

Al 7075 합금의 크리이프 파단수명에 관한 연구(I) A Study on the Creep Fracture Life of Al 7075 alloy(I)

강 대 민*
Dae-Min Kang

ABSTRACT

High temperature tensile tests, steady state creep tests, internal stress tests and creep rupture tests using Al7075 alloy(T_m) were performed over the temperature range of $90^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$ ($0.4T_m \sim 0.85T_m$) and stress range of $0.64 \sim 17.2$ (kgf/mm^2).

The main results obtained in this paper were as follows.

- (1) The activation energies for yielding at the temperature of $0.4T_m \sim 0.75T_m$ were calculated to be $25.7 \sim 36.5$ Kcal/mol, which were nearly equal to the activation energies for creep.
- (2) At around the temperature of $90^\circ\text{C} \sim 120^\circ\text{C}$ and under the stress level of $10 \sim 17.2$ (kgf/mm^2), and at around the temperature of $200 \sim 410^\circ\text{C}$ and under the stress level of $1.53 \sim 9.55$ (kgf/mm^2) and again at around the temperature of $470 \sim 500^\circ\text{C}$ and under the stress level of $0.62 \sim 1.02$ (kgf/mm^2), the applied stress dependence of steady state creep rate n_{measu} measured were, respectively, 3.15, 6.62 and 1.1, which were in good agreement the calculated stress dependence n_{calc} obtained by the difference of the applied stress dependence of the internal stress and the ratio of the internal stress to the applied stress.
- (3) At the temperature range of $0.4 \sim 0.43T_m$ and at the temperature range of $0.52 \sim 0.75T_m$ and again at the temperature range of $0.82 \sim 0.85T_m$, the activation energies Q_{measu} obtained by steady state creep rate, respective, 26.16, 34.9, 36.2 and 36.1 Kcal/mol, which were in good agreement with those obtained with the activation energies under constant effective stress and the temperature dependence of internal stress.
- (4) At the temperature range of the $0.52 \sim 0.73T_m$ and under the stress level of $1.53 \sim 9.55$ (kgf/mm^2), the stress dependence of rupture life(n') measured was $6.3 \sim 6.6$, which was in good agreement with the stress dependence of steady state creep rate(n). And at the same condition the activation energy for rupture(Q_r) measured was $32.0 \sim 36.9$ Kcal/mol, which was also in good agreement with the

* 부산공업대학교 차량공학과

activation energy obtained by steady state creep rate(Q_c).

- (5) The rupture life(t_f) might be represented by athermal process attributed to the difference of the applied stress dependence of the internal stress and the ratio of the internal stress to the applied stress, and the thermal activated process attributed to the temperature dependence of the internal stress as

$$t_f = A' \sigma_a \{n(1-d\sigma_i/d\sigma_a)/(1-\sigma_i/\sigma_a)\} \cdot \exp[\{Q_c^* - (n_0RT^2/E_{(T)}) (dE_{(T)}/dT) - (n_0RT^2/\sigma_a - \sigma_i) (d\sigma_i/dT)\} / RT]$$

- (6) The relationship between Larson-Miller rupture parameter and logarithmic stress was linearly decreased, so creep rupture life of Al 7075 alloy seemed to be predicted exactly with Larson-Miller parameter.

1. 서 론

고온 상태하에서 사용되는 모든 장비들의 경우 그 수명 및 안전성이 중요시되는 것은 물론 특히 원자력 발전소의 안전의 문제는 아주 중요하다. 한국에서도 2000년대 이전에 모두 20 여개의 원자력 발전소가 건설될 예정과 관련하여 원자력 발전소의 건설은 물론 운영시에 발전설비 및 부품들의 안전성에 관한 연구 결과의 축적이 절실히 요구되나 선진국에서는 자국들의 원자력 발전소의 외국판매와 관련하여 그 실험결과를 비밀 취급하는 사례가 많다. 이런 상황속에서 건설을 계획하고 있는 국내 산업체에서도 국산설비를 제작하고 있는 실정에서 국내에 이들 재료의 사용상의 안전성 관계로 고온에서 크리이프 변형과 파단에 관한 연구가 절실히 필요하게 되었다.

크리이프 변형중 고온에서(0.8 T_m 이상) 주로 일어나는 확산크리이프에 관한 연구¹⁾로는 Nabarro와 Herring, Coble등에 의하여 고온이고 낮은 응력하에서 크리이프 변형이 용이하게 되는것은 작용된 응력에 의하여 유도된 원자들의 확산의 결과라고 제안하고 변형속도가 응력에 1차적으로 비례함을 보였다. 약 0.4~0.7 T_m 의 온도범위에서 발생하는 전위 크리이프에 관한 연구¹⁾로는 Lagneborg가 Mott에 의하여 제안된 회복 크리이프 이론을 전위 밀도의 온도와 응력의 의존성을 감안하여 이론식을 제시하였다. 또한 크리이프 거동에 관한 연구로는 Sherby²⁾는 크리이프 활성화 에너지에 관한 실험적 연구에서 시험도중 온도를 변화시킨 후 측정된 크리이프 온도 변화 전후의 크리이프 속도를 구해서 측정된 0.5~1.0 T_m 온도구간에서의 활성화 에너지

는 자기확산 활성화 에너지와 거의 동일하여 이 영역에서의 크리이프 변형기구는 전위상승에 의하고 온도의 증가에 따른 활성화 에너지의 증가는 탄성계수 감소에 따른 영향이라고 설명하였다. 그러나 Wilshire³⁾ 등은 Nimonic 80A와 Nimonic 105A의 Q_c 를 구한 경우 각각 462 및 515KJ/mol으로 이것은 유효응력 일정에서의 크리이프 활성화 에너지 Q_c^* 의 값(각각 305 및 310KJ/mol)에 비해 큰 값으로 측정되었고 이들의 Q_c^* 의 값은 자기확산의 활성화 에너지 Q_{sd} 와 거의 같은 값으로 나타나서 이 Q_c 의 증가는 내부응력의 온도 의존성에 기인한다고 시사했다.

크리이프 수명에 관한 연구중 파단 매개변수에 관한 연구⁴⁾로는 Larson-Miller 매개변수, Orr-Sherby-Dorn 매개변수, Manson-Haferd 매개변수와 Goldhoff-Sherby 매개변수 등 여러 연구가 있고 1983년에 E. Picco⁵⁾는 주조 Ni-기초합금 IN 738LC의 크리이프와 파단거동을 750~950°C 온도 범위에서 연구한 결과 파단은 시편표면에서 시작되는 산화된 입계균열의 전파에 의하여 일어나고 균열전파 속도는 합금의 변형거동에 의해서 지배된다고 주장했다.

한편 알루미늄 합금중 초강도 합금인 Al 7075 합금의 크리이프 특성에 관한 연구로는 J. D. Embury와 B. M. Wilcox⁶⁾에 의해 고온에서 정상크리이프 속도에 대한 미세조직의 영향을 설명되었지만 아직도 Al 7075 합금의 크리이프 특성에 관한 연구는 상당히 불충분한 실정이어서 이러한 크리이프 특성중 특히 크리이프 거동 및 파단수명 예측에 관한 연구가 시급한 실정이다.

본 연구에서는 Al 합금중 초 강도성질을 지닌 Al 7075 합금의 고온인장 실험, 정 크리이프 실험 및

응력이완 실험을 통하여 크리이프 파단수명을 외부 응력에 의한 비열적 과정과 온도에 의한 열적 활성화 과정의 복합으로 구하고 또한 Lanson-Miller 크리이프 파단 매개변수를 이용하여 Al 7075 합금의 파단수명을 보다 더 정확히 예측하는데 그 목적이 있다.

2. 이 론

2.1 응력지수

순수금속 및 2~3의 합금에 대해서 경험적으로 구한 Sherby-Dorn⁷⁾의 정상 크리이프 속도식은 다음과 같이 표시된다.

$$\dot{\epsilon}_s = A \sigma_n^a \exp(-Q_c/RT) \dots\dots\dots (1)$$

식(1)을 온도조건을 일정하게 두고 양변에 대수를 취해서 초기 부가응력 σ_{a1} , σ_{a2} 일때의 정상상태 크리이프 속도를 $\dot{\epsilon}_{s1}$, $\dot{\epsilon}_{s2}$ 으로 표시하면 응력지수 n는 다음과 같다.

$$n = \frac{\log(\dot{\epsilon}_{s2}/\dot{\epsilon}_{s1})}{\log(\sigma_{a2}/\sigma_{a1})} \dots\dots\dots (2)$$

J. K. Tien⁸⁾ 등은 부가응력을 유효응력($\sigma_e = \sigma_a - \sigma_i$), 부가응력 일정하에서 크리이프 활성화 에너지(Q_c)를 유효응력 일정하에서의 크리이프 활성화 에너지(Q_c^*)으로 표시하고 E_T 를 포함시켜 식(1)을 식(3)으로 일반화시켰다.

$$\dot{\epsilon}_s = A' \left(\frac{\sigma_a - \sigma_i}{E_T} \right)^{n_0} \cdot \exp(-Q_c^*/RT) \dots\dots\dots (3)$$

식(2)를 증분으로 표시하고 식(3)을 대입하면 n와 n_0 의 관계는 다음과 같이 유도된다.

$$n = n_0 \left[1 - \left(\frac{d\sigma_i/d\sigma_a}{1 - \sigma_i/\sigma_a} \right)_T \right] \dots\dots\dots (4)$$

2.2 크리이프의 활성화 에너지

식(1)에서 응력에 따른 일정상수값을 B_1 으로 하면 식(5)로 나타낼 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_s = B_1 \exp(-Q_c/RT) \dots\dots\dots (5)$$

두 온도구간이 크지않으면 B_1 은 일정하다고 가정할 수 있어 활성화 에너지 Q_c 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_c = R \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln(\dot{\epsilon}_{s2}/\dot{\epsilon}_{s1}) \dots\dots\dots (6)$$

식(5)을 변형하면

$$\ln \dot{\epsilon}_s = \ln B_1 - (Q_c/R) (1/T) \dots\dots\dots (7)$$

가 되고 식(7)은 $\ln \dot{\epsilon}_s - 1/T$ 의 좌표에서 직선으로 표시되어 이 직선의 기울기는 $-Q_c/R$ 가 되어 활성화 에너지는 다음과 같이 계산된다.

$$Q_c = -R \times (\text{기울기}) \text{ (KJ/mol)} \dots\dots\dots (8)$$

식(6)을 미분형태로 표시하고 여기에 식(3)을 대입하면 식(9)으로 된다.

$$Q_c = Q_c^* \frac{n_0 RT^2}{E_T} \frac{dE}{dT} - \frac{n_0 RT^2}{(\sigma_a - \sigma_i)} \frac{d\sigma_i}{dT} \dots\dots\dots (9)$$

식(9)는 다음과 같은 식으로 간략하게 표현할 수 있다.

$$Q_c = Q_c^* + K_E + K_i$$

여기서 $K_E = -(n_0 RT^2/E_T) (dE_T/dT)$
 $K_i = -[n_0 RT^2/(\sigma_a - \sigma_i)] (d\sigma_i/dT)$

2.3 크리이프 파단수명을 위한 활성화 에너지와 응력지수

많은 금속이나 합금에서 정상 크리이프 속도와 파단시간과의 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$t_f = (C/\dot{\epsilon}_s)^\alpha \dots\dots\dots (10)$$

여기서 $\alpha = 1$ 이라면 크리이프 수명에 대한 응력과 온도의 의존성은 식(1)과 식(10)에서 다음과 같이 정리된다.

$$t_f = A' \sigma_a^{n'} \exp(Q_f/RT) \dots\dots\dots (11)$$

식(11)에서 파단시간의 부가응력의존성 n' 를 구하기 위해 온도조건을 일정하게 두고 작용응력 σ_1 , σ_2 하에서의 파단수명을 각각 t_{f1} , t_{f2} 으로 두면 n' 는 다음과 같이 된다.

$$n' = \frac{\log(t_{f2}/t_{f1})}{\log(\sigma_2/\sigma_1)} \dots\dots\dots (12)$$

식(11)에서 응력조건을 일정하게 두고 Q_f 는 다음 식(13)에 의하여 구할 수 있다.

$$Q_f = R \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \left(\frac{t_{f2}}{t_{f1}} \right) \dots\dots\dots (13)$$

2.4 Larson-Miller 매개변수

크리이프 파단수명, 부가응력과 온도사이의 관계는 식(14)와 같다.

$$f(\sigma, t_R, T) = \text{Constant} \dots\dots\dots (14)$$

식(14)를 다시 표현하면

$$f(t_R, T) = P(\sigma) \dots\dots (15) \text{ 가 된다.}$$

식(5)와 (10)에서

$$A_{TR} \exp(-H/RT) = \text{Constant} \dots\dots\dots (16)$$

H를 응력만의 함수라고 가정해서 양변에 로그를 취하고 정리하면

$$T(C + \log_{10} t_R) = 0.434 \times H/R \dots\dots\dots (17)$$

따라서 식(17)은 식(18)으로 표현되고 여기서 $P_{L.M}(\sigma)$ 는 응력만의 함수인 Larson-Miller 외삽 파라메타이다.

$$T(C + \log t_R) = P_{L.M}(\sigma) \dots\dots\dots (18)$$

3. 실험방법 및 결과

3.1 시편

고온 인장시험, 정 크리이프 실험, 내부 응력측정 및 크리이프 파단시험에 사용했던 재료는 T₆ 열처리한 Al 7075 합금으로서 열처리 조건 및 재료의 화학적 성분과 기계적 성분은 각각 Fig. 1, Table

1, Table 2에 표시했다. Table 1, 2의 아랫칸에 표시되어있는 값은 'Aluminum standard & data'에서 참조한 것으로 실험에 사용된 Al 7075 합금재료는 표준 Al 7075 합금과 거의 비슷한 성질을 가지는 재료를 사용했다. 인장 시험은 Tinus Olsen사의 Super-L 인장시험기를 이용하여 10mm/min속도로 행했고 경도시험은 Detroit Testing M/C Co.사의 HB-2Brinell 경도계를 이용하여 실시했고 화학성분 분석은 발광분광 분석장치(spectrometer)를 사용했다.

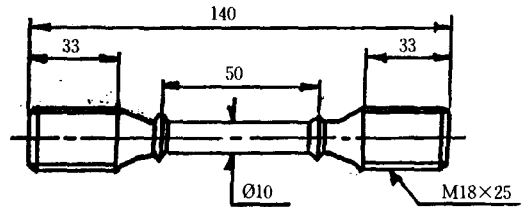


Fig. 1 Creep specimen(mm)

Table 1 Chemical composition Wt. (%)

Material	Cu	Cr	Mn	Si	Fe	Zn	Mg	Ti
Al 7075	1.48	0.18	0.02	0.12	0.19	5.49	2.4	0.14
	1.2-2.0	0.18-0.35	0.30	0.40	0.50	5.1-6.1	2.1-2.9	0.20

Table 2 Mechanical properties

Material	Y/S(kgf/mm ²)	T/S(kgf/mm ²)	Elongation(%)	Hardness(BHN)
Al 7075	52.70	62.20	17	147
	51.33	58.37	11	150

3.2 고온 인장시험

Al 7075 합금의 고온에서의 물성치, 즉 최대 인장강도, 탄성계수, 항복강도의 온도 의존성 등을 측정하기 위하여 고온 인장시험이 실시되었고 실험조건과 결과⁹⁾는 Table 3에 표시했다. 여기서 보면 탄성계수는 온도가 증가함에 따라 감소하고 고온이 될수록 탄성계수의 온도 의존성은 적게 나타났다. 또한 최대 인장강도와 항복강도는 온도 증가에 따라 감소하고 파단 연신율은 온도가 증가함에 따라 대체적으로 증가하였다. Fig. 2는 항복강도의 온도의존성을 구하기 위해 항복강도와 온도관계를 나타낸 그래프로서 저온일수록 항복강도가 급격히 떨어져 항복강도의 온도 의존성이 크고 온도의 함수로

서 항복강도의 감소는 온도 전 범위에 걸쳐 비선형적이다. Fig. 3은 Table 3에 표시되어 있는 항복강도와 탄성계수의 값을 $\ln(\sigma_y/E) - 1/T$ 좌표상에 나타낸 것으로 항복의 결보기 활성화 에너지는 이러한 그래프의 기울기에 일반 기체상수 R 값을 곱하여 구할 수 있고 이 값에서 항복의 활성화 에너지는 다음 식(19)에 의하여 구할 수 있다.

$$Q_y = n Q_y' \dots\dots\dots (19)$$

여기서 구한 항복의 결보기 활성화 에너지 Q_y' 는 약 5.4~8.3Kcal/mol정도로 계산되었고 0.4T_m~0.75T_m의 온도조건에서 응력지수값이 3.15~6.62임을 고려하여 구한 항복의 활성화 에너지는 25.7~36.5Kcal/mol로 나타나 이 값은 크리이프 활성화 에너지 26.0~36.0Kcal/mol 값과 거의 같은 범

Table 3 High temperature tensile properties of the Al 7075 alloy

Temperature (°C)	Strain rate (S ⁻¹)	Elastic modulus (kgf/mm ²)	0.2pct.off-set yield strength (kgf/mm)	Ultimate tensile strength (kgf/mm)	Strain to Failure (%)
90	1×10 ⁻³	5.01×10 ⁵	42.50	43.90	7.50
100		4.90×10 ⁵	30.50	31.20	6.00
110		4.80×10 ⁵	22.50	22.70	7.00
200		3.80×10 ⁵	15.50	15.50	12.10
210		3.77×10 ⁵	13.20	13.40	14.30
220		3.74×10 ⁵	11.70	13.20	15.20
230		3.71×10 ⁵	10.40	10.60	18.10
280		3.55×10 ⁵	7.10	7.50	30.50
290		3.53×10 ⁵	6.45	6.55	33.90
300		3.51×10 ⁵	5.90	6.25	37.60
310		3.49×10 ⁵	5.40	6.06	36.50
380		2.56×10 ⁵	3.78	4.14	53.20
390		2.55×10 ⁵	3.53	3.76	49.20
400		2.54×10 ⁵	3.30	3.60	52.00
410		2.53×10 ⁵	3.10	3.10	30.00

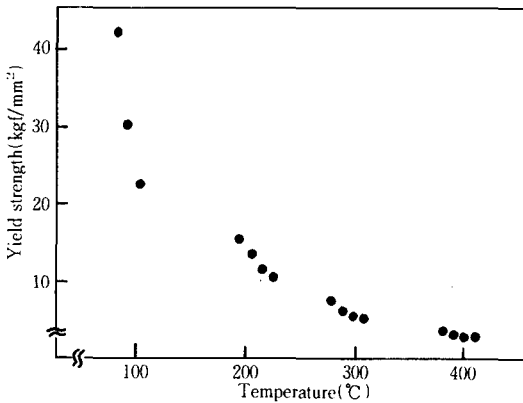


Fig. 2 Temperature dependence of yield strength

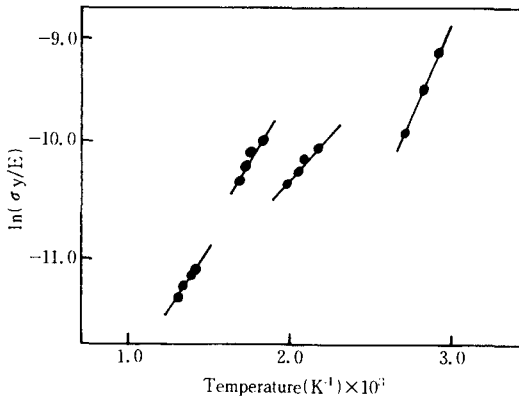


Fig. 3 Arrhenius representation of the yield strength data

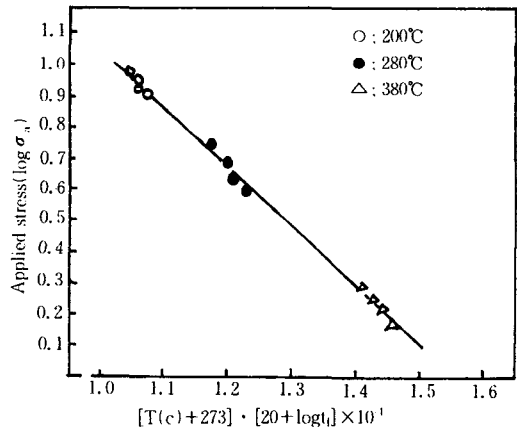


Fig. 4 Variation of logarithmic stress with Lason-Miller parameter for creep rupture tests

위에 있다. 이 결과는 온도 0.4~0.75T_m 조건에서 1차 크리이프 변형율이 아주 작아 이것은 고온에서 항복중에 1기 크리이프는 무시할 수 있고 1차와 정상상태 크리이프 중에서 변형기구가 동일하다고 추측된다.

3.3 정 크리이프 실험

크리이프 시험기는 동경 시험기기 회사의 모델 (CRL-3000)로 최대허용 하중은 3톤, 레버비는 1 : 20이다. 로의 사용온도는 최고 850°C이고 시험편

Table 4 Stress temperature experiment condition of steady state creep

Temp. (°C)(T _m)	Stress(kgf/mm ²)				Temp. (°C)(T _m)	Stress(kgf/mm ²)			
90(0.40)	10.00	12.50	15.10	17.20	300(0.63)	1.85	2.04	2.17	2.55
100(0.41)	"	"	"	"	310(0.64)	"	"	"	"
110(0.42)	"	"	"	"	320(0.65)	"	"	"	"
120(0.43)	"	"	"	"	380(0.72)	1.53	1.66	1.78	1.91
200(0.52)	8.13	8.51	8.91	9.55	390(0.73)	"	"	"	"
210(0.53)	"	"	"	"	400(0.74)	"	"	"	"
220(0.54)	"	"	"	"	410(0.75)	"	"	"	"
230(0.55)	"	"	"	"	470(0.82)	0.64	0.76	0.89	1.02
240(0.56)	"	"	"	"	480(0.83)	"	"	"	"
280(0.61)	1.85	2.04	2.17	2.55	490(0.84)	"	"	"	"
290(0.62)	"	"	"	"	500(0.85)	"	"	"	"

에 PR 열전대를 부착하여 시험온도를 설정하고 자동온도 조절장치로서 ±1°C 범위에서 일정하게 유지했다. 시편의 변형율과 시편온도는 자동적으로 차트에 기록된다. 실험조건⁹⁾은 Table 4와 같이 일정온도에서 부가응력 조건을 변화시키고 일정부가응력에 대하여 온도 조건을 변화 시켰다. 여기서 응력지수 값을 구하기 위해 다음 식을 이용했고 $\dot{\epsilon}_{s1}$ 및 $\dot{\epsilon}_{s2}$ 는 작용응력 σ_1 , σ_2 하에서의 크리이프 속도이다.

$$n = \frac{\log(\dot{\epsilon}_{s2}/\dot{\epsilon}_{s1})}{\log(\sigma_2/\sigma_1)} \dots\dots\dots (20)$$

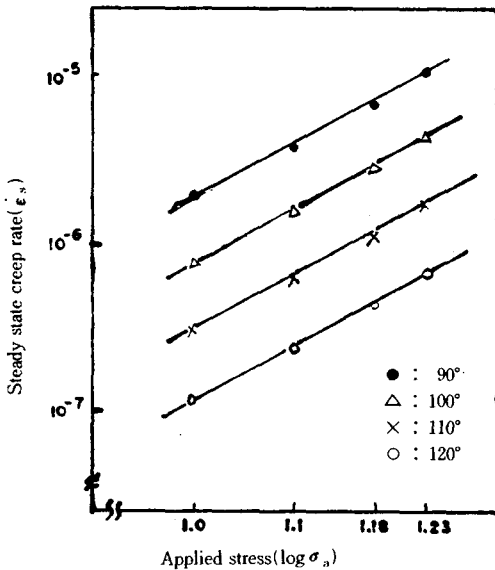


Fig. 5 Applied stress dependence of creep rate for 90°C~120°C

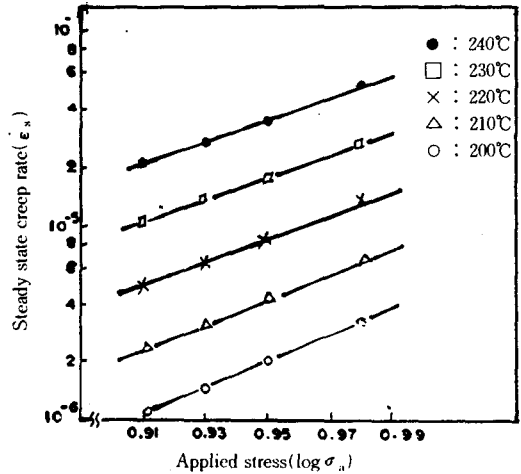


Fig. 6 Applied stress dependence of creep rate for 200°C~240°C

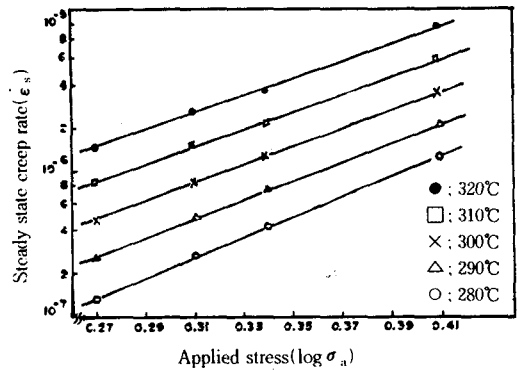


Fig. 7 Applied stress dependence of creep rate for 280°C~320°C

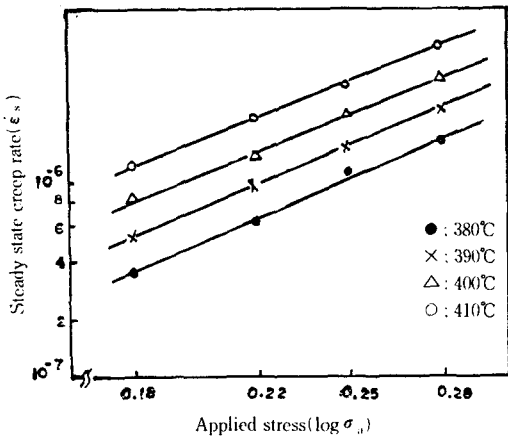


Fig. 8 Applied stress dependence of creep rate for 380°C ~ 410°C

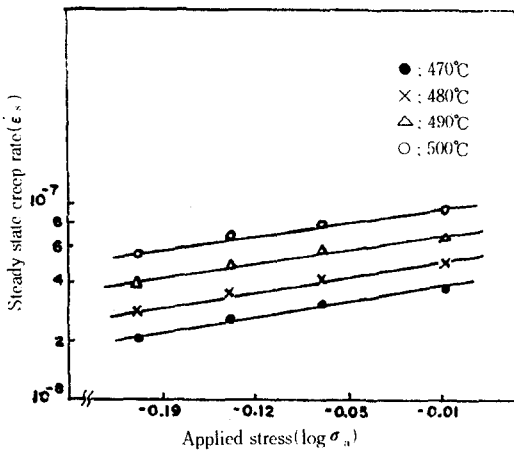


Fig. 9 Applied stress dependence of creep rate for 470°C ~ 500°C

Fig. 5~9는 온도조건 90°C~500°C에서 정상 크리이프 속도의 부가응력 의존성(n)을 구하기 위하여 정상 크리이프 속도와 부가응력사이의 관계를 나타낸 것으로 n 값은 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향이 나타났다. 이 결과에서 온도조건 90~120°C, 응력조건 10~17.2(kgf/mm²)인 경우의 정상 크리이프 속도와 부가응력과의 관계는 대수좌표에서 멱함수 법칙이 잘 만족하고 n 값은 약 3.15로 나타났다. 온도조건 200°C~410°C, 응력조건 1.53~9.55(kgf/mm²)인 경우의 정상상태 크리이프 속도와 부가응력사이의 관계는 대수좌표에서 멱함수 법칙을 잘 만족하고 측정된 응력지수 n 값은

Lagneborg¹³⁾, Weertman¹⁴⁾, Barrett와 Nix¹⁵⁾의 이론에서 설명한 전위상승이 변형을 주도할 때의 Al의 4~5의 값보다 높은 6.62의 값으로 나타났다. 이것은 석출물에 의한 흐름 응력의 증가로 추측되고 대부분의 석출경화형 합금의 경우 응력지수 값이 5~15의 큰 값을 갖는 것이 실험적으로 측정되었다. 온도조건 470°C~500°C, 응력조건 0.62~1.02(kgf/mm²)에서는 Nabarro-Herring¹⁶⁾과 Coble¹⁷⁾에 의해서 제안된 것으로 확산이 주로 변형을 주도할 경우 응력지수값 1에 가까운 1.1의 값으로 측정되었다.

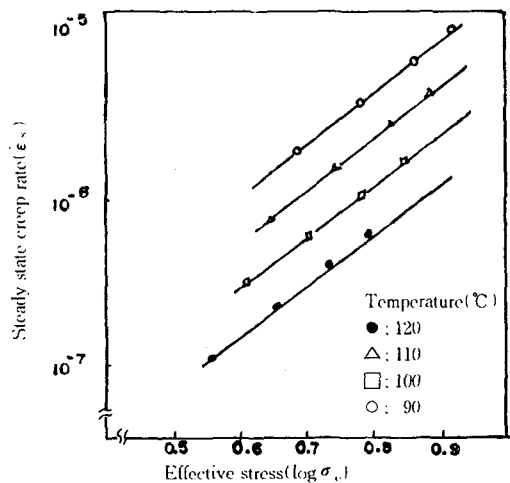


Fig. 10 Effective stress dependence of creep rate for 90°C ~ 120°C

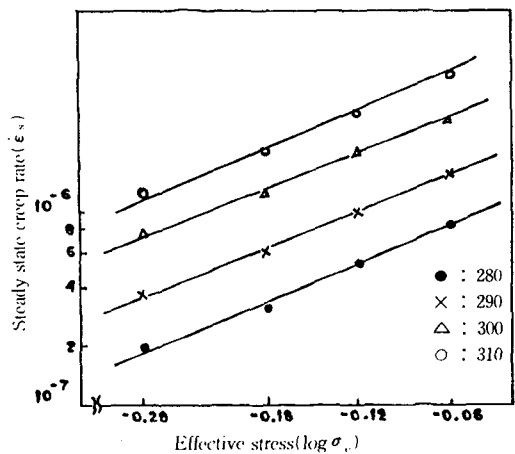


Fig. 11 Effective stress dependence of creep rate for 280°C ~ 310°C

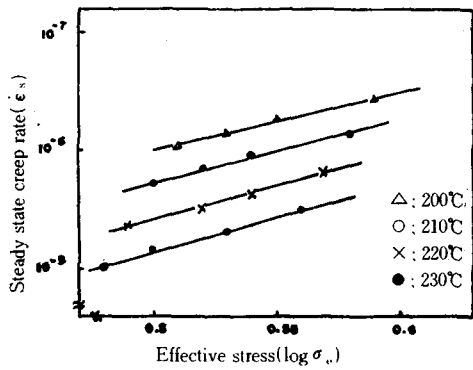


Fig. 12 Effective stress dependence of creep rate for 200°C ~ 230°C

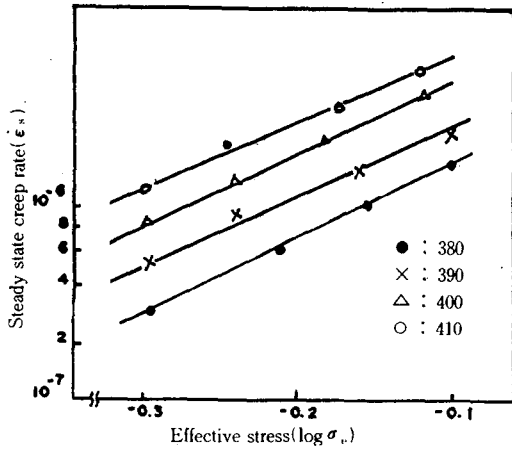


Fig. 13 Effective stress dependence of creep rate for 380°C ~ 410°C

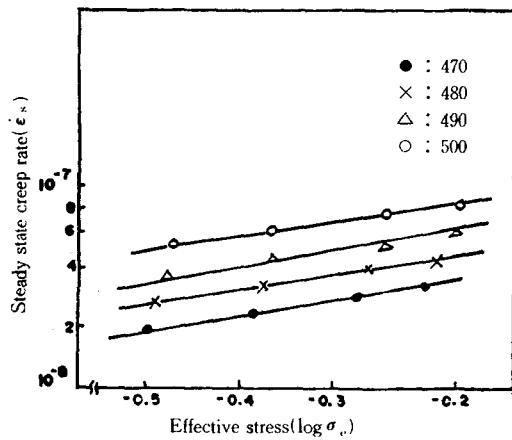


Fig. 14 Effective stress dependence of creep rate for 470°C ~ 500°C

Fig. 10~14는 유효 응력의존성(n_0)의 값을 측정하기 위해서 온도범위 90°C ~ 500°C에서의 크리이프 속도와 유효응력 사이의 관계를 나타낸 것으로 n_0 의 값은 다음 식(21)에 의해서 구했다. 여기서 유효응력은 시험중 가해지는 응력의 일부를 제거하여 $d\dot{\epsilon}/dt = 0$ 인 응력을 찾는 시험인 응력이완 방법(stress transient dip test tech.)에서 내부응력을 측정하여 부가응력에서 내부응력을 제한 값으로 사용했다.

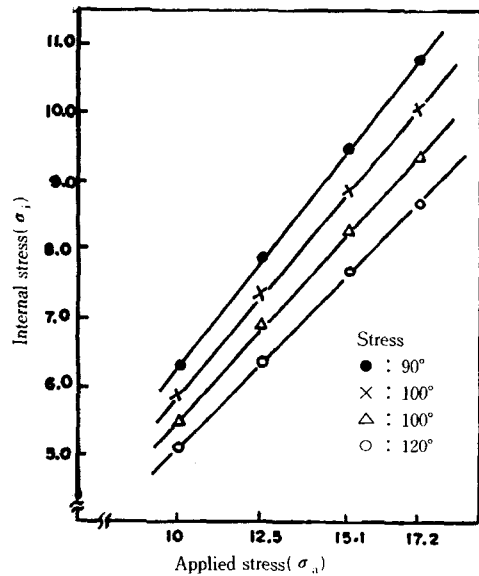


Fig. 15 Internal stress dependence of the applied stress for 90°C ~ 120°C

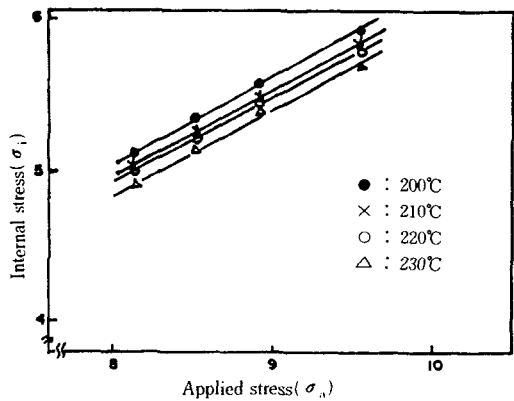


Fig. 16 Internal stress dependence of the applied stress for 200°C ~ 230°C

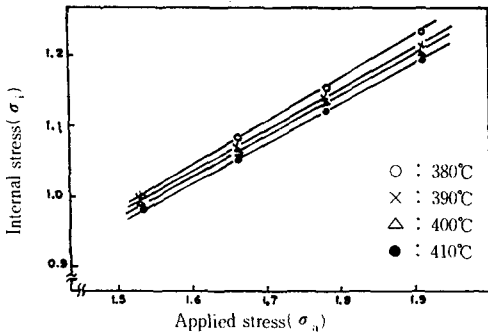


Fig. 17 Internal stress dependence of the applied stress for 380°C ~ 420°C

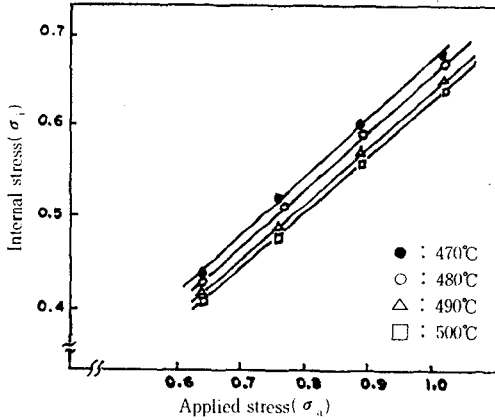


Fig. 18 Internal stress dependence of the applied stress for 470°C ~ 500°C

$$n_0 = \frac{\log(\dot{\epsilon}_{s2}/\dot{\epsilon}_{s1})}{\log(\sigma_{e2}/\sigma_{e1})} \dots\dots\dots (21)$$

Fig. 15~Fig. 18은 식(4)에 언급되어있는 $n_{calc.}$ 값을 구하기 위해 여러 온도조건에서 내부응력과 부가응력의 관계를 나타내었다. 여기서 구한 $d\sigma_i/d\sigma_a$ 및 σ_i/σ_a 의 값과 n_0 를 고려해서 구한 n 값 ($n_{calc.}$)과 식(2)에서 구한 n 값($n_{meas.}$)을 이용하여 $n_{meas.}$ 값과 $n_{calc.}$ 값과의 관계를 Fig. 30에 표시했고 여기서 상호값은 거의 잘 대응하고 있어 n_0 , $d\sigma_i/d\sigma_a$ 및 σ_i/σ_a 를 측정하여 정상 크리이프 속도의 부가응력의존성(n)을 예측할 수 있다.

Fig. 19~23은 온도조건 90°C ~ 500°C 하에서의 활성화 에너지를 구하기 위하여 대수 정상크리이프 속도와 온도의 역수사이의 관계를 나타낸 것이고 Al 7075 합금의 자기확산 에너지 Q_d 는 대부분 제

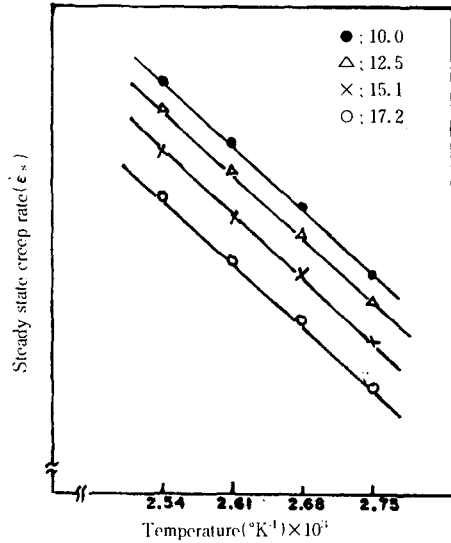


Fig. 19 Temperature dependence of steady state creep rate for constant applied stress

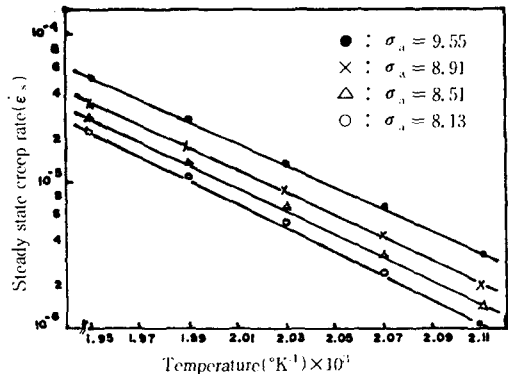


Fig. 20 Temperature dependence of steady state creep rate for constant applied stress

료에 대해 경험식인 $Q_d/T_m = 36\text{cal}/^\circ\text{K}$ 를 이용하여 Al 7075 합금의 용융온도 T_m 가 638°C임을 고려할때 Al 7075 합금의 자기확산 에너지는 33Kcal/mol로 된다. 실험 결과치를 보면 응력이 증가할수록 활성화 에너지는 감소하는 경향을 나타내고 이것은 외부응력이 크리이프 변형을 저지하는 장애를 낮게하는 것으로 이러한 사실은 Seeger¹⁸⁾, Breen과 Weetman¹⁹⁾, Vladimira²⁰⁾ 및 M. Gold²¹⁾ 등의 연구결과와 일치한다.

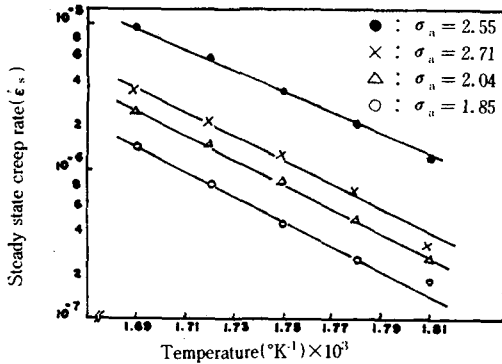


Fig. 21 Temperature dependence of steady state creep rate for constant applied stress

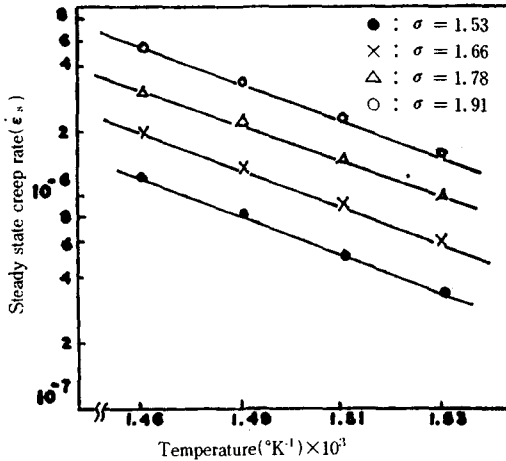


Fig. 22 Temperature dependence of steady state creep rate for constant applied stress

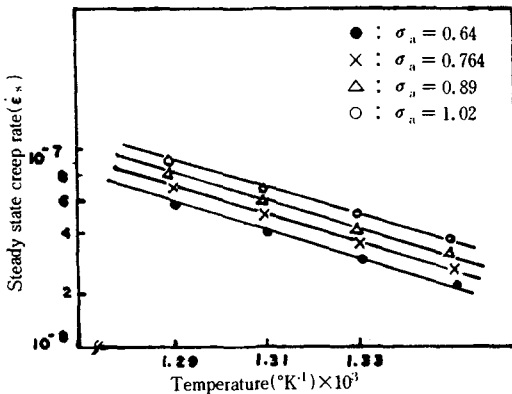


Fig. 23 Temperature dependence of steady state creep rate for constant applied stress

0.4 T_m ~0.85 T_m 에서 활성화 에너지로서 변형을 주도하는 기구를 고찰하면 먼저 0.5 T_m 이하의 저온 크리이프, 즉 0.4 T_m ~0.43 T_m 의 측정된 활성화 에너지는 평균 26.16Kcal/mol로서 Al의 자기확산에 필요한 활성화 에너지 33Kcal/mol보다 적게 나타났다. J. P. Dorn과 Jaffe²²⁾의 연구에서 Al의 온도가 0.4 T_m 부근에서는 활성화 에너지가 27.4Kcal/mol로서 Friedel의 교차슬립에 필요한 활성화 에너지 계산값과 잘 일치했다. 또한 S. K. Mondal¹⁰⁾은 0.45 T_m 에서 Al에 대한 2.63kgf/mm², 그리고 그 이상에서 29.5Kcal/mol로 나타나 전위조직의 관찰에 의해 교차슬립과정으로 결론을 맺어 이러한 결과를 종합해 보면 Al 7075 합금에서 온도가 0.4 T_m ~0.43 T_m 의 변형기구는 교차슬립과정으로 추측된다.

온도 0.52 T_m ~0.75 T_m 조건에서의 활성화 에너지는 34.9~36.2Kcal/mol로서 Al의 Q_{sd} 와 거의 일치하고 이러한 결과는 Sherby의 다결정 Al재료를 사용한 실험결과에서 Q_c 는 0.5 T_m 이상에서 Q_{sd} 와 거의 일치하며 이 구간에서의 변형기구는 전위상승

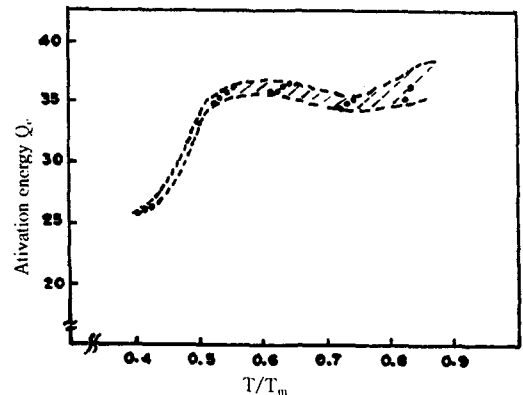


Fig. 24 T/T_m dependence of activation energy Q_c

에 의한다고 하여 실험결과를 뒷받침한다.

온도 0.82 T_m ~0.85 T_m 조건에서의 활성화 에너지는 36.1Kcal/mol로서 Al의 Q_{sd} 와 거의 일치하고 이 온도영역에서는 Sherby와 Burke¹¹⁾, Nabarro와 Herring¹⁶⁾, 그리고 Coble¹⁷⁾등에 따르면 금속내의 전위는 회복과 재결정에 의하여 쉽게 소멸되고 크리이프 변형은 주로 작용된 응력에 의하여 유도된 원자들의 확산에 의한 결과로 Q_c 는 Q_{sd} 와 같음을

보였고 이것은 실험결과와 잘 일치하며 이러한 실험결과를 Fig. 24에서 온도에 따른 Q_c 의 변화를 나타내었다.

Fig. 25~Fig. 28은 일정 유효응력 상태에서의 활성화 에너지(Q_c^*)값을 구하기 위해서 일정 유효응력 조건에서의 온도변화에 대한 정상 크리이프 속도의 관계를 나타낸 것으로 여기서 유도된 식(22)에 의해서 구했다.

$$Q_c^* = R \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln(\dot{\epsilon}_{s2} / \dot{\epsilon}_{s1}) \Big|_{\sigma_c} \dots (22)$$

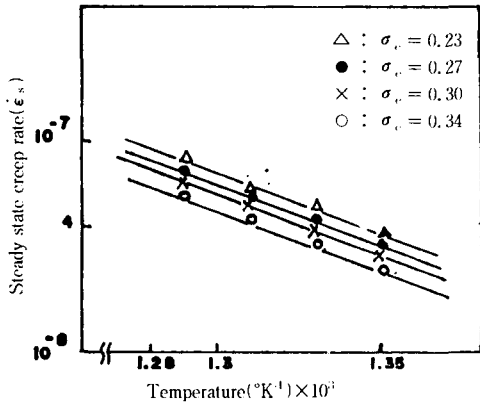


Fig. 25 Temperature dependence of steady state creep rate for constant effective stress

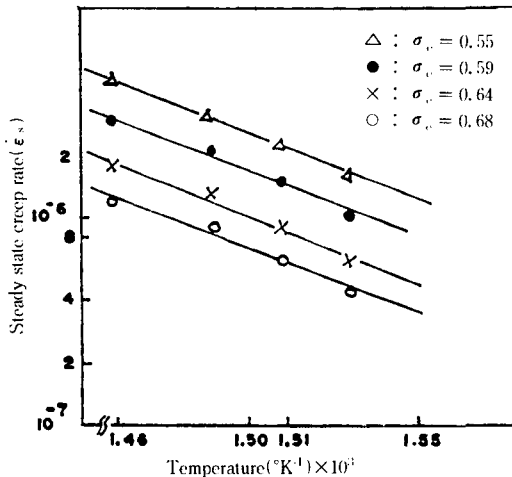


Fig. 26 Temperature dependence of steady state creep rate for constant effective stress

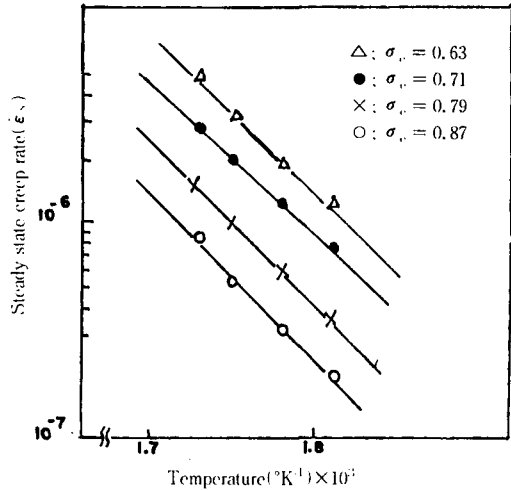


Fig. 27 Temperature dependence of steady state creep rate for constant effective stress

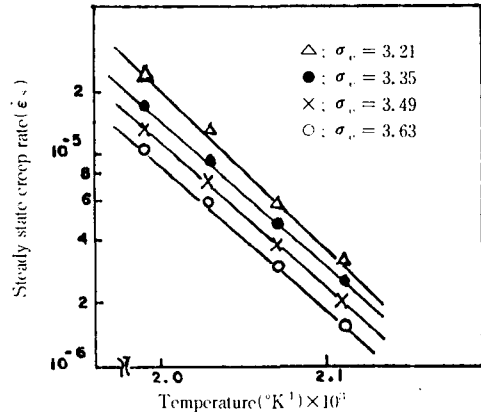


Fig. 28 Temperature dependence of steady state creep rate for constant effective stress

위의 식(22)은 일정 유효응력 상태하에서 $\ln \dot{\epsilon}_s - 1/T$ 의 좌표에서 직선으로 표시되고 이 직선의 기울기는 $-Q_c^*/R$ 로 표시되고 Q_c^* 는 다음 식(23)에 의해서 계산된다.

$$Q_c^* = -R \times (\text{기울기}) \text{ (KJ/mol)} \dots (23)$$

이렇게 해서 구한 Q_c^* 값과 Q_c 의 관계는 식(9)에 언급하였듯이 탄성계수의 온도의존성(K_E)과 내부응력의 온도의존성(K_I)항으로 표시되기 때문에 K_E 와 K_I 에 대해 실험 결과를 고찰하면 우선 K_E 항과 K_I 항에서 $90^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$ 에서의 K_E 값은 1.7~

2Kcal/mol의 범위에 있고 K_1 값은 5~8Kcal/mol로 나타나 Q_c 와 Q_c^* 의 차이는 K_E 보다 K_1 의 크기에 기인한다고 추측된다. 식(9)에서 구한 값을 $Q_{c(calcu.)}$ 라 하고 식(8)에서 구한 값을 $Q_{c(measu.)}$ 라고 하여 계산한 결과 $Q_{measu.}$ 값은 26.16~36.11Kcal/mol로 나타나 K_E 값이 적기에 무시한 $Q_c^* + K_1$ 값으로 계산한 $Q_{calcu.}$ 값인 28.11~34.94Kcal/mol과 거의 일치했다.

3.4 크리이프 파단실험

파단수명의 응력의존성과 파단을 위한 활성화 에너지는 Table 5에 표시되어 있는 온도, 응력, 파단

시간의 자료에서 각각 식(12), (13)에 의하여 구했고 여기서 측정된 n' 값은 약 6.3~6.6으로 정상상태 크리이프 속도에 대한 응력의존성 n 값의 결과와 거의 같은 값으로 계산되었고 파단을 위한 활성화 에너지 Q_f 값은 약 32~36.9으로서 정상상태에서 측정된 활성화 에너지 Q_c 와 거의 일치했다.

Fig. 29는 정상 크리이프 속도와 파단시간과의 관계를 나타낸 그래프이다. 가로축을 파단시간을, 세로축을 정상 크리이프 속도를 두면 서로 선형적으로 반비례함을 알 수 있고 $t_f \cdot \dot{\epsilon}_s$ 값은 응력과 온도에 관계없이 일정상수 0.13으로 계산되었다. 이러한 실험결과는 다음과 같이 Ashby, Monkman과 Grant, Raj의 이론²⁵⁾에서 설명할 수 있다.

Table 5 Stress temperature experiment condition and results for creep rupture

Temp. (°C) (T_m)	Stress(kgf/mm ²)				Creep rupture time(hr)			
200(0.52)	8.13	8.51	8.91	9.55	440	320	230	145
210(0.53)	"	"	"	"	196.3	145	105	67
220(0.54)	"	"	"	"	90.7	69	52.5	34
230(0.55)	"	"	"	"	43	33.5	26	17.5
280(0.61)	4.00	4.46	4.78	5.67	162	81.4	52.8	17.9
290(0.62)	"	"	"	"	89.2	46.5	30.8	10.7
380(0.72)	1.53	1.66	1.78	1.91	225	132	80.7	52
390(0.73)	"	"	"	"	149	88.1	55	36

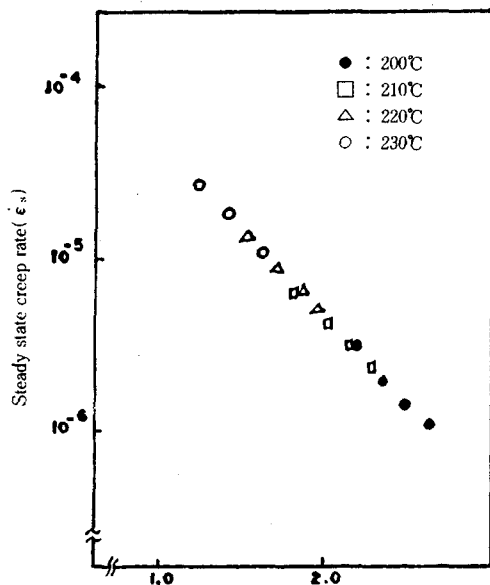


Fig. 29 Relation between the rupture time and steady state creep rate($\dot{\epsilon}_s$)

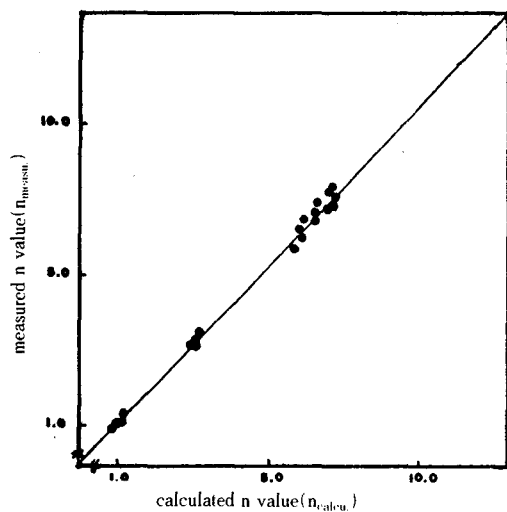


Fig. 30 Relationship between measured and calculated n value by using eq. (4)

Ashby는 파단시간(t_f)과 정상상태 크리이프 속도($\dot{\epsilon}_s$)의 관계를 $t_f = (\dot{\epsilon}_n + \dot{\epsilon}_g) / \dot{\epsilon}_t$ 으로 표시하여

$\dot{\epsilon}_n$ 과 $\dot{\epsilon}_g$ 를 측정된 결과 식(24)으로 표시하였다.

$$t_f = \left\{ \epsilon + (1/1.8) \cdot (\mu/\mu_{+1}) \cdot \ln \right. \\ \left. (0.7/f_{1/2}-1) \right\} \cdot (\dot{\epsilon}_s)^{-1} \dots\dots\dots (24)$$

여기서 f_n 는 입내 개재물의 부피, $\dot{\epsilon}_n$ 과 $\dot{\epsilon}_g$ 는 각각 핵생성 변형률, 성장 변형률이다.

Monkman과 Grant는 실험을 다양하게 하여 파단 시간과 정상상태 크리이프 속도사이의 관계는 아래와 같이 비례관계가 성립함을 밝혔다.

$$\dot{\epsilon}_s \cdot t_f = C_{MG} \dots\dots\dots (25)$$

여기서 C_{MG} 는 Monkman-Grant 상수이다.

또한 Raj는 실리카 입자를 함유하는 구리를 실험하여 파단시간을 다음과 같이 표현했다.

$$t_f = \left(\frac{1-A_0}{1-48} \right) \cdot (\dot{\epsilon}_s)^{-1} \dots\dots\dots (26)$$

여기서 A_0 는 입계에 있어 공동의 초기면적이고 공동이 입계입자에서 형성된다면 A_0 는 아래와 같다.

$$A_0 = (\pi/4) \cdot (P_0/l_0) \dots\dots\dots (27)$$

여기서 P_0 와 l_0 는 각각 경계에 따라 평균 입자의 직경과 간격이다.

결국 파단시간과 정상크리이프 속도의 관계는 여러 연구결과를 통해 서로 선형적으로 반비례 관계가 되어 식(11)은 앞에서 구한 정 크리이프 실험치와 내부응력 실험치를 고려하면 파단수명은 다음과 같이 외부응력과 내부응력의 비 및 증분이 영향을 주는 비열적과정(athermal process)과 내부응력의 온도 의존성이 영향을 주는 열적 활성화 과정(thermal activated process)의 복합으로 표시할 수 있다.

$$t_f = A' \sigma_a \{ -n_0(1-d\sigma_i/d\sigma_a)/(1-\sigma_i/\sigma_a) \\ \cdot \exp[|Q^* - (n_0RT^2/E_{(T)}) (dE_{(T)}/dT) \\ - (n_0RT^2/(\sigma_a - \sigma_i) \\ (d\sigma_i/dT) | /RT] \} \dots\dots\dots (28)$$

Fig. 4는 Table 5에 있는 실험결과를 이용하여 대수응력과 Lason-Miller 파라메타 사이의 관계를 나타낸것으로 여기서 LM 매개변수에 포함되어있는 상수 C값은 20값으로 선택하므로 LM파라메타는 $T(20 + \log t_R)$ 로 계산했고 이 결과에서 대수응력과 LM 파라메타 사이의 관계는 선형적으로 감소하여 LM 파라메타를 이용하면 Al 7075 합금의 크리이프 수명에측을 정확히 예측할 수 있을 것으로 추측된다.

4. 결 론

T_6 열처리된 Al 7075 합금을 이용하여 온도범위 90°C(0.4 T_m)~500°C(0.85 T_m), 응력범위 0.64~17.2(kgf/mm²)에서의 고온 인장실험, 정 크리이프 실험, 내부응력 측정 및 크리이프 파단실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 0.4 T_m ~0.75 T_m 온도조건에서 항복의 결보가 활성화 에너지 Q_y '는 약 5.4~8.3Kcal/mol 나타나 정상상태의 응력의존성 n값의 3.15~6.62임을 고려해서 구한 항복의 활성화 에너지는 25.7~36.5Kcal/mol로 계산되어 이 값은 정상상태의 크리이프 활성화 에너지 26.0~36.0 Kcal/mol값과 거의 같은 범위에 있다.
- 2) 정상 크리이프 속도의 부가응력의존성(n)값은 온도조건 90~120°C와 응력조건 10~17.2(kgf/mm²), 온도조건 200~410°C와 응력조건 1.53~9.55(kgf/mm²) 및 온도조건 470~500°C와 응력조건 0.62~1.02(kgf/mm²) 각각 3.15, 6.62 및 1.1값으로 측정되었고 정상 크리이프 속도와 부가응력에서 구한 측정된 응력 지수(n_{measu})값과 부가응력과 내부응력 결과로부터 계산된 응력지수(n_{calcu})값은 서로 잘 일치하였다.
- 3) 온도조건 0.4~0.43 T_m , 0.52~0.75 T_m 및 0.82~0.85 T_m 에서의 활성화 에너지(Q_{measu})는 각각 26.16, 34.9~36.2 및 36.1Kcal/mol으로 측정되었고 이 값은 일정 유효응력 상태하에서의 활성화 에너지와 내부응력의 온도의존성과 합한 값(Q_{calcu})과 서로 잘 일치하였다.
- 4) 파단수명의 응력의존성 n'값은 6.3~6.6으로 정상상태의 크리이프 속도에 대한 응력의존성 n 값의 결과와 거의 일치했고, 파단을 위한 활성화 에너지 Q_f 값은 약 32~36.9kcal/mol로서 정상상태의 활성화 에너지 Q_s 값과 거의 일치했다.
- 5) 파단수명은 다음과 같이 외부응력과 내부응력의 비 및 증분이 영향을 주는 비열적과정(Athermal process)과 내부응력의 온도의존성이 영향을 주는 열적 활성화 과정(Thermal activated process)의 복합으로 표시할 수 있다.

$$t_f = A' \sigma_a \{ -n_o(1 - d\sigma_i/d\sigma_a)/(1 - \sigma_i/\sigma_a) \} \cdot \exp[\{ Q^* - (n_oRT^2/E(T)) (dE(T)/dT) - (n_oRT^2/\sigma_a - \sigma_i) (d\sigma_i/dT) \} / RT]$$

6) Larson-Miller 파단매개변수와 대수응력사이의 관계는 선형적으로 감소하여 LM 파라메타를 이용하면 Al 7075 합금의 크라이프 파단수명을 정확히 예측할 수 있을 것으로 추측된다.

이 논문은 1993년도 한국학술진흥재단의 공모 과제(지방대 육성) 연구비에 의해 수행된 결과의 일부이며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) Soo W. Nam, 크라이프, 피로 그리고 분위기의 상호작용(I), Journal of the Korean Institute of Metals, Vol.21, pp.595~660, 1983.
- 2) O. D. Sherby, J. L. Lytton, and J. E. Dorn, Acta Meta., V. 5, pp. 219~227, 1957.
- 3) K. R. Williams and B. Wilshire, Metal Sci. J., 7, 176 1973.
- 4) W. E. White, Iain Le May, J. Engi. Materials and Technology, July 1978, Vol.100 pp.333~335
- 5) G. J. D. Ranucci, E. Picco, and P. M. Stocchi, Metallurgical Trans. A, Vol.14A, November pp. 2329~2335, 1983.
- 6) J. D. Embury, B. A. Wilcox and A. H. Clauser, Vol.100, pp.153~162, 1972.
- 7) J. E. Dorn, J. Mech. Phys. Solids, 3, p. 85, 1950.
- 8) S. Purushothaman and J. K. Tien, Acta Metall., 26, p.519, 1978.
- 9) Dae Min. Kang, The Activation energy and the stress exponent for creep deformation of Al 7075 alloy, Phd. Thesis, 1988. 2
- 10) S. K Mandal, Mechanism of Recovery in Creep of Aluminum at an intermediate Temperature, Trans. of the Indian Inst. of Metals, pp.14~18, 1971.
- 11) O. D. Sherby and P. M. Burke, Progress Mater. Sci.,13, p.325 1967.
- 12) D. A. Miller and T. G. Landon, Vol.10A, November, p.1636~1641, 1979.
- 13) R. Lagneborg, Met. Sci. J., 6, 127, 1969.
- 14) J. Weertman, J. Appl. Phys., 28, 196, 1957.
- 15) C. R. Barrett and W. D. Nix, Acta Met., 13, 1247, 1965.
- 16) F. R. N. Nabarro, Phys. Soc. of London p. 75, 1948.
- 17) R. C. Coble, J. Appl. Phys., 34, 1679, 1963.
- 18) A. Seeger, Phil. Mag, Vol. 45, pp. 771~773, 1954.
- 19) J. Breen and J. Weertman, Trans, AIME, Vol. 203, pp.1230~1234, 1955.
- 20) C. V. Vladimiloba, and V. A. Lik Hachov, Fiz metalloved, Vol.28, No.4, pp.165~169, 1969.
- 21) K. Linga, Murty, M. Gold and Arthur L. Ruoff, J. of App. Phy., Vol.41, pp.4917~4927, 1970.
- 22) N. Jaffe, and J. E. Dorn, Effect of the Stress on the Creep Rate of High Purity Aluminum in the Cross Slip Region, Trans. of AIME, Vol. 224, pp.1167~1173, 1962.