

Al-Zn-Mg 3원계 알루미늄 합금의 크리프 거동

윤종호* · 황경충

경일대학교 기계공학부

Creep Behaviour of Al-Zn-Mg Ternary Aluminum Alloy

Jongho Yoon* · Kyungchoong Hwang

School of Mechanical Engineering, Kyungil University, Gyeongsbuk 712-701, Korea

(Received 9 October 2003 / Accepted 2 December 2003)

Abstract : To make practical applications of Al-Zn-Mg ternary aluminum alloy effectively in various field, a series of static creep tests under the 16 temperature-stress combination conditions had been performed. The creep tester with constant stress loading was designed and made by the authors and used in this study. The higher the creep temperature rose, the less the stress exponents became. The bigger the applied stresses became, the less values the creep strain activation energy showed. The life prediction constant of Larson-Miller parameter was calculated as about 2.3. In the fractography, the ductile fracture with dimples by intergranular breakage was primarily observed. We can make practical use of these test data in the design, the life prediction and the prevention of the accidents of the thermal facilities, etc.

Key words : Creep rate(크리프 속도), Rupture strain(파단 변형율), Creep rupture(크리프 파단), SEM(주사형 전자현미경), Stress dependence(응력 의존성), Creep life prediction(크리프 수명 예측), Activation energy(활성화 에너지), Fractography(파단면 관찰)

1. 서론

3원계(Al-Zn-Mg) 알루미늄 합금은 비강도가 높은 장점 때문에 최근 항공산업과 자동차산업 등에 많이 사용되고 있다. 최근 에너지의 고갈과 지구온난화 영향을 우려하여 자동차의 소형화 및 경량화에 대해 많은 연구를 한다. Al합금은 경량이면서도 적당한 강도와 우수한 내식성 및 적절한 가공성을 가지기 때문에 고속으로 인한 열 발생이 많은 항공기의 동체재료 등에 많이 사용되고 있다.

3원계 알루미늄 합금의 크리프에 대한 국내의 연구로는 박¹⁾이 Al-Zn-Mg계 합금과 Al-Zn-Mg-Cu

계 합금의 크리프 특성을 연구한 바 있다. Cuddy²⁾는 크리프 중에 유발되는 내부응력 및 구조에 대한 연구를 수행하였다. Bradley³⁾는 실온에서 순수한 알루미늄의 피로 크리프 특성에 대한 연구 등을 발표하였다.

본 연구에서는 3원계 알루미늄 합금을 대상으로 응력과 온도를 변화시키면서 정적 크리프시험을 하였으며, 각종 실험데이터를 분석함으로써 크리프 변형기구를 규명하고 파단의 균열형태를 관찰하였으며 파괴기구를 분석하였다. 본 재료의 안정된 사용범위를 예측하는 한편 크리프 저항성이 큰 재료 개발에 활용하고자 하였다. 본 실험에서는 4가지의 온도조건과 4단계의 응력을 가하여 3원계 알루미늄 합금에 대한 크리프시험을 하여 해당 부품의 잔여

*To whom correspondence should be addressed.
jhyoon@kiu.ac.kr

수명을 예측할 수 있는 방법을 찾고, 이에 적절한 사용조건을 설정함으로써 기기의 수명을 연장시키고, 예상되는 사고를 미연에 방지하고자 하였다.

2. 크리프이론

2.1 크리프 강도 및 이론

허용응력을 규정하는 크리프강도는 크리프 파단 시험을 통하여 얻어지고, 이들을 이용한 기계부품들의 수명예측이 가능하다. 크리프시험에서는 시험편에 일정한 하중을 유지시킨 후 파단에 소요되는 파단시간(rupture time)과 파단 변형률(rupture strain)을 관찰한다. 최저 크리프 변형속도를 측정하여 재료의 유효수명 및 사용조건에 맞는 허용 하중을 알아낼 수 있다. 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 불변 조건하에서 정상 크리프 변형속도(steady state creep rate)를 측정할 수 있다. 정상적인 크리프곡선에서 변형초기에는 시간변화에 대한 크리프속도가 낮으나 어느 정도 시간이 경과된 후에는 변형속도가 일정해진다. 그 후 계속하여 변형이 진행되면 변형속도가 점진적으로 빨라지는 구간에 도달되며, 결국은 파단된다.^{4,6)}

3. 실험

3.1 시험편 및 시험방법

고온 크리프시험에 사용된 3원계 합금은 Al, Zn 및 Mg가 주성분을 이루고 있으며, 소량의 Cr, Cu를 함유한 합금으로 화학적 성분은 Table 1과 같다. 크리프시험편은 ASTM 규격에 따라 와이어 방전가공

Table 1 Chemical compositions of Al-Zn-Mg Alloy

Zn	Mg	Mn	Cu	Cr	Al
4.5	1.9	0.5	0.007	0.001	BAL.

Table 2 Mechanical properties of specimen

Yield point strength (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Elongation (%)
233.5	272.7	13.8

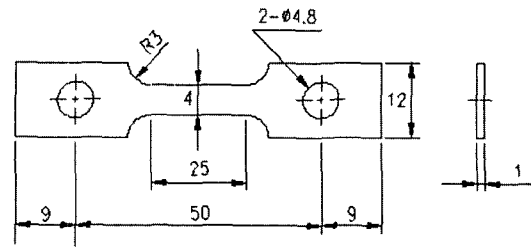


Fig. 1 Dimensions of tensile creep specimen

기를 사용하여 가공하였다. 와이어 방전가공기를 이용하여 가공하게 되면 시험편이 열응력을 받게 된다. 이의 해소를 위해 알루미늄의 용융온도를 감안하여 300°C로 1시간 동안 풀림처리 한 후 표면의 산화막을 제거하고 아세톤으로 세척하였다. 시험편의 치수는 Fig. 1에 나타내었으며, 기계적 성질은 Table 2와 같다.

3.2 크리프 시험장치

실험장치는 Andrade와 F. Garofalo 등이^{5,7)} 고안한 캔티레버 형을 설계 및 제작하여 이용하였다. 실험장치에 부착된 가열로는 타원형의 적외선 노이며 시험편은 가열로의 석영관 내에 장치할 수 있도록 되어있다. 실험할 때 노내에 일정한 시험온도가 유지되도록 시험편의 온도변화가 $\pm 1^\circ\text{C}$ 이하로 조절 되도록 하는 제어장치를 노에 연결하였다. 그리고 시험편의 크리프변형량은 LVDT를 활용하여 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 까지 가능하도록 측정하였다. 실험장치의 개략도를 Fig. 2에 도시하였다.

3.3 시험방법

Fig. 2에 보인 크리프 시험편의 양단은 볼트로 고정시키고, 열전대를 시험편 중앙에 위치시켰다. 또한 석면을 이용하여 노내의 열이 밖으로 새지 않도록 하였다.

크리프시험 설정조건은 시험편에 미치는 영향을 알아보기 위하여 180°C로부터 20°C의 온도간격으로 상승시켜 200, 220 및 240°C의 4가지의 온도조건을 설정하였으며, 응력은 200, 220, 240 및 260 MPa의 4가지 조건을 설정하여 전체적으로 16가지의 조건하에서 시험을 실시하였다. 시험조건은 Table 3에 나타내었다. 시험후 주사 전자현미경(SEM)으로 파

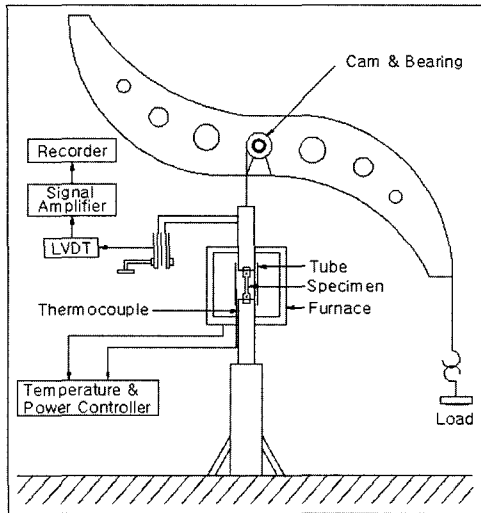


Fig. 2 Schematic diagram of static creep tester with constant stress loading

Table 3 Experimental static creep data of Al-Zn-Mg alloy

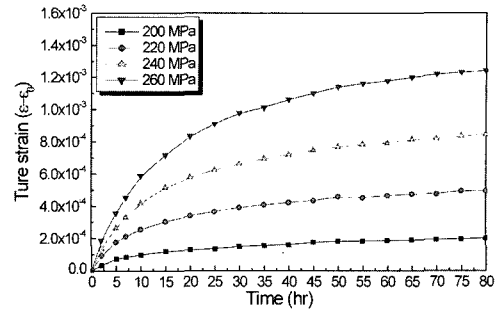
Temp. (°C)	Stresses (MPa)	Creep rate, (hr ⁻¹)	Rupture time, (hr)
180	200	1.617x10 ⁻⁶	over 168
	220	2.696x10 ⁻⁶	"
	240	3.366x10 ⁻⁶	"
	260	4.806x10 ⁻⁶	"
200	200	4.34x10 ⁻⁶	"
	220	7.398x10 ⁻⁶	70
	240	1.185x10 ⁻⁵	63
220	200	1.547x10 ⁻⁵	55
	220	7.003x10 ⁻⁶	77
	240	1.275x10 ⁻⁵	64
240	220	2.065x10 ⁻⁵	52
	240	3.116x10 ⁻⁵	38
	260	1.209x10 ⁻⁵	60
240	220	2.322x10 ⁻⁵	48
	240	3.314x10 ⁻⁵	39
	260	4.474x10 ⁻⁵	28

단면을 관찰하여 파괴의 양상을 분석하였다.

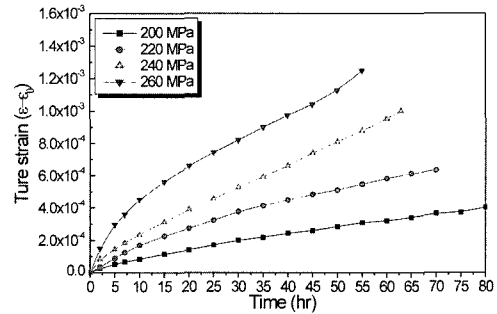
4. 실험결과 및 고찰

4.1 크리프

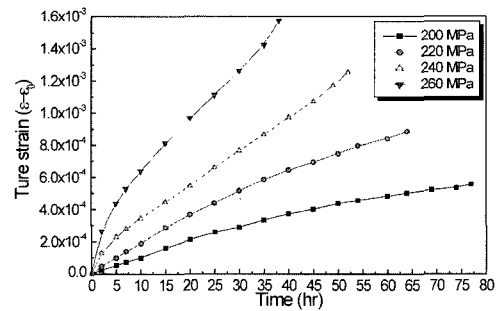
본 연구에서 크리프시험 조건인 온도범위 180 ~240°C의 구간과 응력범위 200, 220, 240 및 260 MPa의 구간에서 온도와 하중을 변화시키며, 시험한



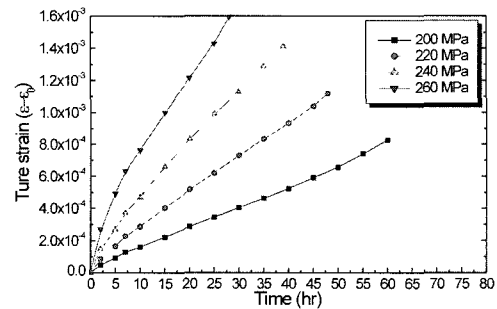
(a) 180°C



(b) 200°C



(c) 220°C



(d) 240°C

Fig. 3 Creep strain curves as time functions

결과 Fig. 3의 크리프곡선을 얻었다. 시험에서 얻어

진 시간-변위 값으로부터 시간변화에 대한 진 변형률(true strain)을 계산하여 그린 것이다. ϵ_0 이 초기 변형률이라 하면, 전체 변형률, ϵ 은 다음 식으로 정의된다.

$$\epsilon = \ln(e+1) = \ln\left(\frac{l_0 + \Delta l}{l_0}\right) \quad (1)$$

여기서, e : 공칭 변형률, l_0 : 초기 길이
 Δl : 변형길이

각각의 시간 t 에 대한 변형률 ϵ_t 를 이용하여 정상 상태 크리프속도 $\dot{\epsilon}_s$ 는 다음 식으로 된다.

$$\dot{\epsilon}_s = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

여기서, $\dot{\epsilon}_s$: 정상상태의 크리프속도

ϵ_1, ϵ_2 : t_1, t_2 에서 변형률

t_1, t_2 : 각각의 크리프시간

Fig. 3의 크리프 변형률 곡선은 Table 3을 기초로 하여 그린 것이다. (a)는 180°C에서의 크리프 곡선으로 초기 단계가 짧게 나타났으며, 정상 크리프 구간이 계속되는 현상을 보여준다. 200~260 MPa에서는 시험편의 파단이 일어나지 않았고, 1주일(168시간) 이상 계속해서 늘어나는 양상을 보여주고 있다. (b)는 온도 200°C에서는 크리프 시험 응력 200 MPa에서 1주일 이상 계속 늘어났다. 220~260 MPa 조건 하에서 각각 시험편의 파단시간은 각각 70, 63 및 55 시간만에 일어났음을 보여준다. (c)는 온도 220°C에서 크리프 시험 응력 200~260 MPa에서 각 시험편들의 파단에 소요된 시간은 77, 64, 52 및 38 시간만에 나타났다. (d)는 온도 240°C에서는 하중의 증가에 따라 크리프저항성과 파단 변형률이 감소하였으며, 크리프저항성과 파단 변형률 모두 실험조건 중 가장 큰 값을 보이고 있다. 200~260 MPa에서 각 시험편의 파단시간은 60, 48, 39 및 28시간만에 나타났다.

4.2 크리프변형의 응력 의존성

크리프 변형률속도의 응력 의존성은 Cuddy와 Garofalo가 제안한 정상 변형률 속도에 대한 다음 식으로 표시된다.^{2,6)}

$$\dot{\epsilon}_s = K\sigma^n \quad (3)$$

여기서, K 는 구조상수, σ 는 응력(MPa),
 n 은 응력지수

식 (3)의 양변에 로그를 취하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\log \dot{\epsilon}_s = \log K + n \log \sigma \quad (4)$$

식 (4)에 따라 $\dot{\epsilon}_s$ 와 σ 의 관계를 그림으로 나타낸 것이 Fig. 4이다. $\dot{\epsilon}_s$ 와 σ 의 관계는 선형적으로 나타났으며, 이 직선의 기울기가 응력지수 값(n)이 된다. 크리프 시험온도가 180°C에서 240°C로 20°C씩 증가함에 따라 응력지수 값은 각각 7.29, 6.50, 6.34 및 6.05의 순서로 점점 작아지는 경향을 알 수 있다.

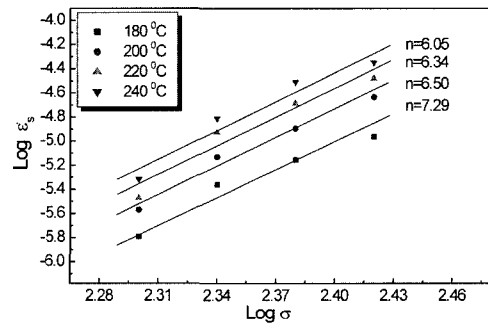


Fig. 4 Dependence of creep rate on applied stresses

이와 같은 경향은 온도가 높아질수록 전위밀도가 감소하고 이에 따라 응력 감소효과가 높아지기 때문으로 사료된다.

4.3 크리프변형에 대한 활성화에너지

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

$$\dot{\epsilon}_s = K \cdot \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right) \quad (5)$$

여기서, Q_c : 크리프활성화 에너지(kcal/mol),

K : 응력, 조직, 온도에 따른 구조상수,

R : 기체상수(8.314 kJ/mol)

T : 절대온도(K)

식 (5)의 양변에 로그를 취하면 다음같이 된다.

$$\ln \dot{\epsilon}_s = \ln K - \frac{Q_c}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (6a)$$

$$\text{즉, } \log \dot{\epsilon}_s = \log K - \frac{Q_c}{2.303RT} \quad (6b)$$

이 식으로부터 Q_c 값은 $\log \dot{\epsilon}_s$ 과 $1/T$ 와의 기울기 $[-Q_c/(2.303R)]$ 로부터 구할 수 있으므로 Fig. 5에서 직선의 기울기를 계산하면 크리프 활성화에너지 Q_c 를 계산할 수 있다. 가해진 응력 200~260 MPa에 대해 각기 활성화에너지를 계산하면 70.35, 67.07, 66.43 및 65.09 kcal/mol로 계산되었다. 활성화에너지는 응력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 볼 수 있는데, 이와 같은 현상은 Bradley 등이 주장한 크리프 활성화에너지와 유효 응력 관계에서도 확인할 수 있다.³⁾

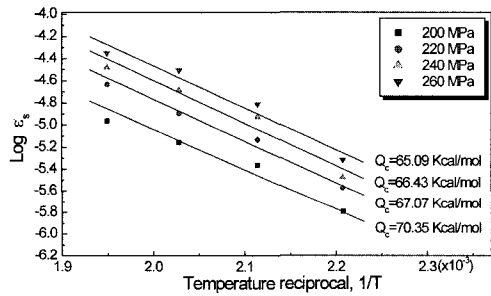


Fig. 5 Dependence of creep rate on temperature

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.

파단수명의 예측은 Manson-Haford⁸⁾ 및 Larson-Miller변수가 주로 사용되는 데 본 연구에서는 계산이 간단하여 자주 이용되는 후자를 이용하여 수명을 예측하여 보았다. Larson-Miller 변수 P 는 다음 식으로 계산된다.

$$P = f(\sigma) = T (\log t_r + C) \quad (7a)$$

$$\log t_r = \frac{P}{T} - C \quad (7b)$$

여기서, T : 켈빈 온도(K), σ : 응력(MPa),
 t_r : 파단 시간(hr), C : 상수

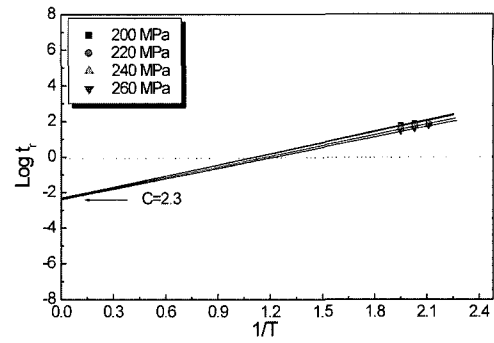


Fig. 6 Determination of constant at Larson-Miller parameters from relation plots between $\log(t_r)$ and $(1/T)$ at various stresses

Table 3의 데이터를 이용하여 각각의 응력별로 $\log(t_r)$ 과 절대온도의 역수($1/T$)간의 상관관계 그래프를 Fig. 6에 나타내었다. 응력별로 직선식의 계산을 위해 최소 자승오차 회귀직선식을 구하면 각 응력별 기울기는 P 의 값이 되고, 상수 C 는 2.3정도로 확인되었다. 즉,

$$P = T (\log t_r + 2.3) \quad (8)$$

이 식으로부터 온도와 응력 조건들이 주어지면 3원계 알루미늄 합금의 수명(t_r)이 계산될 수 있다.

4.5 주사 전자현미경 고찰

파단면의 조직은 주사 전자현미경으로 관찰하였으며, 16 가지의 실험조건들 중에서 대표적인 파단면의 사진을 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 덩플들이 보이는 것은 입계에서 연성파괴가

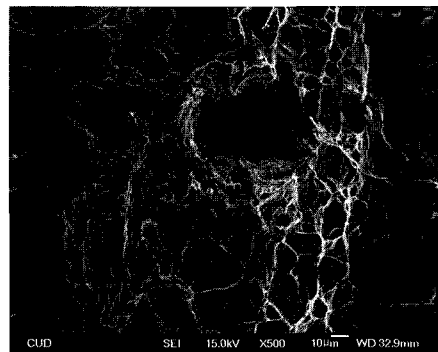


Fig. 7 SEM micrograph of static creep rupture after creep test under the various stresses

일어났다는 것을 보인다. 큰 덩플과 작은 덩플이 혼합된 형태로 나타나고 있는 데 큰 덩플은 개재물 주위에 형성된 공동이고 작은 덩플들이 이것을 결합시켜 주고 있는 모습이다.

5. 결론

본 연구에서는 3원계(Al-Zn-Mg) 알루미늄 합금에 대한 크리프 특성 연구를 하였다. 크리프 변형에 따른 응력지수, 크리프 변형의 활성화에너지, 수명예측 및 파단면을 연구하여 다음의 결론들을 얻었다.

- 1) 크리프 시험온도가 증가함에 따라 크리프 변형에 따른 응력지수는 7.29, 6.50, 6.34 및 6.05로 점차적으로 감소한다.
- 2) 크리프 변형의 활성화에너지는 가해진 응력의 증가에 따라서 70.35, 67.07, 66.43 및 65.09 kcal/mol 로 점차적으로 감소한다.
- 3) 3원계 알루미늄 합금은 본 연구의 조건들에서 Larson-Miller변수의 계산에서 수명예측 상수 C값은 약 2.3 정도이다.
- 4) 파단면은 입계파손에 의한 연성파괴의 일반적 형태인 덩플들이 관찰되었다.

References

- 1) J. G. Park, A Study on the Static and Cyclic Creep Behavior of Al-Zn-Mg and Al-Zn-Mg-Cu Aluminium Alloys, Doctoral Thesis, Chungbuk National Univ. Graduate School, 1996.

- 2) L. J. Cuddy, "Internal Stresses and Structures Developed During Creep," *Met. Trans.*, Vol.1, pp.395-401, 1970.
- 3) W. L. Bradley, S. W. Nam, D. K. Matlock, "Fatigue Perturbed Creep of Pure Aluminum at Ambient Temperatures," *Met. Trans.*, Vol.7A, pp.425-430, 1976.
- 4) J. H. Dorn, *The Mechanical Behaviour of Materials at Elevated Temperature*, McGraw-Hill, New York, pp.432-443, 1961.
- 5) E. N. da C. Andrade, "On the Viscous Flow in Metals and Allied Phenomena," *Proc. Roy. Soc., Series A*, London, UK, Vol.84, pp.1-12, 1910.
- 6) F. Garofalo, *Fundamentals of Creep and Creep-Rupture in Metals*, The Macmillian Company, New York, p.258, 1965.
- 7) F. Garofalo, O. Richmond, W. F. Domis, "Design of Apparatus for Constant Stress or Constant Load Creep Tests," *Trans. of ASME, Series D, J. of Basic Engineering*, Vol.84, pp.287-293, June 1962.
- 8) S. S. Manson, A. M. Haferd, "A Linear Time-Temperature Relation for Extrapolation of Creep and Stress Rupture Data," NASA-TN-2890, National Aeronautics and Space Administration, Mar. 1953.
- 9) B. J. Kim, Y. I. Kwon, B. S. Lim, "A Study on the Life Prediction Method using Artificial Neural Network under Creep-Fatigue Interaction," *Transactions of KSAE*, Vol.9, No.6, pp.135-142, 2001.