

(論 文)

A17075합금의 고온 크리프 활성화에너지의 상태의존성

조용이* · 김희송**

(1992년 8월 10일 접수)

State Dependence of Activation Energies for High Temperature Creep of A17075 Alloy

Yong-Yi Cho and Hei-Song Kim

Key Words : High Temperature Creep(고온 크리프), Dislocation Climb(전위상승), Activation Energy(활성화 에너지), Temperature-Compensated Time(온도 보상시간), Zener-Hollomon Parameter(Zener-Hollomon 상수)

Abstract

The activation energy for high temperature creep is associated with stresses, temperatures, strains and the creep strain appears to be a function of a temperature, compensated time, namely $te^{-\Delta H/RT}$, and the stress. In fact this functional relation appears to be isomorphic to material structure by x-ray analyses. Applying this functional relation, the dependence of activation energy for A17075 creep was investigated. The activation energy for creep is insensitive to stress, temperature, structure, and strain. And phenomenological model agrees with experimental creep data.

1. 서 론

대부분의 금속과 합금의 크리프 변형은 속도의존성이고 특히 고온에서는 더욱 그러하다. 속도의존성을 나타내는 것은 하중속도 민감성, 크리프, 이완(relaxation) 및 크리프-소성 상호작용 등이다. 이 문제에 대해서 여러가지 모델이 나와 있지만 아직 만족스럽지 못하다. 지금까지 제안된 것은 통일형 모델이거나 상호작용적인 두 구성방정식의 집합으로서의 모델이다. 크리프의 많은 이론이 나와 있으나 이론을 바탕으로 한 연역(deduction)은 실험결과와 완전히 일치하지 않는다. 그리고 이론정립에서 가정은 비현실적인 것이 많다.⁽¹⁾

이 연구에서는 A17075의 활성화에너지의 각 변수

의존성을 온도 보상시간과 Zener-Hollomon 개변수를 써서 조사하고 가장 신빙성이 있는 Miller에 의한 현상론적 크리프식을 조사 연구하였다.

2. 이 론

2.1 크리프 변형의 전형적인 이론 모델

크리프의 가장 전형적인 이론은 자유에너지 장애(barrier)에 대한 전위의 열확산에서 예측할 수 있다. 반응속도론에서 요구되는 바와 같이 그러한 과정에 대한 크리프속도는 다음과 같은 관계식을 준다.⁽²⁾

$$\dot{\epsilon} = A e^{-\Delta H/RT} \sin h\left(\frac{V\sigma}{2kT}\right) \quad (1)$$

여기서 A , V , ΔH 는 조직민감계수(structure-sensitive parameter)이다.

*정회원, 단국대학교 기계공학과 대학원

**정회원, 단국대학교 기계공학과

2.2 크리프 변형의 현상론적 모델

크리프 모델로서 가장 신빙성이 있는 현상론적 크리프 모델에 Garofalo의 응력의존성 식에다 Miller의 온도의존성 식을 결합한 현상론적 모델은 다음과 같다.^(3,4)

$$\dot{\epsilon} = A\theta \sinh^n\left(\frac{\sigma}{C}\right) \quad (2)$$

여기서,

$$\theta = \begin{cases} \exp(-Q_c/RT), & T_m > T \geq T_t \\ \exp\{-Q_c/RT\}[1n(T_t/T) + 1], & T \geq T_t > 0 \end{cases} \quad (3)$$

A는 크리프계수, C는 Power-law breakdown 응력, n은 Power-law 지수, T_m은 용융온도, T_t는 천이온도이다.

2.3 변화하는 온도에서의 크리프

일반적으로 크리프 변형량의 에너지 상태방정식과 크리프의 곡선은 다음과 같다(Fig. 1).

$$\dot{\epsilon} = f(\sigma, T, \epsilon)$$

온도를 수학적으로 일반화한 온도 보상(temperature compensated) 시간개념을 도입하면 전 크리프 변형률 ϵ 은 다음의 함수관계로서 표현할 수 있다. 이것은 X선 회절시험과 소성변형의 기계적 성질이 동형이 되는 것에 근거를 두고 있다.

$$\epsilon = f(te^{-\Delta H/RT}) = f(\theta), \quad \theta = \text{보상온도}, \quad \sigma = \text{일정} \quad (4)$$

크리프의 활성화에너지는 두개의 다른 온도에서 동일 응력하에서의 두개의 크리프 실험에서 정할수 있다.

$$t_1 e^{-\Delta H/RT_1} = t_2 e^{-\Delta H/RT_2} \quad (5)$$

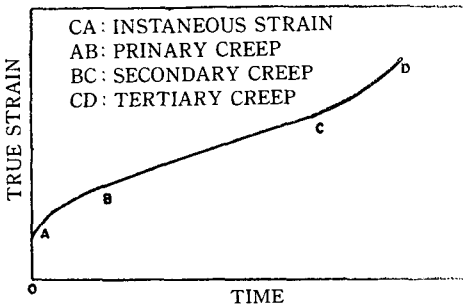


Fig. 1 Creep curve

일정한 응력에 대해서 시간에 따라 변하는 온도 조건에서의 크리프는 다음과 같이 일반화할 수 있다.

$$\theta = \int_0^t e^{-\Delta H/RT} dt \quad (6)$$

정온 크리프에서는 식(6)은 아래와 같이 된다.

$$\theta = te^{-\Delta H/RT} \quad (7)$$

2.4 Zener-Hollomon 매개변수⁽¹⁾

식(4)에서 크리프 속도는 다음과 같다.

$$\dot{\epsilon} = \left(\frac{\partial f}{\partial \theta}\right)\left(\frac{d\theta}{dt}\right) = f'(\theta) e^{-\Delta H/RT}, \quad \sigma = \text{일정} \quad (8)$$

그리고 정상 크리프에서는 다음과 같이 된다.

$$\dot{\epsilon}_s e^{\Delta H/RT} = f'(\theta_s), \quad \sigma = \text{일정} \quad (9)$$

여기서 $\dot{\epsilon}_s$ 는 정상 크리프 변형률 속도이고 θ_s 는 정상 크리프에서의 θ 이다. 그런데 이 θ_s 는 응력의 함수이기 때문에 다음과 같다.

$$Z = \dot{\epsilon}_s e^{\Delta H/RT} = f(\sigma) \quad (10)$$

여기서 Z는 Zener-Hollomon 매개변수이다.

2.5 응력과 파단

주어진 응력에서의 파단으로 이끄는 변형손상이 변형률-파단에만 의존한다고 가정하면 파단에서의 θ 의 값 θ_f 는 온도에 관계없이 같은 응력하에서의 모든 실험에 대해서 동일할 것이다. 따라서 응력-파단은 다음과 같은 함수관계가 나온다.

$$\theta_f = t_f e^{-\Delta H/RT} = G(\sigma) \quad (11)$$

여기서, θ_f 와 t_f 는 각각 파단에서의 θ 와 t 이다.

3. 실험방법

3.1 크리프 실험

(1) 시편

크리프 시편은 A17075합금 봉재를 Fig. 2와 같이 NC 선반가공하여 T₆로 열처리하였다. 재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1, Table 2와 같으며 아래칸에 적힌 값은 "Aluminum standard & data"에서 참조한 것이다.

(2) 정크리프 실험

크리프 시험기는 동경 시험기기 회사의 모델(CRL-

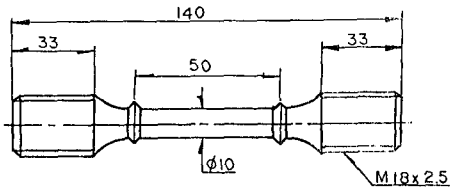


Fig. 2 Creep specimen (mm)

3000)로 최대 허용하중은 3톤, 레버비는 1:20이다. 로의 사용온도는 최고 850°C이고 요구하는 노온은 시편에 PR 열전대를 부착하여 얻었다. 하중을 가한 즉시 시편의 표점거리는 일정하게 변형되므로 최초 응력을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$L_o = A_o \sigma_o = A \sigma, A_o l_o = A l \quad (12)$$

(탄성변형은 소성변형에 비해 작으므로 무시)

여기서, L_o 는 초기하중, A_o 는 시편의 단면적, σ_o 는 시편의 초기응력, l_o 는 시편의 초기길이, A 는 하중을 가한 즉시 변형된 시편의 단면적, σ 는 하중을 가한 즉시 변형된 단면적에 작용하는 응력, l 는 하중을 가한 즉시 변형된 시편의 길이이다.

시편의 초기하중에 의한 변형률을 배제한 시간에 따른 크리프 변형률은 다음과 같이 계산된다.

$$\epsilon - \epsilon_o = 1n \frac{l/l_o}{l_o + \Delta l_o} = 1n \frac{l}{l_o + \Delta l_o} \quad (13)$$

여기서, l 는 시간 t 에서의 시편의 길이, l_o 는 시편의 표점거리, Δl_o 는 하중을 가한 즉시 늘어난 길이, ϵ 는 크리프 변형률, ϵ_o 는 초기하중에 의한 변형률이다.

본 실험에서는 정상상태 크리프를 설명하기 위하여 Table 3에서 보는 바와 같이 일정 온도에서 응력조건을 변화시켜 멱함수 법칙의 응력지수값을 측

정하였고, 일정응력에 대하여 온도조건을 변화시켜 활성화 에너지값을 측정하였다.

(3) 내부응력의 측정

재료의 내부응력을 측정하는 방법에는 응력이완 방법(stress transient diptest tech.)을 사용했다. 이것은 시험중 가해지는 응력의 일부를 제거하여 $d\epsilon/dt=0$ 인 응력을 찾는 시험으로 변형후 응력이 내부응력보다 크면 $d\epsilon/dt > 0$ 이며, 보다 작으면 $d\epsilon/dt < 0$ 이 된다. 또한 회복효과를 피하기 위하여 응력변화 후에 직접 측정되었다. 이때 $d\epsilon/dt=0$ 의 유지시간은 약 2시간, 저응력에서는 약 20분 정도로 관찰했다(Fig. 3).

(4) 크리프 파단시험

크리프 파단시험에 적용된 온도와 응력조건을 열거하면 Table 4와 같다. Table 4에서 보는바와 같이 파단시간의 응력의존성(n')값을 측정하기 위해 일정온도에서 응력조건을 변화시켰고, 파단을 위한 활성화 에너지(Q_p) 측정을 위해 일정 초기응력에 대해 온도조건을 변화시켰다. 이 결과는 Table 5에 나타내었다.

(5) 온도변동하의 크리프 시험

실험방법은 320 kg하에서 온도만을 급속히 기준 온도보다 주기적으로 상승시키거나 하강시켜 실험을 했고, 실험조건을 Table 6과 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 τ/p (여기서 τ 는 기준온도에서의 부하 시간, p 는 주기)를 변수로 하여 일정하중에서 기준 온도보다 온도를 상승 또는 하강시키는 방법으로 행했다.

온도를 상승시키는 방법으로서의 시험기 자체의 가속장치에 의해 3.5°C/min의 속도로서, 또 하강시키는 방법으로서의 별도의 부속장치를 부착하여 수초동안씩 찬 공기를 분사함으로써 요구온도까지

Table 1 Chemical composition Wt. (%)

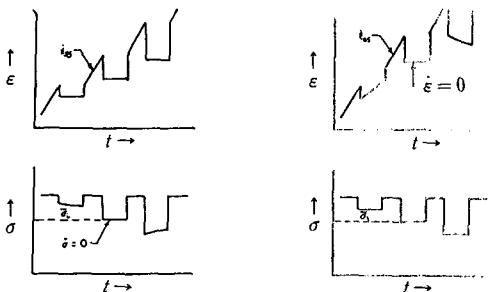
Material	Cu	Cr	Mn	Si	Fe	Zn	Mg	Ti
A17075	1.50	0.26	0.02	0.26	0.34	5.60	2.40	0.17

Table 2 Mechanical properties

Material	Yielding Strength (kgf/mm ²)	Tensile Strength (kgf/mm ²)	Elogation (%)	Hardness (BHN)
A17075	52.02	60.29	14	148

Table 3 Stress-Temperature

Temperature (°C)	Stress (kgf/mm ²)			
90 (0.4Tm)	10	12.5	15.1	17.2
100 (0.41Tm)	10	12.5	15.1	17.2
110 (0.42Tm)	10	12.5	15.1	17.2
120 (0.43Tm)	10	12.5	15.1	17.2
200 (0.52Tm)	8.13	8.51	8.91	9.55
210 (0.53Tm)	8.13	8.51	8.91	9.55
220 (0.54Tm)	8.13	8.51	8.91	9.55
230 (0.55Tm)	8.13	8.51	8.91	9.55
240 (0.56Tm)	8.13	8.51	8.91	9.55
280 (0.61Tm)	1.85	2.04	2.17	2.55
290 (0.62Tm)	1.85	2.04	2.17	2.55
300 (0.63Tm)	1.85	2.04	2.17	2.55
310 (0.64Tm)	1.85	2.04	2.17	2.55
320 (0.65Tm)	1.85	2.04	2.17	2.55
380 (0.72Tm)	1.53	1.66	1.78	1.91
390 (0.73Tm)	1.53	1.66	1.78	1.91
400 (0.74Tm)	1.53	1.66	1.78	1.91
410 (0.75Tm)	1.53	1.66	1.78	1.91
470 (0.82Tm)	0.64	0.76	0.89	1.02
480 (0.83Tm)	0.64	0.76	0.89	1.02
490 (0.84Tm)	0.64	0.76	0.89	1.02
500 (0.85Tm)	0.64	0.76	0.89	1.02



(a) STRESS TRANSIENT DIP TEST (b) STRAIN TRANSIENT DIP TEST

Fig. 3 "Dip test" for defining the internal stress

8.5°C/min의 속도로서 급냉시켰다. 온도 변동하의 크리프에 상당하는 구성방정식의 각 계수 및 지수를 구하기 위해서 Table 7의 조건으로 정크리프 실험을 행하고 온도변동하의 크리프 실험조건은 Table 6에 나타내었다.

(6) 활성화에너지의 측정

열역학적 상태함수로서 활성화에 대한 자유에너지, 즉 Gibbs의 자유에너지 ΔG를 쓰면 응력과 절대온도는 독립상태변수가 된다.

즉 ΔG=ΔG(σ, T)가 되고 등온조건에서는 이 상태함수가 다음과 같이 활성화엔탈피 ΔH에 관련된다.

Table 4 Stress-Temperature

Temperature(°C)	Stress(kgf/mm ²)			
200 (0.52T _m)	8.13	8.51	8.91	9.55
210 (0.53T _m)	8.13	8.51	8.91	9.55
220 (0.54T _m)	8.13	8.51	8.91	9.55
230 (0.55T _m)	8.13	8.51	8.91	9.55
240 (0.56T _m)	8.13	8.51	8.91	9.55
280 (0.61T _m)				2.55
290 (0.62T _m)				2.55
300 (0.63T _m)	1.85	2.04	2.17	2.55
310 (0.64T _m)				2.55
320 (0.65T _m)				2.55
380 (0.72T _m)		1.66		
390 (0.73T _m)	1.53	1.66	1.78	1.91
400 (0.74T _m)		1.66		
410 (0.75T _m)		1.66		

Table 5 Test data

Stress(kgf/mm ²)	Temp.(°C)	Creep life(hr)	Activation energy for feacture(kcal/mol)
8.13	200	440	36.35
	210	196.25	
	220	90.7	
	230	43	
8.51	200	320	35.35
	210	145	
	220	69	
	230	33.5	
8.92	200	230	34.34
	210	105	
	220	52.5	
	230	26	
9.55	200	145	33.29
	210	67	
	220	34	
	230	17.5	

Table 6 Temperature-Load

Reference temperature(°C)	Variable temperature(°C)	Period (τ/p)			Load (kg)	
250	280		3/7	4/7	5/7	320
	290		3/7	4/7	5/7	
	300		3/7	4/7	5/7	
	220			4/7		

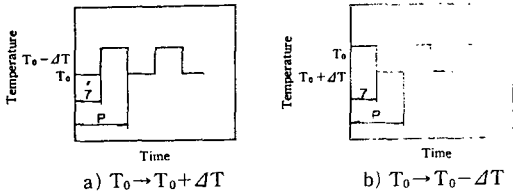


Fig. 4 Experimental condition

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (14)$$

여기서, ΔS 는 활성화 엔탈피이고 다음과 같다.

$$\Delta S = -\left. \frac{\partial \Delta G}{\partial T} \right|_{\sigma} \quad (15)$$

이 두 관계를 결합하면

$$Q = \Delta H = \frac{\partial(\Delta G/T)}{\partial(1/T)} \quad (16)$$

가 되고, Q 는 실험에서 측정되는 활성화에너지이다.

따라서 활성화에너지를 실험데이터에서 구하는 데 필요한 관계식이다.

이 활성화에너지를 써서 크리프의 변형률속도를 표시하면 다음과 같다.

$$\epsilon_s = k \exp(-Q_c/RT) \quad (17)$$

여기서, Q_c 는 크리프 활성화에너지, k 는 응력, 조직, 온도에 따른 함수, R 은 기체상수, T 는 절대온도이다.

위 식에서 Q_c 는 다음과 같이 된다.

$$Q_c = -R \left(\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}_s}{\partial(1/T)} \right)_{k, \sigma} \quad (18)$$

$$\text{혹은 } Q_c = \frac{R}{w} \left(\frac{\partial \ln \sigma}{\partial(1/T)} \right)_d \quad (19)$$

이 식에서 Q_c 를 구하는 방법은 두 가지가 있다. 첫째는 급속변환방법(temperature cycling method)으로 T_1 에서 크리프 시험중 ΔT 만큼 큰 T_1 로 온도를 갑자기 변화시켜 온도변화 전후의 크리프속도를 이용하여 온도변동하에서의 크리프 활성화에너지를 구하는 방법이다. 두번째 방법은 크리프 시험에서의 크리프속도와 온도의 역수($1/T$)의 좌표에서 기울기에 의한 방법(slope method)으로 정크리프상태하의 활성화에너지를 구하는 것이다. 활성화에너지의 측정결과는 Table 8에 나타내었다.

(7). 크리프 파단을 위한 활성화에너지 및 응력의 존성 계산

Table 7 Variable temperature-peirod

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

Table 8 Test data

Temp(°C)	stress(kgf/mm ²)	Activation Energy for creep(kcal/mol)
90~120	10.0	26.5
	12.5	26.2 (26.16)
	15.1	26.08
	17.2	25.86
200~240	8.13	36.61
	8.51	35.47 (34.96)
	8.91	34.39
	9.55	33.38
280~320	1.85	38.5
	2.04	36.64 (35.83)
	2.17	34.86
	2.55	33.26
380~410	1.53	37.4
	1.66	35.37 (34.97)
	1.78	34.06
	1.91	33.06
470~500	0.64	38.04
	0.764	36.77 (36.11)
	0.89	35.27
	1.02	34.37

크리프 수명의 응력과 온도의존성은 다음과 같다.

$$t_f = A' \sigma^n \exp(Q_f/RT) \quad (20)$$

여기서, t_f 는 파단시간, A' 는 재료, 응력, 온도의존성상수, n' 는 응력의존성지수, Q_f 는 크리프의 파단 활성화에너지이다.

위 식에서 온도를 일정하게 하면

$$n' = \frac{\log(t_{f2}/t_{f1})}{\log(\sigma_2/\sigma_1)} \quad (21)$$

여기서 t_{f1} , t_{f2} 는 각각 작용응력 σ_1 , σ_2 하에서 파단수명이다.

파단을 위한 활성화에너지는 식(20)에서 응력을

일정하게 두면 $\ln t_f - 1/T$ 곡선은 직선이 되고 다음과 같이 계산된다.

$$Q_f = R \times (\text{기울기}) \quad \text{kcal/mol} \quad (22)$$

계산에 필요한 실험데이터는 Table 5에 나타내었다.

(8) 응력지수 n 의 계산

응력지수의 값은 다음식에서 구한다.

$$n = \frac{\log(\dot{\epsilon}_2/\dot{\epsilon}_1)}{\log(\sigma_2/\sigma_1)} \quad (23)$$

여기서, 작용응력 σ_1 , σ_2 하에서 크리프 속도는 $\dot{\epsilon}_2$, $\dot{\epsilon}_1$ 이다.

응력지수 n 값은 대수변형률과 대수응력의 그래

Table 9 Tensile properties of the A17075 alloy.

Temperature (°C)	strain rate (pct/min)	Elastic Modulus (kgf/mm ²)	0.2pct offset Yield strength (kgf/mm ²)	0.1timate Ten sile strength (kgf/mm ²)	strain to Failure (pct)
90		5.01×10^5	42.5	43.9	7.5
100		4.9×10^5	30.5	31.2	6
110		4.8×10^5	22.5	22.7	7
200		3.8×10^5	15	15.5	12.1
210		3.77×10^5	13.2	13.4	14.3
220		3.74×10^5	11.7	13.2	15.2
230		3.71×10^5	10.4	10.6	18.1
280		3.55×10^5	7.1	7.5	30.5
290		3.53×10^5	6.45	6.55	33.9
300		3.51×10^5	5.9	6.25	37.6
310		3.49×10^5	5.4	6.06	36.5
380		2.56×10^5	3.78	4.14	53.2
390		2.55×10^5	3.53	3.76	49.2
400		2.54×10^5	3.3	3.6	52
410		2.53×10^5	3.10	3.24	30

프에서 직선의 기울기로 표시된다.

3.2 고온 인장시험

고온 인장시험에 사용된 시험편은 크리프 실험에 사용된 재료와 동일한 재료이고 파단에서 총 연신율은 25.4 mm 표점거리를 사용하여 측정했다. 실험에 사용된 실험조건과 결과는 Table 9에 표시했다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 활성화에너지의 각 변수 의존성

Fig. 5는 200, 240, 280, 320°C에서의 크리프 실험한 결과를 σ - z 좌표계에 나타낸 것이다. 식(8)은 σ 과 z 사이의 일정한 함수관계가 나타내어지는 것을 말하며 Fig. 5에서 보는 바와 같이 여러가지 온도와 여러가지 응력하에서 동일한 곡선을 나타내며

일정한 함수관계를 갖고있다. 따라서 A17075의 크리프 활성화에너지는 온도와 응력에 민감하지 않음을 알 수 있다. 만일 민감하다면 동일한 곡선을 형성할 수 없을 것이다.

Fig. 6은 10.19, 9.55, 8.92, 8.28 kgf/mm²에서 크리프 실험결과를 ϵ - θ 좌표계에 나타낸 것이다. 식(2)은 ϵ 과 θ 사이의 일정한 함수관계를 나타내며 Fig. 6에서 보는 바와 같이 각 응력에서 곡선의 양상이 동일하며 일정한 함수관계를 갖고 있다. 따라서 여기서도 A17075의 크리프의 활성화 에너지는 응력에 민감하지 않음을 알 수 있다.

Fig. 7은 200, 210, 220, 230 °C에서의 크리프 시험한 결과를 σ - θ 좌표계에 나타낸 것이다. 식(9)은 σ 와 θ 사이의 일정한 함수관계가 나타내어지는 것을 말하며 Fig. 7에서 보는 바와 같이 여러가지 온도와 변형률하에서 동일한 곡선을 나타내며 일정한 함수관계를 갖고 있다. 따라서 A17075의

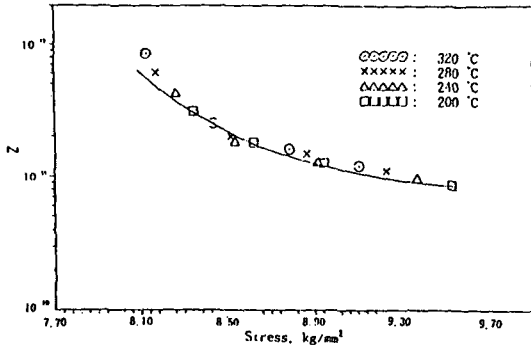


Fig. 5 Z versus stress

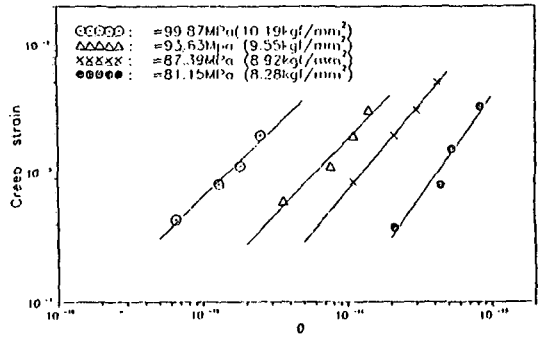


Fig. 6 θ versus Creep Strain

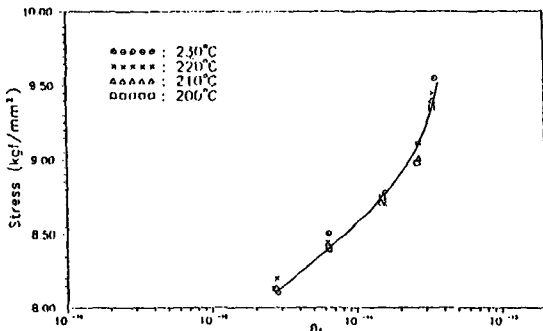


Fig. 7 θ_1 versus stress

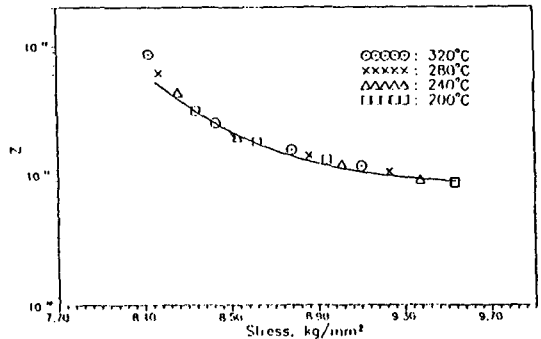


Fig. 8 Z versus stress with phenomenological model

크리프의 활성화 에너지는 온도와 변형률에 민감하지 않음을 알 수 있다.

Fig. 8은 200°C, 240°C, 280°C, 및 320°C에서 Miller에 의한 크리프 모델을 써서 $\sigma-z$ 곡선을 그린 것이며 Fig. 8에서 보는 바와 같이 $\sigma-z$ 의 상관관계는 실험 데이터에서의 상관관계인 Fig. 5와 잘 부합된다.

자유에너지 장애(sarrier)를 넘는 전위의 활성화 에너지에 바탕을 둔 이론모델인 식(1)에는 응력이 σ/T 의 함수로 크리프식에 들어간다. 그러나 실험 데이터에서의 $\sigma-\theta$, $z-\sigma$, $\theta_1-\sigma$ 관계에는 응력이 포함되고 σ/T 가 포함되지 않는다. 이것은 고온 크리프는 장애를 넘는 전위의 열적 활성화에 의해 이루어지는 것이 아님을 암시한다. Raj⁽⁶⁾는 Miller에 의해 유도된 현상론적, 온도의존적인 Gibbs의 자유에너지가 전위론에 의해 유도된 이론적, 응력의존적인 Gibbs의 자유에너지보다 크리프 데이터를 잘 만족한다고 연구결과를 보고하였다. 그러나 이것에 대한 전위론적인 설명은 남아 있다. 따라서 전위론에 의한 모델은 실험적 데이터에 바탕을 둔

연역(deduction)에 일치하지 않는 과정에 대한 모델이라고 생각되고, 이것에 반해 현상론적 모델은 잘 일치하고 A17075의 크리프 모델로서 적당하다고 생각된다. 이상에서 A17075합금의 크리프는 $\varepsilon=f(\theta)$ 의 함수관계에 의해 상관시킬 수 있다.

5. 결 론

A17075의 크리프실험을 하고 A17075의 고온 크리프의 활성화에너지의 의존성을 온도 보상시간과 Zener-Hollomon 매개변수를 써서 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) A17075의 정상 크리프의 활성화에너지는 온도, 변형률, 응력에 민감하지 않다.
- (2) A17075의 크리프 파단에 대한 활성화에너지는 온도의 변형률에 민감하지 않다.
- (3) Miller에 의한 현상론적 크리프 모델은 실험결과와 잘 부합된다.
- (4) A17075합금의 크리프는 $\varepsilon=f(\theta)$ 의 함수관계에 의해 상관시킬 수 있다.

참고문헌

- (1) Dorn, J.E., 1954, "Some Fundamental Experiments on High Temperature Creep," J. Mech. Phys. Solids, Vol. 3, pp. 85~116.
- (2) Kauzman, 1941, Nowick and Macklin 1947.
- (3) Garofalo, F., 1963, "An Empirical Relation Defining the Stress Dependence of Minimum Creep Rate in Metals," Trans. Metal, Soc. AIME, Vol. 227, pp. 351~356.
- (4) Miller, A., 1976, "An Inelastic Constitutive Model for Monotonic, Cyclic and Creep Deformation: Part-I Equations Development and Analytical Procedure," ASME J. of Engineering Materials and Technology, Vol. 98, pp. 97~105.
- (5) Fred, A.D., Raj, A.V. and Walker, K.P., 1992, "Stress Versus Temperature Dependence of Activation Energies for Creep," ASME J. of Engineering Materials and Technology, Vol. 114, pp. 46~50.