

초 두랄루민(AI 2024)의 정적인 크리프 거동

황경충*, 윤종호*

Static Creep Behaviour of Super-Duralumin(AI 2024)

Kyung-choong Hwang*, Jong-ho Yoon*

Abstract

Super-duralumin has widely been used as the part materials of aerospace and automobile industry because it has high specific strength and also is light. But, we have little design data about the creep behaviors of the alloy. Therefore, in this study, every creep test under four constant stress conditions have been conducted for four temperature conditions. A series of creep tests had been performed to get the basic design data and life prediction of super-duralumin products and we have gotten the following results. First, the stress exponents showed the descending trend as the test temperatures increase. Secondly, the creep activation energy gradually decreased as the stresses become bigger. Thirdly, the constant of Larson-Miller parameters on this alloy was estimated about 6. And last, the fractographs at the creep rupture showed both the brittle fracture due to the transgranular rupture.

Key Words : Creep Rate(크리프 속도), Rupture Strain(파단 변형률), Stress Dependence(응력의존성), Activation Energy(활성화에너지), Life Prediction(수명예측), Creep Rupture(크리프 파단), SEM(주사 전자현미경), Fractography(파단면 관찰)

1. 서론

항공기 소재인 초 두랄루민 알루미늄 합금(2024)은 비강도가 높은 장점 때문에 항공기는 물론 자동차, 선박, 군 전투장비, 수압관의 이음쇠 및 구조재 등의 재료로 널리 사용되고 있다. 최근 에너지의 고갈과 지구온난화 영향을 우려하여 자동차의 소형화 및 경량화에 대해 많은 연구를 한다. 또한 초 두랄루민 알루미늄 합금은 경량이면서도 적당한 강도, 우수한 내식성 및 적절한 가공성을 가지기 때문에 고속으로 인한 열 발생이 많은 항공 우주산업의 모체재료 등에 많이 사용되고 있다.

알루미늄 합금의 크리프에 관한 연구는 황¹⁾과 박²⁾ 등이 Al-Zn-Mg계 합금과 Al-Zn-Mg-Cu계 합금의 크리프특성을 연구한 바 있다. Cuddy³⁾는 크리프 중에 유발되는 내부응력 및 구조에 대한 연구를 수행하였다. Bradley⁴⁾는 실온에서 순수한 알루미늄의 피로 크리프특성에 대한 연구를 발표한 바 있다.

본 연구에서는 초 두랄루민 알루미늄 합금을 대상으로 응력과 온도를 변화시키면서 정적 크리프시험을 통하여 각종 실험데이터를 구하는 한편 크리프 변형기구를 규명하고 파단의 균열형태를 관찰하여 파괴기구를 분석함으로써 본 재료의 안정된 사용범위를 예측하는 한편 크리프 저항성이 큰 재료개발에 활용하고자 하였다.

* 황경충, 경일대학교 기계자동차설계학부 (kchwang@lycos.co.kr)

주소: 경상북도 경산시 하양읍 부호리 33 번지

+ 경일대학교 기계자동차학부

본 실험에서는 4가지의 온도조건과 4단계의 하중을 가하여 알루미늄 합금에 대한 크리프시험을 하여 해당 부품의 잔여수명을 예측할 수 있는 방법을 찾고, 이에 적절한 사용조건을 설정함으로써 기기의 수명을 연장시키고, 예상되는 사고를 미연에 방지함과 동시에 향후 본 연구를 토대로 신소재 개발에 필요한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 크리프 이론

허용 응력을 규정하는 크리프강도는 크리프시험을 통하여 얻어지고, 이들을 이용한 기계부품들의 수명예측이 가능하다. 크리프시험에서는 시험편에 일정한 하중을 유지시킨 후 파단에 소요되는 파단시간과 파단 변형율을 측정한다. 일정한 하중을 가하고 시험하는 경우는 시험도중 시험편의 단면적 감소에 따라 응력이 계속 증가하게 된다. 크리프 변형속도는 응력에 크게 의존하므로 일정한 응력하에서 시간에 따른 변형을 측정하여 온도와 응력의 불변조건 하에서 변형율(ϵ)과 정상 크리프 변형속도($\dot{\epsilon}_s$)를 측정할 수 있다.

¹⁾ 정상적인 크리프곡선에서 변형초기에는 시간변화에 대한 크리프속도가 늦으나 어느 정도 시간이 경과된 후에는 변형속도가 일정해진다. 그 후 계속하여 변형이 진행되면 변형속도가 점진적으로 빨라지는 구간에 도달되며 결국은 파단된다.⁵⁻⁷⁾

2.1 크리프 변형율속도의 응력의존성

변형율 속도에 대해 Cuddy가 제안한 식^{3,7)}은

$$\dot{\epsilon}_s = K\sigma^n \quad (1)$$

여기서, K : 구조상수, σ : 응력(MPa),

n : 응력지수

식(1)의 양변에 로그를 취하면 다음 식이 얻어진다.

$$\log \dot{\epsilon}_s = \log K + n \log \sigma \quad (2)$$

2.2 크리프 활성화에너지와 변형율 속도의 관계

크리프변형은 열적 활성화과정에 의해 진행되므로 크리프 변형속도는 다음의 Arrhenius방정식으로 표시할 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_s = K \cdot \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right) \quad (3)$$

여기서, Q_c : 크리프 활성화에너지(kcal/mol),

K : 응력, 조직, 온도에 따른 구조상수,

R : 기체상수(8.314 kcal/mol)

T : 절대온도(K)

식(3)의 양변에 로그를 취하면 다음같이 된다.

$$\log \dot{\epsilon}_s = \log K - \frac{Q_c}{2.303RT} \quad (4)$$

2.3 파단수명의 예측

다양한 합금들에 대하여 폭넓게 적용되는 Larson-Miller⁸⁾변수를 활용할 수 있다. 이 변수 P 는 다음 식으로 계산된다.

$$P = T (\log t_r + C) \quad (5)$$

여기서, T : 켈빈 온도(K), σ : 응력(MPa),

t_r : 파단시간 (hr), C : 상수

3. 실험 및 연구방법

3.1 시험편

본 크리프시험에 사용된 초 두랄루민 알루미늄 합금은 Al이 주성분을 이루고, 미량의 Zn, Mg 및 Mn을 함유한 합금으로 화학적 성분은 Table 1과 같다. 크리프시험편 제작은 ASTM 규격에 의하여 두께 1mm의 판상으로 인장방향과 압연방향이 평행하도록 한 표점거리는 9.6mm인 인장 크리프 시험편으로 와이어 방전가공기를 사용하여 가공하였다. 시험편의 압연방향에 있을 수 있는 가공 영향을 제거시키고, 강도와 경도를 높이기 위해 열처리에서 균질화 처리로 500℃에서 1시간 동안 열처리를 시킨 후 노냉(furnace cooling)을 실시하였다. 시험편의 기계적 성질은 Table 2와 같다.

Table 1 Chemical compositions of Al Alloy

Zn	Mg	Mn	Cu	Cr	Al
5.42	2.85	0.1	2.2	0.2	BAL.

Table 2 Mechanical properties of specimen

Yield-point Strength (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Percent Elongation
133.5	172.4	8.9

3.2 크리프 시험장치

실험장치는 Andrade와 F. Garofalo 등이⁹⁻¹⁰⁾ 고안한 레버형의 크리프 실험기를 활용하였다.¹⁾ 시험기의 가열로는 타원형의 적외선 노이며, 시험편은 가열로의 석영관 내에 장치할 수 있도록 되어있다. 실험할 때 노내에 일정한 시험 온도가 유지되도록 시험편의 온도변화가 $\pm 1^\circ\text{C}$ 이하로 조절 되도록 하는 제어장치를 노에 연결하였다. 그리고 시험편의 크리프 변형량은 LVDT(linear variable differential transformer)를 활용하여 $\pm 0.5\mu\text{m}$ 까지 측정 가능하도록 하였다.

Table 3 Mechanical properties of specimen

Temp. ($^\circ\text{C}$)	Stress (MPa)	Creep rate, (hr^{-1})	Rupture time, (hr)
350	150	0.00567	over 168
	160	0.0102	"
	170	0.01651	"
	180	0.0241	"
365	150	0.01273	"
	160	0.01875	"
	170	0.02453	166
	180	0.0376	151
375	150	0.02443	155
	160	0.03642	141
	170	0.05856	128
	180	0.08561	99
385	150	0.03659	138
	160	0.05243	104
	170	0.0761	82
	180	0.1522	47

3.3 시험방법

크리프시험에서 시험편의 양단은 볼트로 고정시키고, 열전대를 시험편 중앙에 위치시켰다.

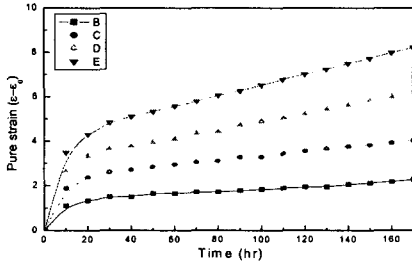
크리프시험 설정조건은 시험편에 미치는 영향을 알아보기 위하여 350°C 로부터 15°C 의 온도간격으로 상승시켜 365 , 375 및 385°C 의 4가지 온도조건으로 설정하였으며, 응력은 150 , 160 , 170 및 180 MPa 의 4가지 조건을 설정하여 전체적으로 16가지의 조건 하에서 시험을 실시하였다. 시험조건은 Table 3에 나타내었다. 시험후 주사 전자현미경(SEM)으로 파단면을 관찰하여 파괴의 양상을 분석한다.

4. 실험결과 및 고찰

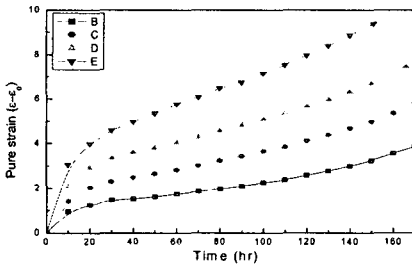
4.1 크리프 곡선

본 연구에서 크리프시험 조건인 온도범위 $350\sim 385^\circ\text{C}$ 의 구간과 응력범위 $150\sim 180\text{ MPa}$ 의 구간에서 온도와 하중을 변화시키며, 시험한 결과 Fig. 2의 크리프곡선을 얻었다. 시험에서 얻어진 시간-변위 값으로부터 시간변화에 대한 진변형률(pure strain)을 계산하여 그린 것이다.

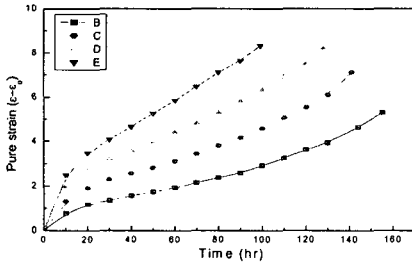
Fig. 1의 크리프 변형률 곡선은 Table 3을 기초로 하여 그린 것이다. (a)는 350°C 에서의 크리프 곡선으로 초기 단계가 짧게 나타났으며, 정상 크리프 구간이 계속되는 현상을 보여준다. $150\sim 180\text{ MPa}$ 에서는 시험편의 파단이 일어나지 않았고, 1주일(168시간) 이상 계속해서 늘어나는 양상을 보여주고 있다. (b)는 온도 365°C 에서는 전 구간에서 I 단계, II 단계 및 III단계가 구분 가능한 일반적인 크리프 곡선 형태를 보여주었다. 크리프 시험 응력 $150\sim 160\text{ MPa}$ 에서는 1주일 이상 계속 늘어났다. $170\sim 180\text{ MPa}$ 조건 하에서 각각 시험편의 파단은 각각 166 및 151 시간만에 일어났음을 보여준다. (c)는 온도 375°C 에서 크리프저항성과 파단 변형은 $150\sim 180\text{ MPa}$ 조건 하에서 시험편의 파단에 소요된 시간은 155, 141, 128 및 99시간만에 나타났다. (d)는 온도 385°C 에서는 하중의 증가에 따라 크리프저항성이 감소하였고 파단 변형률도 감소하였으며, $150\sim 180\text{ MPa}$ 에서 각 시험편의 파단시간은 138, 104, 82 및 47시간만에 나타났다.



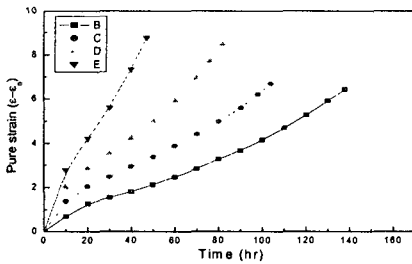
(a) 350°C



(b) 365°C



(c) 375°C



(d) 385°C

Fig. 1 Creep strain curves as time functions

4.2 크리프변형과 응력의존성

식(2)에 따라 $\dot{\epsilon}_s$ 와 σ 의 관계를 그림으로 나타낸 것이 Fig. 2이다. $\dot{\epsilon}_s$ 와 σ 의 관계는 선형적으로 나타났으며, 이 직선의 기울기가 응력지수값(n)이 된다. 크리프시험 온도가 350°C에서 385°C로 15°C씩 증가함에 따라 응력지수값은 각각 12.44, 9.93, 9.63 및 9.16의 순서로 점점 작아지는 경향을 보여주었다. 이와 같은 경향은 온도가 높아질수록 전위밀도가 감소하고 이에 따라 응력 감소효과가 높아지기 때문이다.

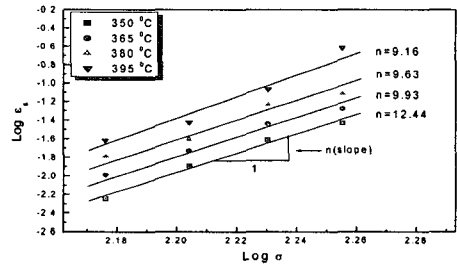


Fig. 2 Dependence of creep rate on applied stresses

4.3 크리프변형에 대한 활성화 에너지

식(4)에서 크리프 활성화에너지 Q_c 값을 $\ln \dot{\epsilon}_s$ 과 $1/T$ 와의 기울기[- $Q_c/(2.303R)$]로부터 구할 수 있으므로 Fig. 3에서 직선의 기울기를 계산하면 Q_c 를 계산할 수 있다. 응력 150~180 MPa에 대해 각각의 활성화에너지를 계산하면 167.4, 159.59, 158.07 및 154.89 kcal/mol값을 얻었다. 활성화에너지는 응력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 볼 수 있는데, 이와 같은 현상은 Bradley 등이 주장한 크리프 활성화에너지와 유효응력 관계에서도 확인할 수 있다.⁴⁾

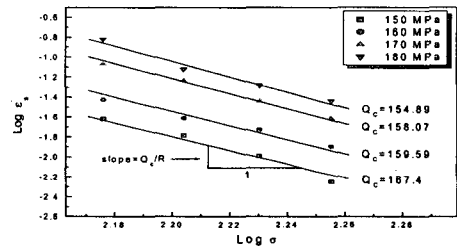


Fig. 3 Dependence of creep rate on temperature

4.4 크리프 잔존수명 예측

크리프시험 데이터 Table 3에서 재료의 파괴시간을 비교해보면 외부응력 증가에 따라 파괴수명은 급격히 감소하고 있다. 같은 응력에서 온도증가에 따라 파단수명은 급격히 감소한다. 어느 온도영역에서의 파단수명을 알고 있으면 다른 온도영역에서의 파단수명을 예측할 수 있다.

Table 3의 데이터를 이용하여 각각의 응력별로 $\log(t_r)$ 과 절대온도의 역수 ($1/T$)간의 상관관계 그래프를 Fig. 4에 나타내었다. 응력별로 직선식의 계산을 위해 최소 자승오차 회귀직선식을 구하면 각 응력별 기울기가 P 의 값이 되고, 상수 C 는 6정도가 되었으며, Fig. 5로도 확인되었다. 즉,

$$P = T (\log t_r + 6) \quad (6)$$

이 식으로부터 온도와 응력 조건들이 주어지면 티타늄 합금의 수명(t_r)이 계산될 수 있다.

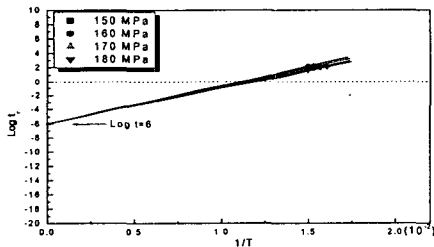


Fig. 4 Determination of constant at Larson-Miller parameters from relation plots between $\log(t_r)$ and $(1/T)$ according to the stresses

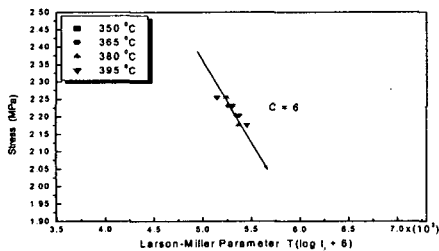
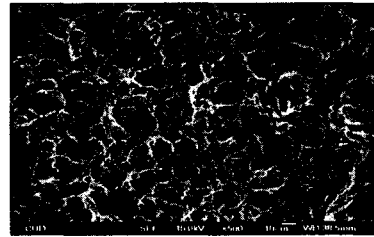


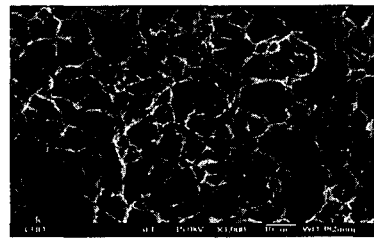
Fig. 5 Correlation of Larson-Miller parameter for Aluminum alloy by the experimental stress-rupture curves

4.5 주사 전자 현미경 고찰

항공기 소재인 초 두랄루민 알루미늄 합금의 크리프시험 후 파단면의 미세 조직관찰은 주사 전자현미경으로 관찰하였으며, 16가지의 실험조건들 중에서 대표적인 파단면의 사진들을 분석해 본 결과 입계파단에 의한 취성파괴 현상을 Fig. 6(a, b)에서 확인할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 6 SEM micrograph of static creep rupture after creep test under the various stresses

5. 결론

본 연구에서는 항공기 소재로 많이 사용되고 있는 초 두랄루민(Al 2024) 합금에 대한 크리프시험과 그 시편들의 파단면을 관찰하여 다음과 같은 결과들을 얻었다.

- (1) 크리프 시험온도가 증가함에 따라 크리프 변형에 따른 응력 지수는 12.44, 9.93, 9.63 및 9.16 으로 점차적으로 감소하는 경향이 나타났다.
- (2) 크리프 변형의 활성화에너지는 가해진 응력의 증가에 따라서 167.4, 159.59, 158.07 및 154.89 kcal/mol 로 점차적으로 감소하는 경향을 보였다.
- (3) 초 두랄루민 합금강은 본 연구의 조건들에서 Larson-

Miller 변수의 계산에서 수명예측 상수 C값은 약 6정도로 확인되었다.

- (4) 파단면은 입내파단에 의한 취성파괴 현상이 주도적으로 나타났으며, 딩플현상도 많이 나타났다.

Constant Load Creep Tests," Trans. of ASME, Series D, J. of Basic Engineering, Vol. 84, pp. 287~293.

참 고 문 헌

- (1) Hwang K. C., Yoon, J. H., 2004, "Creep Behaviour of Al-Zn-Mg Ternary Aluminum Alloy," J. of KSAE, Vol. 12, No. 1, pp. 203~208, 2004.
- (2) Park, J. K., 1996, *A Study on the Static and Cyclic Creep Behavior of Al-Zn-Mg and Al-Zn-Mg-Cu Aluminium Alloys*, Chungbuk National University Graduate School, Doctoral Thesis.
- (3) Cuddy L. J., 1770, "Internal Stresses and Structures Developed During Creep," Met. Trans., Vol. 1, pp. 395~401.
- (4) Bradley W. L., Nam S. W. and Matlock D. K., 1976, "Fatigue Perturbed Creep of Pure Aluminum at Ambient Temperatures," Met. Trans., Vol. 7A, pp. 425~430.
- (5) Dorn J. H., 1961, *The Mechanical Behaviour of Materials at Elevated Temperature*, McGraw-Hill, New York, pp. 432--443.
- (6) Andrade E. N. da C., 1910, "On the Viscous Flow in Metals and Allied Phenomena," Proc. Roy. Soc., Series A, London, UK, Vol. 84, pp. 1~12.
- (7) Garofalo F., 1965, *Fundamentals of Creep and Creep-Rupture in Metals*, The Macmillian Company, New York, p. 258.
- (8) Larson, F. R. and Miller, J., 1952, "A Time-Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses," Transaction of the ASME, Vol. 74, pp. 765~775.
- (9) Andrade E. N. da C, 1910, "On the Viscous Flow in Metals and Allied Phenomena," Proc. Roy. Soc., Series A, London, UK, Vol. 84, pp. 1~12.
- (10) Garofalo F., Richmond O. and Domis W. F., 1962, "Design of Apparatus for Constant Stress or