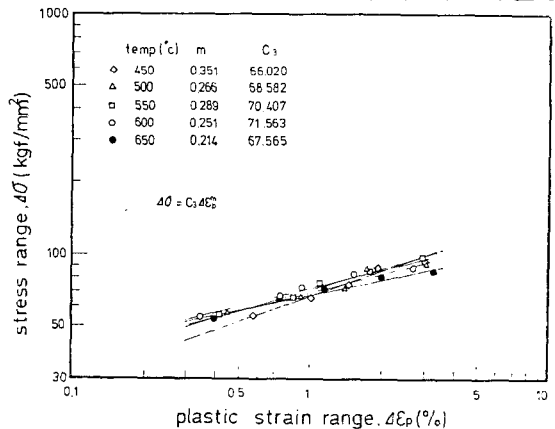


Fig. 6 Effects of plastic strain range and temperature on stress range

하고 最小自乘法으로 式 (5)의 m 과 C_3 를 구하여 表示하였다.

이에 의하면 塑性 變形率幅의 增加에 따라 發生 應力이 거의 直線的으로 增加하고, 溫度 上昇에 따라 塑性 變形率幅에 대한 應力幅의 增加率인 m 이 減少하는 傾向이 있다. 그러나 溫度變化에 의한 應力幅의 變化는 좁은 範圍로 直線的으로 整理된다.

이로부터 塑性 變形率幅의 增加는 變形率 硬化를 增加시키는데 反하여 溫度의 上昇은 變形率 硬化를 減少시킨다. 주 應力幅은 本 實驗 範圍에서는 溫度 上昇에 따라 軟化效果가 있음을 알 수 있다.

以上과 같이 Figs. 3, 4, 5 및 6에서 얻은 各 係數를 Table 4에 表示한다.

Table 4 Constants for experimental low-cycle fatigue equation of STS 316

Temp. C	α	C_1	β	C_2	m	C_3
450	0.432	29.483	0.155	1.402	0.351	66.020
500	0.503	41.901	0.136	1.223	0.266	68.582
550	0.551	49.930	0.162	1.488	0.289	70.407
600	0.560	43.057	0.141	1.294	0.251	71.563
650	0.629	58.043	0.141	1.214	0.214	67.565

이에 의하면 溫度 上昇에 따라 Manson-Coffin 式의 指數인 α 는 增加하고, 變形率 硬化 指數 m 은 減少하는 傾向을 알 수 있다.

Table 4의 데이터에서 溫度를 變數로 하여 α - m 의

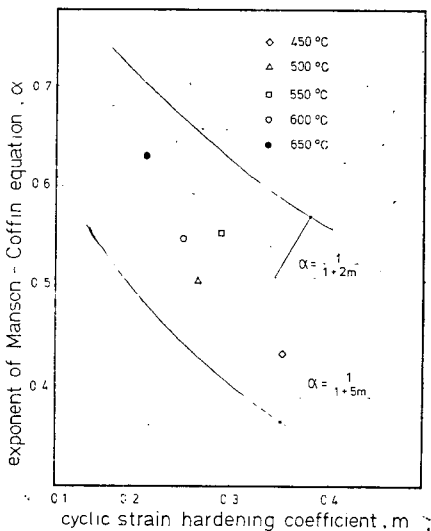


Fig. 7 Relationship between Manson-Coffin equation's α and strain hardening coefficient m with obtained data

關係를 圖示하면 Fig. 7과 같다.

Morrow⁽²⁵⁾는 低사이클 疲勞의 1 사이클중의 變形率 에너지의 考察로부터 式 (5)의 加工硬化 指數 m 에 따라 $\alpha = 1/(1+5m)$ (9)

의 關係式을 提案하고 있으며, 한편 Tomkins⁽²⁶⁾는 그의 低사이클 疲勞 크랙 傳播에 관한 모델로부터

$$dl/dN \cong \frac{\pi^2}{32} \cdot \frac{\Delta \epsilon_p \cdot \Delta \sigma^2}{T^2} l \quad (10)$$

를 誘導하고 이로부터 α 를

$$\alpha = 1/(1+2m) \quad (11)$$

을 提案하고 있다. 여기서 T 는 塑性 變形率帶에 대한 平均的인 變形應力이다.

Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이 本 實驗의 結果는 Morrow와 Tomkins의 式 사이에서 整理되고 있으며 α 의 減少에 따라 m 의 增加傾向이 뚜렷하고 溫度 上昇에 α 의 減少 및 m 이 增加한다.

Kanazawa⁽²¹⁾에 의한 SUS 304, 321 및 347 스테인레스 鋼의 常溫과 450°~800°C의 大氣中에서 0.4, 4, 40 %/min의 變形率 速度에 대한 全變形率 制御에 의한 低 사이클 疲勞 實驗에서 다음과 같은 것을 指摘하고 있다. α 와 m 과의 實驗의 關係에서 600°C 이상에서는 Morrow의 關係式에 적용되고, 常溫과 450°C에서는 Tomkins의 式에 比較的 잘 整理된다고 하였다.

이와 같은 結果와 같이 劃一的인 關係를 찾기는 어렵지만 本 實驗의 結果는 Fig. 7과 같이 兩式의 範圍內에서 整理될 수 있었다.

3.5. $\Delta\sigma$ -log N 의 關係

低사이클 高溫 疲勞 試驗에서 反復數가 增加함에 따라 變化하는 應力幅의 크기를 히스테리시스 曲線으로부터 測定하여 이 關係를 $\Delta\sigma$ -log N 으로 Fig. 8에 表示하였다.

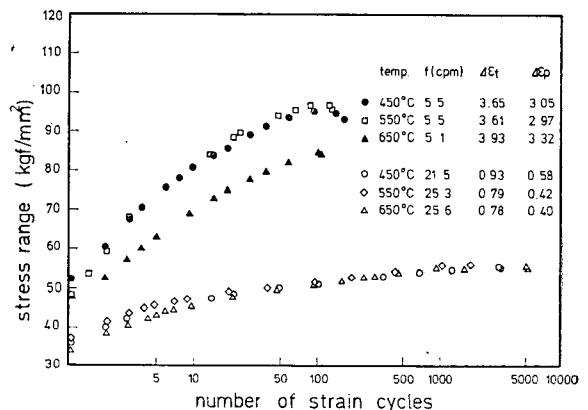


Fig. 8 Effects of cycle frequency and temperature on the stress variation

變形率幅이 높은 範圍의 周波數(5.1~5.5 cpm)에서는 550°C까지는 同一 周波數에 대해서 거의 一致하나 550°C以上에서는 外力에 抵抗하는 應力이 낮게 나타난다. 이는 高溫 크리프 效果가 作用한 것으로 생각된다. 또한 反復數의 增加로 인한 變形率 硬化現象도 비슷한 反復荷重速度에 대하여 550°C가 가장 높고 650°C의 경우가 가장 낮다.

그러나 變形率幅이 낮은 範圍의 周波數(21.5~25.6 cpm), 즉 反復速度가 빠른 경우에는 本 實驗範圍의 溫度 全般에 걸쳐 應力變化에 同一한 傾向을 나타낸다.

一般的으로 反復 사이클에 의한 變形率 硬化로 인한 應力增加는 疲勞壽命의 初期에 크게 나타나며, 變形率幅이 클수록 또 周波數가 낮을수록 變形率 硬化의 增加率도 현저하나.

이로 부터도 高溫 低사이클 疲勞壽命은 溫度의 影響보다는 變形率 速度에 크게 依存함을 알 수 있다.

3.6. 高溫 疲勞의 크랙 發生과 傳播 舉動

低사이클 高溫 疲勞試驗에서 破斷된 試驗片을 選擇하여 光學顯微鏡으로 크랙 發生 및 傳播舉動을 考察하였다.

Fig. 9(a)는 本 實驗에서 塑性 變形率幅이 가장 낮고 周波數가 높은 650°C에 대한 것으로 크랙의 傳播는 粒內破壞의 形式을 취하였고 結晶粒子의 方向 및 粒界와의 相對의 位置 등에서 가장 약한 곳을 찾아 方向轉換하면서 粒內를 通過한다.

Fig. 9(b)는 塑性 變形率幅이 가장 높고 周波數가 낮은 650°C에 대한 것으로 크랙의 發生 및 傳播는 粒界破壞의 形式을 취하였다. Fig. 9의 (a)와 (b)로 부터 同一의 試驗溫度에서도 反復 周波數는 粒內 및 粒界破



(a) 650°C, ×300 Δε_p=0.40% f=25.6 cpm
 (b) 650°C, ×300 Δε_p=3.32% f=5.1 cpm

Fig. 9 Effect of cycle frequency on transgranular and intergranular crack propagation observed from interface section

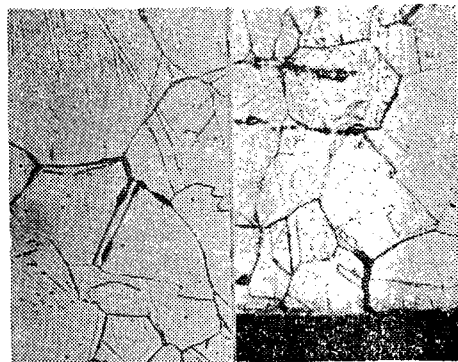
壞를 支配한다.

Yamaguchi⁽²⁷⁾에 의하면 450°C以下에서는 大部分의 크랙이 모두 雙晶 境界로 부터 發生한다고 하였으나 本 實驗에서는 粒界, 粒內 크랙에 비하여 雙晶에서 發生하는 경우는 드물었다.

Fig. 10은 粒界 크랙과 結晶粒界 및 雙晶 크랙의 初期 發生 過程에 관한 사진이며 600°C 및 650°C에서 本 實驗範圍의 높은 塑性 變形率幅 및 낮은 周波數의 경우로서 크랙들은 粒界 破壞形式을 취하고 있다. Fig. 10(a)는 表面 粒界에 우선적으로 크랙이 發生하고 粒界에 따라 크랙이 表面으로 부터 깊이 方向으로 傳播됨을 알 수 있다. 表面에서는 600°C以上の 高溫인 경우 특히 粒界 表面에 酸化膜이 發生하였으며 이것이 粒界 크랙의 發生을 加速시키는 效果가 있다. Fig. 10(b)는 粒界의 三重點(triple point)에서 粒界 크랙이 胛기 靫으로 發生 또는 이들이 連結되는 경우와 結晶粒子의 境遇 中間에서 크랙이 境界에 따라 發生함을 알 수 있다. 또한 2個의 雙晶 境界에 따라 나란히 크랙이 發生한 것도 볼 수 있다.

Yamaguchi⁽²⁷⁾는 平行한 雙晶 境界가 많이 있을 경우의 크랙은 반드시 雙晶 境界를 하나씩 건너서 發生한다고 하였으나 本 實驗에서는 이러한 것은 관찰치 못하였다. 이는 같은 SUS 316 鋼이라도 溶體化 處理의 條件과 組織의 粒子 지름 및 實驗溫度에 따라 크랙 發生 舉動에 差異가 있는 것으로 생각한다.

Fig. 11(a)는 650°C, Δε_p=1.15%, f=12 cpm에서 試驗한 것으로 雙晶 境界上에 介在物이 存在한 경우이며 介在物과 基地의 境界部分이 취약점으로 되어 初期 크랙이 發生하여 雙晶 境界上을 크랙이 傳播하고 있다.



(a) 600°C, ×300 Δε_p=2.66% f=6.1 cpm
 (b) 650°C, ×600 Δε_p=3.32% f=5.1 cpm

Fig. 10 Early stage of intergranular cracks and twin cracks

Fig. 11(b)는 500°C, $\Delta\epsilon_p=1.17\%$, $f=8.6$ cpm의 比較的 低溫에서 試驗하여 試驗片 表面을 觀察한 것으로 雙晶 境界 크랙이 發生한 것을 볼 수 있다. 또한 粒內 크랙 傳播의 支配를 받아 雙晶 境界로부터 粒內 크랙으로 傳播되는 것으로 보이는 크랙도 확인할 수 있었다.

全體를 通하여 알 수 있는 것은 本 實驗 範圍에서는 낮은 溫度, 낮은 塑性 變形率幅, 높은 周波數의 경우는 粒內 破壞가 支配的이고, 反對로 높은 溫度, 높은 塑性 變形率幅, 낮은 周波數의 경우는 粒界 破壞가 主로 發生하였다. 또 兩者間의 中間 範圍에서는 粒內 破壞와 粒界 破壞가 混成되어 있으며, 그 程度는 中間 範圍의 條件에 따라 發生한다.



(a) 650°C, $\times 600$
 $\Delta\epsilon_p=1.15\%$
 $f=12.0$ cpm
(b) 500°C, $\times 300$
 $\Delta\epsilon_p=1.77\%$
 $f=8.6$ cpm

Fig. 11 Twin cracks on the intersection and surface

4. 結 論

오오스테나이트系 STS 316 스테인레스鋼을 1100°C에서 1時間 溶體化 處理하여, 각각 450°C, 500°C, 550°C, 600°C, 및 650°C의 高溫 大氣中에서 變形率 速度 40%/min의 3角波形式으로 變形率 制御의 低사이클 高溫 疲勞實驗을 하였다.

이때 疲勞壽命에 미치는 塑性 變形率幅, 彈性 變形率幅, 全變形率幅, 溫度, 周波數 및 應力幅의 影響과 破壞舉動을 考察한 結果, 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 塑性, 彈性 및 全變形率幅의 增加에 따라 疲勞壽命이 減少하며, 塑性 變形率幅과 高溫 疲勞壽命의 關係는 Manson-Coffin의 $\Delta\epsilon_p \cdot N_f^\alpha = C_1$ 이 成立되며 溫度에 따라 α 와 C_1 은 各各 0.432~0.629 및 29.483~58.043의 값을 취하였다.

(2) Manson-Coffin 式의 指數 α 와 變形率 硬化係數 m 과의 關係는 Morrow와 Tomkins의 曲線 사이에 存

在한다.

(3) 粒界 破壞는 溫度 550°C 以上, 塑性 變形率幅 3% 以上, 周波數 5 cpm 以下에서 觀察되었다.

(4) 크랙 發生 傳播의 양식은 溫度, 塑性 變形率幅 및 周波數에 따라 粒內, 粒界 및 雙晶 境界의 單獨 또는 混成型으로 發生한다.

後 記

本 研究는 1982年度 韓國科學財團의 研究費에 의하여 이루어 졌으며, 同 財團 關係 諸位께 깊은 謝意를 表합니다.

Reference

- (1) L.F. Coffin, Fatigue at High Temperature-Prediction and Interpretation, "Proceedings, Institution of Mechanical Engineers", Vol. 188, pp. 109~127, 1974
"General Electric Company Corporate Research and Development", Technical Information Series No. 74 CRD 066, pp. 1~25, 1974
- (2) "ASME Boiler and Pressure Vessel Code", Section Case Interpretation, p. 1592, 1974
- (3) J.T. Berling, T. Slot, Effect of Temperature and Strain Rate on Low-Cycle Fatigue Resistant of AISI 304, 316 and 348 Stainless Steels, *Fatigue at High Temperature, ASTM STP 459*, pp. 3~30, 1969
- (4) E. Krempl, B.M. Wundt, Hold-Time Effects in High-Temperature Low-Cycle Fatigue, *ASTM STP 489*, pp. 1~27, 1971
- (5) F.R. Larson, J. Miller, A Time-Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses, *Trans. ASME 74*, pp. 765~775, 1952
- (6) L.F. Coffin, A Review of Fatigue Predictive Methods in the Regime where Inelastic Strains Dominate, *General Electric Company Corporate Research and Development Technical Information Series No. 80 CRD 006*, pp. 1~17, 1980
- (7) S.S. Manson, The Challenge to Unify Treatment of High-Temperature Fatigue-A Partisan Proposal Based on Strain-Range Partitioning, *Fatigue at Elevated Temperatures, ASTM STP 520*, pp.

- 744~782, 1973
- (8) B. Tomkins, J. Wareing, Elevated-Temperature Fatigue Interaction in Engineering Materials, *Metal Science J.* Vol. 11, pp.414~424, 1977
- (9) K. Yamaguchi, K. Kanazawa, S. Yoshida, Dependence of Temperature and Strain Rate on the Low-Cycle Fatigue Life of Type 321 Stainless Steel, *Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*, Vol. 64, No. 8, pp.1199~1208, 1978
- (10) L.F. Coffin, Jr. The Effect of Frequency on the Cyclic Strain and Low Cycle Fatigue Behavior of Cast Udimet 500 at Elevated Temperature, *Metallurgical Transactions*, Vol. 2, pp.3105~3113, 1971
- (11) J. Wareing, Creep-Fatigue Interaction in Austenitic Stainless steels, *Metallurgical Transactions*, Vol. 8A, pp.711~721, 1977
- (12) R.M. Pelloux, J.S. Huang, Creep-Fatigue-Environment Interactions, *Proceedings of a Symposium sponsored by the IMS-AIME Mech. Metall. Committee at the Fall Meeting of the Metall. Soci. of AIME*, Milwaukee, Wisconsin, sep. 18~19, 1979, pp.151~164, 1979
- (13) H.H. Smith, P. Shahinian, Effect of an Oxygen Atmosphere on Cyclic Hardening in Type 316 Stainless Steel, *Metallurgical Transaction*, Vol. 1, pp.2007~2009, 1970
- (14) D.J. Duquette, M. Gell, The Effects of Environment on the Elevated Temperature Fatigue Behavior of Nickel-Base Superalloy Single Crystals, *Metallurgical Transactions*, Vol. 3, pp.1899~1905, 1972
- (15) S.W. Oh, T. Kunio, M. Shimizu, K.H. Yamada, T. Sato, Frequency Dependence of Crack Behavior on Low-Cycle Fatigue Failure of SUS 316 Stainless Steels in High Temperature, *Proc. JSME*, No. 798-2, pp.7~9, 1979
- (16) S.W. Oh, T. Kunio, M. Shimizu, K.H. Yamada, T. Sato, Effect of Grain Boundary Precipitation on Low-Cycle Fatigue Behavior at Elevated Temperature of SUS 316 Stainless Steel, *Trans. KSME*, Vol. 4 No. 4, pp.152~159, 1980
- (17) S.W. Oh, *et al*, Study of High Temperature Strength and Fracture Behavior on the Austenite Stainless Steels (1)-Creep Strength and Fracture Behavior, *Trans. Dong-A Univ.* Vol. 17, pp.165~193, 1980
- (18) G.E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, 2nd ed., p.209, McGraw-Hill, 1976
- (19) S.S. Manson, Behavior of Materials under Conditions of Thermal Stress, *Natl. Advis. Comm. Aero.*, Tech. Note 2933, 1954
- (20) L.F. Coffin, Jr. A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal, *Trans. ASME*, Vol. 76, pp.923~949, 1954
- (21) K. Kanazawa, S. Yoshida, Effect of Temperature and Strain Rate on the High Temperature, Low Cycle Fatigue Behavior of Austenitic Stainless Steels, *Int. Conf. on Creep Fatigue in Elevated Temperature Applications*, Philadelphia Sep. 1973, C 226/73, pp.226.1~226.10, 1973
- (22) S. Yoshida, K. Kanazawa, K. Yamaguchi, *et al*, Elevated Temperature Fatigue Properties of Engineering Materials Part 1, *Trans. of Natl. Res. Inst. Met. Japan*, Vol. 19, No. 5, pp.247~272, 1977
- (23) S. Taira, M. Fujino, *et al*, Temperature Dependence of Low Cycle Fatigue Strength and Distinctive Feature of Fatigue Cracks of SUS 347, *Jour. JSME*, Vol. 23, No. 246, pp.208~214, 1974
- (24) S.S. Manson, G.R. Halford, A Method for Estimating High Temperature Low Cycle Fatigue Behavior on Materials, *Proceeding of Intl. Conf. on Thermal and High Strain Fatigue*, The Metals and Metallurgy Trust, London, pp.154~170, 1967
- (25) J. Morrow, Cyclic Plastic Strain Energy and Fatigue of Metals, *ASTM STP* No. 378, pp.45~87, 1965
- (26) B. Tomkins, Fatigue Crack Propagation-an Analysis, *Phil. Mag.*, Vol. 18, pp.1041~1066, 1968
- (27) K. Yamaguchi, K. Kanazawa, S. Yoshida, Some Aspects of Cracks in Austenitic Stainless Steels Subjected to High Temperature, Low Cycle Fatigue Test, *Jour. JSMS*, Vol. 24, No. 258, pp.234~239, 1975