

大韓造船學會誌
 第27卷 第3號 1990年 9月
 Journal of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 27, No. 3, September 1990

고온하 표면균열의 수명예측에 관한 파괴역학적 연구

서창민*, 김영호**, 손봉호***, 오상엽***

A Fracture Mechanic Study on Life Prediction of Surface Cracks at Elevated Temperature

by

Chang-Min Suh*, Young-Ho Kim**, Bung-Ho Son***, and Sang-Yeub Oh***

요 약

本 研究에서는 304스테인리스강을 사용한 평판재와 작은 인공피트재의 고온 疲勞試驗과 크리프 試驗을 593°C의 대기중에서 실시하고, 표면의 분포균열을 실온에서 레프리카법으로 연속적으로 관찰하고, 표면균열의 발생, 성장, 합체 거동을 관측하여, 균열 密度 길이의 분포등의 정량적인 統計的 性質에 대하여 검토하는 동시에, 파괴역학적으로 시험편의 수명을 지배하는 주균열의 성장거동 및 수명예측을 실시한 것이다. 또 실온의 결과와 고온疲勞 및 크리프 경우의 미소 분포균열의 統計的 結果를 비교 검토하였다.

Abstract

Microcracking of type 304 stainless steel at 593°C (1,100°F) has been studied, in particular, initiation, growth, and coalescence of fatigue and creep microcracks on smooth specimens and small notch specimens via surface replicas and photomicrographs. Quantitative information, such as, initiation period, growth, and coalescence behavior, statistical distributions of crack length, density of cracks, distribution patterns and crack growth properties, were obtained.

From this study, the fracture process, fatigue life, and creep life prediction characterized by the growth of surface microcracks have been analysed by a new approach unifying the conventional approaches based on the final fracture of materials with the fracture mechanics approach.

Knowledge of these parameters is critical for the application of fracture mechanics to fatigue and creep life assessment, and the damage evaluation of structures at elevated temperature.

1. 言 緒

최근 고온기기 및 구조물의 설계 검사 보수 진전성

평가에도 파괴역학이 확장 적용되고 있다. 이와 더불어 고온에 의한 疲勞균열성장특성[1~7], 크리프 疲勞 상호작용하의 미소 균열의 성장거동을 고찰한 수명評價에 의한 信賴性 確保가 강하게 요구되고 있다[8~

접수일자 : 1990년 4월 19일, 재접수일자 : 1990년 6월 15일

* 정회원, 경북대학교 기계공학과

** 부산대학교 공과대학

*** 경북대학교 대학원

11]. 한편, 파괴역학의 進歩와 더불어 많이 실시된 대부분의 研究는 관통균열을 대상으로 하고 그 성장속도를 지배하는 여러가지 파괴역학적인 因子($K, \Delta J, \text{수정 } J$ 등)에 주목되고 있다.

그러나 실용상 중요한 미소 표면균열의 고온하의 성장특성에 관한 研究는 실온疲勞의 경우와 비교해서 實驗技術上 및 解析上의 곤란도 있어 비교적 적고, 이 분야의 자료 축적이 공학적 및 공업적인 사회욕구에 따라 강력하게 요구되고 있다[4, 6, 8~11]. 일반적으로 고온疲勞에 있어서는 평활표면에 미소분포균열이 고밀도로 발생하고, 그 성장 및 干涉合體過程이 수명의 대부분을 점하고 있는 것이 알려져 있고[3, 4, 7], 고온기기의 잔여수명 평가 및 안전성 평가를 위하여 이 미소한 분포균열의 발생 성장거동을 정량적으로 把握할 필요가 있다.

本 研究에서는 304스테인리스강을 사용한 평활재와 작은 인공피트재의 고온疲勞試驗과 크리프 試驗을 593°C의 대기중에서 실시하고 표면의 분포균열을 실온에서 레프리카법으로 연속적으로 관찰하고 표면균열의 발생 성장거동을 관측하여, 그 密度 길이의 분포등의 정량적인 統計的 性質에 대하여 검토하고 동시에, 시험편의 수명을 지배하는 주균열의 성장거동 및 수명에측을 실시한 것이다. 또 실온의 결과와 고온疲勞 및 크리프 경우의 미소분포균열의 統計的 結果를 비교 검토하였다.

2. 實驗方法

실험재료는 오스테나이트계 스테인리스강 304 압연 환봉의 溶體化 處理材이고 그 化學成分 및 機械的 性質을 Table 1에 나타낸다. 試驗片은 Fig. 1(a)에 나타낸 平滑試驗片을 사용하고 노치재의 경우에는 Fig. 1(b)에 나타낸 인공 피트를 가공하여 사용하였다. 크리프 및 고온疲勞試驗에는 상온의 레버식 크리프 試驗機

Table 1 Chemical composition (weight percent)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
Standard	max 0.08	max 1.00	max 2.00	max 0.01	max 0.03	—	8.0~10.5	18.0~20.0
Material	0.036	0.8	1.606	0.028	0.011	—	8.92	18.07

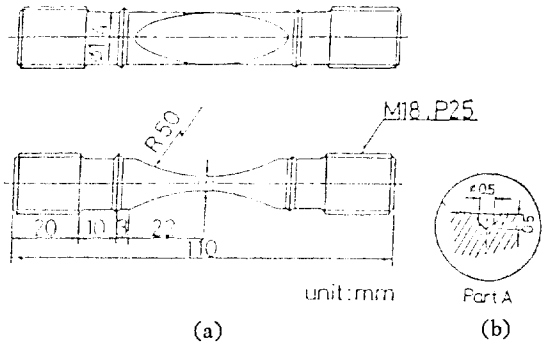


Fig. 1 Configuration of creep-fatigue specimen

를 개량하여, 대기중 593°C에서 荷重制御試驗을 실시하였다. 試驗片의 가열에는 관상전기로를 사용하여 일정한 온도를 유지하였고 크리프, 유지시간 10분 및 유지시간 1분의 矩狀波形을 사용하였다.

試驗片표면의 미소균열의 측정에는 레프리카법을 이용하여 시험편 표면형상 변화를 採取하고 破壞를 유도하였던 주균열의 위치를 역으로 추적하고 顯微鏡으로 擴大 관찰함으로써 높은 정밀도(分解能 1μ 以下)에서 連續的으로 관찰 계속하였다. 표면 레프리카는 試驗中 加熱爐의 窓을 통하여 試驗片 표면상태의 변화를 移動式 顯微鏡으로 관찰하면서 疲勞수명의 5~10% 마다 시험편을 일시적으로 서서히 실온까지 서냉시킨 후 試驗片의 중앙부에서 채취하였지만 이 조각이 疲勞수명에는 거의 영향을 미치지 않음이 확인되어 있다[5, 6]. 또 試驗片 표면은 에머리지 1200번까지 研磨한 후 미소균열의 관찰을 容易하게 하기 위하여 왕수로 에칭시켰다.

Table 2 Mechanical properties

	Temperature	Yield point 0.2% offset kg/mm ²	Tensile strength kg/mm ²	Elongation %	Reduction in area %	Hardness H _B
Standard	R.T.	min 21	min 53	min 40	min 60	max 187
Material	R.T.	32	65	67	79	184
Material	593°C	17.9	43	40	67.7	—

KS No. 14 A tensile specimen
Loading speed: 3mm/min (R.T.: room temperature)

3. 實驗結果와 考察

3.1. 응력과 破斷時間과의 關係

Fig. 2에 인공 피트재의 593°C하의 公稱응력 σ 와 파

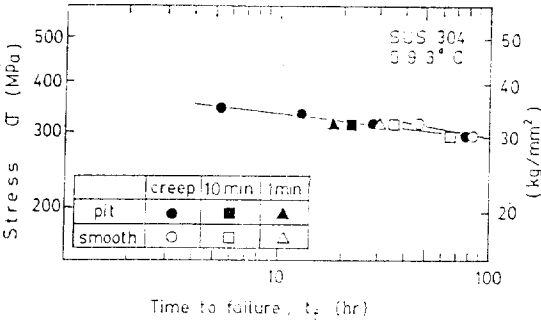


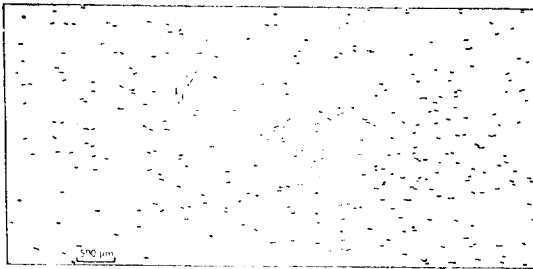
Fig. 2 The relation of stress and the time to fracture at 593 C(1100F) for AISI 304 stainless steel

단시간 t_f 와의 관계를 나타내고 평활재의 데이터와 유지시간 10분과 1분과의 데이터도 나타난다. 미소균열의 관찰은 314MPa, 294MPa의 두 응력레벨에서 크리프 유지시간 10분 및 1분하의 조건에서 실시하였다.

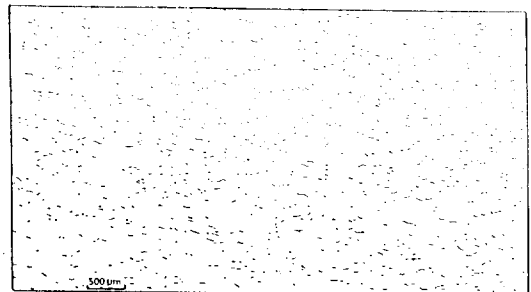
3.2. 미소균열의 발생 성장거동

크리프 및 유지시간 10분과 1분의 실험에 있어서는 시험편 표면에 다수의 미소 균열이 관찰되었다. Fig. 3 (a-1) (a-2)와 Fig. 3(b-1) (b-2)에 각각 평활재와 피트재상의 미소균열의 연속적인 관찰 결과의 일예를 나타낸다. 이 그림은 레프리카를 光學顯微鏡으로 擴大하고 그 寫眞을 촬영한 것을 트레이싱한 것이다. 이러한 寫眞으로부터 파단에 달한 주균열(major crack)을 역으로 追跡하였다. 이 그림에서 수명의 극히 초기에서 파단에 도달할 때까지 미소한 다수의 균열이 불균일하게 발생하게 되고 더우기 성장 및 간섭 합체를 수반하여 破斷에 도달함을 알 수 있다.

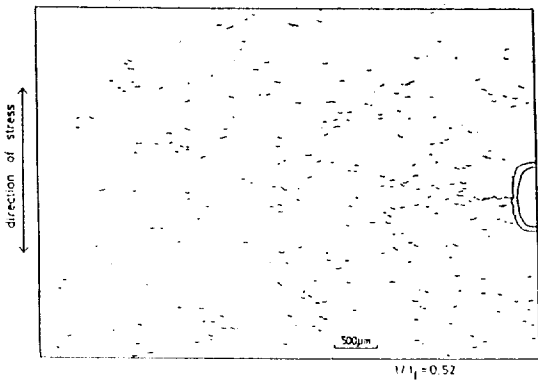
본 실험재료의 平均結晶粒徑은 약 10 μ m이며 재료상



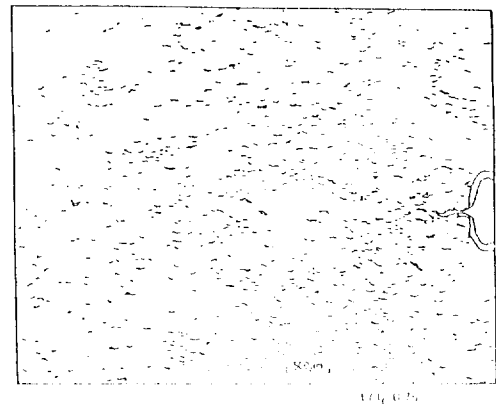
(a-1)



(a-2)



(b-1)



(b-2)

Fig. 3 A typical example of initiation, growth and coalescence of creep-fatigue microcracks distributed on the surface of a smooth specimen(a-1, a-2) and a small notch specimen (b-1, b-2).
(a-1) $t/t_f=0.38$; (a-2) $t/t_f=0.83$; (b-1) $t/t_f=0.52$; (b-2) $t/t_f=0.75$

에는 특히 미소분포균열이 고밀도상태로 관찰되었다. 또 미소균열은 한 結晶粒을 통과하여 성장한 균열이나 결정립계가 완전히 분리된 것으로 정의[1,7,12]하였고 그 표면길이는 $6\mu\text{m}$ 에서 $12\mu\text{m}$ 정도였다.

3.3. 길이분포와 균열密度的 변화

고온 미소균열은 불규칙한 形狀을 나타내므로 荷重軸에 垂直한 방향으로 投影한 길이를 균열길이 $2a$ 라고 定義하고 또 合體한 균열도 모두 계산하였다. Fig. 4

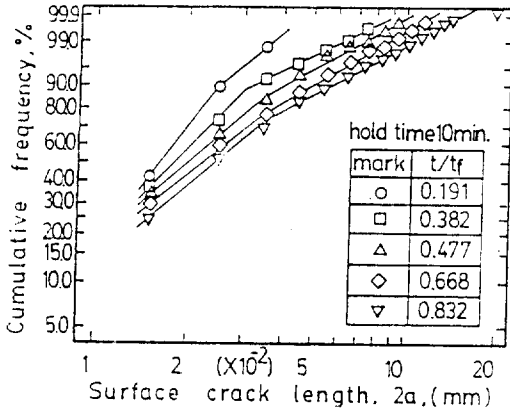


Fig. 4 Weibull distribution of the cumulative probability of fracture

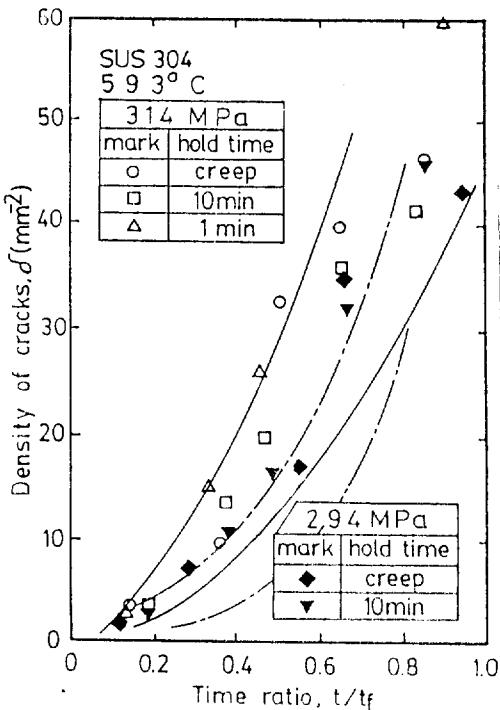


Fig. 5 Variation of crack density against distance from major crack tip

는 Fig. 3의 實驗條件에서 미소균열의 길이분포를 와이블 확률지(Weibull probability paper)상에 프로트한 평활제의 일례를 나타낸다. 이 그림에서 0.05mm 이하의 미소균열의 수가 卓越하게 많음을 알 수 있다. 時間比 t/t_f 의 增加와 더불어 균열길이가 크게 되는 방향으로 이동하지만 응력레벨 및 t/t_f 에 의존하지 않았다. 또 이 곡선의 分岐點은 $10\sim 20\mu\text{m}$ 이며 이것은 結晶粒의 1~3배에 相當한다. 이와같은 결과는 실온하의 연강의 疲勞試驗, 304강의 고온疲勞 및 크리프시험에서도 관찰되었다[1,7,12].

위와 같은 데이터를 사용해서 균열밀도와 時間比 t/t_f 에 대한 변화를 구하여 Fig. 5에 나타낸다. 균열 밀도는 응력 레벨에 의하여 증가하고 응력치가 적어질수록 균열密度도 저하하는 경향을 나타낸다. 피트제에서는 피트의 先端에 응력이 집중하기 때문에 균열密度는 Fig. 6과 같이 피트先端에서 거리에 의하여 균열개수가 점차 감소하고 있다. 또 Fig. 5상의 절선인 分散帶는 피트제의 것으로 평활제보다 균열密度가 적어지고 크리프의 密度는 크고 유지시간의 차는 크지 않음을 알 수 있다. 그리고 균열密度가 1mm^2 당 수백개의 미소균열이 고밀도로 발생하였다. 이것은 고온에서 특히 干涉 合體가 顯著하게 되고 주균열은 干涉合體를 반복

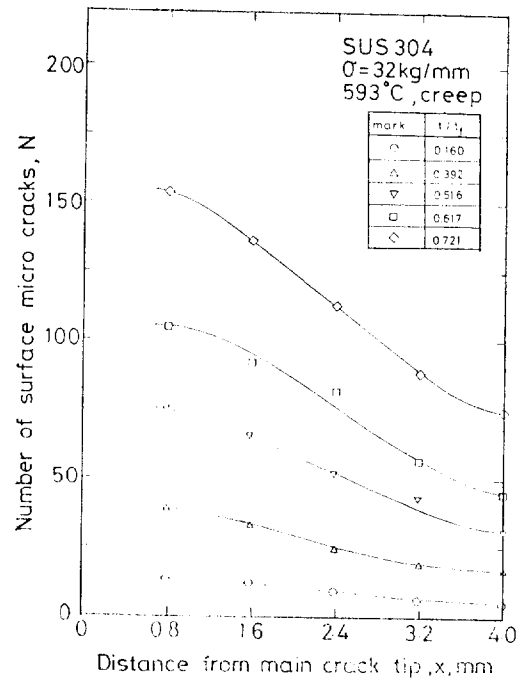


Fig. 6 Increase of crack density as a function of time ratio

하면서 급속하게 성장하여 破斷에 달하더 또한 수명의 전기간을 통하여 미소분포 균열이 계속해서 발생됨을 의미한다. Fig. 5에 나타난 균열密度的變化는 材料損傷의 蓄積과 균열密度的와 相關關係가 있음을 나타내고 나머지 수명평가에도 유효한 자료로 된다고 생각된다. 즉 미소균열의 密度를 檢출함에 의하여 잔여수명이 평가될 가능성을 示唆하고 있다.

3.4. 주균열의 성장거동

시험편을 破斷으로 유도한 주균열을 레프리카 寫眞에서 역으로 追跡하고 주균열의 성장거동을 조사하여 실온과 고온의 경우에 대하여 Fig. 7(a)에 나타낸다. 또 점선으로 나타난 것은 동일재의 실온 疲勞의 것으로 균열의 개수는 극히 적고 단독으로 성장하면서 破斷에 달하였다. Fig. 7(b)는 인공 피트제상의 작은 균열의 원활한 성장거동을 나타내고 있다. Fig. 7의 그림과 같이 균열은 疲勞수명의 초기 (10~20%)에서 발생 성장하기 시작하므로 균열 길이는 t/t_f 로 정리하면 응력레벨의 차이에도 불구하고 비교적 좁은 分散帶에 모임을 알 수 있다. 또한 고온에 있어서는 주균열 길이는 室溫에 비하여 적고 破斷直前에서도 0.5mm 以下임이 注目된다. 이것은 破斷直前에 있어서 미소한 균열이 急

速하게 合體하여 破斷에 到達함을 意味하고 있다.

3.5. 표면균열의 성장特性

Fig. 8은 이러한 주균열의 표면에서의 성장速度를 應力擴大係數 $\sigma\sqrt{\pi a}$ 로 整理한 結果를 나타낸다. 그림상의 하단에는 $\bigcirc, \square, \triangle$ 표시인 자료 즉 크리프, 유지시간 10분과 1분의 結果를 나타내고 있다. 즉 593°C 하에서는 응력레벨에 따라 다소의 균열성장속도에 차이가 있음을 알 수 있다. 이 그림에서 고온평활재의 테이타는 실온의 境遇와 比較해서 상당히 가속측에 있는 것은 538°C 경우와도 一致하였다[5]. 이 加速은 고온에 따른 영계수의 低下 및 고온酸化의 影響에서도 說明될수 있지만 主균열에 近接하여 발생한 고밀도인 미소균열의 合體에 의한 加速機構도 考慮되어진다[3, 4, 7].

Fig. 8상의 상단에는 593°C하의 인공피트제상에서 제 가지 조건하의 균열성장 特性도 나타내고 있다. 이 고온피트의 資料와 高溫 平활재의 資料를 比較하면 크리프 및 유지시간의 차에 있어서도 실온의 境遇와 같이 미소균열의 성장特性은 큰 균열의 特性과 다르고 加速측에 있다. 이러한 特性은 538°C의 고온資料[7]와

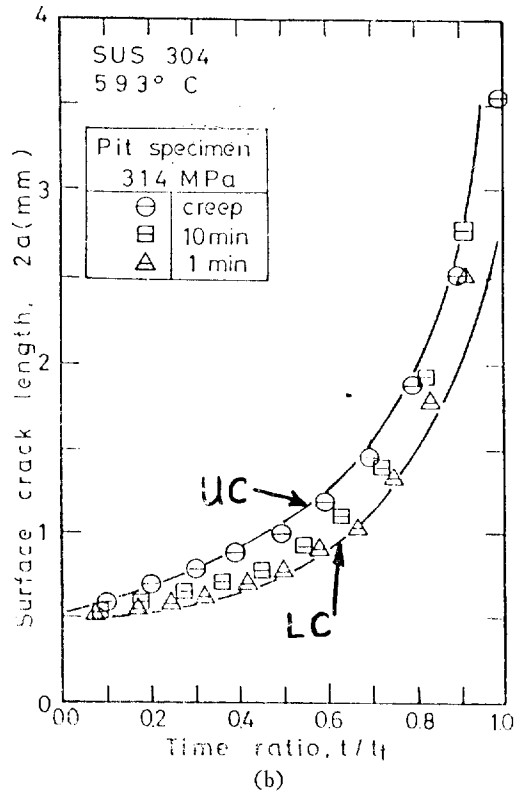
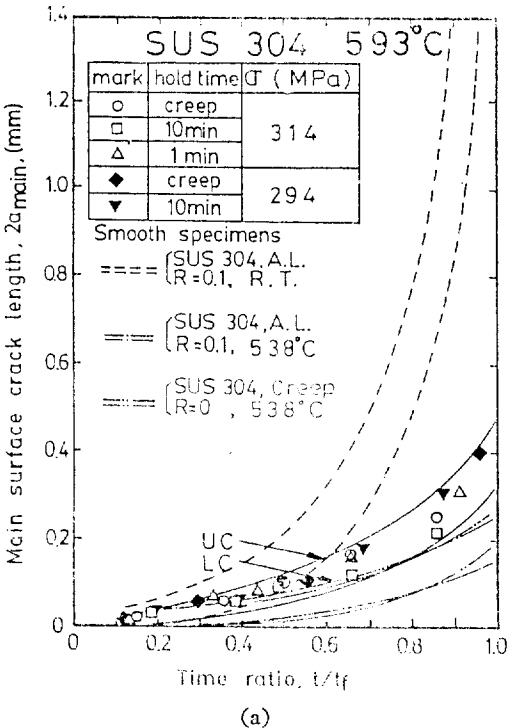


Fig. 7 Increase of major crack length against time ratio for (a) smooth specimen and (b) pit specimen. UC indicates the upper limit curve and LC the lower limit curve

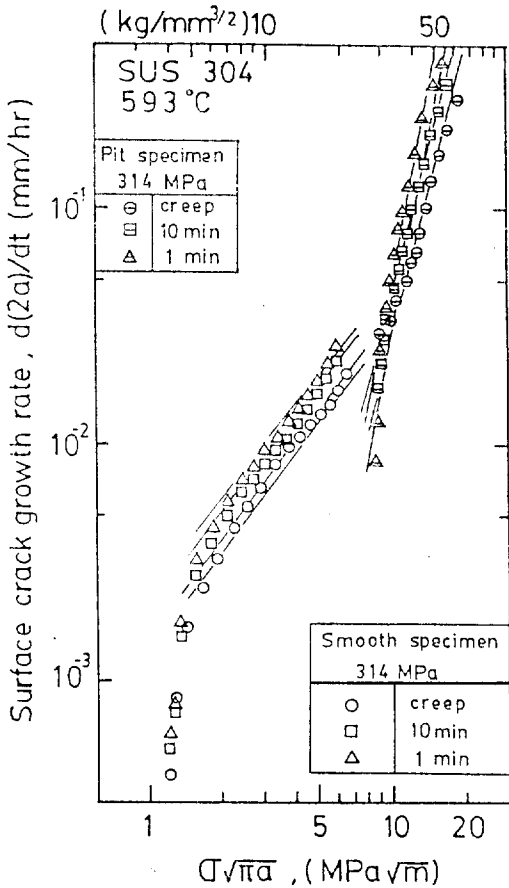


Fig. 8 Dependence of the surface crack growth rate of major microcrack upon the stress intensity factor

宇佐美들의 결과[3]와도 일치하는 경향을 나타내고 있다.

또 塑性疲労균열傳播에 있어 파괴역학 파라메타로 해서 ΔJ 가 有效함이 알려져 있고 本研究와 같은 高應力下의 試驗에서는 ΔJ 등의 적용이 바람직하지만 여기서는 簡便하고 또 實用性を 考慮해서 $\sigma\sqrt{\pi a}$ 와 da/dt 만의 特性을 나타내었다.

3.6. 主균열의 성장特性에 의한 수명예측

主균열의 길이는 時間比 t/t_f 로 整理하면 應력레벨과 材質의 差異에도 불구하고 비교의 좁은 分散帶內에 모임을 알았다[1, 5, 7].

本研究에서는 이 균열의 성장特性을 利用하여 Fig. 7과 같은 實驗데이터를 包含한 평滑한 曲線의 上界限, 下界限 및 中央線을 各各 UC(Upper limit curve), LC(Lower limit curve) 및 MC(Middle curve)로 假定하

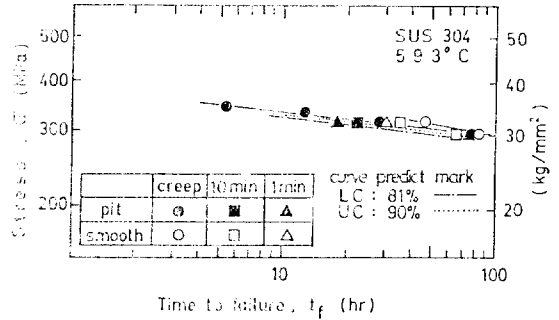


Fig. 9 Comparison of the fatigue and creep life by experiments with those obtained by integration of K vs crack growth relationship

고 이 세 개의 曲線을 基礎데이터로 해서 다음과 같은 計算方法으로 수명예측을 실시하였다. 즉 本研究에서는 式(1)을 利用한 균열의 성장速度와 應력擴大係數를 計算하였다. 이때 수명예측의 單純化를 위하여 $f(a)$ 는 1로 假定하였다.

$$da/dt = C \cdot K^m$$

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f(a) \tag{1}$$

그래서 破斷時間 t_f 는 式(2) 및 式(3)과 같은 積分에 의하여 그 結果가 얻어진다.

$$t = \int dt = \int_{a_i}^a \frac{da}{C \cdot \sigma^m \cdot \pi^{m/2} \cdot a^{m/2}} \tag{2}$$

여기서 a_i 는 初期균열의 길이이며 만일 $m \neq 2$ 라 하면 式(2)는 式(3)으로 된다.

$$t = \frac{a^{(-m/2+1)} - a_i^{(-m/2+1)}}{(-m/2+1) \cdot C \cdot \sigma^m \cdot \pi^{m/2}} \tag{3}$$

破斷時間 t_f 는 마이크로 컴퓨터에 入力한 式(1) 및 (3)에 의하여 計算한다. 이때 m 과 C 는 最小自乘法에 의하여 구하며 a 는 材料의 破壞靱性值 K_c 혹은 a_f 에 의하여 定해진다. Fig. 8에는 UC, MC 및 LC曲線을 使用하여 推定한 $da/dt-K$ 의 關係를 線으로 나타내었다. 또 Fig. 9上에는 本研究에서 試圖한 計算方法에 의하여 誤差가 적고 精密度가 좋은 應력-파단시간 曲線의 수명예측 資料를 點線으로 表示하였다. 즉 Fig. 7과 같은 無次元의 主균열의 성장特性을 使用하면 Fig. 8의 직선 및 Fig. 9의 點線의 資料와 같은 信賴性이 있는 수명예측이 推定 可能하였다.

4. 結 論

304 스테인리스강의 평滑재와 인공피트材의 크리프와 유지시간 10分 및 유지시간 1分의 실험을 593°C에

시 實施하면서 실온에서 표면레프리카法에 의하여 미소분포균열의 발생 成長 合體거동을 測定하고 그 特性을 利用하여 수명예측을 實施함으로써 아래와 같은 主要한 結果를 얻었다.

1) 미소균열은 수명의 초기에 발생하고 破斷에 달할 때까지 발생을 계속하였다. 수명의 대부분은 이러한 미소균열의 성장·合體過程에 消費되는 것이다.

2) 고온下에서 大部分의 균열은 0.05mm이하의 극히 미소한 균열이다. 破斷直前에 있어서도 主균열은 0.5mm까지 성장하지 못하였다. 따라서 破斷은 最終적으로 미소한 균열끼리의 合體에 의하여 誘導되어진다.

3) 평활재의 미소한 균열중의 主균열의 $da/dt - \sigma \sqrt{\pi a}$ 特性은, 인공피트에서 발생한 균열의 성장特性과 다르다. 고온下의 미소균열의 성장은 고밀도의 균열군과의 合體에 의하여 加速되어진다.

4) 비교的 좁은 分散帶內에 모이는 $a/a_f - t/t_f$ 曲線의 特性을 利用하여 計算하면 $da/dt - K$ 曲線과 $S - t_f$ 曲線의 예측이 可能하였다.

후 기

본 연구는 1986년도 한국과학기술단의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Suh, C.M., and Kim, G.N. "A study on the initiation and growth behaviors of surface crack in type 304 stainless steel at room temperature", *Trans. of Korean Soc. of Mech. Engng.*, 8, pp.195-200, 1984.
- [2] Kitagawa, H., Yuuki, R., Takahashi, S, and Suh, C.M. "Fracture mechanics approach to small fatigue crack growth initiated on smooth surface", *Proc. Japan Soc. Mech. Engng.* No. 790-7, pp.25-30, 1979.
- [3] Usami, S., Fukuda, Y., and Shida, S. "Initiation and growth of small cracks on the smooth specimen in high temperature plastic fatigue", *Proc. Japan Soc. Mech. Engng.* No. 810-7, pp.219-224, 1981.
- [4] Usami, S., Fukuda, Y., and Shida, S. "Micro-crack initiation and propagation in 304 stainless steel plain specimen under fatigue-oxidation interaction at elevated temperature", *J. of the Soc. of Mater. Science, Japan*, 33, pp.685-691, 1984.
- [5] Yuuki, R., Kitagawa, Suh, C.M. and Mochida, I. "Fatigue crack growth of surface cracks in stainless steel at elevated temperature", *J. of the Soc. of Mater. Science, Japan*, 31, pp.500-504, 1982.
- [6] Horiguchi, M. and Kawasaki, T. "A study of combined fatigue and creep fracture behavior of Austenitic stainless steel at 650°C," *J. of the Soc. of Mater. Science, Japan*, Vol. 31-342, pp.277-282, 1982.
- [7] Suh, C.M., Kang, Y.G., Suh, D.Y. and Hwang, B.W." Basic characteristics of surface micro-cracks in type 304 steel at 538°C", *KSME Journal*, 1, pp.115-120, 1987.
- [8] Skelton, R.P. "Growth of short cracks during high strain fatigue and themal cycling", *ASTM STP* 770, pp.337-381, 1982.
- [9] Sidey, D., and Coffin, L.F. Jr. "Low-cycle fatigue damage mechanisms at high temperature," *ASTM* 675, pp.528-568, 1979.
- [10] Brinkman, C.R. "Creep-fatigue effects in structural materials used in advanced nuclear power generating systems", *Proc. of the 27th Sagamore Army Materials Research Conf. on Fatigue Environment and Temperature Effects*, pp.241-263, 1980.
- [11] James, L.A. "The effect of frquency upon the fatigue crack growth of type 304 stainless steel at 1000°F", *ASTM STP* 513, pp.218-229, 1972.
- [12] Suh, C.M., Yuuki, R. and Kitagawa, H. "Fatigue microcracks in a low carbon steel", *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* 8, pp.193-203, 1985.