

<論 文>

304스테인리스강의 고온표면미소 균열의 거동에 관한 기초적 연구

서 창 민* · 이 정 주** · 김 영 호***

(1988년 4월 7일 접수)

Behaviors of Surface Micro-Crack of 304 Stainless Steel at Elevated Temperature

Chang-Min Suh, Jung-Ju Lee and Young-Ho Kim

Key Words : Surface Micro-Crack(표면미소균열), Creep(크리프), Creep-Fatigue(크리프-피로), Load Holding Time(하중유지시간), Time Ratio(시간 비율), Main Crack(주균열)

Abstract

This paper deals with the behavior of surface crack growth and the characteristics of surface micro-crack distribution under creep and creep-fatigue with 1 min. and 10 min. of load holding times at 593°C, in air. The test specimen is a plate type with a small artificial defect of type 304 stainless steel. Quantitative analysis of the characteristics of surface micro-cracks initiated from the small defect has been carried out by the surface replica method and optical microphotography. The experimental results have been interpreted from the view-point of fracture mechanics. It can be concluded that the longer the hold time the longer the total life time. Most of surface micro-cracks initiate at grain boundaries before the specimen reaches 20% of its total life time, a few of them lead to fracture by coalescence with the main crack.

1. 서 론

최근 高溫機器, 部材의 檢査, 보수 및 健全性評價에도 破壞力學이 확장, 적용되고 이를 기초로 한 연구도 활발하게 추진되어 왔다⁽¹⁻¹⁰⁾.

강의 고온피로-크리프에 관한 연구결과를 波形的으로 분류하면 ① 크리프 스트레인이 무시되는 高周波數의 波形, ② 인장과 압축방향에 크리프 스트레인이 크게 생기는 파형, ③ 압축방향에만 크리프

스트레인이 생기는 파형, ④ 인장방향에만 크리프 스트레인이 생기는 파형, ⑤ 일정하중을 가하는 크리프 등으로 大別된다^(11,20).

平滑材의 고온저사이클피로에 있어서 파단수명에 미치는 온도, 주파수 및 스트레인의 파형의 영향을 해석하는 경우 위의 ①~④의 네 가지 파형으로 大別하면 피로현상중의 크리프 영향이 잘 해석되고 피로-크리프 상호작용의 內容도 체계적으로 분석할 수 있다고 NASA가 제시하고 있다⁽¹¹⁾.

이와 같은 크리프 및 피로-크리프시험이란 주로 고온하에 원형시험편을 사용하여 유지시간에 따라 얻어지는 변위, 소성스트레인 및 破斷時間자료 등을 얻어 구조물 및 기기의 설계자료로 사용한 것이

*정회원, 경북대학교 공과대학 기계공학과
**정회원, 한국과학기술대학 생산공학부
***정회원, 부산대학교 공과대학 생산기계공학과

다^(11~19). 또한 관통균열에 관한 피로-크리프 상호작용하의 균열전파거동에 관한 파괴역학적 연구가 많이 보고되는 경향이 있지만, 원자로를 위시한 고온 기기 및 구조물의 발달로 이 분야에 관한 많은 자료의 축적이 요구되고 있다^(2~4,17,19,20).

특히 部材 表面上에 실존 가능한 결함의 영향과 피로-크리프 상호작용하에 작은 표면결함에서 전파될 균열의 발생성장에 관한 정량적인 자료는 수명 예측과 건전성평가 등을 위한 통계적 시뮬레이션을 수행하는 데 있어 강력히 요구되지만 이것에 관한 기초적 자료의 축적이 미흡한 실정이다^(17,19).

따라서 본 연구에서는 파괴역학적인 해석법과 표면레프리카법을 확장, 적용시켜 피로-크리프하의 유지시간에 따른 작은 표면균열의 분포상태와 이의 합체, 성장 및 밀도변화특성을 해석하여 기초적 자료를 얻는다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

시험편 재료는 용체화 처리된 304스테인리스강이다. 시험편은 직경 19mm의 열간압연환봉을 기계 가공하여 Fig. 1과 같은 형상으로 제작하였다. 시험편의 중앙평활부는 연마지 1200번까지 연마한 후 산화크롬분말로 버핑하였다. 작은 표면결함은 소형 정밀 탁상드릴링머시인으로 직경 0.5mm, 깊이 0.5mm의 크기로 정밀하게 가공하였다. 표면결함의 깊이는 드릴링머시인에 부착시킨 다이얼게이지에 의해 측정하였으며, 표면레프리카로 그 크기를 확인하였다.

2.2 실험 방법

본 연구에는 레버식 크리프시험기를 개조하여 크리프 및 피로시험에 사용하였다. 하중의 부하 및 제거는 전원의 입력상태에 따라 모터의 회전방향이 바뀌고 이에따라 나사식재의 상하운동에 의한다. 따라서 Fig. 2(a)의 응력파형으로 부하응력 32kg/mm², 온도 593°C의 고온대기하에서 크리프, 유지시간 10분 및 유지시간 1분의 크리프-피로시험을 행하였다. Fig. 2(a)의 파형 중 무부하시간은 균열 성장거동에 영향을 거의 미치지 않으므로 Fig. 2(b)와 같은 응력파형으로 바꾸어 실험에서 얻은 데이터를 바꾸어진 응력파형에 대한 시간으로 환산하여 정리하였다. 시험편 가열은 전기저항식 전기로로

하였으며, 온도조절은 자동온도조절장치에 의하여 593°C의 실험 온도레벨을 ±5°C 이내로 유지시켰다.

표면미소균열의 발생·성장거동을 관찰하기 위하여 예비실험에서 얻은 데이터의 파단시간 수명비 (t/t_f)가 0.2, 0.4, 0.5, 0.6 및 0.8 부근에서 시험기를 일시 정지시켜 상온까지 냉각시킨 후 각 경우에 대하여 작은 표면결함을 중심으로 레프리카를 채취·보존하였다. 채취된 레프리카를 광학현미경으로 확대·촬영한 후 그 사진들을 조합시켜 표면미소균열의 발생·성장거동을 가시화하고, 유지시

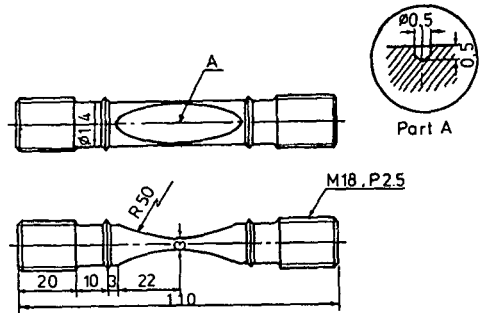


Fig. 1 Configuration of creep-fatigue specimen (unit: mm)

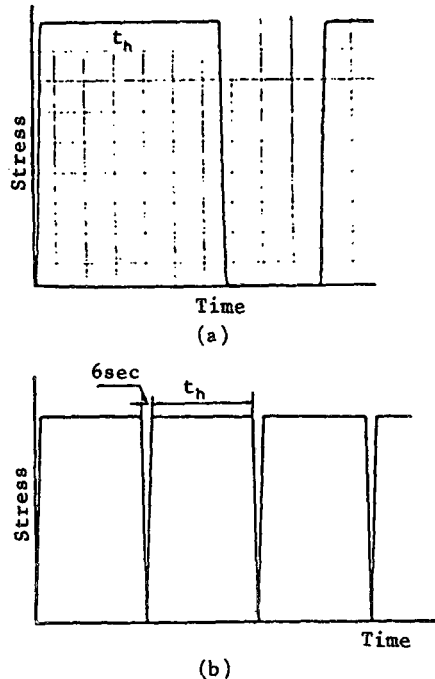


Fig. 2 Stress wave type of the creep-fatigue test (t_h = hold time)

간변화에 따른 표면미소균열의 분포와 표면미소균열과 이들의 성장, 합체에 의한 작은 표면결함에 관하여 연구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 작은 표면결함에서 발생·성장하는 표면균열의 성장특성

Fig. 3은 레프리카에서 현미경(X100)으로 측정된 투영된 표면균열길이와 시간과의 관계를 나타낸다. Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이 수명은 하중유지 시간이 증가함에 따라 길어진다. 즉 유지시간 1분의 크리프-피로시험의 경우가 가장 짧고 다음은 유지시간 10분인 크리프-피로시험의 경우가 가장 짧고 다음은 유지시간 10분인 크리프-피로시험의 경우이며, 반복 작용이 없는 크리프시험의 파단수명이 가장 길다.

Fig. 4는 Fig. 3의 자료를 파단수명 t_f 에 대한 시간수명 t 와의 비 t/t_f 와 표면균열길이와의 관계로 나타낸 것으로, 표면미소균열을 관찰하기 위한 기초적인 자료로도 이용하였다. Fig. 5는 Fig. 3의 결과를 이용하여 시간당 균열성장속도와 최대 응력확대계수와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 시간당 균열성장속도는 유지시간이 길어짐에 따라 감소한다. 이와 같은 결과는 관통균열을 가진 스테인리스강으로 실험한 결과와⁽⁴⁾ 같은

경향을 나타내고 있다.

3.2 표면미소균열의 발생 및 성장거동

Fig. 6은 본 연구에서 얻은 결과중 예로서 크리프에 대하여 미소균열의 발생과 성장·합체거동을 나타낸 것이다. 이것은 시험편 표면상태의 변화를

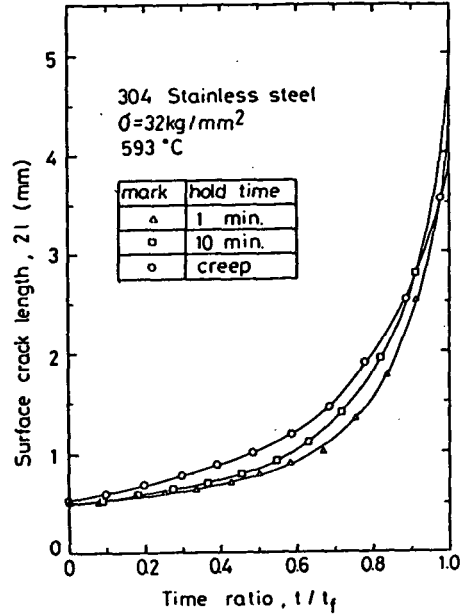


Fig. 4 Relation between the surface crack length and time ratio

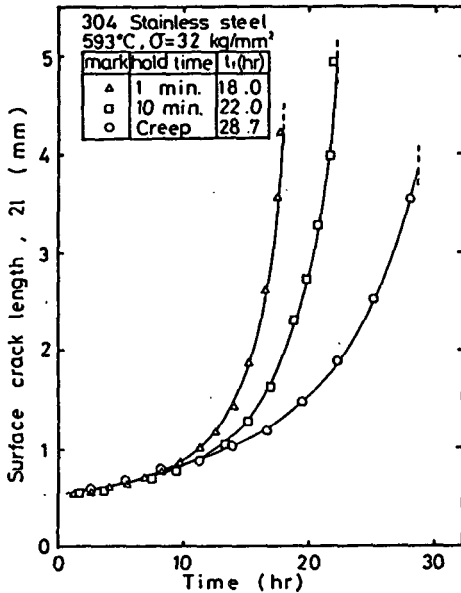


Fig. 3 Initiation and growth behavior of surface crack initiated from a pit of 304 stainless steel

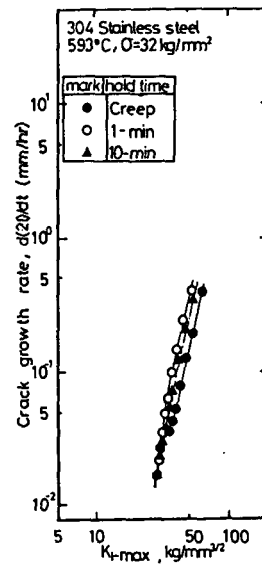


Fig. 5 Dependence of the surface crack growth rate upon the maximum stress intensity factor

레프리카법을 이용하여 채취·보관한 후 작은 표면 결함을 기점으로 일정영역을 잡아 광학현미경을 사용하여 확대 촬영한 사진들을 연속적으로 접속시켜 이를 트레싱한 다음 축소시킨 것이다. 이때 시험기를 일시정지시켜 상온까지 냉각시킴으로서 균열 성장에 미치는 영향은 거의 무시할 수 있다는 보고가 있다⁽⁶⁾.

여기서 표면미소균열은 파단수명의 초기에 나타나는 슬립선이나 보이드 및 캐비티 등과 도시화된 자료의 관찰만으로는 판별이 곤란하므로 광학현미경으로 그 상태를 점검하여 결정입계가 완전히 분리되었거나 인접된 결정입계를 통과해서 성장한 균열들을 표면미소균열로 정의하였다. 이와같은 정의 방법은 별도의 표면미소균열에서도 사용되었다⁽⁵⁻⁸⁾.

Fig. 6을 포함한 본 실험의 표면관찰로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있었다. 파단시간수명의 10~20%에 상당하는 잠복기를 거친 다음 작은 표면결함에서 주균열(파단수명을 좌우한 미소균열)이 발생하며, 이것은 서서히 성장한 후 파단수명에 달하면 급속한 성장을 하였다.

파단수명 20% 이전의 크리프, 유지시간 10분 및 1분인 크리프-파로의 세 가지 경우에서 모두 표면미소균열은 파단수명의 20% 이전에 발생함을 알 수 있었다. 이 결과는 표면결함이 없는 평활재의 상온⁽⁵⁾ 및 고온에서의 실험결과^(6,7)와도 잘 일치하고 있다.

표면미소균열은 크리프, 유지시간 10분, 유지시간 1분인 크리프-파로시험의 순으로 표면미소균열의 수가 많아지며, 파괴형식도 결정입계를 따라 파괴가 진행되는 입계파괴의 형성이 두드러지는데 이는 유지시간이 증가함에 따라 시간의존성인 크리프 파괴형상이 우세하기 때문이라고 생각된다.

표면미소균열은 작은 표면결함에서 발생한 주균열 선단 부근에 많이 분포하고 있으며 파단수명비의 증가와 더불어 새로운 표면미소균열이 계속적으로 발생·성장하여 갯수와 길이가 증가되며 이때 대부분의 표면미소균열들은 주응력축에 거의 수직인 방향으로 성장하고 있음을 알 수 있다. 또한 작은 표면결함에서 발생한 주균열 선단에 밀접된 미소균열들은 파단수명의 초기에는 서서히 성장해 가면서 다른 미소균열들과 연결·합체되지만 그 후 이러한 연결·합체가 가속화되면서 급속히 성장함을 관찰할 수 있고 축방향의 신장과 함께 횡방향의

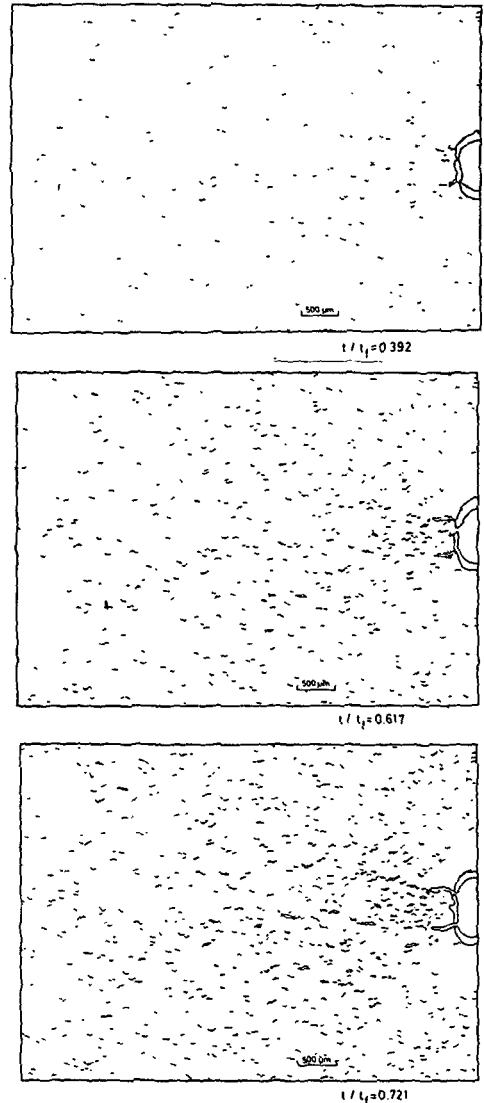


Fig. 6 Initiation, growth and coalescence of microcracks on the notched surface of specimen (SUS304, $\sigma=32\text{kg/mm}^2$, 593°C , creep)

수축이 파단수명의 말기에서 더욱 현저함을 알 수 있다.

4. 표면미소균열의 통계적 고찰

4.1 표면미소균열의 분포변화

Fig. 7은 Fig. 6과 같은 자료로부터 측정된 예로서 작은 표면결함으로부터 발생한 주균열선단의 주응력축에 수직인 방향의 일정거리에 따른 표면미소

균열수를 나타낸 것이다. 표면미소균열들은 주균열 선단 부근에 가장 많이 밀집되어 있고 거리의 증가와 더불어 감소함을 알 수 있다. 이것은 주균열의 선단에 가까울수록 응력집중현상이 커지므로 캐비티의 발생 및 성장이 용이하고 결정입계에 응력이 집중되어 미소균열의 발생이 용이하지만, 주균열선

단에서 멀어지면 응력집중이 낮아져서 미소균열의 발생이 어려워지며 일정한 포화치를 갖음을 알 수 있다. 또 하중유지시간이 감소함에 따라 균열성장거동은 캐비티에 의한 것보다 피로의 영향이 지배적이 되고, 반복작용에 의한 국부적인 크리프 영향으로 주균열선단 부근에서 표면미소균열이 다수 분포한다고 생각된다. 그리고 이러한 현상은 주균열선단으로부터 거리에 따른 소성영역의 변화와 변형률과도 관계가 있다고 생각되며 이들은 앞으로 더욱 연구할 과제라 생각된다.

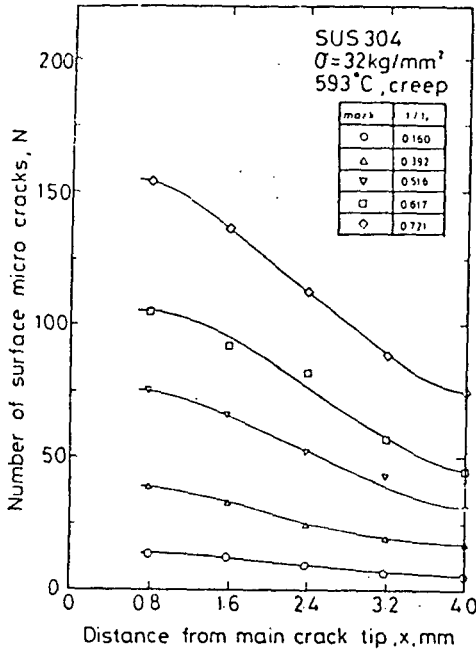


Fig. 7 Number of surface micro-cracks along the distance from main crack tip within 0.8mm width

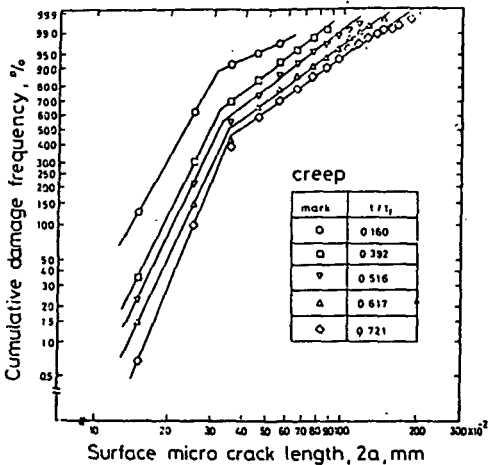


Fig. 8 Weibull distribution of the cumulative probability of failure versus the surface micro-crack length

4.2 파단수명비에 따른 와이불누적 확률의 변화

Fig. 8은 Fig. 6과 같은 표면관찰의 자료에서 정량적으로 측정된 표면미소균열길이 $2a$ 에 대하여 와이불누적확률을 나타낸 것이다. 파단수명비의 증가에 따라 기울기가 감소하며 균열길이가 큰 방향으로 이동해서 약 0.02~0.035mm에서 절점이 있음을 알 수 있다. 이는 파단수명의 초기에 발생한 미소균열들이 파단수명비의 증가와 더불어 성장·합체되어 균열길이가 길어지기 때문이라고 생각된다. 이와같은 현상은 연강평활재의 상온회전굽힘피로시험⁽⁵⁾과 304스테인리스강 평활재에 대한 고온편진인장피로시험⁽⁶⁾에서도 같은 경향을 나타낸다. 표면미소균열의 갯수는 일반적으로 파단수명비가 증가함에 따라 지수함수에 가까운 분포형태로 나타나며, 균열길이의 분포는 t/t_f 가 증가함에 따라 균열길이가 큰 방향으로 이동하지만 t/t_f 가 0.8 부근에서 대부분의 균열길이는 0.02~0.05mm 정도로 대단히 작다. 여기서 균열길이 $2a$ 는 실제의 표면미소균열을 주응력축에 수직인 방향으로 투영하였을 때의 길이로 정의하였다. 또 두 개 혹은 그 이상의 균열들이 합체되면 하나의 균열로 취급하였다.

4.3 파단수명비에 따른 표면미소균열의 밀도변화

Fig. 9는 예로서 나타낸 Fig. 6 및 Fig. 8과 같은 자료를 이용하여 본 연구에서 실시된 세 가지 실험 조건에서 얻은 표면미소균열의 밀도 δ 를 구하여 파단수명비에 대한 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 9에서 δ 는 크리프, 유지시간 10분, 유지시간 1분인 크리프-피로의 순으로 유지시간이 길어짐에 따라 높아짐을 알 수 있다. 유지시간 1분인 크리프-피로의 경우, 균열의 발생·성장 및 합체현상

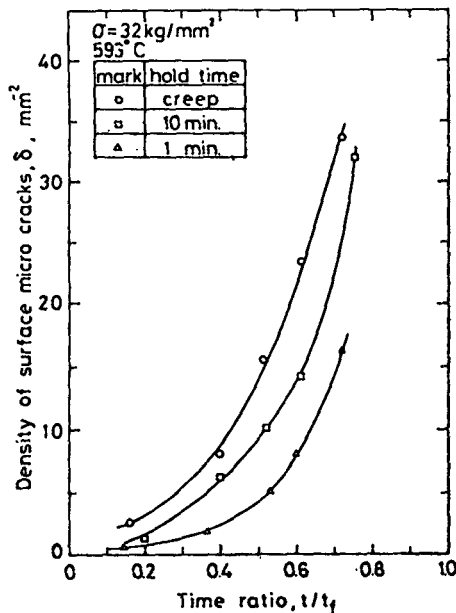


Fig. 9 Relation between the surface micro-crack density, δ , and the time ratio, t/t_f .

은 다른 경우에 비해 주로 주균열선단 부근에서 일어난다. 따라서 미소균열의 밀도는 크리프와 유지시간 10분인 크리프-피로의 경우보다 훨씬 적다. 또한 세 가지 실험조건하에서 δ 는 파단수명에 가까워짐에 따라 급격히 증가함을 알 수 있다. 상온의 연강평활재⁽⁵⁾와 고온의 304스테인리스강 평활재로 편진인장피로시험^(6,7)을 행한 실험결과에 의하면 δ 는 응력레벨에 무관하며 파단수명에 가까워지면서 급격히 증가한다는 사실이 보고되었다.

이와같이 크리프와 유지시간 10분인 크리프-피로의 δ 가 유지시간 1분인 경우보다 크지만 파단수명이 길어지는 이유는 주균열선단의 소성영역에서 캐비티의 발생과 성장에 의한 영향 때문이라 생각된다. 즉 하중유지시간이 길어지면 균열성장거동은 피로균열의 발생·성장보다는 캐비티의 생성과 성장·합체에 의해 좌우되며, 주균열선단 부근에서 발생한 표면미소균열들에 의한 응력방출로 인하여 응력집중이 감소된다^(2,3). 따라서 하중유지시간이 길어지면 균열성장 및 합체가 지연되어 파단수명이 길어진다고 생각된다.

5. 결 론

본 연구에서는 593°C 의 고온대기중에서 작은 표면결함이 있는 304스테인리스강의 시험편을 사용하

여 크리프 및 크리프-피로시험(유지시간 10분과 1분)을 행하여 유지시간에 따른 표면미소균열의 발생·성장거동을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

대부분의 미소균열은 파단수명의 20% 이전에 결정입계에서 발생하여 시간이 경과함에 따라 성장·합체하며 그 중 주균열선단에 있는 극히 적은 수의 균열들이 주균열과 합체하여 파단에 이르게 되었다. 주균열선단에는 표면미소균열들이 고밀도로 분포되어 있고, 주균열선단으로부터의 거리의 증가와 더불어 감소한다. 그러나 유지시간 1분인 경우는 거리의 증가와 더불어 균열의 밀도변화가 다른 두 경우보다 적었다. 크리프와 유지시간 10분인 크리프-피로쪽이 유지시간 1분인 경우보다 파단수명이 증가하였다. 이는 노치선단에서 생긴 표면미소균열의 발생·성장·합체에 의한 영향임을 확인하였다. 즉 유지시간이 적은 쪽은 국부적인 미소균열의 합체로 표면미소균열의 성장이 가속화됨을 알았다.

후 기

본 연구는 1986년도 한국과학재단의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 동 재단 관계자 여러분께 감사함을 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 結城良治, 北川英夫, 徐昌敏, 持田郁夫, 1982, "高温におけるステンレス鋼の表面き裂の疲労き裂成長特性", 日本材料學會誌, 第31卷, 第344號, pp. 500~504.
- (2) Shahinian, P. and Sadananda, K., 1979, "Effect of Stress Ratio and Hold Time on Fatigue Crack Growth in Alloy 718", ASME, J. of Material and Technology, Vol. 101, pp. 224~230.
- (3) James, L.A., 1972, "Hold-Time Effect on the Elevated Temperature Fatigue Crack Propagation of Type 304 Stainless Steel", Nuclear Tech., Vol. 16, pp. 521~530.
- (4) James, L.A. and Schwenk, E.B., 1972, "Fatigue-Crack Propagation Behavior of Type 304 Stainless Steel at Elevated Temperature", Metallurgical Trans., Vol. 2, pp. 491~496.
- (5) 徐昌敏, 北川英夫, 結城良治, 1983, "平滑材表面の微小疲労균열에 관한 基礎的 特性", 大韓機械學會論文集, 第7卷, 第1號, pp. 28~35.

- (6) Suh, C.M, Kitagawa, H., Kim, G.N. and Yuuki, R., 1985, "Quantitative Analysis of Surface Microcrack in Type 304 Stainless Steel at Elevated Temperature", ASME, PVP-Vol. 98-1, pp. 137~142.
- (7) Suh, C.M., Suh, D.Y. and Hwang, B.W., 1986, "Surface Micro Cracks in a Type 304 Stainless Steel at Elevated Temperature", Proc. of 2nd Conf. of APCS-86, pp. 221~226.
- (8) Shahinian, P., 1976, "Creep-Fatigue Crack Propagation in Austenitic Stainless Steel", ASME, J. of Pressure Vessel Technology, Vol. 75, pp. 166~172.
- (9) 堀口正一, 川崎正, 1982, "オーステナイト系ステンレス鋼の650°Cにおける疲労-クリープ相互作用下の破壊労働に関する研究", 日本材料學會誌, 第31卷, 第342號, pp. 277~282.
- (10) Baik, S. and Raj, R., 1982, "Mechanism of Creep-Fatigue Interaction", Metallurgical Trans., 13A, pp. 1215~1221.
- (11) Halford, G.R., Hirschberg, M.H and Manson, S.S, 1973, "Temperature Effects on the Strainrange Partitioning Approach for Creep Fatigue Analysis", ASTM, STP 520, pp. 658~669.
- (12) Kino, H., Nakashima, K., Yamanouchi, H., and Yamashita, Y., 1986, "Creep Crack Growth Behavior in 2 1/2Cr-1Mo Steel", J. of Soc. of Materials Science, Japan, Vol. 35-390, pp. 254~259.
- (13) Kitamura, T., Sugihara, H., and Ohtani, R., 1986, "Effect of Cyclic Stress Change on Creep Crack Propagation", J. of Soc. of Materials Science, Japan, Vol. 35~390, pp. 260~266.
- (14) Nishino, S., Sakane, M. and Ohnami, M, 1986, "Creep, Fatigue and Creep-Fatigue Damage Evaluation and Estimation of Remaining Life of SUS 304 Austenitic Stainless Steel at High Temperature", J. of Soc. of Materials Science, Japan, Vol. 35~390, pp. 292~298.
- (15) Kanazawa, K., Yamaguchi, K. Sato, M., Suzuki, N., and Kanao, M., 1981, "High-Temperature, High-Cycle Fatigue Properties of S45C and SCM435 Steels", J. of Soc. of Materials Science, Japan, Vol. 30-332, pp. 454~460.
- (16) Hoffmann, C., Eylon, D. and McEvily, A.J., 1982, "Influence on Microstructure on Elevated Temperature Fatigue Resistance of a Titanium Alloy, ASTM STP 770, pp. 5~22.
- (17) Chaboche, J.L., 1982, "Lifetime Predictions and Cumulative Damage under High-Temperature Conditions," ASTM STP 770, pp. 81~104.
- (18) Törrönen, K., and Cullen, W.H. Jr., 1982, "Effect of Light-Water Reactor Environments on Fatigue Crack Growth Rate in Reactor Pressure Vessel Steels", ASTM STP 770, pp. 460~481.
- (19) Jaske, C.E., 1982, "Materials-Data Needs for Fatigue Design of Pressure Vessel Systems", ASTM STP 770, pp. 600~611.
- (20) Ohtani, 1980, "Creep and Fatigue at Elevated Temperature", 鐵と鋼, 第66卷, 第14號, pp. 2106~2118.