

## Al 7075 합금의 크리이프 파단수명에 관한 연구(Ⅱ)

### A Study on the Creep Fracture Life of Al 7075 Alloy(Ⅱ)

강 대 민\*  
Dae-Min Kang

#### ABSTRACT

High temperature tensiles tests, steady state creep tests, internal stress tests and creep rupture tests using Al 7075 alloy were performed over the temperature range of 90°C ~ 500°C and stress range of 0.64 ~ 17.2(kgf/mm<sup>2</sup>) in order to investigate the creep behavior and predict creep rupture life

From the apparent activation energy  $Q_c$  and the applied stress exponent  $n$  measured, at the temperature range of 90°C ~ 120°C, the creep deformation seemed to be controlled by cross slip. On the other hand at the temperature of 200°C ~ 230°C the creep deformation seemed to be controlled by dislocation climb but at 470°C ~ 500°C, by diffusion creep. And the rupture life( $t_f$ ) might be represented by anthermal process attributed to the difference of the applied stress dependence of internal stress and the ratio of the internal stress to the applied stress, the thermal activated process attributed to the temperature dependence of the internal stress. Also the ratio between stress dependence of primary creep rate and that of minimum creep rate was measured 0.46, the minimum creep rate is expected to be approximately obtained from master creep curve including the relationship primary creep rate and minimum creep rate.

Finally the relationship new rupture parameter and logarithmic stress was represented with including the ratio between the dependence of primary creep rate and that of minimum creep rate, using the new rupture parameter the rupture life prediction is exactly expected.

#### 1. 서 론

고온상태하에서 사용되는 모든 장비들의 경우,

그 수명 및 안정성에 고온 크리이프 문제는 대단히 중요하므로 고온에서 크리이프변형과 파단에 관한 연구가 절실히 필요하다.

크리이프 변형중 고온에서(0.8Tm이상) 주로 일

---

\* 부산공업대학교 차량공학과

어나는 확산크리이프에 관한 연구<sup>1)</sup>로는 Nabarro와 Herring, coble 등에 의하여 연구되었고 약 0.4~0.7Tm의 온도범위에서 발생하는 전위 크리이프에 관한 연구<sup>2)</sup>로는 Lagneborg가 Mott에 의하여 제안된 회복 크리이프 이론을 전위밀도의 온도와 응력의 의존성을 감안하여 이론식을 제시하였다. 또한 크리이프 거동에 관한 연구로는 Sherby<sup>3)</sup>는 크리이프 활성화 에너지를 실험적으로 구했고 Wilshire<sup>7)</sup> 등은 Nimonic 80A와 Nimonic 105A의 Qc를 구한 경우 각각 462 및 515KJ/mol으로 이것은 유효응력 일정에서의 크리이프 활성화 에너지 Qc\*의 값(각각 305 및 310KJ/mol)에 비해 큰 값으로 측정되었다.

Master creep curve에 관한 연구로는 M. Ohnami<sup>4)</sup>의 연구에서 제시한 매개변수를 이용하여 천이 크리이프와 정상상태 크리이프속도의 응력 의존성을 고려한 매개변수를 구했고 크리이프 수명에 관한 연구로는 1952년 Larson과 Miller<sup>5)</sup>에 의해 처음으로 크리이프 수명시간  $t_f = T(C + \log T)$  형태로 시간-온도의 개념을 도입했다. 1954년에 Sherby와 Dom<sup>6)</sup>은 크리이프 파단에 적합한 매개변수는  $[\log t_f - (H/RT)]$ 라고 언급했고 또한 1969년에 Grounes<sup>7)</sup>는 화학반응속도 이론을 근거로 파단시간과 온도 매개변수를 단일화하려고 시도하여  $T[\ln t_f + P(T, \sigma_a)] = Q(T, \sigma_a)$ 의 형태로 유도했다. 그리고 1983년에 E. Picco<sup>8)</sup>는 주조 Ni-기초합금 IN 738LC의 크리이프와 파단거동을 750~950°C 온도범위에서 연구한 결과 초기와 정상상태 크리이프는 구분된 단계로 간주할 수 없고 근본적으로 같은 변형기구라고 언급했다. 또한 파단은 시편 표면에서 시작되는 산화된 입계균열의 전파에 의해서 일어나고 균열전파 속도는 합금의 변형 거동에 의해서 지배된다고 주장했고 이의 연구된 파단매개변수는 Larson-Miller매개변수, Orr-Sherby-Dom매개변수, Manson-Haferd매개변수와 Goldhoff-Sherby매개변수 등 여러 연구가 있다.

한편 알루미늄 합금중 초강도 합금인 Al 7075 합금의 크리이프 특성에 관한 연구로는 J. D. Embury와 B. M. Wilcox<sup>9)</sup>에 의해 고온에서 정상크리이프 속도에 대한 미세조직의 영향을 설명되었지만 아직도 Al 7075 합금의 크리이프 특성에 관한 연구는 상당히 불충분한 실정이어서 이러한 크리이프 특

성중 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, 응력이완 실험 및 크리이프 파단시험을 통하여 Al 7075 합금의 변형을 주도하는 변형 기구의 규명과 master creep curve를 작성하여 Al 7075의 크리이프 거동을 예측하고자 한다. 또한 이러한 실험을 통하여 크리이프 파단수명을 외부 응력에 의한 비열적 과정과 온도에 의한 열적 활성화 과정의 복합으로 구하고 M. Ohnami의 연구를 토대로 하여 천이 크리이프와 정상상태 크리이프속도의 응력 의존성을 고려한 새로운 파단 매개변수를 구하여 Al 7075 합금의 파단수명을 보다 더 정확히 예측하는데 그 목적이 있다.

## 2. 크리이프 이론

일정 부가응력 하에서의 크리이프 관계식은 Andrade의 크리이프 식의 수정식<sup>9)</sup>으로 식(1)과 같이 표현된다.

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

여기에서  $\epsilon$ 는 전 변형,  $t$ 는 부하시간, 제 1, 2 및 3항은 각각 순간변형, 천이 크리이프 변형, 정상 크리이프 변형성분이다.

여기서  $\beta$ 는 상수이고  $k$ 는 정상 크리이프 속도를 말한다.

식 (1)에서 크리이프 속도  $\frac{d\epsilon}{dt}$ 는  $\beta nt^{n-1} \gg k$ 의 관계가 성립되므로 식(1)은 식(2)와 같이 된다.

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \beta nt^{n-1} \dots\dots\dots (2)$$

식(2)에서 양변에 대수를 취해서 온도조건을 일정하게 두면  $\log \beta + \log n$ 는 상수가 되므로 식(3)으로 표현된다.

$$\log \dot{\epsilon}_s - (n-1)\log t = c \dots\dots\dots (3)$$

식(1)에서 계수  $\beta$  및  $k$ 는 다음과 같은 응력의존성이 있다.

$$\beta = \beta_1 \sigma_a^m, k = \beta' \sigma_a^{m'} \dots\dots\dots (4)$$

여기서  $\beta, m, \beta', m'$ 는 상수이고 이러한 상수들의 관계는 온도와 무 관계하게 식(5)와 같은 관계가 성립한다.

$$\frac{m}{m'} = \text{일정}, \beta(\beta')^{-m/m'} = \text{일정} \dots\dots\dots (5)$$

식(2)에서 양변에  $k^{-m/m'}$ 를 곱하여 식(4)를 이용하여 정리하면 식(2)는 식(6)과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{d\epsilon}{dt} k^{-c_1} = c_2 t^{n-1} \dots\dots\dots (6)$$

여기서  $c_1 = m/m'$ ,  $c_2 = \beta_n(\beta')^{-m/m'}$ 이다.

Larson-Miller법에 의해서 최소 크리이프 속도를 고려한 master creep curve에 사용했던 파라메타에서 제1기 크리이프 결과를 정리할 때 종축의 응력에 대해서 횡축에  $T(c+(n-1)\log t - \log d\epsilon/dt)$ 가 되는 파라메트를 사용함으로써 실험결과를 정리할 수 있고 관계식을 요약하면 다음과 같다.

$$\log \sigma_a = \frac{a}{b+2.3PT} - \frac{2.3}{b+2.3PT} T \left\{ c+(n-1) \log t - \log \frac{d\epsilon}{dt} \right\} \dots (7)$$

여기서 a, b는 정수이고(b+2.3p) T는 실험조건에 대하여 근사적으로 일정한 값으로 취급한다. 따라서  $\log \sigma_a$ 는 파라메타에 대해서 직선관계로 표시됨을 알 수 있고 천이 크리이프와 정상 크리이프에 대한 master creep curve간의 상관성을 구하기 위해서 식(7)을 식(8)의 관계를 대입하므로써 구할 수 있다.

식(6)의 양변에 대수를 취하면 식(7)은 식(8)로 된다.

$$\log \sigma_a = \frac{a}{b+2.3PT} - \frac{2.3}{b+2.3PT} T \left( c - \log c_2 - \frac{m}{m'} \log k \right) = \frac{a}{b+2.3PT} - \frac{2.3}{b+2.3PT} T \left( c' - \frac{m}{m'} \log k \right) \dots\dots\dots (8)$$

여기서  $c' = c - \log c_2 = c(\log c_2 \ll c)$ 이므로 종축에 대수 부가응력값을 두고 횡축에  $T(c-m/m' \log \epsilon_s)$ 가 되는 파라메타를 취할 때 다음 식(9)와 같이 서로 선형적인 관계가 있다.

$$\log \sigma_a = A - BT \left( c - \frac{m}{m'} \log \epsilon_s \right) \dots\dots\dots (9)$$

식(9)에서 최소 크리이프 속도와 파단 시간과의 관계에서

$$\log \sigma_a = A - BT \left( c - \frac{m}{m'} \log c_1 + \frac{m}{m'} \log t_f \right) \dots\dots\dots (10)$$

가 되고 A, B는 일정 상수값이다.

여기서  $\frac{m}{m'} \log c_1 \ll c$ 이므로 식(10)은 식(11)로 표현할 수 있다.

$$\log \sigma_a = A - BT \left( c + \frac{m}{m'} \log t_f \right) \dots\dots\dots (11)$$

### 3. 실험방법 및 조건

#### 3.1 시 편

고온 인장시험, 정 크리이프 실험, 내부 응력측정 및 크리이프 파단시험에 사용했던 재료는 Al alloy 7075-T<sub>6</sub> 열처리한 Al 7075 합금으로서 열처리 조건 및 재료의 화학적 성분과 기계적 성분은 각각 Fig. 1, Table 1, Table 2에 표시했다. Table 1, 2의 아랫칸에 표시되어 있는 값은 'Aluminum standard & data'에서 참조한 것으로 실험에 사용된 Al 7075 합금재료는 표준 Al 7075 합금과 거의 비슷한 성질을 가지고 재료를 사용했다. 인장시험은 Tinius Olsen사의 Super-L 인장시험기를 이용하여 10mm/min 속도로 행했고 경도시험은 Detroit Testing M/C Co. 사의 HB-2Brinell 경도계를 이용하여 실시했으며 화학성분 분석은 발광 분광 분석장치(spectrometer)를 사용했다.

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

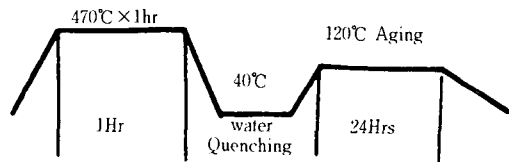


Fig. 1 Heat treatment(T<sub>s</sub>)

### 3.2 실험장치 및 조건

#### 3.2.1 고온 인장시험

고온인장 실험에 사용된 실험조건과 결과는 Table 3에 나타내었고 실험에 사용된 시험편은 크

리이프 시험에 사용된 재료와 동일한 재료이고 파 단에서 총 연신율은 25.4mm의 표점거리를 사용하여 측정되었으며 최대인장강도, 탄성계수와 항복 강도의 온도의존성도 측정되었다.

Table 3 High temperature tensile properties of the Al 7075 alloy

Temperature (°C)	Strain rate (S <sup>-1</sup> )	Elastic-modulus (kgf/mm <sup>2</sup> )	0.2pct. off-set yield strength (kgf/mm)	Ultimate tensile strength(kgf/mm <sup>2</sup> )	Strain to Failure (%)
90	1×10 <sup>-3</sup>	5.01×10 <sup>5</sup>	42.50	43.90	7.50
100		4.90×10 <sup>5</sup>	30.50	31.20	6.00
110		4.80×10 <sup>5</sup>	22.50	22.70	7.00
200		3.80×10 <sup>5</sup>	15.50	15.50	12.10
210		3.77×10 <sup>5</sup>	13.20	13.40	14.30
220		3.74×10 <sup>5</sup>	11.70	13.20	15.20
230		3.71×10 <sup>5</sup>	10.40	10.60	18.10
280		3.55×10 <sup>5</sup>	7.10	7.50	30.50
290		3.53×10 <sup>5</sup>	6.45	6.55	33.90
300		3.51×10 <sup>5</sup>	5.90	6.25	37.60
310		3.49×10 <sup>5</sup>	5.40	6.06	36.50
380		2.56×10 <sup>5</sup>	3.78	4.14	53.20
390		2.55×10 <sup>5</sup>	3.53	3.76	49.20
400		2.54×10 <sup>5</sup>	3.30	3.60	52.00
410		2.53×10 <sup>5</sup>	3.10	3.24	30.00

#### 3.2.2 정 크리이프 시험 및 내부응력 측정

정상 크리이프 속도의 응력의존성과 온도의존성을 측정하여 변형을 주도하는 변형기구 규명과 master creep curve를 작성하기 위해서 정 크리이프 실험을 행하였다. 크리이프 시험기는 동경 시험기기 회사의 모델(CRL-3000)로 최대허용 하중은 3톤, 레버비는 1:20이다. 로의 사용온도는 최

고 850°C이고 시험편에 PR 열전대를 부착하여 시험 온도를 설정하고 자동온도 조절장치로서 ±1°C 범위에서 일정하게 유지했다. 시험편의 변형율과 시험 온도는 자동적으로 차트에 기록된다. 실험조건<sup>10)</sup>은 Table 4와 같이 일정온도에서 부가응력조건을 변화시키고 일정부가응력에 대하여 온도 조건을 변화시켰다.

Table 4 Stress-temperature experiment condition of steady state creep

Temp. (°C)(T <sub>m</sub> )	Stress(kgf/mm <sup>2</sup> )				Temp. (°C)(T <sub>m</sub> )	Stress(kgf/mm <sup>2</sup> )			
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)	"	"	"	"

또한 내부응력 측정은 최소 크리이프의 유효응력의존성, 유효 응력일정하에서의 크리이프 활성화에너지를 측정하기 위해서 실험을 행하였다. 이것은 시험중 가해지는 응력의 일부를 제거하여  $d\epsilon/dt=0$ 인 응력을 찾는 시험으로 변형된 응력이 내부응력 보다 크면  $d\epsilon/dt>0$ 이며 보다 작으면  $d$

$\epsilon/dt<0$ 이 된다.

### 3.2.3 크리이프 파단시험

크리이프 파단수명의 온도 및 응력의존성, 크리이프 파단 매개변수 등을 구하기 위해서 크리이프 파단시험이 행하였고 적용된 실험조건은 Table 5 와 같다.

Table 5 Stress- temperature experiment condition and results for creep rupture

Temp. (°C)( $T_m$ )	Stress(kgf/mm <sup>2</sup> )				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)	400	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

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 고온인장 시험결과

고온에서의 물성치, 즉 최대 인장강도, 탄성계수, 항복강도의 온도의존성 등을 측정하기 위해서 고온 인장시험이 실시되었고 실험결과<sup>11)</sup>는 Table 3에 표시했다. 여기서 보면 탄성계수는 온도가 증가함에 따라 감소하고 고온이 될수록 탄성계수의 온도의존성은 적게 나타났고 최대 인장강도와 항복강도는 온도증가에 따라 감소했다.

$\ln(\sigma_y/E)-1/T$  좌표상에서 구한 항복의 걸보기 활성화에너지에 일반기체상수 R값을 곱하여 부록의 식(16)에서 구할 수 있다.

이렇게 해서 구한 항복의 활성화에너지는 25.7~36.5kcal/mol로 나타나 이 값은 크리이프 활성화에너지 26.0~36.0kcal/mol 값과 거의 같은 범위에 있다.

### 4.2 최소 크리이프속도의 부가응력의존성과 내부응력의존성

최소 크리이프 속도의 부가응력의존성으로서 크리이프 특성을 고찰하기 위해서 Sherby와 Burke<sup>12)</sup>의 연구를 언급하면 크리이프 속도와 부가응력의 관계는 Fig. 3에서 보는 바와같이 3영역이 있다.

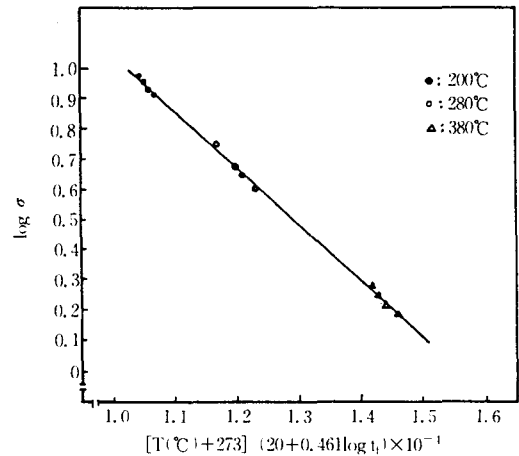
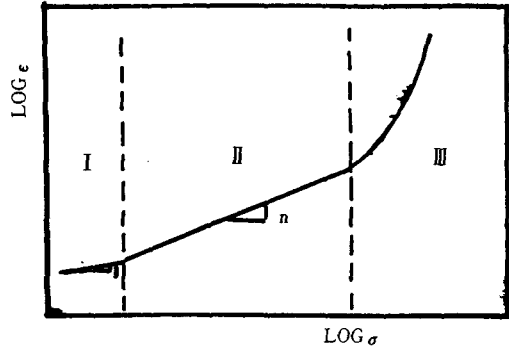


Fig. 2 Master rupture creep curve for Al 7075 alloy

즉 1영역과 2영역은 변형속도가 응력의 n승에 비례하는 식으로 표시되는 크리이프 변형, 즉 "power law creep"이라 한다. 다시말하면 제 1영역에서는  $0.8T_m$  이상으로 확산이 주도하고 응력지수 n값은 1이 된다. 제 2영역에서는 온도가  $0.5T_m$  이상으로 전위활동이나 전위상승이 변형을 지배하며 응력지수 n값은 각각 3, 5가 된다. 또한 3영역은 크리이프 변형속도가 응력의 지수함수에 비례하여

증가함을 알 수 있고 실험적으로 3영역이 발생하는 것은 낮은 온도에서 높은 응력을 작용하는 경우이다.

온도조건 90°C~500°C에서 정상 크리이프 속도의 부가응력 의존성( $\bar{n}$ )을 계산한 결과치는 Table 7에 나타내었고 여기서  $\bar{n}$ 값은 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향이 나타났다. 이 결과에서 온도조건 90~120°C, 응력조건 10~17.2(kgf/mm<sup>2</sup>)인 경우의 정상 크리이프 속도와 부가응력과의 관계는 대수좌표에서 멱함수 법칙이 잘 만족하고  $\bar{n}$ 값은 약 3.15로 나타났다. 온도조건 200°C~410°C, 응력조건 1.53~9.55(kgf/mm<sup>2</sup>)인 경우의 정상상태 크리이프 속도와 부가응력 사이의 관계는 대수좌표에서 멱함수 법칙을 잘 만족하고 측정된 응력지수값은 Lagneborg, Weertman, Barrett와 Nix의 이론에서 설명한 전위상승이 변형을 주도할 때의 A1의 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



- I :  $T > 0.8 T_m$  : Stress directed diffusion  
 $n = 1 \quad Q_c = Q_{sd}$
- II :  $T \geq 0.5 T_m$  : Dislocation climb  
 $n = 5 \quad Q_c = Q_{sd}$   
Dislocation glide  
 $n = 3 \quad Q_c < Q_{sd}$
- III :  $T < 0.4 T_m$  : Dislocation intersection :  
 $\dot{\epsilon} = A' \exp(\beta \sigma) \quad Q_c \ll Q_{sd}$

Fig. 3 Influence of stress on steady state creep rate for a typical pure polycrystalline metal

Table 6 Relationship applied stress(kgf/mm<sup>2</sup>) and internal stress(kgf/mm<sup>2</sup>) for 90°C~500°C

Temp(°C)	$\sigma_a$	$\sigma_i$	Temp(°C)	$\sigma_a$	$\sigma_i$	Temp(°C)	$\sigma_a$	$\sigma_i$	Temp(°C)	$\sigma_a$	$\sigma_i$
90	10.0	6.33	110	10.0	5.50	280	1.85	1.25	300	1.85	1.23
	12.5	7.90		12.5	6.88		2.04	1.37		2.04	1.35
	15.1	9.54		15.1	8.29		2.17	1.44		2.17	1.42
	17.2	10.84		17.2	9.41		2.55	1.68		2.55	1.66
100	10.0	5.92	120	10.0	5.10	290	1.85	1.24	310	1.85	1.22
	12.5	7.40		12.5	6.36		2.04	1.36		2.04	1.33
	15.1	9.19		15.1	7.67		2.17	1.43		2.17	1.41
	17.2	10.13		17.2	8.72		2.55	1.67		2.55	1.64
200	8.13	5.12	220	8.13	5.00	380	1.53	1.00	400	1.53	0.99
	8.51	5.35		8.51	5.23		1.66	1.08		1.66	1.06
	8.91	5.56		8.91	5.46		1.78	1.15		1.78	1.13
	9.55	5.92		9.55	5.78		1.91	1.23		1.91	1.21
210	8.13	5.04	230	8.13	4.92	390	1.53	1.00	410	1.53	0.98
	8.51	5.27		8.51	5.14		1.66	1.07		1.66	1.05
	8.91	5.48		8.91	5.39		1.78	1.14		1.78	1.12
	9.55	5.83		9.55	5.68		1.91	1.21		1.91	1.19
470	0.64	0.44	490	0.64	0.42	480	0.64	0.43	500	0.64	0.41
	0.76	0.52		0.76	0.49		0.76	0.51		0.76	0.48
	0.89	0.60		0.89	0.57		0.89	0.59		0.89	0.56
	1.02	0.68		1.02	0.65		1.02	0.67		1.02	0.64

~1.02(kgf/mm<sup>2</sup>)에서는 Nabarro-Herring과 Coble에 의해서 제안된 것으로 확산이 주로 변형을 주도할 경우 응력지수값 1에 가까운 1.1의 값으로 측정되었다.

Table 6은 온도 90°C~500°C 사이의 내부응력 측정결과이고 여기서 측정된 부가응력과 내부응력 사이의 관계는 90~500°C 온도조건에서  $\sigma_1 = (0.55 \sim 0.65) \sigma_a$ 의 관계로 나타났다.

Table 7에 표시되어 있는  $n_0$ 은 부록에 있는 식(19)에 의해서 구했고 Table 7에서  $n_{calcu}$  값을 구하기 위해  $d\sigma_1/d\sigma_a$  및  $\sigma_1/\sigma_a$ 의 값이 표시되었으며 이 값과  $n_0$ 를 고려해서  $n_{calcu}$ 을 구할 수 있다. 식(18)에서 구한  $n_{meas}$  값과 앞에서 언급한  $n_{calcu}$  값과의 관계를 Fig. 4에 표시했고 여기서 상호값은 거의 잘 대응하고 있음을 알 수 있다.

### 4.3 일정 부가응력 및 유효응력에 대한 최소 크리이프 속도의 온도의존성

일정 응력 부가응력에 대한 최소 크리이프 속도의 온도의존성을 구하기 위해 일정부가응력에 대해 온도조건을 변화시켜 부록의 식(21)에 의해서 활성화에너지를 측정하였다.

Table 5는 온도조건 90°C~500°C 하에서 일정 부가응력 상태에서 활성화에너지를 구하기 위하여 대수 정상크리이프 속도와 온도의 역수사이의 관계를 이용하여 구한 결과를 나타냈고 실험에 사용되었던 Al 7075 합금의 자기확산 에너지  $Q_{sd}$ 는 대부분 재료에 대해 경험적인  $Q_{sd}/T_m = 36\text{cal}/^\circ\text{K}$ 를 이용하여 Al 7075 합금의 용융온도  $T_m$ 가 638°C임을 고려할 때 Al 7075 합금의 자기확산 에너지는 33Kcal/mol로 된다.

90°C~500°C에서 활성화에너지로서 변형을 주도하는 기구를 고찰하면 먼저 0.5 $T_m$  이하의 저온크리이프, 즉 0.4 $T_m$ ~0.43 $T_m$ 의 측정된 활성화에너지는 평균 26.16Kcal/mol로서 Al의 자기확산에 필요한 활성화에너지 33Kcal/mol보다 적게 나타났다. J. P. Dorn과 Jaffe의 연구<sup>14)</sup>와 S. K. Mandal<sup>15)</sup>의 연구결과를 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 활성화에너지는 34.9~36.2Kcal/mol로서 Al의  $Q_{sd}$ 와 거의 일

치하고 이러한 결과는 Sherby와 Burke의 제의에 따르면 전위상승에 의해서 변형이 주도된다고 예상할 수 있다.

온도 0.82 $T_m$ ~0.85 $T_m$  조건에서의 활성화에너지는 36.1Kcal/mol로서 Al의  $Q_{sd}$ 와 거의 일치하고 이 온도영역에서는 Sherby와 Burke, Nabarro와 Herring, 그리고 Coble 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 일치한다.

실험 결과치를 보면 응력이 증가할수록 활성화에너지는 감소하는 경향을 나타내고 이것은 외부응력이 크리이프 변형을 저지하는 장애를 낮게 하는 것으로 이러한 사실은 다음과 같이 Seeger<sup>15)</sup>, Breen과 Weetman<sup>16)</sup>, Vladimira<sup>17)</sup> 및 M. Gold<sup>18)</sup> 등의 연구결과에서 설명된다.

그리고 일정 유효응력 상태하에서의 활성화에너지( $Q_c^*$ ) 값은 부록의 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.

$$Q_c^* = -R \times (\text{기울기}) \quad (\text{Kcal/mol}) \quad \dots\dots\dots (12)$$

이렇게 해서 구한  $Q_c^*$  값과  $Q_c$ 의 관계는 식(23)

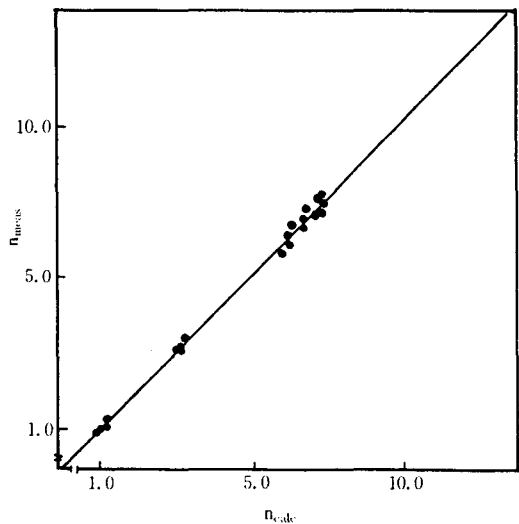


Fig. 4 Relationship between measured and calculated nvalue by using Eq. (35) and (33)

에서 언급하였듯이 탄성계수의 온도의존성( $K_E$ )와 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  $1.7 \sim 2\text{Kcal/mol}$ 의 범위에 있고  $K_i$ 값은  $5 \sim 8\text{Kcal/mol}$ 로 나타나  $Q_c$ 와  $Q_c^*$ 의 차이는  $K_E$ 보다  $K_i$ 의 크기에 기인한다고 추측된다. 식(23)에서 구한 값을  $Q_{c(\text{calcu})}$ 라 하고 식(21)에서 구한 값을  $Q_{c(\text{meas})}$ 라고 하여 계산한 결과  $Q_{\text{meas}}$  값은  $26.16 \sim 36.11\text{Kcal/mol}$ 로 나타나  $K_E$ 값이 적기에 무시한  $Q_c^* + K_i$  값으로 계산한  $Q_{\text{calcu}}$  값인  $28.11 \sim 34.94\text{Kcal/mol}$ 과 거의 일치했고  $Q_{c(\text{meas})}$ 와  $Q_{c(\text{calcu})}$ 의 관계를 Fig. 5에서 나타내었고 여기서 상호값은 잘 대응하고 있음을 알 수 있다.

#### 4.4 master creep curve 작성

Ohnami등의 연구에서 언급된 master creep curve 작성시 필수적인 기초자료인  $m/m'$  값을 구하기 위해 온도조건  $250^\circ\text{C} \sim 300^\circ\text{C}$ , 응력조건이  $2.55 \sim 4.07(\text{kgf/mm}^2)$  조건에서 천이 크리이프 속도와 최소 크리이프의 응력의존성 값을 측정했다. Fig. 6~9는 온도조건이  $250 \sim 300^\circ\text{C}$ 이고 응력조건이  $2.55 \sim 4.07(\text{kgf/mm}^2)$ 인 조건에서의 1차 크리이프 속도와 시간 사이의 관계를 나타낸 그래프이고 1차 크리이프 단계에서 크리이프 변형률의 시간의

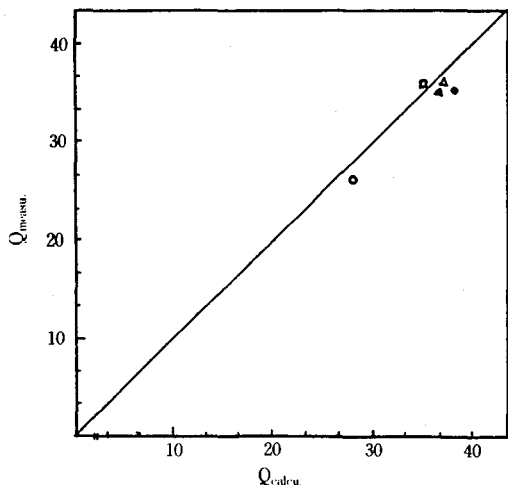


Fig. 5 Relationship between measured and calculated activation energy(Kcal/mol) by using eq. (36) and (38)

존성  $n$ 값은 식(3)에서 보는 바와 같이  $[\log(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_2) / \log(t_1/t_2) + 1]$ 에 의해 계산이 가능하여  $n$ 값의 결과는 0.28의 값으로 나타났다. 상수  $\beta_0$ 의 값은 온도와 응력에 따른 값을 일정 응력에서 온도가 증가함에 따라 증가하고 일정 온도에서 응력이 증가함에 따라 증가하는 현상이 나타났다.

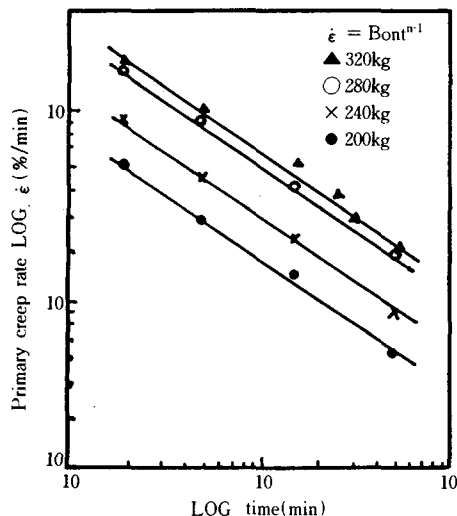


Fig. 6 Relation between primary creep rate and time at  $250^\circ\text{C}$  ( $0.574 T_m$ )

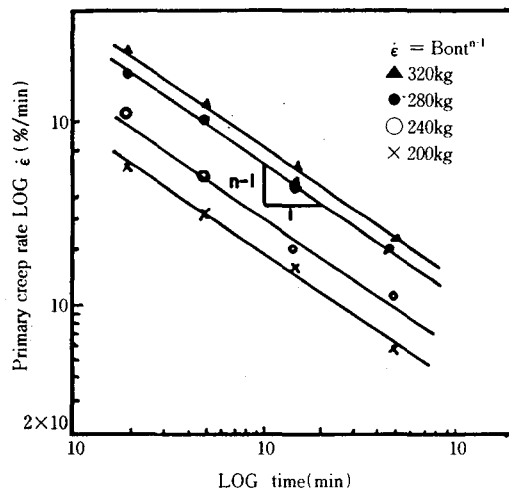


Fig. 7 Relation between primary creep rate and time at  $280^\circ\text{C}$  ( $0.61 T_m$ )



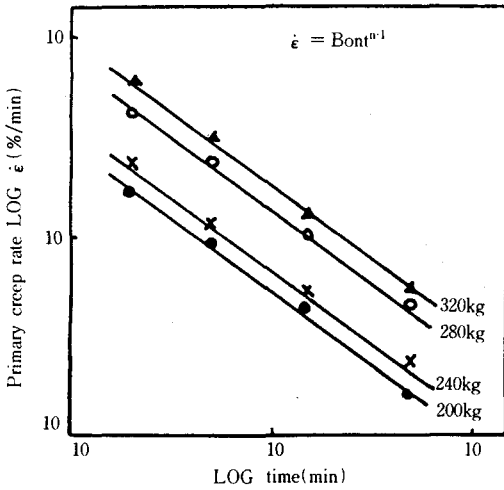


Fig. 8 Relation between primary creep rate and time at 290°C (0.62 Tm)

Fig. 10은 상수  $\beta_0$ 의 응력의존성  $m$ 값을 구하기 위해서 대수와 대수응력사이의 관계를 표시했고  $m$ 값은 약 2.36~3.18정도의 값이 측정되었으며 또한 이 값은 온도가 증가함에 따라 감소하고  $\beta_0$ 의 값은 온도가 증가함에 따라 증가하는 현상으로 나타났다.

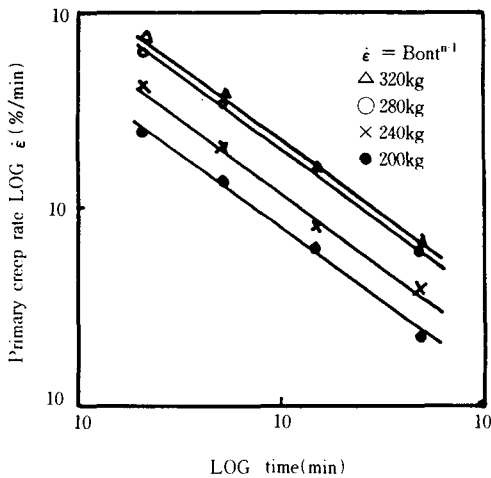


Fig. 9 Relation between primary creep rate and time at 300°C (0.63 Tm)

Fig. 11은 정상상태 크리이프 속도의 응력의존성  $m'$ 값을 구하기 위하여 대수정상상태 크리이프 속도와 대수응력 사이의 관계를 나타낸 것으로 여기서 계산된  $m'$ 값은 약 5.5~7.2값으로 측정되었고, 식(12)에 표시되어 있는  $m/m'$ 의 값은 0.46으로 나타났다.

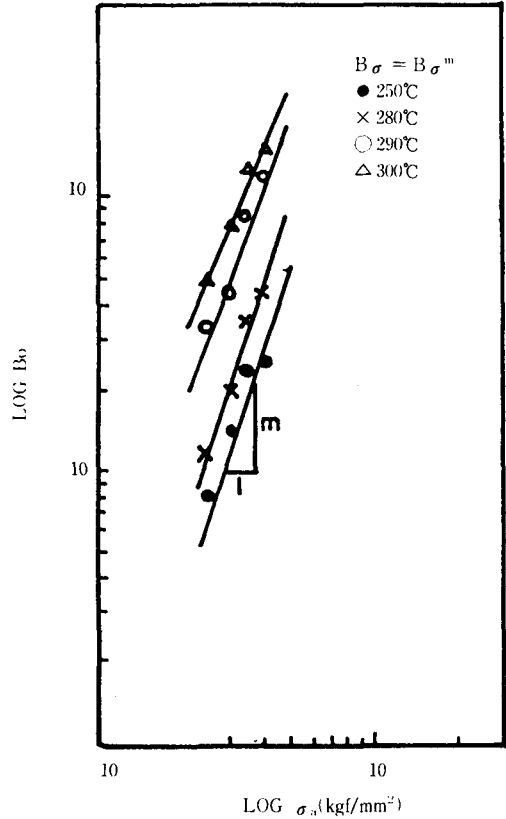


Fig. 10 Stress dependence of  $B_0$

Fig. 12는 본 실험결과와 master creep curve로서 제1기, 제2기 크리이프에 대해 각각  $T(C+(n-1) \log t - \log d\dot{\epsilon}/dt | t)$  및  $T(C-m/m' \log k)$ 가 되는 파라메타를 횡축을 취할 때 양자는 모두 동일 직선상에 정리할 수 있음을 알 수 있다. 이 경우의 상수  $C$ 값은 Dushman과 Langmuir등은 식(13)과 같이 제안했다.

$$t = \frac{N_0 h}{jQ} \dots \dots \dots (13)$$

여기서  $N$ 은 Avogadro의 수(gram atom당  $6.061 \times 10^{23}$  atoms),  $h$ 는 Plank상수( $6.554 \times 10^{-27}$  erg sec),  $j$ 는 열의 기계적인 등가( $4.185 \times 10^7$  erg/cal) 이고  $Q$ 는 활성화에너지(cal/gram atom)이다. 이 식에서 상수  $C$ 값은 약 15~23정도의 값으로 계산되고 Lason과 Miller, 그리고 Ohnami 등의 연구에서 일반적으로 20정도의 값을 갖는다고 언급했다. 이렇게 하여  $C$ 와  $C'$ 값은 20으로 해도 큰 차가 없다. Fig. 12에서 단시간 크리이프 시험결과로부터  $T(C+(n-1)\log t - \log d\epsilon/dt)$ 가 되는 파라메타를 사용하여 실험적으로 구한 결과로서 이 결과로부터 근사적으로 임의응력 및 온도에 있어서 최소변형률 속도를  $T(C'-m/m' \cdot \log k)$ 가 되는 파라메타로 잡아 횡축을 취화함으로써 추정하는 것이 가능함을 알 수 있다.

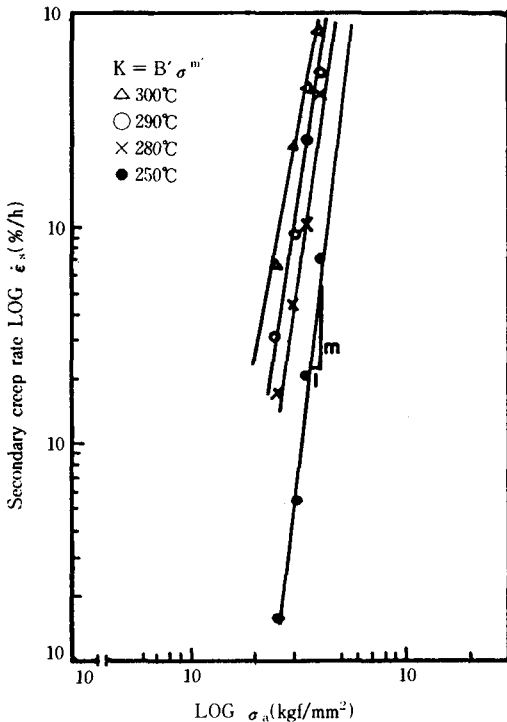


Fig. 11 Temperature dependence of stress exponent

#### 4.5 크리이프 파단매개변수

파단수명의 응력의존성과 파단을 위한 활성화

에너지는 Table 5에 표시되어 있는 온도, 응력, 파단시간의 자료에서 각각 식(26), (27)에 의하여 구했고  $n'$ 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 32~36.9(kcal/mol)으로서 정상상태에서 측정된 활성화 에너지  $Q_c$ 와 거의 일치했다. Fig. 13은 정상 크리이프 속도와 파단시간과의 관계를 나타낸 그래프이다. 가로 축을 파단시간을, 세로 축을 정상 크리이프 속도를 두면 서로 선형적으로 반비례함을 알 수 있고  $t_f \dot{\epsilon}_s$  값은 응력과 온도에 관계없이 일정상수 0.13으로 계산되었다. 이러한 실험결과는 Ashby, Monkman과 Grant, Raj의 이론에서 설명할 수 있듯이 파단시간과 정상크리이프 속도의 관계는 서로 선형적으로 반비례관계가 되어 식(25)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.

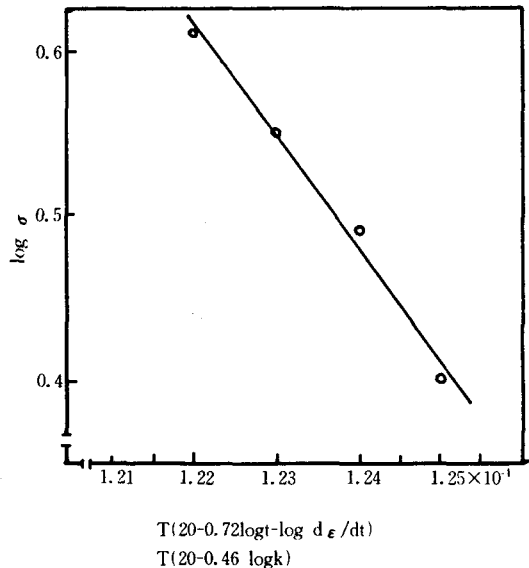


Fig. 12 Master creep curve

Table 7 Relationship between effective stress dependence and applied stress dependence

Temp. (°C)	R <sub>0</sub>	dσ <sub>i</sub> /dσ <sub>a</sub>	σ <sub>i</sub> /σ <sub>a</sub>	N <sub>calcu</sub>	N <sub>measu</sub>
90	3.17	0.63	0.63	3.12	3.22
100	3.11	0.58	0.59	3.17	3.16
110	3.08	0.54	0.55	3.12	3.13
120	3.05	0.50	0.51	3.11	3.09
200	5.94	0.57	0.63	6.88	6.82
210	5.59	0.56	0.62	6.36	6.09
220	5.32	0.57	0.61	5.83	6.00
230	5.06	0.55	0.60	5.66	5.85
280	5.79	0.60	0.67	6.87	6.92
290	5.62	0.60	0.66	6.67	6.78
300	5.45	0.60	0.66	6.36	6.30
310	5.23	0.60	0.65	5.95	6.05
380	6.21	0.59	0.65	7.17	6.94
390	5.43	0.54	0.64	7.02	6.73
400	5.34	0.54	0.64	6.79	6.49
410	5.25	0.54	0.63	6.57	6.33
470	1.09	0.64	0.68	1.22	1.22
480	1.03	0.64	0.66	1.11	1.13
490	0.94	0.61	0.65	1.04	1.05
500	0.93	0.61	0.63	1.00	1.02

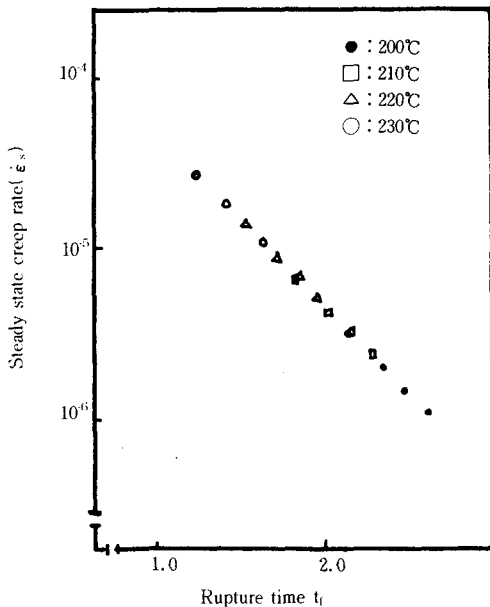


Fig. 13 Relation between the rupture life and steady state creep rate

$$t_f = A \sigma_a^{n_0(1-d\sigma_i/d\sigma_a)/(1-\sigma_i/\sigma_a)} \exp \left[ \left\{ \frac{Q^* - (n_0RT^2/E_T)(dE_T/dT) - (n_0RT^2/\sigma_a - \sigma_i)(d\sigma_i/dT) \right\} / RT \right] \dots \dots \dots (14)$$

M. Ohnami<sup>4)</sup>의 연구를 토대로 하여 구한 크리이프 파단매개변수는 다음 식(15)와 같고 이러한 새로운 파단 매개변수는 Larson-Miller의 파단매개변수  $T(20+\log t_f)$ 항에다 천이크리이프 속도와 최소 크리이프 속도의 응력의존성의 비( $m/m'$ )를 고려한 결과식으로 변형된다.

$$\log \sigma_a = A - BT \left( c + \frac{m}{m'} \log t_f \right) \dots \dots \dots (15)$$

Fig. 2는 식(15)의 새로운 파단 매개변수와 대수응력사이의 관계를 나타내었고 여기서 서로 선형적인 관계가 있음을 알 수 있으며 이러한 파라메타를 이용하면 Al 7075합금의 크리이프 수명예측을 정확히 예측할 수 있을 것으로 추측된다.

### 5. 결 론

T<sub>6</sub> 열처리된 Al 7075 합금을 이용하여 온도범위 90°C(0.4T<sub>m</sub>)~500°C(0.85T<sub>m</sub>), 응력범위 0.64~17.2(kgf/mm<sup>2</sup>)에서의 고온 인장실험, 정 크리이프 실험, 내부응력 측정 및 크리이프 파단 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 90°C~410°C 온도조건에서의 항복의 활성화 에너지는 25.7~36.5Kcal/mol로 측정되어 이 값은 정상상태의 크리이프 활성화 에너지 26.0~36.0Kcal/mol 값과 거의 같은 범위에 있다.
- 2) 온도 90°C~120°C, 응력 10~17.2(kgf/mm<sup>2</sup>)의 조건에서 측정된 응력지수  $\bar{n}$ 값은 약 3.15값으로 나타났고 측정된 활성화에너지는 약 26.16Kcal/mol로서 자기확산에 필요한 활성화 에너지보다 적게 나타났다.
- 3) 온도조건이 200°C~230°C이고 응력조건이 8.13~9.55(kgf/mm<sup>2</sup>), 온도조건이 280°C~310°C 응력조건이 1.85~2.55(kgf/mm<sup>2</sup>) 및 온도조건이 380°C~410°C 응력조건이 1.53~1.91(kgf/mm<sup>2</sup>)인 조건에서 측정된 응력지수값은 각각 6.19, 6.51 및 6.62으로 나타났고 또한 측정된 활성화에너지값은 각각 34.96, 35.83 및 34.97(Kcal/mol)로서 자기확산에 필요한 활성화에너지값과 거의 비슷한 값으로 나타났다.
- 4) 온도조건이 470°C~500°C, 응력조건이 0.62~

- 1.02(kgf/mm<sup>2</sup>)에서의 응력지수값은 1.1의 값으로 측정되었고 측정된 활성화에너지값은 36.11(Kcal/mol)로서 자기확산에 필요한 활성화에너지값과 거의 비슷한 값으로 나타났다.
- 5) 이 결과에서 온도 90°C~120°C, 응력 10~17.2(kgf/mm<sup>2</sup>) 조건에서의 변형기구는 교차슬립과정, 온도조건이 200°C~230°C이고 응력조건이 8.13~9.55(kgf/mm<sup>2</sup>), 온도조건이 280°C~310°C 응력조건이 1.85~2.55(kgf/mm<sup>2</sup>) 및 온도조건이 380°C~410°C 응력조건이 1.53~1.91(kgf/mm<sup>2</sup>)인 조건에서의 변형기구는 전위상승, 그리고 온도조건이 470°C~500°C, 응력조건이 0.62~1.02(kgf/mm<sup>2</sup>)에서의 변형기구는 확산이라고 추측된다.
- 6) 정상크리이프 속도와 부가응력에서 구한 측정된 응력지수( $n_{meas}$ )값과 부가응력과 내부응력 결과로부터 계산된 응력지수( $n_{calcu}$ )값은 서로 잘 일치하였고 또한 측정된 활성화에너지( $Q_{meas}$ )는 일정 유효응력 상태하에서의 활성화에너지와 내부응력의 온도의존성과 합한 값( $Q_{calcu}$ )과 서로 잘 일치하였다.
- 7) 파단수명의 응력의존성  $n'$ 값은 6.3~6.6으로 정상상태의 크리이프 속도에 대한 응력의존성  $\bar{n}$ 값의 결과와 거의 일치했고, 파단을 위한 활성화에너지  $Q_f$ 값은 약 32~36.9으로서 정상상태의 활성화 에너지  $Q_c$ 값과 거의 일치했다.
- 8) 파단수명은 다음과 같이 외부응력과 내부응력의 비 및 증분이 영향을 주는 비열적 과정(Athermal process)과 내부응력의 온도의존성이 영향을 주는 열적활성화 과정(Thermal activated process)의 복합으로 표시할 수 있다.
- $$t_f = A' \sigma_a^{\ln_0(1-d\sigma_i/d\sigma_a)/(1-\sigma_i/\sigma_a)} \exp \left\{ [Q^* - (n_0RT^2/E_T)(dE_T/dT) - (n_0RT^2/\sigma_a - \sigma_i)(d\sigma_i/dT)] / RT \right\}$$
- 9) 천이 크리이프 속도와 최소 크리이프속도의 응력 의존성의 비(m/m') 값은 0.46으로 측정되었고 master creep curve에서 천이 크리이프 속도와 최소 크리이프 속도와와의 상관성을 이용하여 단시간 크리이프 시험결과로부터 얻어진 곡선으로부터 최소 변형률 속도를 근사적으로 얻을 수 있다.
- 10) 천이 크리이프와 정상상태 크리이프 속도의 응력의존성을 고려한 새로운 파단 매개변수와와

대수응력 사이의 관계는 다음과 같이 Larson-Miller의 파단 매개변수 항에서 천이 크리이프 속도와 최소 크리이프 속도의 응력 의존성의 비를 고려한 결과식으로 표현되고 이것을 이용하여 파단수명을 정확히 예측할 것으로 기대된다.

$$\log \sigma_a = A - BT \left( c + \frac{m}{m'} \log t_f \right)$$

이 논문은 1993년도 한국학술진흥재단의 공모과제(지방대 육성) 연구비에 의하여 연구되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- 1) Soo W. Nam, 크리이프, 피로 그리고 분위기의 상호작용(I), Journal of the Korean Institute of Metals, Vol. 21, pp. 595~660, 1983.
- 2) Oleg D. Sherby, Creep Correlation in Alpha Solid Solutions of Aluminum, J. of Metal, Sept., pp. 959~964, 1952.
- 3) K. R. Williams and B. Wilshire, Metal Sci. J., Vol. 7, pp. 176~193.
- 4) M. Ohnami; 材料試験 8~66, pp. 15~24(昭 34-3)
- 5) Larson, F. R., and Miller, J., "A Time-Temperature Relationship for Rupture and Creep stresses," Trans. ASME. Vol. 74, p. 765, 1952.
- 6) Orr, R. L., Sherby, O. D., and Dorn, J. E., "Correlation of Rupture Data for Metals at Elevated Temperature," Trans. ASM, Vol. 46, p. 113, 1954.
- 7) Grounes, M., "A Reaction-Rate Treatment of the Extrapolation Methods in Creep Testing," ASME Journal of Basic Engineering, 1969.
- 8) E. Picco, Metallurgical Trans. A, Vol. 14A, pp. 2329~2335, 1983.
- 9) A. H. Cottrell, Dislocation and Plastic Flow in Crystals, Oxford, p. 197, 1953.
- 10) D. M. Kang, The Activation energy and the stress exponent for creep deformation of Al

7075 alloy, Phd. Thesis, 1988. 2

- 11) D.M.Kang, A Study on the creep fracture life of Al 7075 alloy(1), the J. of the Koren institute of industrial safety, Vol. 8, 4호 pp. 27 ~40, 1993.
- 12) O.D.Sherby and P.M.Burke, Progress Mater. Sci., Vol.13, pp. 325, 1967.
- 13) 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.
- 14) S.K Mandal, Mechanism of Recovery in Creep of Aluminum at an intermidiate Temperature, Trans. of the Indian Inst. of Metals, Vol. , pp.14~18, 1971.
- 15) A. Seoger phll, Mag, Vol. 45, pp. 771~773, 1959.
- 16) J. Breen and J. Weertman, Trans, AIME, Vol. 203, pp. 1230~1234, 1955.
- 17) C. V. Vladimiloba, and V. A. LikHachov, Fiz metalloved, Vol. 28, No. 4, pp. 165~169, 1969.
- 18) K. Linga, Murty, M. Gold and Arthur L. Ruoff, J. of App. Phy., Vol. 41, pp. 4917~4927, 1970.

**부 록**

순수금속 및 2~3의 합금에 대해서 경험적으로 구한 Sherbu-Dom의 정상 크리이프 속도식에서 J. K. Tien등의 연구결과를 이용하여 요약 정리하면 다음과 같다.

- 1) 항복의 활성화 에너지( $Q_y$ )와 항복의 걸보기 활성화에너지( $Q'_y$ )와의 관계  
 $Q_y = n Q'_y$  ..... (16)
- 2) 최소 크리이프와 부가 응력과의 관계

- 3) 최소 크리이프 속도의 부가응력 의존성( $\bar{n}$ )의 계산식

$$\bar{n} = \frac{\log(\dot{\epsilon}_{s2}/\dot{\epsilon}_{s1})}{\log(\sigma_{s2}/\sigma_{s1})} \dots\dots\dots (18)$$

- 4) 최소 크리이프 속도의 유효응력 의존성( $n_0$ )의 계산식

$$n_0 = \frac{\log(\dot{\epsilon}_{s2}/\dot{\epsilon}_{s1})}{\log(\sigma_{e2}/\sigma_{e1})} \dots\dots\dots (19)$$

- 5) 최소 크리이프 속도의 부가응력 의존성( $\bar{n}$ )과 유효응력 의존성( $n_0$ )과의 관계식

$$\bar{n} = n_0 [1 - (d\sigma_i/d\sigma_a)/(1 - \sigma_i/\sigma_a)] \dots\dots\dots (20)$$

- 6) 부가응력 일정상태하에서의 활성화에너지( $Q_c$ )의 계산식

$$Q_c = R \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln(\dot{\epsilon}_{s2}/\dot{\epsilon}_{s1}) \dots\dots\dots (21)$$

- 7) 유효응력 일정상태하에서의 활성화에너지( $Q_c^*$ )

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

- 8) 부가응력 일정에서의 활성화에너지( $Q_c$ )와 유효응력 일정에서의 활성화에너지( $Q_c^*$ )의 관계식

$$Q_c = Q_c^* - \frac{n_0 RT^2}{E_T} \frac{dE}{dT} - \frac{n_0 RT^2}{(\sigma_a - \sigma_i)} \frac{d\sigma_i}{dT} \dots\dots\dots (23)$$

- 9) 정상 크리이프 속도와 파단시간과의 관계  
 $t_f = (c/\dot{\epsilon}_s)^k, (k=1)$  ..... (24)

- 10) 크리이프 파단수명( $t_f$ )과 부가응력( $\sigma_a$ )과의 관계

$$t_f = A' \sigma_a^{n'} \exp(Q_f/RT) \dots\dots\dots (25)$$

- 11) 파단시간의 부가응력 의존성( $n'$ )의 계산식

$$n' = \frac{\log(t_{f2}/t_{f1})}{\log(\sigma_2/\sigma_1)} \dots\dots\dots (26)$$

- 12) 크리이프 파단수명을 위한 활성화 에너지( $Q_f$ ) 계산식

$$Q_f = R \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln\left(\frac{t_{f2}}{t_{f1}}\right) \dots\dots\dots (27)$$