

# 니켈기 초내열합금 Alloy718의 고온 크리프 파단 특성

권상우\* · 공유식\*\* · 김선진\*\*

\*부경대학교 기계설계공학과 대학원

\*\*부경대학교 기계공학부

## High Temperature Creep Rupture Characteristics of Ni-Based Alloy718

SANG-WOO KWON\*, YU-SIK KONG\*\* AND SEON-JIN KIM\*\*

\*Graduate Student, Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

\*\*School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

**KEY WORDS:** Creep characteristics 크리프 특성 Steady state creep rate 정상상태 크리프 속도, Creep rupture time 크리프 파단시간 Larson-Miller parameter LMP, Initial strain 초기연신율

**ABSTRACT:** The short-term high temperature creep rupture behavior of Ni-based Alloy718 steel was investigated at the elevated temperatures range of 550 to 700 °C under constant stress conditions. The creep rupture characteristics such as creep stress, rupture time, steady state creep rate, and initial strain were evaluated. Creep stress has a quantitative correlation between creep rupture time and steady state creep rate. The stress exponents ( $n$ ,  $m$ ) of the experimental data at 550, 600, 650 and 700 °C were derived as 33.5, -24.9, 26.1, -21.2, 16.8, -12.8 and 10, -8.2, respectively. The stress exponent decreased with increasing creep temperature. The creep life prediction was derived by the Larson-Miller parameter (LMP) method and the resultant equation was obtained as follows:  $T(\log t_r + 20) = -0.00252 \sigma^2 - 1.377 \sigma + 22718$ .

### 1. 서 론

현재 선박, 자동차 및 항공기 등의 엔진, 발전소 보일러, 터빈, 원자로 부품 등의 여러 가지 고온 재료의 고온 분위기에서의 사용 기회가 증가하고 있으며, 효율 면에서도 이들의 사용 온도가 높아지는 추세이다. 이러한 고온에서 사용할 수 있는 내열강, 초내열합금의 개발과 함께 내열재료에 있어 고온강도, 특히 크리프 강도 특성에 관한 연구가 매우 중요한 실정이다. 이와 같은 내열재료는 고온에서 장시간 사용되므로 고온 파괴, 즉 크리프 손상에 의한 고장 및 파손으로 경제적 손실은 물론 인명 피해까지도 발생할 수 있다. 따라서 이러한 재료의 장시간 고온 크리프 특성을 단시간의 실험에 의해 파악하고 안전강도와 수명을 예측함으로써 사고 방지는 물론 인명 및 재산 손실 예방을 도모한다는 것은 고온 재료의 사용에 있어서 가장 중요한 요소이다(Kim et al., 2000; Kong et al., 2004).

초내열 재료에 대한 장시간 고온 크리프 특성의 연구뿐 아니라 수명, 강도 평가에 대한 연구는 시간적, 경제적 제약으로 미약한 실정이나, 크리프의 주요 인자(크리프 응력, 파단 수명, 정상 크리프 속도, 전 크리프 연신율, 초기연신율 등)와의 정량적인 상관관계를 규명하고 이를 정량화하여 파단 수명을 도출

하는 크리프 수명 예측 평가에 관한 연구가 수행되고 있다(Kim et al., 2001). 원자력 발전소용 밸브스템(Valve stem)은 일반적으로 내열 스테인레스강으로 가공이 되고 있으나, 고온 및 고압하에서 작동되기 때문에 수명상의 한계가 있다. 이를 초내열 합금으로 대체하게 될 경우 우수한 크리프 파단특성을 활용할 수 있으며, 또한 인장강도의 비약적인 향상을 기대할 수 있다. 그러나 니켈기 초내열합금은 일반 스테인레스강에 비해서 가격이 비싸서 실제로 생산되는 부품의 제품단가를 높인다는 문제점이 있다. 따라서 밸브스템의 구성부분 중 직접적으로 고온·고압의 가스에 노출되는 헤드부분만을 니켈기 초내열합금으로 사용하고, 스템을 포함한 여타 부분은 일반 스테인레스 강으로 대체한다면 초내열합금의 내구성을 가지면서 제조단가가 낮은 제품을 개발할 수 있다. 그러므로 이들을 접합할 수 있는 기술의 개발이 요구되고 있다(권상우 등, 2008). 이상의 기술 개발을 위해서는 무엇보다도 먼저 Alloy718의 모재에 대한 고온 인장 특성 및 크리프 파단 특성의 고찰이 필요 불가결하다.

이상과 같은 관점에서 본 연구에서는 먼저 Alloy718의 적용분야의 사용환경을 고려하여 550°C, 600°C, 650°C 및 700°C에 대한 고온 인장시험과 고온 크리프 파단시험을 수행하여 고온 인장특성과 각종 크리프 파단 특성치의 상관관계를 고찰하고, Larson-Miller parameter(LMP)법에 의한 크리프 수명 예측식을 도출하고자 하였다.

교신저자 김선진: 부산광역시 남구 용당동 산100

051-629-6163 sjkim@pknu.ac.kr

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 시험편 재료는 니켈기 초내열합금 Alloy718이며, 그 화학적 성분과 기계적 성질을 Table 1 및 Table 2에 각각 나타내었다. Table 3은 Alloy718의 열처리 조건을 나타낸다. 또한 고온 크리프 파단 시험에 사용된 시험편의 형상과 치수는 ASTM 규격에 준하여 시험편 평행부의 직경은 13mm의 환봉으로부터 6mm로 가공하였으며, 시험편 표면부위는 사포400번에서 1200번까지 연마한 후 다시 0.3에서 0.05 $\mu$ m의 산화분말을 사용한 표면을 경면 연마하여 표면 거칠기가 시험결과에 미치는 영향을 최소화 하도록 하였으며 시험편의 형상과 치수를 Fig. 1에 나타내었다.

### 2.2 실험장치 및 실험방법

정적(Static) 및 동적(Cyclic) 고온 크리프 시험이 가능한 크리프 시험 장치는 SATEC사(Model: DLF-10-1029)의 시험기를 사용하였다. 하중과 변형의 서보제어가 가능한 전기, 기계장치의 크리프 시험기이며, 고온 크리프, 응력/완화시험, 인장 및 압축 시험이 가능하다.

온도측정은 K형 열전대를 사용하였고, 시험편의 가열공정은 시험편에 부하를 주지 않은 무부하 상태에서 설정온도까지 약 10 $^{\circ}$ C/min로 가열하였다. 그리고 부하 전에 노의 온도분포가 균일하게 유지되도록 설정온도에서 30분간 지속시킨 후 하중을 작용시켜 실험 중 온도를 일정 온도에서  $\pm 1^{\circ}$ C범위 이내로 유지하면서 실험을 수행하였다. 또한 고온 크리프 시험 중 발생하는 연신은 표점거리 30mm되는 양단의 플랜지를 기준으로 하여 LVDT로 측정하여 시험기 자체에 연결되어있는 컴퓨터에 저장하여 고온 크리프 변형거동을 고찰하였다. 시험편 가열을 위한 전기로는 개폐식을 사용하였으며, Control console에 부착된 노의 온도를 제어하는 자동 온도 조절장치는 1200 $^{\circ}$ C까지 전 범위의  $\pm 0.25^{\circ}$ C의 정확도를 가지며, 노의 내부는  $\pm 1.5^{\circ}$ C, 노 전체 3구간 Top, Middle, Bottom zone의 온도 구배는 2 $^{\circ}$ C정도이다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 고온인장 특성

Fig. 2는 니켈기 초내열합금 Alloy718의 열처리된 모재를 상온(20 $^{\circ}$ C), 550, 600, 650 및 700 $^{\circ}$ C에서 고온인장시험을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 인장강도 시험의 결과를 보면, 550 $^{\circ}$ C이상의 인장강도와 항복강도의 결과치는 비슷한 경향으로 나타났으며, 특히 온도가 상승함에 따라 600 $^{\circ}$ C 이후에서는 인장강도가 급격하게 감소함을 알 수 있다. 이는 고온 크리프 파단시험에서도 온도의 영향이 크게 작용할 것으로 판단된다.

**Table 1** Chemical compositions of Alloy718 (wt. %)

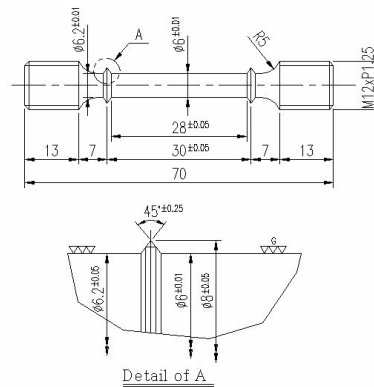
Al	Si	Mn	Cr	Ti	Fe	Mo	Ni
0.62	0.1	0.06	19.2	1.1	17.7	2.8	Bal.

**Table 2** Mechanical properties of Alloy718

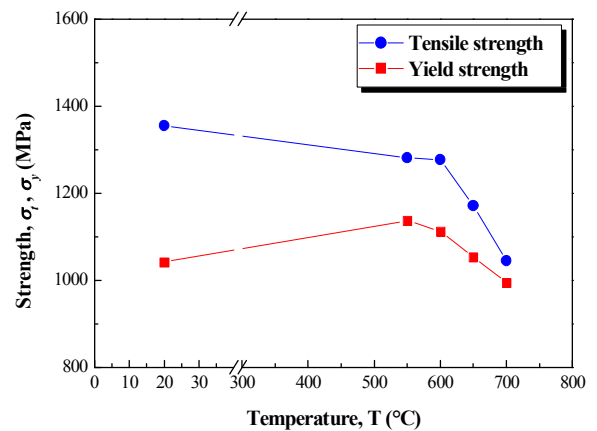
Temp. (°C)	Tensile strength $\sigma_t$ (MPa)	Yield strength $\sigma_y$ (MPa)	Elongation $\epsilon$ (%)	Reduction of area $\psi$ (%)
R. T	1355	1042	24	28
550	1281	1137	28.4	44
600	1277	1112	30.8	50
650	1171	1054	25.4	27
700	1045	994	24.9	22

**Table 3** Heat treatment conditions of Alloy718

Heat treatment	Temperature x Time	Cooling
Solution treatment	1000 $^{\circ}$ C x 2h	Water Q.
Aging treatment-1	718 $^{\circ}$ C x 8h	
Aging treatment-2	621 $^{\circ}$ C x 8h	Air Cooling



**Fig. 1** Shape and dimension of test specimen (unit: mm)



**Fig. 2** Tensile test results for Alloy718

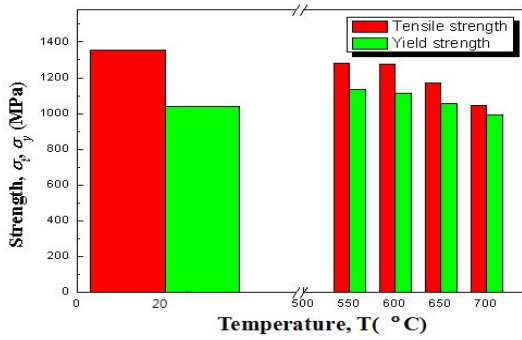


Fig. 3 Relation between strength and temperature

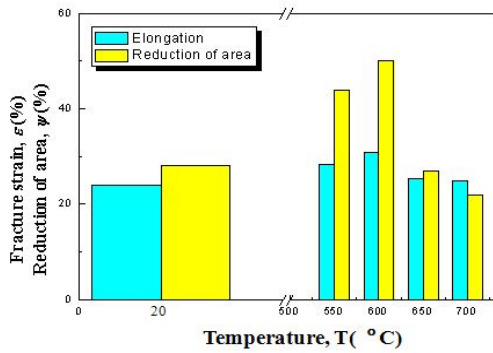


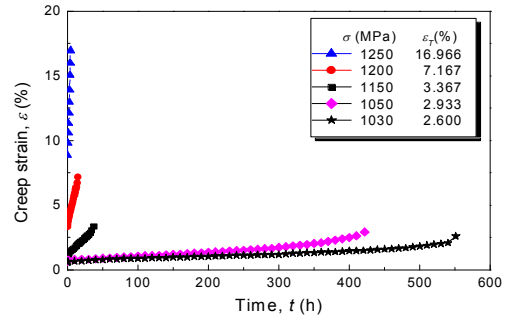
Fig. 4 Relation between ductility and temperature

Fig. 3 및 Fig. 4는 각각 강도와 연성에 대하여 비교 분석한 결과를 나타낸 것이다. 인장강도는 온도가 증가하면 감소하였다. 연신율은 상온보다 고온에서 다소 높은 값을 보였으나 그렇게 높지 않은 결과를 보였다. 단면수축율의 경우는 550과 600°C에서 비교적 높은 연성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

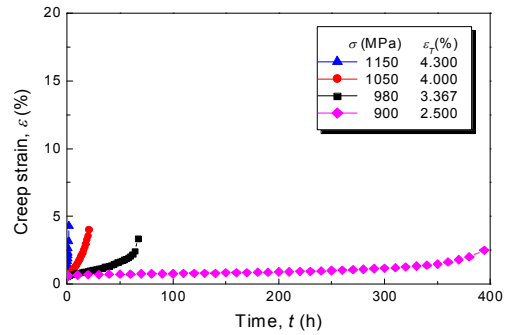
3.2 고온 크리프 파단 거동

일정온도 550°C, 600°C, 650°C 및 700°C에서 응력을 변화시켜 실험적으로 얻은 크리프 곡선을 Fig. 5(a), (b), (c), (d)에 각각 나타낸다. 그래프에서 응력이 증가함에 따라 파단수명은 감소하는 것을 알 수 있고, 특히 700°C의 고온에서는 비교적 낮은 응력에서 크리프 거동이 크게 나타나고 있다. 이는 활성화 에너지로 인한 고온에서의 열거동이 커져, 확산이 활발해 지는데 기인하며, 온도의 영향이 크게 작용함을 알 수 있다.

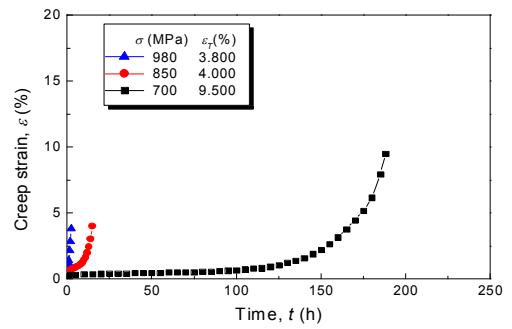
Fig. 6은 크리프 파단시간과 총 크리프 변형률과의 상관관계를 나타낸다. 그림에서 보듯이 파단시간과 총 크리프 변형률과의 상관관계를 Tsuchida et al.(2004)의 결과와 같이 일의적으로 결론 내리기는 무리가 있을 것으로 사료되지만, 본 실험의 범위에서는 저온 영역(550°C, 600°C)에서는 파단시간이 늘어날수록 총 크리프 변형률은 감소하는 경향을 나타내는 반면, 고온 영역(650°C, 700°C)에서는 파단시간이 늘어날수록 총 크리프 변형률은 증가하는 경향을 나타내고 있다.



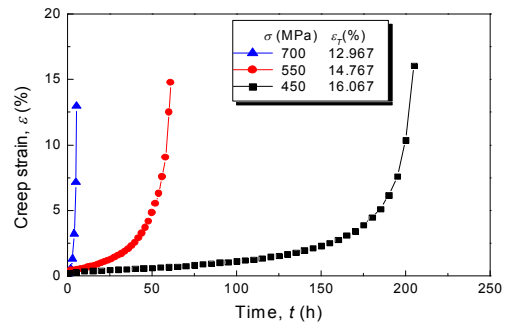
(a) 550°C



(b) 600°C



(c) 650°C



(d) 700°C

Fig. 5 Creep curves of Alloy718 at 550°C, 600°C, 650°C and 700°C

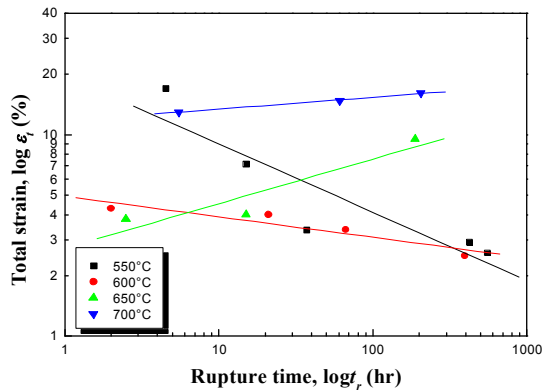


Fig. 6 Rupture time vs. total strain

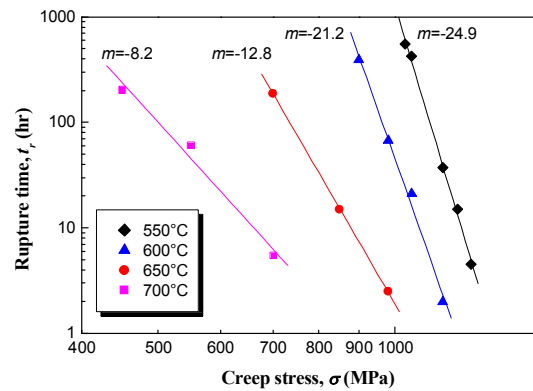


Fig. 7 Creep stress vs. creep life (rupture time)

### 3.3 크리프 응력과 파단시간과의 상관성

Fig. 7은 Alloy718 모재에 대한 크리프 응력( $\sigma$ , MPa)과 크리프 파단시간( $t_r$ , hr)과의 상관성을 나타내는 실험결과로 크리프 설계 곡선(Creep design curve)이라 한다. 그림에서 크리프 수명은 동일 온도에서 응력이 증가할수록 감소하며, 온도가 상승할수록 그 감소율이 더욱 커짐을 알 수 있다. 이는 온도 550, 600, 650, 700°C에서 응력이 결정되면 단시간 실험을 통하여 장시간의 크리프 수명을 예측할 수 있음을 추측할 수 있다. 그림에서 고온일수록 실제 크리프 수명이 훨씬 단축되는 것을 알 수 있다. 그러므로 단시간 실험으로 신뢰성 있는 장시간 수명예측이 가능하리라고 판단된다.

일반적으로 정상상태 크리프 속도 및 크리프 수명의 크리프 응력 의존성은 온도가 일정할 때 Norton(1910)에 의해 제안된 다음의 모델식이 자주 사용되고 있다.

$$\dot{\epsilon} = A \cdot \sigma^n \quad (1)$$

$$t_r = B \cdot \sigma^m \quad (2)$$

여기서 A와 B는 재료상수(Material constant),  $\sigma$ 는 작용응력(Applied stress),  $n$ 과  $m$ 은 응력지수(Stress exponent)이다.

크리프 파단시간에 대한 작용응력의 의존성이 있음을 알 수 있다. 이 결과로부터 얻은 실험적 상관관계식은 다음과 같다.

$$550^\circ\text{C}; \log t_r = 78.094 - 24.996 \log \sigma \quad (3)$$

$$600^\circ\text{C}; \log t_r = 65.334 - 21.226 \log \sigma \quad (4)$$

$$650^\circ\text{C}; \log t_r = 38.830 - 12.850 \log \sigma \quad (5)$$

$$700^\circ\text{C}; \log t_r = 24.265 - 8.249 \log \sigma \quad (6)$$

식(2)에 의한 크리프 응력지수( $m$ )는 550°C는 -24.9, 600°C는 -21.2, 650°C는 -12.8, 700°C는 -8.2의 값으로 나타났으며, 온도에 미치는 응력지수의 영향을 Fig. 8에 나타낸다.

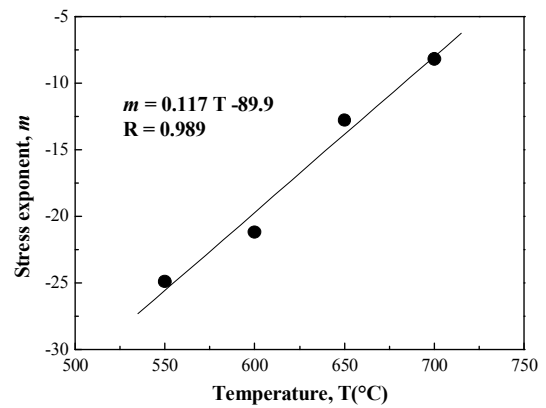


Fig. 8 Effect of stress exponent ( $m$ ) on temperature

### 3.4 크리프 초기연신을 거동

초기연신율은 시간 의존적인 크리프 변형과는 독립적인 변수이나 크리프 응력과 온도에는 매우 민감한 변수이다. Fig. 9는 크리프 응력(Stress)과 초기연신율(Initial strain)과의 관계를 나타낸 것이다. 이때 초기연신율은 크리프 하중을 부하한 후 1분이 경과되었을 때의 변형 값을 측정된 결과이다. 전체적으로 볼 때 온도에 따라 초기연신율 값은 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 이 결과로부터 다음과 같은 실험적 상관관계식을 얻을 수 있었다.

$$550^\circ\text{C}; \log \sigma = 3.035 + 0.073 \log \epsilon_0 \quad (7)$$

$$600^\circ\text{C}; \log \sigma = 3.043 + 0.259 \log \epsilon_0 \quad (8)$$

$$650^\circ\text{C}; \log \sigma = 3.173 + 0.633 \log \epsilon_0 \quad (9)$$

$$700^\circ\text{C}; \log \sigma = 3.129 + 0.694 \log \epsilon_0 \quad (10)$$

즉, 다음과 같이 모델링 할 수 있음을 알았다.

$$\sigma = K(\epsilon_0)^q \quad (11)$$

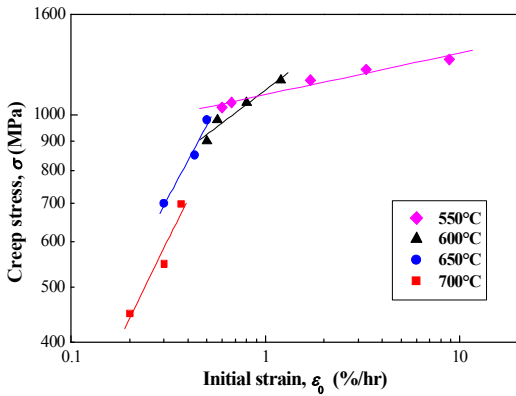


Fig. 9 Creep stress vs. initial strain (IS)

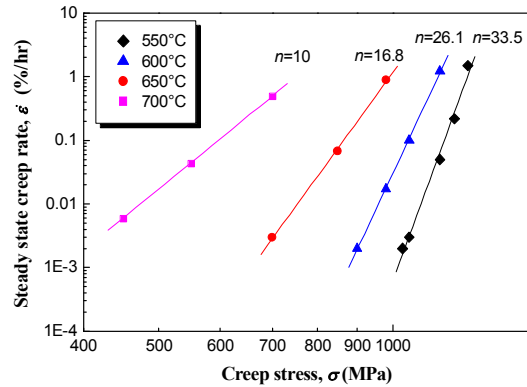


Fig. 11 Steady state creep rate vs. creep stress

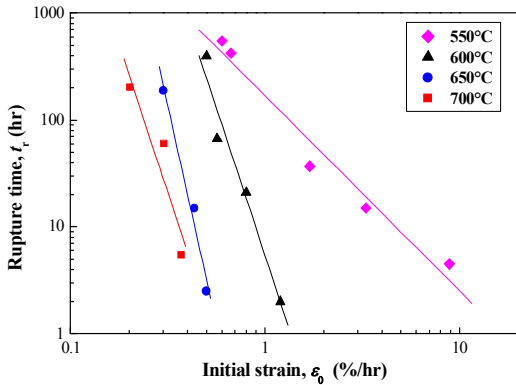


Fig. 10 Rupture time vs. initial strain (IS)

Fig. 10은 파단시간과 초기연신율의 관계를 나타낸 것이다. 700°C의 경우를 제외하고는 크리프 응력에 의해 나타난 결과와 비슷한 경향을 보였다. 이 결과로부터 얻은 실험적 상관관계식은 다음과 같다.

$$550^\circ\text{C}; \log t_r = 2.227 - 1.824 \log \epsilon_0 \quad (12)$$

$$600^\circ\text{C}; \log t_r = 0.731 - 5.525 \log \epsilon_0 \quad (13)$$

$$650^\circ\text{C}; \log t_r = -1.943 - 8.149 \log \epsilon_0 \quad (14)$$

$$700^\circ\text{C}; \log t_r = -1.443 - 5.532 \log \epsilon_0 \quad (15)$$

이 또한 다음과 같이 모델링 할 수 있음을 알 수 있다.

$$t_r = K' (\epsilon_0)^q \quad (16)$$

### 3.5 정상상태 크리프 속도와 크리프 응력과의 관계

Fig. 11은 정상상태 크리프 속도(Steady state creep rate)의 크리프 응력에 대한 의존성을 나타낸 결과이다. 크리프 응력이 증가함에 따라 정상상태 크리프 속도도 증가하는 것을 알 수 있다. 정상상태의 크리프 속도는 응력에 대해 의존함을 알 수

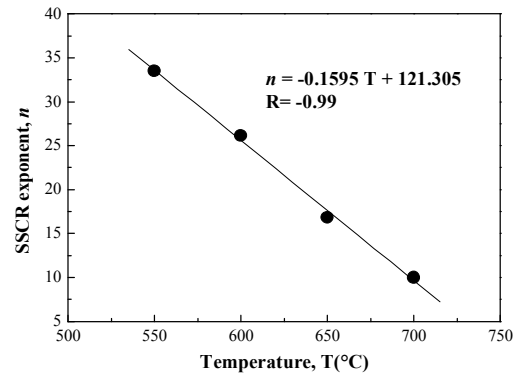


Fig. 12 Effect of SSCR exponent ( $n$ ) on temperature

있다. 실험결과에서 얻어진 크리프 응력지수(Stress exponent,  $n$ )는 550°C는 33.5, 600°C는 26.1, 650°C는 16.8이며, 700°C에서는 10의 값으로 나타났다. 이상의 결과에서 알 수 있듯이, 550°C에서는 응력지수의 값이 큰 값으로 나타났지만, 700°C에서는 거의 1/3이나 낮은 응력지수의 값으로 나타났다. 이는 온도 영향에 의한 미세 조직내의 고용강화 원소의 감소와 이로 인한 전위동의 활성화에 기인한 결과로 생각된다. 따라서 Monkman-Grant의 관계식이 사실에 부합된다고 가정하면, 낮은 정상상태 크리프 속도는 큰 파단시간을 나타낼 것으로 예측된다. 이상의 작용 응력에 따른 정상상태 크리프 속도로부터 얻은 실험관계식은 다음과 같다.

$$550^\circ\text{C}; \log \dot{\epsilon} = -103.717 + 33.500 \log \sigma \quad (17)$$

$$600^\circ\text{C}; \log \dot{\epsilon} = -79.874 + 26.116 \log \sigma \quad (18)$$

$$650^\circ\text{C}; \log \dot{\epsilon} = -50.453 + 16.839 \log \sigma \quad (19)$$

$$700^\circ\text{C}; \log \dot{\epsilon} = -28.790 + 10.012 \log \sigma \quad (20)$$

Fig. 12는 식(1)의 정상상태 크리프 속도에 대한 온도에 미치는 그 응력지수( $n$ )의 영향을 나타낸다. 응력지수는 온도의 증가에 따라 선형적으로 감소함을 알 수 있다.

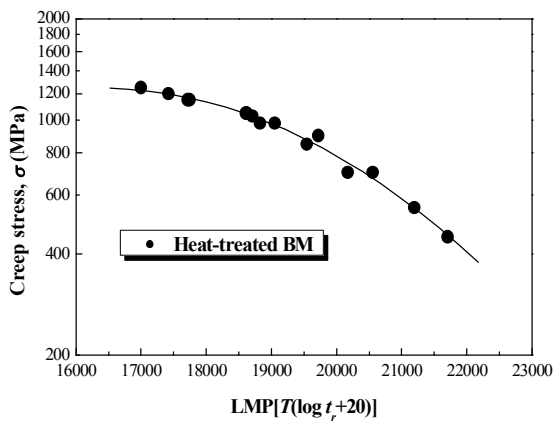


Fig. 13 Larson-Miller parameter plot for Alloy718

### 3.6 LMP에 의한 크리프 수명예측

크리프에 의한 재료의 파단은 장시간의 실험에 의해서 그 손상을 평가하여야 하지만 시간적 제약으로 단시간의 실험결과로 장시간의 손상을 예측하고자 하는 연구가 수행되어져 왔다(Kong et al., 2004). 금속의 조직 변화는 일반적으로 높은 온도에서는 짧은 시간 내에서 발생한다. 실제 요구되는 온도보다 높은 온도에서의 응력-파단시간을 조사하여 이 곡선의 기울기 변화가 없다면 단시간의 데이터로 외삽에 의해 장시간 수명예측이 가능하도록 LMP법(Larson and Miller, 1952)에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$LMP = T(\log t_r + C) \tag{21}$$

식(21)에서 T는 절대온도(K)이고, C는 20이며, 재료정수이다. 그러므로 LMP는 응력의 2차 함수로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$LMP = T(\log t_r + 20) = K_1 \sigma^2 + K_2 \sigma + K_3 \tag{22}$$

여기서 K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, K<sub>3</sub> 은 재료상수이다. 그러므로 Fig. 13에서 도출된 K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, K<sub>3</sub>의 값과 LMP식은 다음과 같다.

$$T(\log t_r + 20) = -0.00252\sigma^2 - 1.377\sigma + 22718 \tag{23}$$

식(23)에 의해 온도와 응력조건이 주어지면 Alloy718 모재의 수명예측이 가능하다.

## 4. 결 론

니켈기 초내열합금 Alloy718의 열처리 모재에 대하여 550°C, 600°C, 650°C 및 700°C에 대한 고온 인장시험과 고온 크리프 파단시험을 수행하여 인장특성과 크리프 파단 특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 크리프 응력과 파단시간 등의 크리프 특성이 초기연신을

과 정량적 상관관계가 성립하였고, 이는 초기연신율에 의한 수명예측 가능성이 있음을 알 수 있었다.

(2) 정상상태 크리프 속도는 크리프 응력에 대한 의존성이 있음을 확인할 수 있었고, 크리프 응력지수(n)는 550°C는 33.5, 600°C는 26.1, 650°C는 16.8이며, 700°C에서는 10의 값으로 나타났다.

(3) 파단시간에 의한 응력지수(m)는 550°C는 -24.9, 600°C는 -21.2, 650°C는 -12.8, 700°C는 -8.2의 값으로 나타났다. 이는 정상상태의 크리프 속도에 의해 도출된 응력지수의 결과와 비슷한 거동을 보였다.

(4) LMP법에 의한 수명예측식은 다음과 같이 도출되었다.

$$T(\log t_r + 20) = -0.00252\sigma^2 - 1.377\sigma + 22718$$

## 후 기

본 논문은 2008년 제주도에서 개최된 한국해양과학기술협의회 공동학술대회에 발표된 논문을 근간으로 하고 있음을 밝힙니다.

## 참 고 문 헌

권상우, 공유식, 김선진 (2008). "Alloy718 마찰접합조건의 최적화와 비파괴평가", 한국해양공학회지, 제22권, 제1호 pp 53-57.

Kim, I.S., Trevor, B., Yeom, J.T. and Park, N.K. (2000). "Characterization of Deformation Behavior for Waspaloy under Creep-Fatigue Interaction", Int. J. of Metals and Materials, Vol 6, No 5, pp 407-413.

Kim, W.G., Kim, S.H. and Ryu, W.S. (2001). "Creep Characterization of Type 316LN and HT-9 Stainless Steels by the K-R Creep Damage Model", KSME Int. J., Vol 15, No 11, pp 1463-1471.

Kong, Y.S., Yoon, H.K., Park, Y.H. and Kim, S.J. (2004). "Creep Life Prediction of High Temperature Tube Materials for Power Plants", Key Engineering Materials, Vol 261-263, pp 1115-1122.

Larson, F.R. and Miller, J.J. (1952). "A Time Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses", Trans ASME, Vol 174, pp 765-781.

Norton, F.H. (1910). "The Creep of Steel at High Temperatures", McGraw Hill, New York, 67 p.

Tsuchida, Y., Inoue, T. and Suzuki, T.(2004). "Creep Rupture Strength of V-modified 2 1/4Cr-1Mo Steel", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol 81, pp 191-197.

2008년 11월 21일 원고 접수

2008년 12월 15일 최종 수정본 채택