

## 인코넬 690 합금의 크리프거동

황경총\*, 윤종호<sup>+</sup>, 최재하<sup>++</sup>, 김성청<sup>++</sup>  
(논문접수일 2002. 2. 16, 심사완료일 2002. 6. 15)

### Creep Behaviours of Inconel 690 Alloy

Kyung-Choong Hwang\*, Jong-Ho Yoon<sup>+</sup>, Jae-Ha Choi<sup>++</sup>, Sung-Cheong Kim<sup>++</sup>

#### Abstract

Inconel 690 alloy has widely been used in power plant and high temperature facilities because it has high thermal resistance and toughness. But, we have little design data about the creep behaviors of the alloy. Therefore, in this study, an apparatus has been designed and built for conducting creep tests under constant load conditions. A series of creep tests on Inconel 690 alloy have been performed to get the basic design data and life prediction of inconel products and we have gotten the following results. First, the stress exponents decrease as the test temperatures increase. Secondly, the creep activation energy gradually decreases as the stresses become bigger. Thirdly, the constant of Larson-Miller parameters on this alloy is estimated about 10. And last, the fractographs at the creep rupture show both the ductile and the brittle fracture according to the creep conditions.

**Key Words :** Inconel(인코넬), Creep Rate(크리프 속도), Rupture Strain(파단변형율), Creep Rupture(크리프 파단), SEM(주사형 전자현미경), Life Prediction (수명예측), Activation Energy(활성화에너지)

## 1. 서론

인코넬 690 합금은 고용체로 오스테나이트계의 합금으로 단상의 미세 조직을 갖고, 소량의 TiC, TiN, Ti(CN) 등의 Ti계 석출물과 탄화물  $M_{23}C_6$ 이 존재하는 합금이다.

이 합금은 니켈(Ni), 크롬(Cr) 및 철(Fe)이 주성분이다. 성형성이 좋고, 내부식성 및 고온에서의 기계적 특성이 우수하여 화학용기, 원자력발전소 등의 열처리장치, 항공기엔진, 병기 및 구조물 등의 내열부품들에 널리 사용되고 있다. 인코넬합금에 대한 국내의 연구는 홍<sup>(1)</sup>은 국산 원자력 발

\* 주저자, (주)은일 기술연구소 (kchwang@lycos.co.kr)

주소: 702-763 대구시 북구 복현2동 320-1 복현목련A 2동 304호, Tel: 053-591-8488

+ 경일대학교 공과대학 기계공학부

++ 충북대학교 공과대학

전기의 개발과 관련하여 그 화학적 특성치 들 및 기계적인 특성치 들을 발표한 바 있다. 최<sup>(2)</sup>는 인코넬 718의 사이클 크리프 특성을, 김<sup>(3)</sup>은 인코넬의 마찰용접 특성을, 그리고 황<sup>(4)</sup>은 인코넬 690 합금의 절삭특성에 대한 연구를 수행 한 바 있다. 그 외에 크리프에 대한 연구로는 임<sup>(5)</sup>은 STS 316의 크리프 특성을 발표하였다. 외국의 연구동향을 살펴보면 Venkatesh 및 Rack<sup>(6)</sup>이 인코넬 690 합금의 크리프 변형에 대한 미세 조직의 안정성이 갖는 영향을 발표하였으며, Cuddy<sup>(7)</sup>는 크리프 중에 유발되는 내부 응력 및 구조에 대한 연구를 수행하였다. 그 외에도 Morris<sup>(8)</sup>는 스테인리스강의 크리프를, Bradley<sup>(9)</sup>는 실온에서 순수한 알루미늄의 피로 크리프특성을, Maiya 등<sup>(10)</sup>은 스테인리스강의 고온-저사이클 피로거동특성에 대한 연구 등이 발표된 바 있으나, 아직까지 인코넬 690 합금의 온도 및 부하에 따른 크리프 특성 및 수명예측에 대한 연구는 이루어지지 않았다.

따라서 본 연구에서는 인코넬 690 합금을 대상으로 하여 네 가지의 온도조건들에 대하여 각각 다섯 단계의 하중을 가하여 고온 크리프시험을 행하였다. 궁극적으로는 인코넬 합금들이 많이 활용되는 발전설비 및 고온 설비들의 장기적인 안전성에 크리프 현상이 직접적으로 영향이 미치므로 본 연구의 자료를 활용한 해당 부품들의 잔여 수명을 예측할 수 있는 방법을 찾고, 이에 적절한 운전조건을 설정함으로써 기기의 수명을 연장시키고, 예상되는 사고를 미연에 방지하고자 한다.

## 2. 크리프이론

### 2.1 크리프 강도 및 이론

산업설비 부품 중에 고온고압의 상태 하에서 사용되는 것이 많다. 더욱이 성능의 극대화를 위해 사용조건은 점차적으로 악 조건화되어 가고 있는 실정이므로 고온 내열재료의 개발 및 그들의 특성 파악 등은 매우 의미가 있다. 허용 응력을 규정하는 크리프강도는 크리프 파단시험을 통하여 얻어지고, 이들을 이용한 기계부품들의 수명예측이 가능하다.

크리프시험에서는 시험편에 일정한 하중을 유지시킨 후 파단에 소요되는 파단시간(rupture time)과 파단 변형률(rupture strain)을 관찰한다. 최저 크리프 변형속도를 측정하여 재료의 유효수명 및 사용조건에 맞는 허용 하중을 알아낼 수 있다. 일정한 하중을 가하고 시험하는 경우는 시험도중 시험편의 단면적 감소에 따라 응력이 계속 증가하게 된다. 크리프 변형속도는 응력에 크게 의존하므로 일정한 응

력 하에서 시간에 따른 변형을 측정하여 온도와 응력의 불변 조건하에서 정상 크리프 변형속도(steady state creep rate)를 측정할 수 있다. 정상적인 크리프곡선에서 변형초기에는 시간변화에 대한 크리프속도가 낮다가 어느 정도 시간이 경과된 후에는 변형속도가 일정해진다. 그 후 계속하여 변형이 진행되면 변형속도가 점진적으로 빨라지는 구간에도달되며, 결국은 파단 된다<sup>(11-13)</sup>.

## 3. 실험 및 연구방법

### 3.1 시험편 및 실험방법

고온 크리프시험에 사용된 인코넬 690 합금은 니켈, 크롬 및 철이 이 합금의 주 성분을 이루고 있으며, 소량의 Al, C, O, N 및 S가 Table 1과 같이 포함되어 있다. 그 외에도 극히 미량인 Ti, Si 및 Mn이 각각 71, 61 및 47ppm 단위로 함유된 인성이 큰 합금이다.

크리프시험편 제작은 ASTM 규격에 따라 와이어 방전가공기를 사용하여 제7호 시험편을 가공하였다. 시험편의 치수는 Fig. 1에 나타내었으며, 기계적 성질은 Table 2와 같다. 시험편의 소재에 대한 풀림 온도는 1,000℃로 1시간 정도 유지한 후에 노냉하였다.

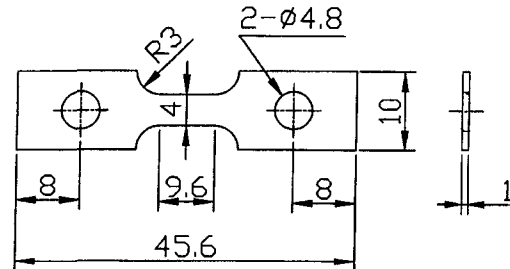


Fig. 1 Dimensions of tensile creep specimen (unit ; mm)

Table 1 Chemical composition of Inconel 690 Alloy (wt. %)

Ni	Cr	Fe	Al	C	O	N	S
62.6	30.8	1.05	0.06	0.01	0.0055	0.0037	0.001

Table 2 Mechanical properties of Inconel 690 Alloy

Yield Strength (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Percent Elongation
1109	1198	6.3

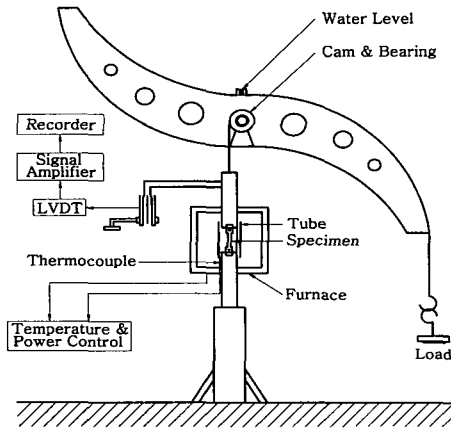


Fig. 2 Schematic diagram of static creep tester with constant load

### 3.2 크리프시험 장치

시험장치는 Andrade와 F. Garofalo 등이<sup>(14,15)</sup> 고안한 레버-빔 형을 설계 및 제작하여 이용하였다. 시험장치에 부착된 가열로는 타원형의 적외선 노이며 시편은 가열로의 석영관 내에 장치할 수 있도록 되어있다. 실험할 때 노내에 일정한 시험온도가 유지되도록 시편의 온도변화가  $\pm 1^\circ\text{C}$  이하로 조절되도록 하는 제어장치를 노에 연결하였다. 그리고 시편의 크리프변형량을 측정할 수 있도록 LVDT를 장착하였다. 시험장치의 개략도는 Fig. 2에 도시하였다.

### 3.3 노내의 온도유지 및 시편의 변형량 측정

일정한 시험 온도를 유지하기 위하여 적외선복사로를 사용하였다. 온도조절기는 공정 제어기와 위상 전력 제어기를 노에 연결하여 사용했고, 노내 시편의 온도변화가  $\pm 1^\circ\text{C}$  이내가 되도록 하였다.

크리프 시편의 변형량은 LVDT로 측정하였으며, 신호조절장치로 증폭시킨 후에 데이터 레코더에 저장했다.  $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 까지 측정 가능하도록 하였다.

### 3.4 시험 및 실험방법

Fig. 2에 보인 크리프 시편의 양단은 볼트로 고정시키고, 열전대를 시편중앙에 위치시켰다. 또한 석면을 이용하여 열이 밖으로 새지 않도록 하였다.

크리프시험 설정조건은 시험편에 미치는 영향을 알아보

기 위하여  $605^\circ\text{C}$ 로부터  $15^\circ\text{C}$ 의 온도간격으로 상승시켜  $620, 635$  및  $650^\circ\text{C}$ 의 4가지의 온도조건을 설정하였으며, 응력은  $180, 190, 200, 210$  및  $220\text{MPa}$ 의 5가지 조건을 설정하여 전체적으로 20가지의 조건하에서 시험을 실시하였다.

크리프시험조건은 Table 3에 나타내었다. 크리프 시험 후 주사형 전자현미경(SEM)으로 파단면을 관찰하여 파괴의 양상을 분석한다. 기계적인 특성은 시험 후에 길이방향으로 시편을 채취하여 마운팅한 다음 # 120 ~ # 1200번 등의 탄화규소(SiC) 연마지로 연마 후에 알루미늄 파우더로 재연마하여 매끈한 표면을 만들었다. 최종적으로 표면을 염산(90ml), 황산(5ml) 및 질산(3ml)을 혼합한 시약으로 부식시켜, 광학현미경 조직사진을 관찰한다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 크리프 곡선

본 연구에서 크리프시험 조건인 온도범위  $605 \sim 650^\circ\text{C}$ 의 구간과 응력범위  $180, 190, 200, 210$  및  $220\text{MPa}$ 의 구간에서 온도와 하중을 변화시키며, 시험한 결과 Fig. 3의 크리프곡선을 얻었다.

크리프곡선은 시험에서 얻어진 시간-변위 값으로부터 시간변화에 대한 진 변형률(pure strain)을 계산하여 그린 것이다.  $\epsilon_0$ 이 초기 변형률이라 하면, 전체 변형률,  $\epsilon$ 은 다음 식으로 정의된다.

$$\epsilon = \ln(e + 1) = \ln\left(\frac{l_0 + \Delta l}{l_0}\right) \quad (1)$$

여기서,  $e$  : 공칭 변형률,  $l_0$  : 초기 길이

$\Delta l$  : 변형길이

그리고, 각각의 시간  $t$ 에 대한 변형률  $\epsilon_t$ 를 이용하여 정상상태의 크리프 속도  $\dot{\epsilon}_s$ 는 다음 식으로 정의된다.

$$\dot{\epsilon}_s = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

여기서,  $\dot{\epsilon}_s$  : 정상상태의 크리프속도

$\epsilon_1, \epsilon_2$  :  $t_1, t_2$ 에서 변형률

$t_1, t_2$  : 각각의 크리프시간

이상과 같이 정상 상태에서 크리프속도를 구하였으며, 파

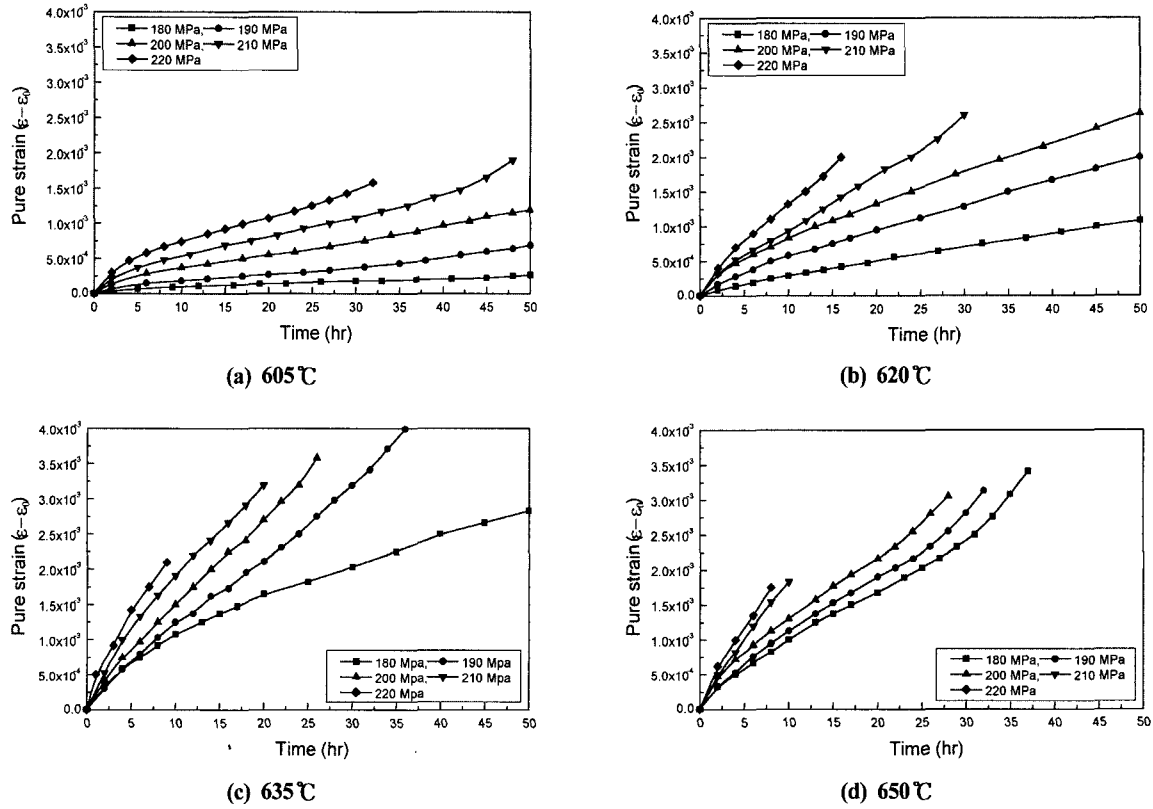


Fig. 3 Creep strain curves as time functions

단 시간과 함께 크리프시험 데이터는 Table 3에 나타내었다.

Fig. 3의 크리프 변형률 곡선은 Table 3을 기초로하여 그린 것이다. (a)는 605°C에서의 크리프 곡선으로 초기 단계가 짧게 나타났으며, 정상 크리프 구간이 계속되는 현상을 보여준다. 180~200MPa에서는 시편의 파단이 일어나지 않았고, 일주일(168시간) 이상동안 계속해서 늘어나는 양상을 보여주고 있으며, 210MPa 및 220MPa에서는 파단이 각각 48시간, 32시간만에 일어났다. (b)는 온도 620°C에서는 전 구간에서 I 단계, II 단계 및 III 단계가 구분 가능한 일반적인 크리프 곡선형태를 보여주었다. 180MPa에서는 크리프 시편이 일주일 이상의 크리프에도 절단되지 않고 계속 늘어나는 양상을 보이고 있다. 180, 190, 200, 210 및 220MPa의 응력조건하에서 각각 시험편의 파단시간은 각각 123, 84, 74, 30 및 15시간만에 일어났음을 보여준다. (c)는 온도 635°C에서 크리프저항성과 파단 변형률 모두 실험조건 증가가 큰 값을 보이고 있다. 180, 190, 200, 210 및 220MPa에서 각 시험편 들의 파단에 소요된 시간은 109, 36, 26, 24

및 9시간만에 나타났다. 605°C 하의 일부 조건들에서는 Table 3에서 볼 수 있듯이 일주일 이상의 실험에서 파단이 일어나지 않았다. (d)는 온도 650°C에서는 하중의 증가에 따라 크리프저항성이 감소하였고 파단 변형률도 감소하였으며, 180, 190, 200, 210 및 220MPa에서 각 시험편의 파단 시간은 37, 32, 28, 10 및 8시간만에 나타났다.

#### 4.2 크리프변형과 응력의존성

크리프 변형률속도의 응력 의존성은 Cuddy 와 Garofulo 가 제안한 정상 변형률( $\dot{\epsilon}_s$ )에 대한 다음 식으로 표시된다<sup>(7,15)</sup>.

$$\dot{\epsilon}_s = K \sigma^n \quad (3)$$

여기서,  $K$  는 구조상수,  $\sigma$  는 응력(MPa),  
 $n$  은 응력지수

따라서 식 (3)의 양변에 로그를 취하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

Table 3 Experimental static creep data of Inconel 690 alloy

Temp. (°C)	Stress (MPa)	Creep rate, (hr <sup>-1</sup> )	Rupture time, (hr)
605	180	7.12 x 10 <sup>-6</sup>	over 168
	190	9.13 x 10 <sup>-6</sup>	over 168
	200	1.81 x 10 <sup>-5</sup>	over 168
	210	2.93 x 10 <sup>-5</sup>	48
	220	3.78 x 10 <sup>-5</sup>	32
620	180	2.03 x 10 <sup>-5</sup>	123
	190	3.54 x 10 <sup>-5</sup>	84
	200	4.78 x 10 <sup>-5</sup>	74
	210	8.28 x 10 <sup>-5</sup>	30
	220	9.96 x 10 <sup>-5</sup>	15
635	180	3.86 x 10 <sup>-5</sup>	109
	190	5.80 x 10 <sup>-5</sup>	36
	200	8.95 x 10 <sup>-5</sup>	26
	210	1.34 x 10 <sup>-4</sup>	24
	220	1.80 x 10 <sup>-4</sup>	9
650	180	6.69 x 10 <sup>-5</sup>	37
	190	9.73 x 10 <sup>-5</sup>	32
	200	1.23 x 10 <sup>-4</sup>	28
	210	1.73 x 10 <sup>-4</sup>	10
	220	2.60 x 10 <sup>-4</sup>	8

$$\log \dot{\epsilon}_s = \log K + n \log \sigma \quad (4)$$

식 (4)에 따라  $\dot{\epsilon}_s$ 와  $\sigma$ 의 관계를 그림으로 나타낸 것이 Fig. 4이다.  $\dot{\epsilon}_s$ 와  $\sigma$ 의 관계는 선형적으로 나타났으며, 이 직선의 기울기가 응력 지수값( $n$ )이 된다.

Fig. 4에 나타난 것과 같이 크리프시험 온도가 605°C에서 650°C로 15°C씩 증가함에 따라 응력지수 값은 각각 9.785, 8.755, 8.505 및 7.15의 순서로 점점 작아지는 경향을 보여준다. 이와 같은 경향은 온도가 높아질수록 전위밀도가 감소하고 이에 따라 응력 감소효과가 높아지기 때문으로 사료된다. 이것은 또한 Morris<sup>(8)</sup>가 전위링크의 감소원인과 응력지수값을 연관시켜 설명한 것과 부합한다고 볼 수 있다.

### 4.3 크리프변형에 대한 활성화 에너지

크리프변형은 열적 활성화과정에 의해 진행되므로 크리

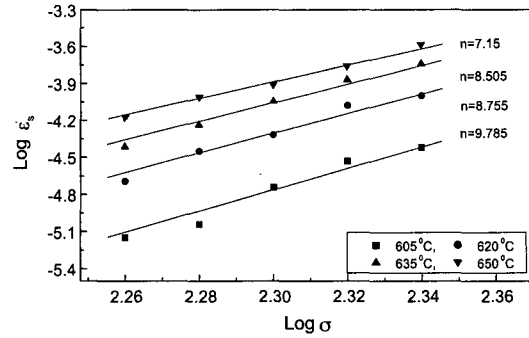


Fig. 4 Dependence of creep rate on the applied stresses

프변형속도는 아래와 같이 Arrhenius 방정식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\dot{\epsilon}_s = K \cdot \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right) \quad (5)$$

여기서,  $Q_c$  : 크리프활성화 에너지(kcal/mol),

$K$  : 응력, 조직, 온도 등에 따른 구조상수,

$R$  : 기체상수(8.314 J/(mol · K) 또는 1.987 cal/(mol · K),

$T$  : 절대온도(K)

식 (5)의 양변에 로그를 취하면 다음과 같이 된다.

$$\ln \dot{\epsilon}_s = \ln K - \frac{Q_c}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (6a)$$

$$\text{즉, } \log \dot{\epsilon}_s = \log K - \frac{Q_c}{2.303RT} \quad (6b)$$

이 식으로부터  $Q_c$  값은  $\ln \dot{\epsilon}_s$ 와  $1/T$ 와의 기울기[- $Q_c/(2.303R)$ ]로부터 구할 수 있으므로 Fig. 5에서 직선의 기울기를 계산하면 크리프 활성화에너지  $Q_c$ 를 계산할 수 있다. 가해진 응력 180, 190, 200, 210 및 220 MPa에 대해 각기 계산된 기울기들은 -15,955, -16,490, -13,845, -12,615 및 -13,855가 된다. 따라서 활성화에너지를 계산하면 73.2, 75.46, 63.4, 57.61 및 63.4kcal/mol로 된다.

크리프변형의 활성화에너지는 응력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 볼 수 있는데, 이와 같은 현상은 Bradley 등이 주장한 크리프 활성화에너지와 유효 응력관계에서도 확인할 수 있다<sup>(9)</sup>.

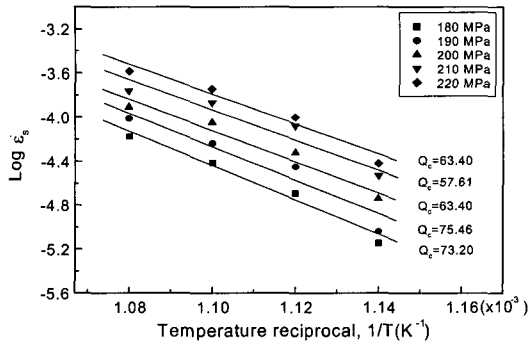


Fig. 5 Dependence of creep rate on temperature

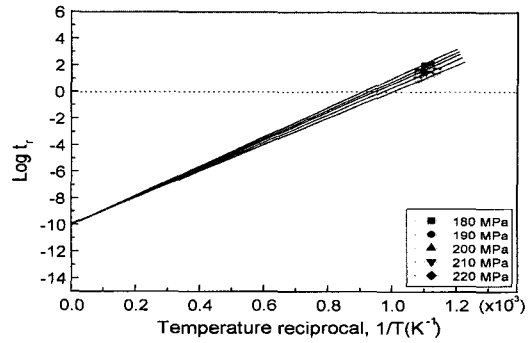


Fig. 6 Determination of constant at Larson-Miller parameters from relation plots between  $\log(t_r)$  and  $(1/T)$  according to the stresses

#### 4.4 크리프 잔존수명 예측

크리프시험 데이터 Table 3에서 재료의 파괴시간을 비교해보면 외부응력 증가에 따라 파괴수명은 급격히 감소하고 있다. 또한 같은 응력에서 온도증가에 따라 파단 수명은 급격히 감소한다. 어느 온도영역에서의 파단 수명을 알고 있으면 다른 온도영역에서의 파단수명을 예측할 수 있다. 이때 이용되는 수명예측 방법으로는 Larson-Miller 변수, Manson-Haferd 변수 및 Dorn-Sherby 변수 등이<sup>(16)</sup> 활용되고 있다.

본 연구에서는 이 중에서 비교적 간편하면서도 여러 합금에 폭넓게 적용되는 Larson-Miller변수로 사용하였는데, 이 변수  $P$  는 다음과 같이 표시된다.

$$P = f(\sigma) = T (\log t_r + C) \quad (9a)$$

$$\log t_r = \frac{P}{T} - C \quad (9b)$$

여기서,  $T$  : 켈빈 온도(K),  $\sigma$  : 응력(MPa),  
 $t_r$  : 파단 시간(hr),  $C$  : 상수

Table 3의 데이터를 이용하여 각각의 응력별로  $\log(t_r)$  과 절대온도의 역수( $1/T$ ) 간의 상관관계 그래프를 Fig. 6에 나타내었다. 응력별로 직선식의 계산을 위해 최소 자승오차 회귀직선 식을 구하면 각 응력별 기울기는  $P$ 의 값이 되고, 상수  $C$ 는 10정도로 확인되었다. 따라서 Larson-Miller 변수는 다음 식으로 표현된다.

$$P = T (\log t_r + 10) \quad (10)$$

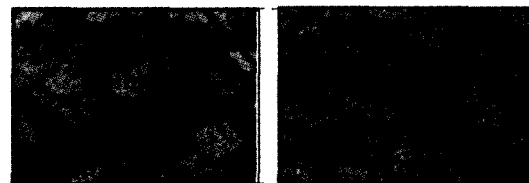
이 식으로부터 온도와 응력 조건들이 주어지면 인코넬 690의 수명( $t_r$ )이 계산될 수 있다.

#### 4.5 광학 및 주사현미경 고찰

인코넬 시험편을 1,000℃에서 1시간 동안 유지시킨 후 노냉으로 풀림한 후에 부식시켜 촬영한 조직사진들은 Fig. 7에 나타내었다. 그림(a)는 크리프 시험전의 사진이고, 그림(b)는 크리프 시험 후(620℃, 190MPa)의 파단 측면부의 조직사진이다.

파단면의 미세 조직관찰은 주사형 전자현미경으로 관찰하였으며, 20가지의 실험조건들 중에서 대표적인 4가지 조건들에서 얻은 파단면의 사진들을 Fig. 8에 나타내었다.

이 사진들 중 (a) 및 (b)의 조건들에서는 입계 파단에 의한 연성파괴 현상이 관찰되었다. 그리고 (c) 및 (d)의 조건들에서는 입내 파단에 의한 취성파괴 현상이 나타났다. 이 경우에는 각진 형의 기공들이 주로 발달하였으며, 이것은 높은 온도와 응력의 영향으로 볼 수 있다. 이러한 내용은 Skelton<sup>(17)</sup>이 주장한 공격자점(vacancy) 주위의 응력 집중



(a) After annealing (b) 650 °C, 180MPa

Fig. 7 Optical micrographs of static creep rupture

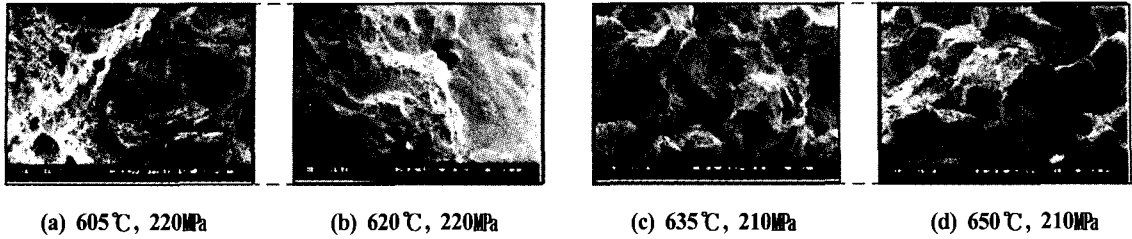


Fig. 8 SEM fractographs of static creep rupture after creep test under the various stresses

이론에서도 설명된 바 있다. 한편 Maiya<sup>(10)</sup> 등은 인코넬 690 합금강에서 입계 석출물은 입계 활주의 저항성을 증가시킨다고 보고한 바 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 오스테나이트계인 인코넬 690 합금강에 대한 크리프시험과 그 시편들의 파단면을 관찰하였다. 크리프 파괴현상을 분석함으로써 이 분야에 대한 기초 설계자료를 구축하여 제품 설계 및 수명예측에 응용하고자 하였다. 본 연구의 결과들을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 시험온도중 가장 낮은 온도인 605°C의 크리프 곡선에서는 초기 영역이 짧게 나타났으며, 정상 크리프 영역이 계속 진행되어 크리프 저항성이 우수하게 나타났다.
- (2) 크리프 시험온도가 605, 620, 635 및 650°C로 증가함에 따라 크리프 변형에 따른 응력의 먹지수는 점진적으로 감소하여 크리프 변형이 응력에 따라 다르게 나타났다.
- (3) 크리프 변형의 활성화에너지는 가해진 응력들 180, 190, 200, 210 및 220MPa 중에서 그 값들이 커짐에 따라 점진적으로 감소하였다.
- (4) 인코넬 690합금은 본 연구의 조건들에서 Larson-Miller변수의 계산식에 있는 상수 C값이 약 10으로 계산되었다. 따라서, 응력에 따라 P의 값은 일정하므로 사용 온도가 주어지면 그 수명을 계산할 수 있다.
- (5) 일부의 온도 및 압력조건들에서는 입계 파괴에 의한 연성파괴 현상이 나타났으며, 또 다른 온도 및 압력조건들에서는 입내 파괴에 의한 취성파괴 현상이 관찰되었다.

## 참고 문헌

- (1) 홍순영, 김희영, 류석현, 심무경, 윤종문, 인코넬 합금의 기계적 특성 평가(인코넬 합금개발), 한국원자력연구소, KAERI/CM-081, 1994.
- (2) 최인식, "0.6  $T_m$  온도영역에서의 인코넬 718에 대한 사이클 크리프 특성에 관한 연구," 한국과학기술원 석사논문, 1979.
- (3) 김의환, 민택기, "합금과 스테인레스 강의 마찰용접 특성 연구," 한국공작기계학회 논문집, 제10권, 제2호, pp. 73~78, 2001.
- (4) 황경충, 윤종호, 최재하, 김성청, "인코넬 690 합금의 질삭성에 관한 연구," 한국공작기계학회 논문집, 제11권, 제2호, pp. 87~94, 2002.
- (5) 임지우, 임병수, "STS 316의 시효 처리와 크리프 거동 측정," 한국공작기계학회지, 제8권, 제4호, pp. 123~129, 1999.
- (6) V. Venkatesh and H. J. Rack, "Influence of Microstructural Instabilities on Elevated Temperature Creep Deformation of Inconel 690," Materials Science and Technology, Vol. 15, pp. 408~412, April 1999.
- (7) L. J. Cuddy, "Internal Stresses and Structures Developed During Creep," Met. Trans., Vol. 1, pp. 395~401, 1970.
- (8) D. G. Morris, "Creep in Type 316 Stainless Steel," Acta Met., Vol. 26, pp. 1143-1151, 1978.
- (9) W. L. Bradley, S. W. Nam and D. K. Matlock, "Fatigue Perturbed Creep of Pure Aluminum at Ambient Temperatures," Met. Trans., Vol. 7A, pp. 425~430, 1976.
- (10) P. S. Maiya and S. Majumdar, "Elevated-Temperature Low-Cycle Fatigue Behaviour of Different Heats of

- Type 304 Stainless Steel," *Met. Trans.*, Vol. 8A, pp. 1651~1660, 1977.
- (11) F. Garofalo, *Fundamentals of Creep and Creep-Rupture in Metals*, The Macmillian Company, New York, p. 258, 1965.
- (12) R. Byrnes, Jr. and R. C. Anderson, "Heat Treating in Vacuum Furnaces and Auxiliary Equipment," *Metals Handbook*, 9th Ed., Vol. 4, pp. 307~324, 1985.
- (13) J. H. Dorn, "The Mechanical Behaviour of Materials at Elevated Temperature," McGraw-Hill, New York, pp. 432~443, 1961.
- (14) E. N. da C. Andrade, "On the Viscous Flow in Metals and Allied Phenomena," *Proc. Roy. Soc., Series A*, London, UK, Vol. 84, pp. 1~12, 1910.
- (15) F. Garofalo, O. Richmond and W. F. Domis, "Design of Apparatus for Constant Stress or Constant Load Creep Tests," *Trans. of ASME, Series D, J. of Basic Engineering*, Vol. 84, pp. 287~293, June 1962.
- (16) S. S. Manson and A. M. Haferd, "A Linear Time-Temperature Relation for Extrapolation of Creep and Stress Rupture Data," NASA-TN-2890, National Aeronautics and Space Administration, Mar. 1953.
- (17) R. P. Skelton, "The Growth of Grain Boundary Cavities during High Temperature Fatigue," *Phil. Mag.*, Vol. 14, pp. 563~572, 1966.