

온도 변동하의 Al7075
합금의 크리이프 및 파단수명
Creep and Rupture Life of Al7075 alloy under
step-wise temperature cycling

김창건 * 강대민 ** 구 암 *** 박경동 **** 배남주 *****
Chang gun kim Dae Min Kang Yang Koo Kueng Dong Park Nam Ju Baek

ABSTRACT

Cyclic temperature creep tests were carried out on Al 7075 alloy specimens were subjected to a constant load and step-wise temperature cycles in which temperature was fluctuated between 300°C and 250°C with three different cycle ratios.

The highest frequency of cycling was 1 cycle per 10 hr and the lowest one was 1 cycle per 12 hr.

From the creep experimental results with the above conditions the creep strain under cyclic temperature can be predicted easily by introducing the equivalent steady temperature T_e as defined by Eq.(16), but the rupture life is 1.1 time than those of constant temperature because of effect of temperature history at tertiary creep range.

Besides this result, the results of the creep test under cyclic temperature conditions are respectively compared with calculated rupture lives using the life fraction law and Eq.(18).

The agreement between the observed rupture times and calculated ones is fairly good. So creep rupture lives can be respectively predicted using life fraction law and Eq.(18).

1. 서 론

크리이프는 응력과 온도의 조건에서 재료가 서서히 변형하는 것으로 정의할 수 있고 오래 전 부터 이러한 크리이프에 대하여 많은 실험적 연구가 행하여져 왔으나 대부분의 크리이프 실험은 정하중 정온하에서 행해졌다. 그러나 실제 크리이프 문제들은 응력과 온도가 변하는 복

잡한 조건을 내포하고 있으며 금속은 크리이프의 거동이 응력뿐만 아니라 온도에 매우 민감하고 모든 크리이프 매개변수들은 온도에 의해 영향을 받기 쉽기때문에 응력과 온도의 전 범위에 걸쳐 일반적인 식을 만들기가 쉽지않다. 그러나 Shuji Taira와 Masateru Ohnami¹⁾ 등은 온도이력의 영향을 무시하는 고체 상태 역학방정식의 근사계산으로 정상상태와 비교하였고 Tadashi Kawasaki와 Afushi Shinozak²⁾ 는 life fraction law에 의한 계산치와 온도변동시의 파단수명을 비교하여 파단수명에 미치는 영향을 실험적으로 고

- * 정회원 : 국방품질연구소(창원분소)
- ** 정회원 : 부산공업대학 산업안전과
- *** 정회원 : 부산공업대학 기계과
- **** 정회원 : 부산공업대학 기계설계과
- ***** 정회원 : 부산공업대학 생산기계과

찰했으나 온도가 변동하는 조건에서 신뢰성이 높은 실제 응력이나 온도를 설정하기 위한 크리프 특성에 관한 상세한 연구가 아직까지는 미흡한 실정이다.

본 논문에서는 Al7075 합금을 사용하여 기준 온도 250 ℃에서 280 ℃, 290 ℃, 300 ℃ 및 220 ℃로 주기적인 변동을시켜 2단 계단상온도 변동의 이력이 크리프 거동에 영향을 주는 인자를 밝혀내었다. 또한 온도 변동하에서의 크리프 결과를 상당정상온도 (Te)를 사용한 고체상태 역학방정식에 의한 근사계산¹⁾으로 추정하였고 온도 변동하에서의 파단수명을 파단수명의 감소율이 그때의 부하응력 및 온도에 의해서만 결정된다고 가정하여 구한 파단수명³⁾과 life fraction law에 의해서 구한 파단수명²⁾과 서로 비교 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2-1 실험시편

시편은 Al7075 합금 봉재를 Fig.1과 같이 게이지 길이 50 mm, 게이지 직경 10mm가 되도록 기계 가공하였다.

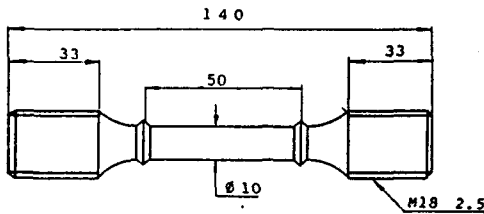


Fig. 1 Creep specimen

시편의 열처리 는 T₆ 열처리로 하고 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

Table1. Chemical composition (Wt%)

Material	Cr	Zn	Mg	Cu	Fe	Ti	Mn	
Al7075	0.20	5.84	2.44	1.71	0.32	0.12	0.44	0.44

Table2. Mechanical properties

Material	Y/S(kg/mm ²)	T/S(kg/mm)	Elongation	Hardness
Al7075	52.7	62.2	17.	147

2-2. 실험장치

본 실험에 사용된 크리프 시험기는 동경시험기기 회사의 모델(CRL-3000)로 최대 허용하중은 3ton, 레버비는 1:20이다. 로의 사용온도는 최고 850 ℃이며 요구하는 노온은 시편에 PR 열전대를 부착하여 디지털 지시계에 나타나고 자동온도 조절장치로써 ±1℃범위에서 일정하게 유지했다. 시편의 변형량은 시편과 더불어 디지털 기록계에 신률(%)로 나타나며 시편온도와 함께 자동적으로 차-트에 기록된다. 요구온도에 도달할 수 있게 하기위해 냉공기를 분사하는 온도급냉장치를 노의 상부에 부착시켰다.

2-3 실험방법

실험은 다음과 같이 두가지 방법으로 실시했다. 첫째는 일정하중하에서 온도만을 급속히 기준온도보다 주기적으로 상승시키거나 하강시켜서 실험을 했고 둘째로는 일정하중하에서 각 시험온도별로 정 크리프 실험을 행했다. 또 파단수명을 비교하기 위해서 상당온도에 해당하는 일정온도에서 정 크리프 실험을 실시하였다. 전자의 방법으로는 실험조건을 τ/P (여기서 τ 는 기준온도에서의 부하시간, P는 주기)를 변수로하여 일정하중에서 기준온도보다 온도를 상승 또는 하강시키는 방법으로 했으며 Table 3과 Fig.2에 나타내었다. 또 후자의 정 크리프 실험은 Table 4와 같다.

온도 변동하의 Al 7075 합금의 크라이프 및 파단수명

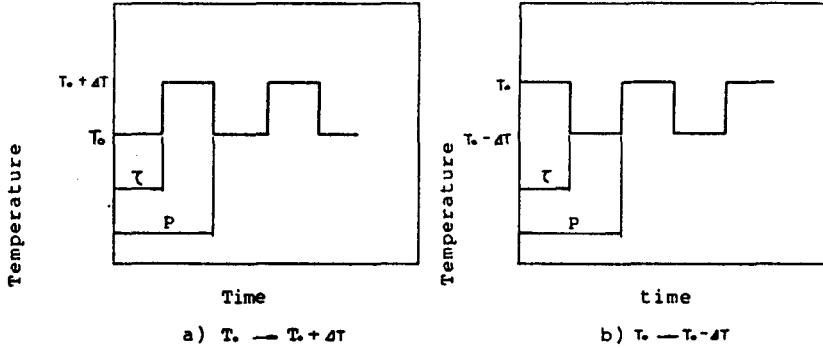


Fig.2 Experimental condition

Table3. Variable temperature-Period matrix

Reference temperature (°C)	Variable temperature (°C)	Period (T/P)			Load (kg)
		3/7	4/7	5/7	
250	280	3/7	4/7	5/7	320
	290	3/7	4/7	5/7	
	200	3/7	4/7	5/7	
	220		4/7	5/7	

Table4. Temperature-Load matrix

Temperature (°C)	Load (kg)			
250	200	240	280	320
280	200	240	280	320
290	200	240	280	320
300	200	240	280	320
273				320
284				320
293				320

기준온도에서 220 °C로 하강시키는 실험을 제외한 모든 실험은 파단까지 행하였으며 온도를

상승시키는 방법으로는 시험기자체의 가속장치에 의해 3.5 °C/min의 속도로써, 또 하강시키는 방법으로는 별도의 부속장치를 부착하여 수초 동안씩 차가운 공기를 분사함에 의하여 요구온도까지 8.5 °C/min의 속도로써 급냉시켰다.

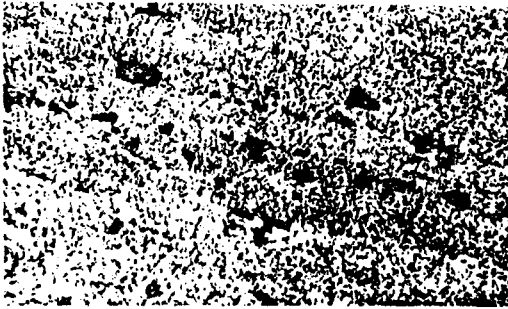
2-4. 변형후의 조직 관찰

조직검사를 위하여 시편을 Al₂O₃분말을 연마한 후 복부식(시약 A:HNO₃ 25ml, H₂O 75 ml, 시약B(Keller시약): HF 0.5ml, HNO₃ 1ml, HCl2ml, H₂O 97 ml)을 행하였는데 먼저 A시약을 70 °C가열하여 시편을 1분 담고 냉수에 씻은 다음 B시약에 15~30초 담귀은 수로 씻어서 부식된 시편을 광학현미경으로 입도와 미세조직을 조사하였다. 이 사진에서 석출물이 bimodal분포를 나타냈으며 T₆의 열처리에 의해 생긴 입계석출로써 만들어진 부식틈은 아주 예리하여 응력부식균열에 취약하게 되는 원인이 된다. Fig. 3은 조직을 나타낸다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1 실험결과

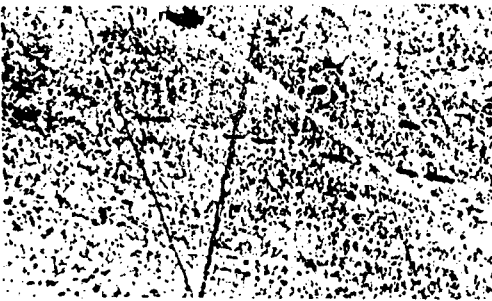
온도변동하의 크라이프에 해당하는 구성방정식의 각 계수 및 지수를 구하기 위해서 Table 4의 조건으로 구한 계산결과를 Table



(a) Before deformation, $\times 320$



(b) T_2 280 °C $\tau/p = \frac{4}{7}$, $\times 320$



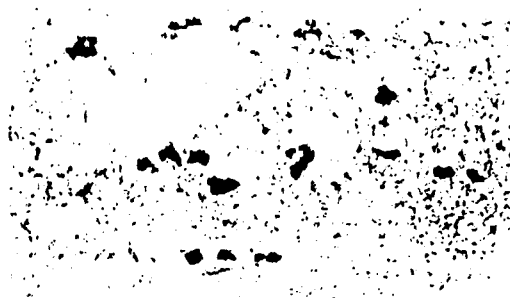
(c) T_2 280 °C $\tau/p = \frac{3}{7}$, $\times 320$



(d) T_2 290 °C $\tau/p = \frac{4}{7}$, $\times 320$



(e) T_2 290 °C $\tau/p = \frac{3}{7}$, $\times 320$



(f) T_2 300 °C $\tau/p = \frac{3}{7}$, $\times 320$

Fig.3 Microstructure on the near fracture surface at step-wise temperature cycling from 250 °C to T_2 , axial direction tensile load 320 kg.

온도 변동하의 Al 7075 합금의 크리이프 및 파단수명

5에 나타냈으며 Table 3의 온도변동조건으로서 구한 곡선들이 Figs 12~19에 나타냈다. 여기서 정 크리이프에 의한 결과로서 계산된 상당 정상온도와 그것으로 구한 곡선과 실험치의 결과는 각각 Table 6과 Fig. 20에 나타나 있

다. 여기서 사용한 온도범위는 호모로고스(homologous) 온도 T/T_m 이며 T_m 은 Al 7075 합금의 용융온도 911°K (638°C)를 나타낸다.

part	Temperature (°C)				Principal notation
	300	290	280	250	
$\beta_0(2.54)$	0.488	0.333	0.114	0.08	Primary creep coefficient
$\beta_0(3.056)$	0.767	0.437	0.189	0.136	
$\beta_0(3.56)$	1.2587	0.83	0.355	0.265	
$\beta_0(4.074)$	1.41	1.182	0.443	0.31	
m	2.36	2.87	3.011	3.18	$B_0 = \beta' \sigma^{m'}$
β	0.0556	0.0196	$6.9 \cdot 10^{-3}$	$3.55 \cdot 10^{-3}$	
m'	5.42	6.24	6.7	7.203	$K = \beta' \sigma^{m'}$
$\beta \cdot \beta' \frac{m}{m'}$	1.5	1.47	0.846	1.254	
β'	$5.13 \cdot 10^{-4}$	$8.4 \cdot 10^{-6}$	$2.287 \cdot 10^{-6}$	$1.619 \cdot 10^{-6}$	$K = \beta' \sigma^{m'}$
A_0	54,300	55,000	25,000	33,000	$\beta_0 = A_0 \exp(-\frac{K}{T})$
m/m'	0.414	0.36	0.23	0.35	C_1
C_2	0.414	0.36	0.23	0.35	$C_2 = \beta \cdot n \cdot \beta'^{-\frac{m}{m'}}$
n	0.276				$\epsilon = \epsilon_0 + \beta_0 t^n$
K(2.54)	7,983.8				$\dot{\epsilon} = A_0 n \exp(-\frac{K}{T}) \cdot t^{n-1}$
K(3.056)	7,430				
K(3.56)	6,972.34				
K(4.074)	6,050				
K(2.54)	17,176.2				
K'(3.056)	17,118.6				
K'(3.56)	16,419.9				$K = A' \exp(-\frac{K'}{T})$
K'(4.074)	15,000				

3-2 계산

3-2-1 정크리이프로부터의 계산

일정온도 일정하중 크리이프 실험에서 크리

이프 곡선은 다음과 같이 (1)식으로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = \epsilon_0 + \beta_0 t^n + kt \dots\dots\dots (1)$$

여기서 ϵ_0 : 초기변형, β_0, n : 응력과 온도에 관계하는 상수 k 이차 크리이프 속도 1차 크리이프 속도 $\dot{\epsilon}$ 는

$$d\epsilon/dt = \beta_0 n t^{n-1} \dots\dots\dots (2)$$

양변에 대수를 취하면

$$\log \dot{\epsilon} = \log \beta_0 + \log n + (n-1) \log t$$

온도조건을 일정하게 두면 β_0 와 n 는 상수가 되므로 $\log \beta_0 n = C$ 라 두면

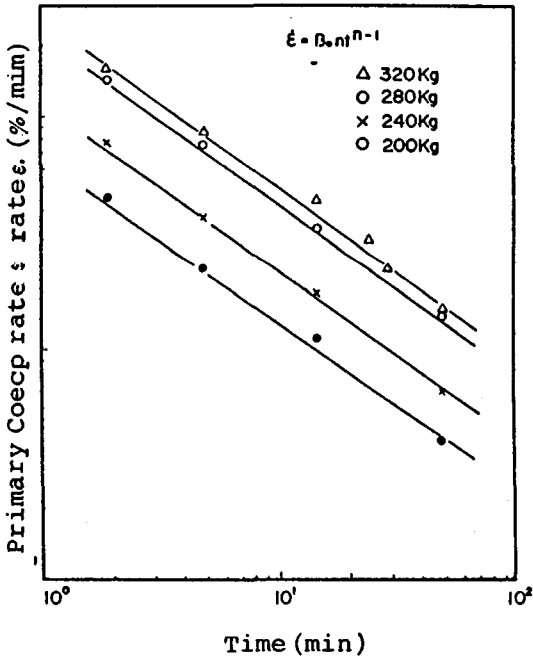


Fig.4 Relation between primary creep rate and time at 250 °C (0.574 T_m)

$$C = \log \dot{\epsilon} - (n-1) \log t$$

$$\log \dot{\epsilon}_1 - (n-1) \log t_1 = \log \dot{\epsilon}_2 - (n-1) \log t_2$$

$$\therefore n = 1 + \log(\dot{\epsilon}_1/\dot{\epsilon}_2) / \log(t_1/t_2) \dots\dots\dots (3)$$

그러므로 지수 $(n-1)$ 는 $\log \dot{\epsilon} - \log t$ 의 그래프에서 직선의 기울기가 된다. 250 °C, 280 °C, 290 °C, 300 °C의 각각의 온도에 대해서 하중을 200 kg, 240 kg, 280 kg, 320 kg으로 바꾸어 얻은 결과를 Figs 4~7에 나타내었다.

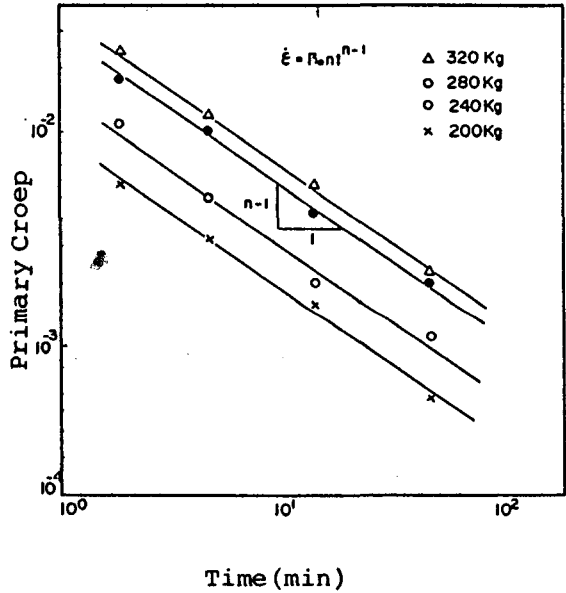


Fig.5 Relation between primary creep rate and time at 280 °C (0.61 T_m)

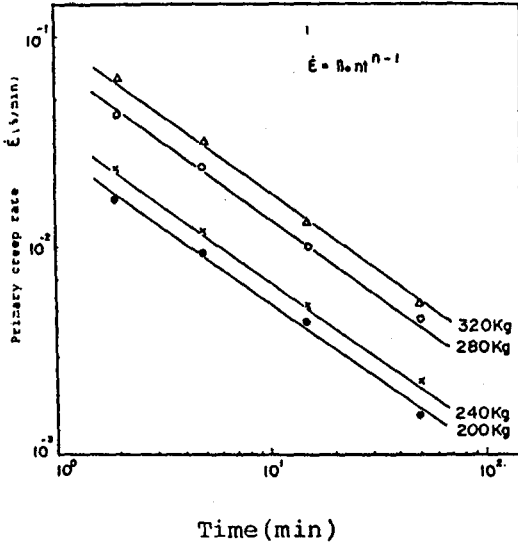


Fig. 6 Relation between primary creep rate and time at 290 °C (0.62 T_m)

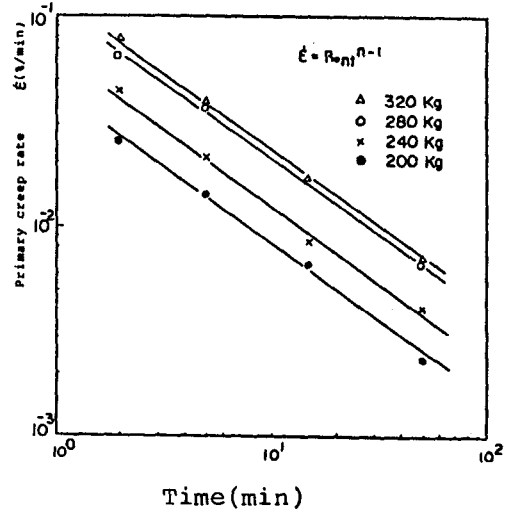


Fig. 7 Relation between primary creep rate and time at 300 °C (0.63 T_m)

3-2-2 크리이프 속도의 응력 및 온도 의존성⁴⁾

a) 크리이프 속도의 응력 의존성

(1)식에서 계수 β₀ 및 k는 다음과같은 응력의존성을 가지고 있다.

$$\beta_0 = \beta \sigma^m \dots (4) \quad k = \beta' \sigma^{m'} \dots (5)$$

여기서 β, m, β', m'는 상수이다.

β, m, β' 및 m'를 구하기 위해서 먼저 β₀ = βσ^m의 양변에 대수를 취하면

$$\log \beta_0 = \log \beta + m \log \sigma \quad \beta : \text{상수}$$

$$m = \log(\beta_{01}/\beta_{02}) / \log(\sigma_1/\sigma_2) \dots (6)$$

로 기울기가 되며 log β₀와 log σ의 관계를 Fig 8에 나타냈다. 또 k = β'σ^{m'}의 양변에 대수를 취하면 마찬가지로

$$m' = \log(k_1/k_2) / \log(\sigma_1/\sigma_2) \dots (7)$$

로 log k와 log σ의 관계에서 직선의 기울기가 되며 Fig 9와 같이 된다. 이 계산결과를 비교하면 m과 m', β와 β' 사이에는 중요한 관계가 있다.

$$m/m' = \text{일정}, \quad \beta (\beta')^{-m/m'} = \text{일정},$$

$$m, m' \propto \frac{1}{T} \dots (8)$$

이것을 비교적 광범위한 온도에서 온도에 무관계하게 성립되며 단시간 크리이프와 장시간 크리이프의 상관성을 연구하는데 이용될 수 있다. 즉 천이 크리이프와 정상 크리이프사이의 관계를 보면 (2), (4), (5)식에서

$$d\epsilon/dt|_t = \beta_0 n t^{n-1}, \quad k = \beta' \sigma^{m'}$$

$$d\epsilon/dt \propto \sigma \cdot k^{-n/m'} = \beta n \beta' \cdot \sigma^{-n/m'} \cdot t^{n-1} \dots \dots \dots (9)$$

(1) 식을 미분하면

$$d\epsilon/dt = \beta_0 n t^{n-1} + k = u/t + k$$

여기서 β 및 k 는 부가응력 및 온도의 함수, 특히 u/t 와 k 의 사이에는 온도 및 응력에 무관계하게 다음의 관계가 비교적 광범위의 금속재료에 대해 성립하는 것으로 알려져 있다.

$$u/t \cdot k^{-c_1} = C_2 \cdot t^{n-1} \dots \dots \dots (10)$$

그러므로 $C_1 = -n/m'$, $C_2 = \beta n \beta' \cdot \sigma^{-n/m'}$... (11)

이 되며 이것은 임의의 부가응력 및 온도하에서 정상 크리이프 속도를 같은 조건의 단

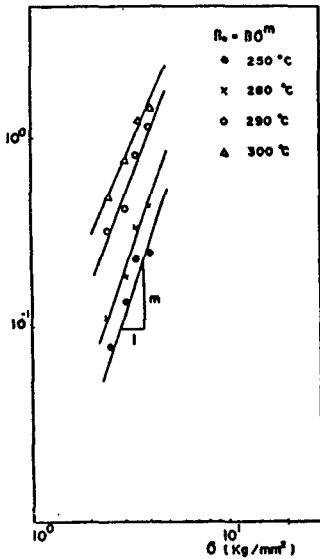


Fig.8 Stress dependence of β_0

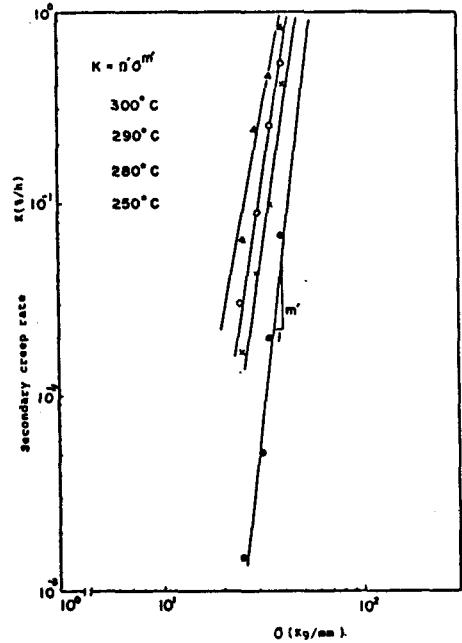


Fig.9 Temperature dependence of stress exponent

시간 크리이프 시험결과로서 추정할 수가 있음을 알 수 있다.

b) 크리이프 속도의 온도 의존성

일정 온도하의 철이 크리이프 및 정상 크리이프 단계에서 크리이프 속도의 온도 의존성은 Arrhenius의 식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d\epsilon/dt = A \cdot \exp(-k/T)$$

$$k = A' \exp(-K/T) \dots \dots \dots (12)$$

여기서 $d\epsilon/dt$ 는 철이 크리이프 속도 k 는 이차 크리이프 속도 A, A', k, k' 는 부하시간 및 부가응력 혹은 부가응력에만 관계

있는 상수. 양변에 대수를 취하면

$$\log \dot{\epsilon} = \log A - K \log e / T$$

$$\log k = \log A' - k' \log e / T \dots (13)$$

$k \log e$ 와 $k' \log e$ 는 $\log \dot{\epsilon}$ 와 $1/T$ 의 관계에서 각각 기울기가 되고 그 결과는 Figs 10~11와 Table 5에 나타나 있고 여

기서 k 이 크리이프의 온도의존성을 나타내는 k 와 정상 크리이프의 온도 의존성을 나타내는 k' 의 비의 값(k/k')은 약 0.43 으로서 k 이 크리이프 및 정상상태 크리이프 속도의 용력 의존성의 비의 값(m/m')이 0.45와 거의 일치한다.

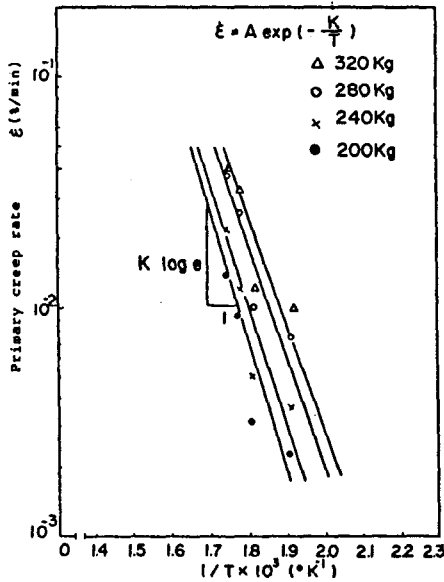


Fig.10 Temperature dependence of primary creep rate

3.2.3 온도 변동하에서 크리이프 계산

온도 변동하에서 크리이프 곡선과 일정 온도하의 크리이프 곡선간의 상호관계를 알기위해서 주기적 온도변동을 주었을때 그것에 상당하는 정크리이프 온도 $1) Te$ 를 구하여 실험치와 이론치를 비교, 고찰하였다. k 이 크리이프 영역과 정상상태 크리이프 영역에서의 상당 정상온도 Te' 와 Te 는

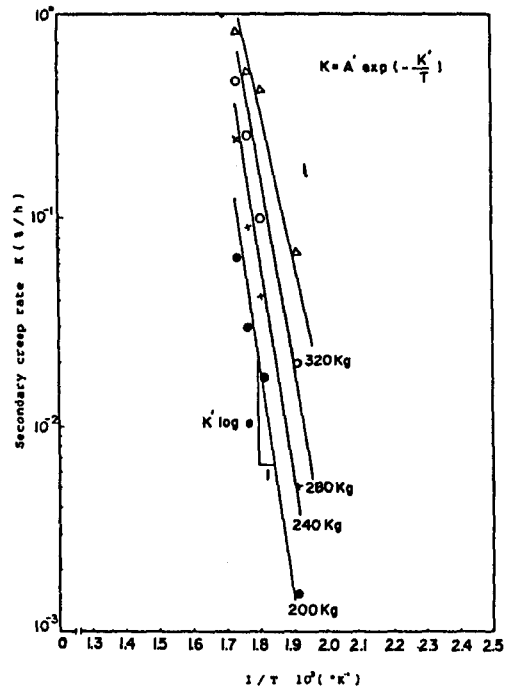


Fig.11 Temperature dependence of secondary creep rate

$$Te' = Te = -K/n / \ln I \dots (14)$$

여기서 $I = \frac{1}{p} \int_0^p \exp(-\frac{k}{m} / T(t)) dt \dots (15)$

I 를 전개하여 (14)식에 대입하면

$$Te = \frac{1}{\frac{1}{T_0 + \Delta T} - \frac{n}{k} \ln \left[\frac{\int_0^p \exp\{-\frac{k}{n} / T(t)\} dt}{\frac{1}{T_0 \Delta T + T_0^2} + (1 \frac{\int_0^p}{p})} \right]}$$

여기서 앞에서 구한 계수 및 지수를 대입하여 상당 정상온도 T_e 값을 구하여 Table 6에 나타내었다. 주기적 온도변동하의 크리이프 곡선에 일치하는 상당 정상온도 T_e 를 사용하여 정상상태 크리이프 영역까지의 주기적 온도 변동하의 크리이프 곡선식은 다음과 같다.

Table 6 Equivalent temperature T_e

Reference temperature (°K)	Variable temperature (°K)	Equivalent temperature T_e (°K)		
		Period (τ/p)		
		3/7	4/7	5/7
	553	546	543	540
	563	557	553	540
	573	566	562	557

$$\epsilon = \epsilon_0 + A_0 \cdot \exp(-K/Te) t^{n_1} + (A_0 n / C_2)^{1/C_1} \cdot \exp(-\frac{1}{C_1} \cdot \frac{K}{Te}) \cdot t \dots\dots\dots (17)$$

실험에 사용한 주기적 온도변동하의 크리이프 곡선을 Figs 12~19에 나타내었으며 기준온도에서 고온측으로 온도변동을 주었을때는 기준온도로 다시 환원할 때에 시간축과 거의 수평이 되는 시간이 존재함을 볼 수 있는데 이 시간을 잠복기(incubation period, $i \cdot p$)라고 하며 이러한 잠복기는 저속크리이프 단계에서는 그림에서 알 수 있듯이 잠복 현상이 나타나지 않고 온도이력에 의해서 크리이프가 진행함을 알 수 있다. 이것은 재료중에 어떤 장애물에 퇴적했던 전위가 상승 운동에 따라서 회복하는 상황에 의해 내부응력이 변화하는 것이라 생각된다.

즉 잠복기는 다음과 같은 식으로 표시가 가능하다.⁵⁾

$$(i \cdot p) = \frac{1}{q} \left\{ -\frac{\gamma T}{q} \cdot \frac{1}{\tau + t} + h(d\epsilon/dt) \right\}$$

여기서 $\Delta\sigma$: 온도감소에 따른 내부응력의 증가량

- γ : 불쯔만 상수
- T : 고온측 온도 (°K)
- t' : 고온측 유지시간
- τ : 기준온도 유지시간
- $d\epsilon/dt$: 크리이프 속도
- h : 경화율 (= $d\epsilon/dt$)

가속크리이프 단계에서는 크리이프 속도가 급격히 증가하므로 잠복기 ($i \cdot p$)는 감소 혹은 거의 소멸되어지고 또 온도진폭에 의한 영향으로서 고온측의 온도가 높을수록 잠복기의 소멸이 빨리 나타남을 알 수 있다. 한편 기준온도 T_0 에서 ΔT 만큼 저온으로 온도변동을 주었을 경우에는 Fig. 18와 같이 크리이프 진행이 저온측에서 거의 없으며 저온측 유지시간을 제외한 기준온도 250 °C의 전부하시간 ($\sum \tau$)을 횡축으로 하여 그린 Fig. 19에서 보면 τ/p 의 값이 작은 즉 저온측 유지시간이 길때 고체상태역학방정식에 따른 계산치와 오차가 5%내외의 미소한 양으로서 크리이프 변형의 온도이력 영향을 무시한 고체상태 역학방정식으로 부터 추정할 수 있다고 생각할 수 있다. Fig. 20은 고체상태 역학방정식을 이용한 이론적 곡선과 본 실험에서 보여준 온도 변동하의 크리이프 곡선과의 결과를 보여주는 것으로 정상상태 범위까지는 거의 일치함을 알 수 있다.

3-2-4 온도변동하의 크리이프 파단수명³⁾

어떤상태에서 크리이프 파단수명의 감소율은 그때의 부하응력 및 온도에 의해서만 결정된다고 가정하면 주기 P인 임의온도 파형 T(t)에서 파단수명 L은 다음과 같다.

$$L = B_0 \cdot P \int_0^P \exp\{-H/T(t)\} dt \dots\dots\dots (18)$$

여기서 L은 파단수명, B_0 , H는 상수이다.

온도 변동하의 Al 7075 합금의 크리이프 및 파단수명

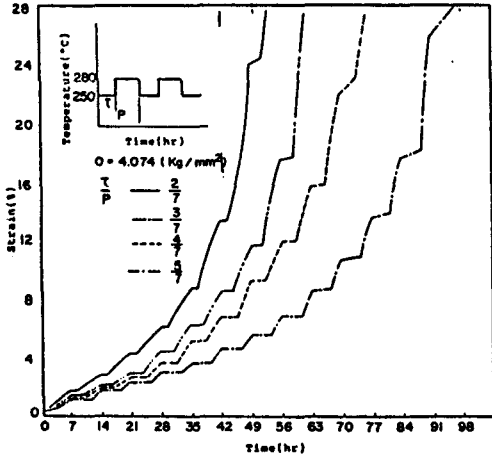


Fig. 12 Creep curves of step-wise temperature cycling under 250°C-280°C

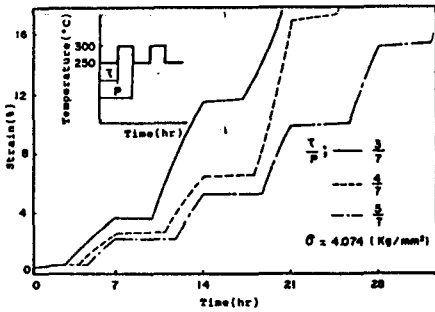


Fig. 14 Creep curves of step-wise temperature cycling

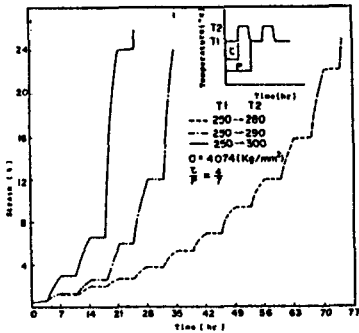


Fig. 16 Comparison with creep curves step-wise temperature cycling respectively under $\frac{\tau}{p} = \frac{4}{7}$

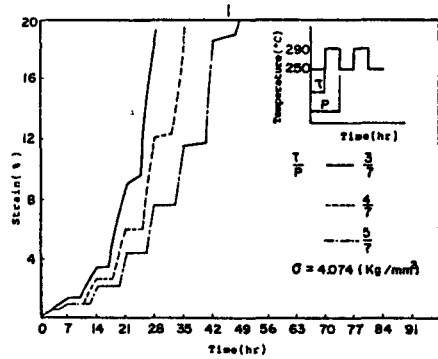


Fig. 13 Creep curves of step-wise temperature cycling

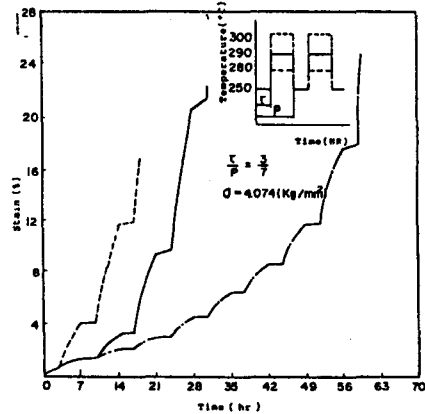


Fig. 15 Comparison with creep curves of step-wise temperature cycling respectively under $\frac{\tau}{p} = \frac{3}{7}$

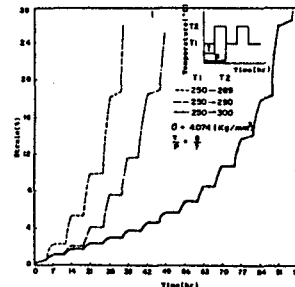


Fig. 17 Comparison with creep curves of step-wise temperature cycling respectively under $\frac{\tau}{p} = \frac{5}{7}$

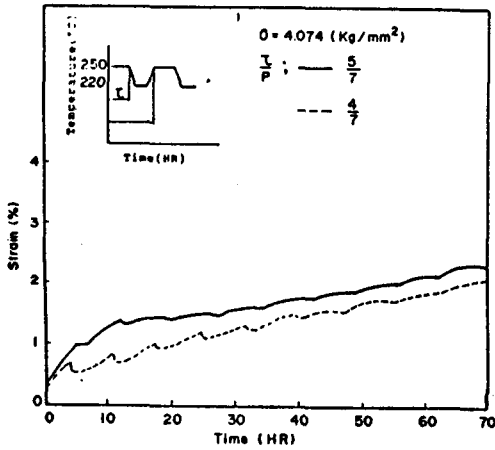


Fig. 18 Creep curves of step-wise temperature cycling under 250-220 °C

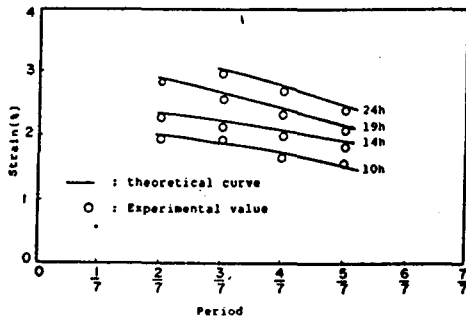


Fig. 20 Comparison of theoretical value and experimental value

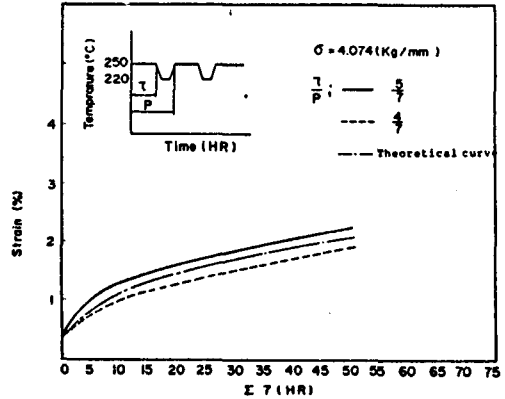


Fig. 19 Effect of low temperature creep curves of step-wise temperature cycling

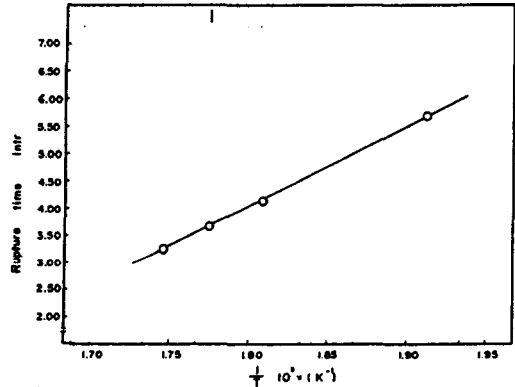


Fig. 21 Relation between the rupture life and temperature

T (t가 T로서 일정한 경우의 파단시험에서는

$$L = B_0 \cdot \exp(H/T) \dots\dots\dots (19)$$

B_0 와 H 값을 Fig. 21에서 구하여 그 값은 각각 1.86×10^{-10} 및 14700 이다. 온도변동 하의 파단수명과 정크리이프에서 파단수명이 같다고 할때 파단수명에 대한 상당정상온도 T_{er} 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T_{er} = H / \ln \left[\frac{1}{p} \int_0^p \exp \left\{ -\frac{H}{T(t)} \right\} dt \right] \dots (20)$$

여기서 구한 T_{er} 값은 Table 7에 표시했다.

그런데 온도변동에 따라 재료가 경화 또는 연화한다고 고려하고 온도이력의 영향을 고려할때의 수정계수를 α 라고 하면 T_{er} 은 다음과 같다.

		3/7	4/7	5/7
250 °C	280 °C	272 °C	268 °C	263 °C
	290 °C	280 °C	276 °C	270 °C
	300 °C	289 °C	284 °C	277 °C

Table. 7 Equivalent steady temperature for rupture life of temperature cycling test

$$T_{er} = H / \ln \left[\frac{\alpha}{p} \int_0^p \exp \{-H/T(t)\} dt \right] \quad (21)$$

여기서 경화될때는 $\alpha < 1$, 연화될때는 $\alpha > 1$ 온도이력의 영향이 없을때 즉 $\alpha = 1$ 일때는 (20)식과 동일하다. 본 실험에서 하중 320 kg으로 3/7 주기로 구한 파단시험결과와 그때의 상당정상온도에 달하는 일정온도에서의 정크리이프 실험결과로서 일정온도에서의 파단수명과 온도변동에서의 파단수명은 일치하지 않고 수정계수 α 는 1보다 크게 되고 온도변동에서 파단수명이 일정온도에서 파단수명의 0.9배가 됨을 알 수 있다. 이것으로부터 본 재료는 가속크리이프에 도달하면서 부터는 온도이력의 영향을 받으며 연화가 급격히 진행함을 알 수 있다.

$$\text{즉 } \dot{\epsilon} = (\partial \sigma_i / \partial t) / \left(\frac{\partial \sigma_i}{\partial \epsilon} \right) = \frac{r}{h} \quad (22)$$

여기서 r 은 회복율, h 는 경화율이다. 가속단계이므로 $r \gg h$ 가 되어 회복율은 다시 $r = (\sigma(\rho), t)$ 의 관계가 되어

$$r = -\frac{d\sigma}{d\rho} \cdot \frac{d\rho}{dt} \quad (23)$$

상승에 의한 전위의 소모율은

$$\frac{d\rho}{dt} = \rho_c \cdot S \quad (24)$$

$$\text{따라서 (23)식은 } r = \left(\frac{d\sigma}{d\rho} \rho_c \right) \cdot S \quad (25)$$

가 된다. 여기서 $-d\rho/dt$:: 상승에 의한 전위의 소모율

- ρ_c : 상승되는 전위밀도
- S : 상승속도
- d : 전위소모에 따른 전위거리

(25)식에서 상승에 의한 전위의 소모율이 커짐에 따라서 전위거리가 짧고 상승속도가 빨라짐에 따라 연화가 급격히 진행됨을 알 수 있다. 온도진폭에 의한 파단수명에서 온도변동에 따른 과시효 영향으로 입체에 따라서 석출물이 선택적 방향성을 띠지않고 측면으로 더 두껍게 성장할 수 있으며 그것으로 인해 구형의 석출물이 형성되기가 쉽고 강도는 감소된다. 또한 석출자유지역(precipitate free zone; P.F.Z)의 폭이 증가하고 입체를 따라 조대 석출물이 성장하여 내인성, 내피로특성등의 기계적 성질이 약화된다. 특히연질의 (P.F.Z)를 따라 균열이 전파되어 파단에 이르게 되어서 파단수명이 감소된다고 생각된다. 그리고 온도변동 크리이프의 파단수명을 추정하는방법 중 life fraction law에 의하면 단형파 온도사이클의 파단수명 τ_R 은 다음식과 같다. 2)

$$\tau_R = \tau_0(R+1)/(R + \tau_0/\tau_1) \quad (26)$$

여기서 τ_R : 단형파 온도사이클의 파단수명

τ_0 : 고온측 크리이프 파단수명

τ_1 : 저온측 크리이프 파단수명

R : 사이클 비(= 1사이클의 고온주기 / 1사이클의 저온주기)

(18)식과 (26)식에서 구한 파단수명을 실험치와 비교하면 Fig. 22와 같다. 이 그림에서 (18)식과 (26)식에서 구한 온도변동하에서의 크리이프 파단수명은 실험치와 대략 일치함을 알 수 있다.

Fig. 3은 각각 온도 250~280, 250~290 조건, τ/p 가 2/7, 5/7인 조건에서의 파단면 사진으로 파단면은 dimple이 많이 형성되어 있음을 알 수 있다. 이렇게 파단부분에서 공공이 형성되는것은 Ischida Mclean의 제외에 따르지 않으면 결정입계 내에서의 전

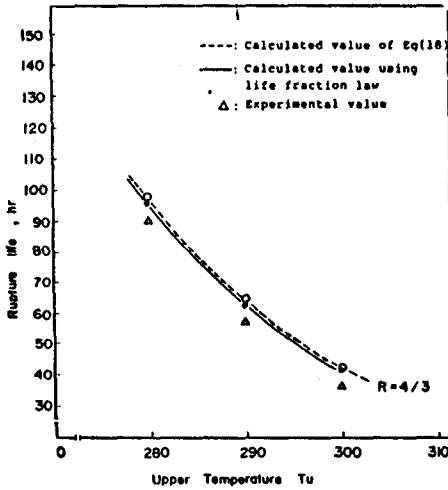


Fig. 22 Relation between the rupture life and the upper temperature

위의 이동은 석출물의 영향을 받아서 정지되고 orowan의 bowing stress보다 더 큰 응력이 작용되면 석출물 주위에 루프를 남기면서 전위들은 bowing out하여 나아가서 계속되는 전위의 bowing out에 의하여 루프의 생성이 증가하면 이 루프가 배응력에 의하여 상승하여 석출물 주위를 떠나게 된다고 했다. 그리고 전위의 이동과 관련된 크리이프 변형의 결과로 공동이 성장할 수 있음을 제안하였고 그들은 모재를 이동하는 전위가 결정입계로 이동되어 들어가서 결정입계를 따라 상승에 의하여 이동이 가능하여 이 상승과정 동안에 공이 생성될 수 있고 이들은 공동으로 확산하여 들어가 결국격자내의 전위가 입계로 이동하여 입계내에 상승함으로써 공공을 생성하여 공동성장에 기여하여 파단에 큰 영향을 미친다고 추측된다.

4. 결 론

주기적 온도 변동하에서 Al7075 합금을 크

리이프 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Al 7075 합금의 특성치 C₁와 C₂의 값은 대략 온도와 응력에 무관계하게 각각 0.45 0.37로 측정되었다.
2. Al7075 합금의 온도 변동하에서 가속크리이프 단계에 달할때 까지 크리이프는 온도이력의 영향이 얼마 안되고 크리이프 곡선에 일치하는 상당 정상온도 Te를 사용한 정상상태 크리이프 영역까지의 크리이프 곡선식은 다음과 같다.

$$\epsilon = \epsilon_0 + A_0 \exp(-K/Te)t^{0.276} + (0.746A_0)^{2.22} \cdot \exp(-\frac{2.22}{T}K) \cdot t$$

여기서 상당온도 Te는

$$Te = \frac{1}{\frac{1}{(T_0 + \Delta T)} - \frac{n}{k} \times \ln\left\{\frac{\tau}{p} \exp\left\{-\frac{k}{n}\right\}\right.}$$

$$\left. \frac{1}{\frac{T_0 \Delta T + T_0^2}{\Delta T}} + (1 - \tau/p)\right\}$$

3. 주기가 P인 2단 계단상의 온도파형에서 파단수명 (L)은

$$L = 1.86 \times 10^{-10} \times P / \{ \exp(-14700/T_0) \tau_1$$

+ exp(-14700/T₁)(p-τ₁)\}과 같이 표시되고 이 식과 life fraction law에서 구한 계산치는 실험치와 잘 일치하여 이러한 계산에 의해 온도변동하의 크리이프 수명을 예측할 수 있다.

4. 가속단계에 접어들면서 온도이력의 영향을 받고 온도이력 영향을 고려한 수정계수 α는 1보다 큰 1.1으로 나타나 온도변동하의 크리이프에 따른 본 재료는 연화하고 파단수명에 대한 상당정상온도 T_{er}은

온도 변동하의 Al 7075 합금의 크리이프 및 파단수명

$$T_{er} = \frac{1}{1/\Delta T + T_0 - 6.85 \ln \left[\frac{\tau}{\rho} \exp \{-14700 \frac{1}{(\frac{T_0 \Delta T + T_0^2}{\Delta T})} + (1 - \tau/\rho)\} \right]}$$

5. 2단 계단상 온도변동의 이력이 크리이프 거동에 영향을 주는 인자중 크리이프가 진행시 발생하는 석출물이 온도진폭이 클수록 석출물이 선택적 방향성을 띠지 않으며 구형의 석출물이 형성되기가 쉽고 이로인해 크리이프 강도는 감소된다고 추측된다.

참 고 문 헌

1. S. Taira, M. Ohnami and S. Sugio-ka, Creep under step-wise temperature cycling, Trans of JSME, 27-176, p.380-p.386, 昭36.4
2. T. Kawasaki, A. Shinojaki and M. Horiguchi, Creep behavior of type 347 austenitic stainless steel subjected to cycling temperature, 材料強度誌, 3.1 p.23 ~ p.38, 1968
3. S. Taira and M. Ohnami, Accelerated stage creep and creep rupture under temperature cycling, Trans of JSME, 27-176, p.386 ~ p.396, 昭36-4
4. T. Nishihara, S. Taira, K. Tanaka and M. Onami, Secondary stage creep of mild steel, Trans of JSME, 24-143, p.424-p.433, 昭33.7
5. S. Taira, M. Ohnami, and M. Sakato, Influence of temperature history on creep, 27-176 p.373-p.379, 昭36.4