

<논 문>

고온 수명평가를 위한 수정 크립-피로 손상모델의 개발

박종주* · 석창성** · 김영진**

(1995년 12월 9일 접수)

Development of Modified Creep-Fatigue Damage Model for High Temperature Life Prediction

Jong-Joo Park, Chang-Sung Seok, Young-Jin Kim

Key Words : Linear Damage Summation Methods(선형손상누적법), Strain Range Partitioning Methods(변형률범위 분할법), Hold Time(유지시간), Rupture Time(파손시간)

Abstract

For mechanical system operating at high temperature, damage due to the interaction effect of creep and fatigue plays an important role. The objective of this paper is to develop a modified creep-fatigue damage model which separately analyzes the pure creep damage for hold time and the creep-fatigue interaction damage during startup and shutdown period. The creep damage was calculated by the general creep damage equation and the creep-fatigue interaction damage was calculated by the modified equation which is based on the frequency modified strain range method with strain rate term. In order to verify the proposed model, a series of high temperature low cycle fatigue tests were performed. The test specimens were made from Inconel 718 superalloy and the test parameters were wave shape and hold time. A good agreement between the predicted lives based on the proposed model and experimentally obtained ones was observed.

기 호 설 명

- N_i : 주어진 변형률범위에서의 파단수명
- n_i : 주어진 변형률범위에서의 사용회수
- t_{ri} : 주어진 온도에서의 파손시간
- t_i : 주어진 온도에서의 노출시간
- σ : 크립응력
- t_R : 크립파손시간
- T : 온도
- $\Delta\epsilon_t$: 전체 변형률범위
- N_f : 파단수명
- ν : 주파수
- α, β : 재료상수
- $\dot{\epsilon}$: 변형률속도

1. 서 론

고온에서 가동되는 기계시스템은 재료의 크립, 피로 혹은 크립-피로 상호작용에 의한 손상을 고려하여 강도설계를 수행한다. 이를 위해서는 고온피로로 인한 손상기구에 대해 체계적인 연구가 필요하나 실험 및 이론상의 어려움으로 인하여 연구가 미진한 상태이다. 지난 수십년간의 연구를 통하여 고온피로손상을 평가하는 방법으로 상온에 적용하는 Coffin-Manson식에 주기인자를 고려한 고온 피로수명에측법,⁽¹⁾ 변형률범위 분할법(strain range partitioning methods),⁽²⁾ 선형손상누적법(linear damage summation methods)^(3,4)이 제시되었다. 주기인자를 고려한 고온 피로수명에측법은 비교적

*회원, 성균관대학교 기계기술연구소

**회원, 성균관대학교 기계공학부

정확한 수명에측을 수행할 수 있으나 하중 작용형태가 불규칙적인 경우에는 주기효과를 정량화하기 어렵다는 단점이 있다. 변형률범위 분할법에서는 고온의 운전중 한 주기동안에 나타나는 소성변형과 변형의 방향을 함께 고려한다. 이 방법은 해석에 사용되는 변형률 이력(strain history) 데이터가 완벽한 히스테리시스 루프(hysteresis loop) 형태를 갖춘 경우에만 적용될 수 있다. 그러나 고온에서 가동되는 기계시스템은 일반적으로 운전조건이 복잡하기 때문에 완벽한 히스테리시스 루프를 구하기가 어렵다. 선형손상누적법은 크립과 피로가 서로 독립적으로 작용한다는 가정하에 크립손상과 피로손상을 선형적으로 결합시키는 방법이다. 이 방법은 해석이 간단하기 때문에 실제 구조물의 수명에측에 많이 이용되고 있다. 그러나 선형손상누적법을 이용한 수명평가에서는 크립과 피로의 상호작용을 고려할 수 없기 때문에 실제 재료의 수명은 이 법칙으로부터 예측된 결과보다 훨씬 짧은 것으로 알려져 있다.

본 논문에서는 유지시간 동안의 순수한 크립성분과 기동 및 정지시에 발생하는 크립-피로 상호작용을 분리하여 해석할 수 있는 수정된 크립-피로 손상모델을 개발하고자 한다. 크립손상은 Claus⁽⁵⁾의 관계식을 사용하여 계산하고 크립-피로 상호작용에 의한 손상은 Coffin⁽⁶⁾의 관계식에 변형률속도 항을 추가한 수정식을 사용하여 계산한다. 개발된 수정식의 타당성을 검토하기 위해 Inconel-718 초내열합금에 대해 과형 및 유지시간을 변화시키며 고온저주기 피로시험을 수행하고 예측결과와 비교하고자 한다.

2. 수정된 크립-피로 손상모델의 개발

이 장에서는 Miner⁽³⁾와 Robinson⁽⁴⁾이 제안한 선형손상누적법에 대해 설명하고, 본 연구에서 제안하는 수정된 크립 피로 손상모델에 의한 해석과정을 설명하고자 한다.

2.1 선형손상누적법

Miner와 Robinson은 고온에서 크립손상과 피로손상이 서로 독립적으로 작용한다는 가정하에 다음과 같은 손상수명식을 제안하였다.

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} + \sum_{i=1}^k \frac{t_i}{t_{Ri}} = D \quad (1)$$

여기서,

n_i : 주어진 변형률범위에서의 사용회수

N_i : 주어진 변형률범위에서의 파단수명

t_i : 주어진 온도에서의 노출시간

t_{Ri} : 주어진 온도에서의 파손시간

선형손상누적법은 형태가 간단하여 실제 문제에 편리하게 적용할 수 있으나, 크립-피로 상호작용에 의한 손상을 예측할 수 없기 때문에 실제 수명은 이 법칙으로부터 예측된 결과보다 훨씬 짧은 것으로 알려져 있다.

2.2 크립 손상수명계산

크립파손시간(t_R)은 가동온도(T)와 크립응력(σ)의 함수로서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\log t_R = f(\log \sigma, T) \quad (2)$$

Claus⁽⁵⁾는 식 (2)에서 가동온도가 일정한 경우에 다음과 같은 실험식을 제안하였다.

$$\log t_R = a \log \sigma + b \quad (3)$$

본 논문에서는 식 (3)을 이용하여 크립파손수명을 계산하였다. 이 식으로부터 응력과 가동온도를 알 수 있다면, 크립에 의한 파손시간이 구해지고 사용시간과의 비로부터 손상수명이 계산된다. 따라서, 크립에 의한 손상을 백분율로 제안하여 전체 파단수명극선에서 감해축으로써 수명감소량을 예측할 수 있다.

2.3 크립-피로 상호작용에 의한 손상수명계산

Coffin⁽⁶⁾에 의하면 주파수의 영향을 고려하여 일정한 전체 변형률에서는 재료의 파단수명(N_f)과 외부에서 가해진 주파수(ν) 사이에는 멱승(power law)의 관계가 성립한다. 이때, 주파수는 유지시간이 없는 연속된 사이클인 경우이다. 그러므로 유지시간이 있는 경우에는 순수한 크립에 의해 감소된 파단 수명과 1주기동안의 전체 시간에서 유지시간을 제외한 나머지 시간으로 주파수를 결정한다. 같은 변형률하에서 파단수명과 주파수와의 관계는 다음과 같으며,

$$N_f = C_1 \nu^{C_2} \quad (4)$$

이를 C_1 에 대해 재정리하면 다음과 같다.

$$N_f \nu^{-C_2} = C_1 \quad (5)$$

변형률범위($\Delta \epsilon_i$)가 변화하는 경우에 C_1 과의 관

계로부터 식 (5)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta \epsilon_r = a(N_f \nu^{-\beta})^{\alpha} \quad (6)$$

여기서, α, β : 재료상수

일반적으로 변형률범위가 변하면 주파수와 파단 수명사이의 관계를 정상화하기가 어렵다. 즉, 식 (6)에서 변형률범위가 변하는 경우에는 C_1 만이 변하는 것이 아니고, 벽층의 기울기인 C_2 도 함께 변한다. 그 이유는 일반적으로 크립의 효과는 가동온도, 사용응력 및 고온 분위기에 노출된 시간의 함수이기 때문이다. 일정한 가동온도에서 변형률이 같은 경우에는 노출시간이 크립의 효과를 좌우하게 된다. 그러나 피로하중하에서는 변형률이 변화하므로 응력과 시간이 크립에 영향을 미치는 인자가 된다. 즉, 식 (6)에서는 사용응력이 일정한 경우에 시간의 효과만을 고려하였으므로, 변형률범위가 변하는 경우에는 정확한 수명평가를 수행하기가 어렵다.

이와 같은 경우에 변형률속도를 같게 한다면, 변형률범위가 변하더라도 같은 변형률하에서는 응력의 변화가 없기 때문에 크립의 효과를 고온분위기에

에 노출되는 시간만의 함수로 생각할 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 Coffin의 관계식에 변형률속도항을 추가한 다음 식을 제안하고자 한다.

$$\dot{\epsilon} = a(N_f \nu^{-\beta})^{\alpha} \quad (7)$$

여기서, $N_f \nu^{-\beta} = C_1, \dot{\epsilon} = J \epsilon_r$

식 (7)로부터 주파수의 가동온도, 변형률범위, 주파수 등의 값을 얻을 수 있다면 그 부분의 파단수명을 결정할 수 있다.

3. 실험

본 연구에서 제안하는 수정식의 타당성을 검토하기 위해 Inconel-718 초내열합금에 대해 파형 및 유지시간을 변화시키며 고온에서 저주기 피로실험을 수행하였다.

3.1 시편 및 시험방법

본 연구에서는 650°C 이상의 고온에서 사용하기 위하여 개발된 Inconel-718합금을 시험재료로 사용하였다. Inconel 718합금은 인장강도와 항복강도가 각각 1083 MPa, 814 MPa인 고강도 합금이며, 그

Table 1 Chemical composition of Inconel-718 alloy

(wt. (%))

| C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | Nb + Ta | Ti | Al | Co | Cu | Fe |
|-------|-----|------|-------|--------|-------|-------|------|---------|------|------|------|------|------|
| 0.036 | 0.1 | 0.13 | 0.003 | 0.0003 | 17.29 | 51.94 | 2.89 | 5.16 | 0.98 | 0.56 | 0.19 | 0.05 | Bal. |

Table 2 Experimental conditions for high temperature low cycle fatigue test

| Test temperature | Strain ratio | Total displacement range (mm) | Period (sec) | Increasing (or Decreasing) time (sec) |
|------------------|--------------|-------------------------------|--------------|---------------------------------------|
| 650°C | -1 | 0.4 | 240 | 120 (no hold) |
| | | | | 90 (60s hold) |
| | | | | 70 (100s hold) |
| | | 0.5 | 280 | 140 (no hold) |
| | | | | 110 (60s hold) |
| | | | | 90 (100s hold) |
| | | 0.6 | 340 | 170 (no hold) |
| | | | | 140 (60s hold) |
| | | | | 120 (100s hold) |

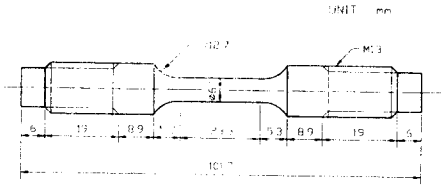


Fig. 1 Geometry of low cycle fatigue test specimen

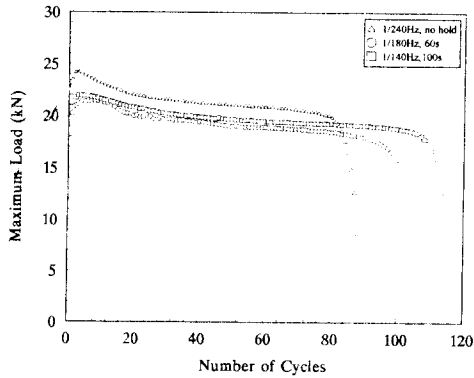
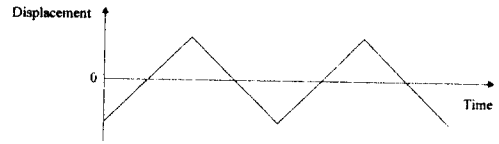


Fig. 2 Schematic diagram of various types of cycle all cycles have same period

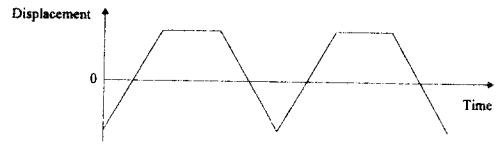
화학적 성분은 Table 1과 같다. 여러 연구자들이 이 합금에 대해 시험온도의 변화에 따른 미세조직의 변화를 관찰하였으며, 고온 저주기 피로특성에 영향을 미치는 주파수의 영향을 관찰하기도 하였다.⁽⁷⁾

Inconel-718합금의 고온 피로특성을 구하기 위하여 ASTM E606⁽⁸⁾(standard recommendation practice for constant-amplitude low-cycle fatigue testing)에 따라 저주기 피로시험을 수행하였다. 온도 제어를 갖춘 전기저항로를 이용하였으며, 시편의 3점에서 온도를 측정하여 시험온도에 도달한 후 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 범위 내에서 2시간 유지시킨 후에 저주기 피로시험을 실시하였다.

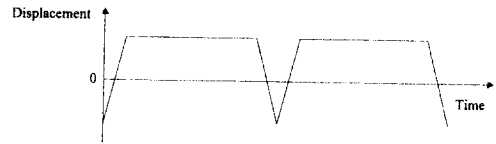
본 실험에 사용된 시험조건은 Table 2와 같다. 실험도중 나타나는 크립의 효과를 측정하기 위하여 1주기에 소요되는 시간을 짧게 하고, Fig. 2와 같이 유지시간이 없는 삼각파형인 경우, 인장과 압축 시간이 매우 짧은 경우 그리고 유지시간과 인장, 압축시간이 적절히 혼합된 경우의 3가지 파형(no hold, 60s hold, 100s hold)에 대해 실험을 수행하였다. 모든 실험을 인장-압축 하중형태에서 실시하였으며, 변위진폭을 0.4, 0.5, 0.6 mm의 3가지로 하였다. 각 경우의 1주기에 소요되는 시간을 진폭이



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 Maximum load vs. Number of cycles (total displacement=0.4 mm)

0.4 mm인 경우에는 240초, 0.5 mm인 경우에는 280초, 그리고 0.6 mm인 경우에는 340초로 하였다. 이와 같이 각 변위진폭에 따라 시간이 달라지는 이유는 변위 증가속도를 같도록 하기 위해서이다. 시편에 작용하는 최대 인장하중의 60% 하중감소가 이루어진 시점을 파단시점으로 하였다.

3.2 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 변위진폭이 0.4 mm인 경우에 대한 실험결과로서 3가지 파형변화에 따른 인장 최대하중의 변화이력을 나타낸 것이다. 인장 최대하중에서 유지시간이 없는 삼각파형인 경우가 파단수명이 가장 짧게 나타났으며, 유지시간이 길어질수록 수명도 증가하였다. 이는 비교적 낮은 변형률범위에서는, 유지시간에 의한 크립효과보다는 변위증가속도의 변화에 의한 효과가 수명에 더 큰 영향을 미치기 때문으로 생각된다.

Fig. 4는 변위진폭이 0.5 mm인 경우에 대한 실험결과이다. 인장 최대하중에서 유지시간이 가장 긴 사다리꼴파형인 경우가 파단수명이 가장 짧게 나타났으며, 유지시간이 짧은 파형, 삼각파형의 순으로 파단수명이 증가하였다. 이는 변형률범위가 증가함에 따라 유지시간에 의해 크립효과가 증가하기 때문으로 생각된다.

Fig. 5는 변위진폭이 0.6 mm인 경우에 대한 실험

험결과이다. 변위진폭이 0.5 mm인 경우와 마찬가지로 인장 최대하중에서 유지시간이 가장 긴 사다리꼴파형인 경우에 파단수명이 가장 짧게 나타났으며, 유지시간이 짧은 파형, 삼각파형의 순으로 파

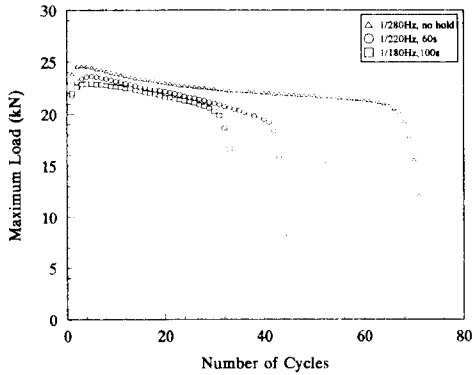


Fig. 4 Maximum load vs. Number of cycles (total displacement = 0.5 mm)

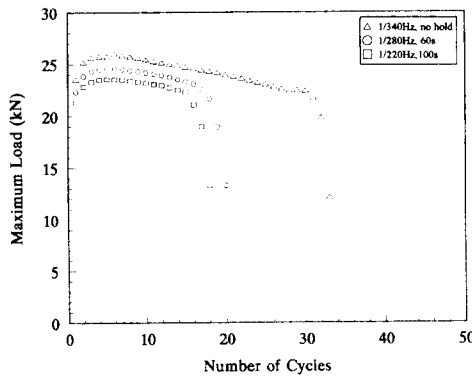


Fig. 5 Maximum load vs. Number of cycles (total displacement = 0.6 mm)

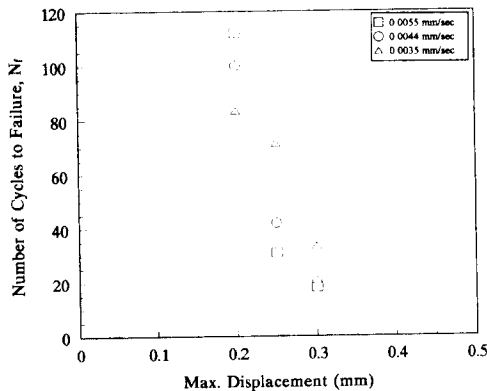


Fig. 6 Maximum displacement vs. Number of cycles to failure at constant displacement rate

단수명이 증가하였다. 그러나 수명변화는 앞의 두 경우보다 줄어들었다. 이는 변형률범위가 매우 높은 경우에는 유지시간에 따른 수명감소와 더불어 하중증가 및 감소시간 동안에 일어나는 크립-피로의 상호작용에 의한 수명감소효과도 증대하기 때문으로 생각된다.

Fig. 6은 3가지 변위증가속도에 따른 수명의 변화를 나타낸 것이다. 시간에 따른 변위증가속도가 같은 경우, 변위진폭이 커짐에 따른 수명의 감소율이 가장 큰 경우는 0.0055 mm/sec인 경우이고, 변위증가속도가 줄어들수록 수명의 감소율이 작아졌다.

이상과 같은 결과가 나타난 이유는 다음과 같은 원인에 기인한다고 생각된다. 응력준위가 낮은 경우에는 유지시간이 길어짐에 따라 응력의 완화폭이 커지고 수명이 상대적으로 길어지게 된다. 한편, 고온에서 유지시간 동안의 크립의 효과에 의한 수명의 변화는 크지 않으리라 생각된다. 그러므로, 전체수명은 응력완화에 의한 수명증가에 영향을 받아 유지시간이 길어질수록 수명이 증가하게 된다.

이와는 반대로, 응력범위가 증가함에 따라 응력 완화현상에 의한 수명의 증가폭은 그리 크지 않지만, 유지시간이 길어질수록 크립의 효과에 의해 수명의 감소폭이 커지게 된다. 따라서 전체 수명은 유지시간동안의 크립의 효과에 의해 감소하리라 생각된다.

4. 사례연구

Inconel-718의 균열발생 수명평가를 수행하기 위하여 3장에서 실험한 결과로부터 저주기 피로특성을 구하였다. Table 3은 동일한 변형률범위에서 유지시간의 변화에 따른 파단수명의 변화를 나타낸 것이며, 이를 도식적으로 나타내면 Fig. 7과 같다.

Table 3 Number of cycles to failure of Inconel-718 at 650°C

| $\Delta\epsilon_t$ (%) | Hold time (sec) | | |
|------------------------|-----------------|-----|-----|
| | 0 | 60 | 100 |
| 1.7 | 82 | 100 | 113 |
| 2.1 | 71 | 42 | 30 |
| 2.6 | 33 | 20 | 18 |

이 그림에는 장⁽⁹⁾이 측정된 650°C에서 0.05 Hz인 경우의 변형률-수명관계도 함께 나타내었다. 장의 데이터는 0.05 Hz의 비교적 빠른 변형률속도에서 구한 데이터이며, 이 경우 크립의 영향을 받지 않으므로 이 데이터를 본 사례연구의 기준 데이터로 설정하였다. Fig. 7에서 유지시간이 변함에 따라 수명선도가 기준선도에서 벗어남을 나타내고 있다. 이는 순수한 크립의 영향과 크립-피로 상호작용에 의한 영향으로 생각된다.

Table 4는 장⁽⁹⁾이 650°C의 일정온도에서 작용응력을 변수로 하여 크립파단시험을 수행한 결과이다. 이 데이터로부터 Claus⁽⁵⁾가 제안한 식 (3)의 상수 a , b 는 Fig. 8로부터 각각 -9.75, 29.49의 값으로 얻어졌다.

Table 3의 실험조건에서 순수한 크립에 의한 손상수명을 계산하기 위해 시험중에 가해진 전체 유지시간과 크립응력으로부터 크립파단시간과 크립손상수명을 계산하여 그 결과를 Table 5에 정리하였다. 이 표에 의하면 크립응력의 증가에 따른 손상수명의 증가보다는 유지시간의 변화에 따른 손상수명의 변화가 더 커지는 것으로 평가되었다.

고온 피로시험 도중에 유지시간이 없다면 순수한 크립에 의한 손상은 나타나지 않으므로, 유지시간 동안의 손상수명을 백분율로 계산하여 전체수명에 더해 주어야 한다. Table 6은 유지시간 동안의 크립의 효과에 의한 손상수명을 백분율로 계산하여 전체 파단수명에 더해준 결과이다. Table 6으로부터 변형률속도와 파단수명과의 관계를 구하여 Table 7에 정리하였다. 일정한 변형률속도에서 주파수와 파단수명과의 관계는 Fig. 9와 같이 나타낼 수 있다. Fig. 9에서 일정한 변형률속도에서 주파수와 파단수명의 관계는 일정한 기울기를 가지며 그 값은 $C_2=1.88$ 로 평가되었다. 세로축 절편값인 C_1 은 Table 8에 정리하였다.

이로부터 변형률범위가 변하더라도 변형률속도가 일정하다면, 주파수와 파단수명 사이에는 역승의

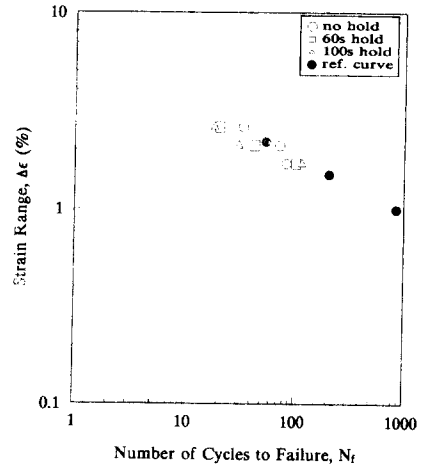


Fig. 7 LCF test results of Inconel-718 at 650°C

Table 4 Creep rupture test results

| Creep stress (MPa) | 500 | 700 | 900 |
|---------------------|-----|------|-----|
| Rupture time (hour) | 804 | 92.2 | 3.2 |

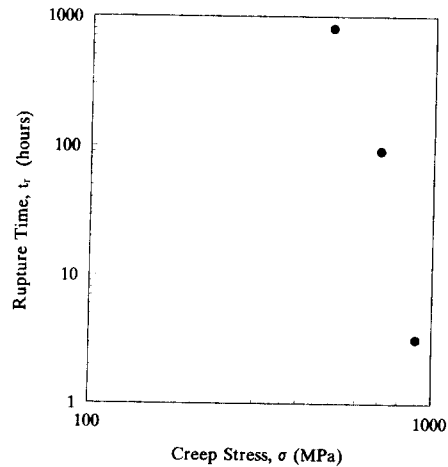


Fig. 8 Cree-rupture test results of Inconel-718 at 650°C

Table 5 Creep damage results of Inconel-718 at 650°C

| | | | | | | |
|---------------------------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|
| Total hold time (hour) | 0.333 | 0.5 | 0.7 | 0.833 | 1.667 | 3.139 |
| Creep stress (MPa) | 855 | 838 | 821 | 804 | 753 | 787 |
| Creep rupture time (hour) | 8.168 | 9.934 | 12.131 | 14.87 | 28.176 | 18.32 |
| Creep damage | 0.041 | 0.0503 | 0.058 | 0.056 | 0.0592 | 0.1713 |

Table 6 Number of cycles to failure with considering creep effect

| $\Delta\varepsilon_1$ (%) | Hold time (sec) | 0 | 60 | 100 |
|---------------------------|-----------------|----|----|-----|
| | 1.7 | | 82 | 104 |
| 2.1 | | 71 | 44 | 32 |
| 2.6 | | 33 | 21 | 21 |

관계가 성립한다.

Coffin 관계식의 상수 C_1 과 ε 와의 관계는 Fig. 10과 같이 나타낼 수 있으며, 식 (7)의 상수 α, β 은 각각 6.13, -0.41 의 값으로 얻어졌다.

이 결과를 장⁽¹⁾의 데이터와 비교하였다. 장은 650°C의 온도에서 0.05 Hz, 삼각파형으로 변형률 폭이 2.189, 1.5, 1.0이다. 이와 동일한 조건에 대해 본 논문에서 제안한 식 (7)을 이용하여 파단수명을 계산하고, 이 결과와 장의 논문에서 발표한 파단수명을 비교하여 제안된 식의 타당성을 검토하였다.

Table 7 Strain rate vs. Number of cycles to failure

| $\Delta\varepsilon_1$ (%) | Frequency (ν) | Strain rate | N_f |
|---------------------------|---------------------|-------------|-------|
| 1.7 | 0.0042 | 0.0075 | 82 |
| | 0.0056 | 0.0096 | 104 |
| | 0.0071 | 0.012 | 119 |
| 2.1 | 0.0036 | 0.0075 | 71 |
| | 0.0046 | 0.0096 | 44 |
| | 0.0056 | 0.012 | 32 |
| 2.6 | 0.0029 | 0.0075 | 33 |
| | 0.0036 | 0.0096 | 21 |
| | 0.0045 | 0.012 | 21 |

Table 8 Power law constant, C_1 vs. Strain rate

| Strain rate | 0.0075 | 0.0096 | 0.012 |
|--|---------------------|---------------------|---------------------|
| Power law constant, $C_1 = N_f^{-\beta} C_2$ | 1.258×10^7 | 4.365×10^6 | 2.884×10^6 |

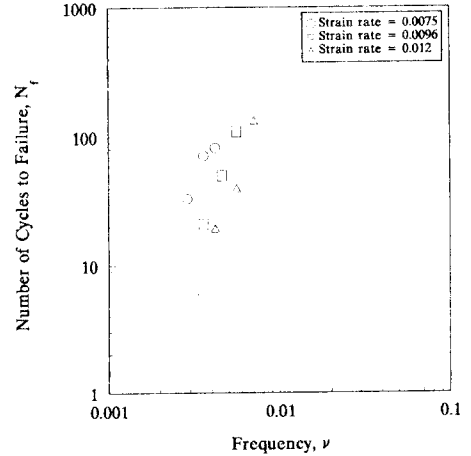


Fig. 9 Frequency vs. Number of cycles to failure for Inconel-718

장의 데이터는 변형률범위와 파단수명의 관계를 나타내므로 본 논문에서 제안한 식을 적용하기 위해서 변형률속도와 파단수명의 관계로 변환시켰으며, 그 결과는 Table 9와 같다.

본 논문에서 사례연구에 사용된 재료는 Inconel-718함금으로 식 (7)의 상수 α, β 은 각각 6.13, -0.41 로 계산되었으므로, 이를 이용하여 각각의

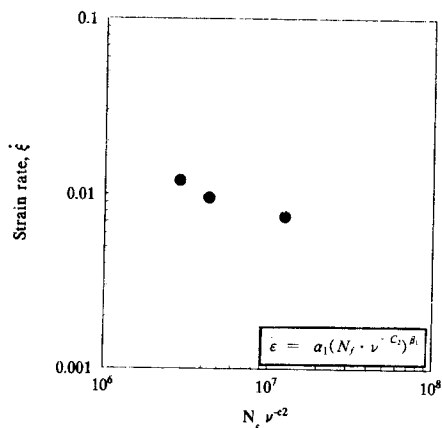


Fig. 10 $N_f \nu^{c_2}$ strain rate relationship for Inconel-718

Table 9 Experimental number of cycles to failure at 0.05 Hz (Chang's⁽⁹⁾ strain-life data)

| Strain rate | 0.11 | 0.075 | 0.05 |
|-------------|------|-------|------|
| N_f | 53 | 203 | 852 |

Table 10 Predicted number of cycles to failure at 0.05 Hz

| Strain rate | 0.11 | 0.075 | 0.05 |
|-------------|------|-------|------|
| N_f | 59 | 150 | 399 |

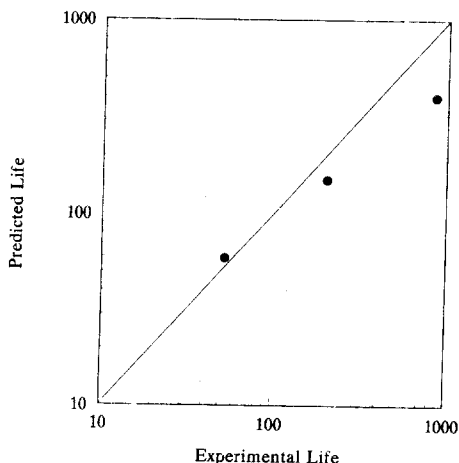


Fig. 11 Comparison of predicted life to experimental life using strain-life approach

변형률 속도에 따른 파단수명을 예측한 결과를 Table 10에 정리하였다.

Fig. 11은 제안된 식을 이용하여 예측된 수명과 실험데이터의 관계를 보여주고 있다. 여기서 실선은 예측수명과 실험데이터가 일치하는 경우이고 점선은 예측수명과 실험데이터의 차이가 1/3~3배에 해당하는 경우를 의미한다. 일반적으로 예측수명과 실험데이터와의 차이가 이 점선내에 들게 되면 비교적 정확한 수명예측이 이루어지는 것으로 평가되고 있다. 평가결과는 실험데이터와 비교하여 약 50%의 차이가 발생하였다. 이는 실험상의 오차를 고려한다면 매우 정확한 수명예측결과라고 생각된다. 따라서 본 논문에서 제안한 수명평가식은 실제 문제에 적용할 경우 수명예측을 정확하게 수행할 수 있다고 생각된다.

5. 결론

고온에서 가동되는 기계시스템의 피로강도설계를 위하여 유지시간동안의 순수한 크립성분과 기동 및 정지시에 발생하는 크립-피로 상호작용을 분리하여 해석을 수행할 수 있는 수정된 크립-피로 손상모델을 개발하였다. Coffin이 제안한 식의 문제점으로부터 변형률속도와 주파수를 함께 고려할 수 있는 수명평가식을 개발하였다. 사례연구를 통하여 제안된 수명평가식을 이용한 해석결과가 실험결과와 약 50%의 차이 내에서 일치하는 것으로 평가되어 제안된 수명평가식의 타당성을 입증하였다. 제안된 수명평가식을 실제문제에 적용할 경우 보다 효율적인 수명예측을 할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 산하 터보동력기계연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로써, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다. 또한 본 연구에 사용된 재료를 제공하여 주신 한국기계연구원의 김학민박사께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Coffin, L. F., 1969, "Predictive Parameters and Application to High Temperature Low Cycle Fatigue," *Proc. 2nd Int. Conf. Fracture*,

- Brighton, London, pp. 649~654
- (2) Halford, G. R. and Manson, S. S., 1976, "Life Prediction of Thermal Mechanical Fatigue Using Strain Range Partitioning," *Thermal Fatigue of Materials and Components, ASTM STP 612*, Philadelphia, ASTM, pp. 239~254
- (3) Miner, M. A., 1945, "Cumulative Damage in Fatigue," *J. Appl. Mech.*, Vol. 12, *Trans. ASME*, Vol. 67, pp. A159~A164
- (4) Robinson, E. L. A., 1938, "Effect of Temperature Variation on the Creep Strength of Steel," *Trans. ASTM*, Vol. 60, pp. 253~259
- (5) Clauss, F. J., 1960, "An Examination of High-Temperature Stress-Rupture Correlation Parameters," *Transaction of the ASME*, Vol. 60, pp. 905~927
- (6) Coffin, L. F., Jr., 1954, "A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal," *Trans. ASME*, Vol. 76, pp. 931~950
- (7) Fournier D., and Pineau, A., 1977, "Low Cycle Fatigue Behavior of Inconel 718 at 298K and 823K," *Metallurgical Transactions*, Vol. 8A, pp. 1095~1105.
- (8) *ASTM Standard E606~92*, 1980, "Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing," Annual Book of ASTM Standards, ASTM Philadelphia
- (9) 장식태, 1990, "Ni-Fe기 초내열합금 Inconel 718의 변형특성 및 미세조직에 관한 연구," 성균관대학교 박사학위논문