

AZ31 마그네슘 합금의 고온 크리이프 변형특성에 관한 연구

안 정 오¹⁾ · 강 대 민²⁾ · 구 양²⁾ · 심 성 보²⁾

부경대학교 대학원¹⁾ · 부경대학교 기계공학부²⁾

A Study on the Creep Deformatin Characteristic of AZ31 Mg Alloy at High Temperature

Jungo An¹⁾ · Daemin Kang²⁾ · Yang Koo²⁾ · Sungbo Sim²⁾

¹⁾Graduate School, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

(Received 24 February 2005/ Accepted 30 March 2005)

Abstract : The apparent activation energy Q_c , the applied stress exponent n , and rupture life have been determined from creep test results of AZ31 Mg alloy over the temperature range of 200 °C to 300 °C and the stress range of 23.42 MPa to 93.59 MPa, respectively, in order to investigate the creep behavior. Constant load creep tests were carried out in the equipment including automatic temperature controller with data acquisition computer.

At the temperature of 200 °C~220 °C and under the stress level of 62.43~93.59 MPa, and at around the temperature of 280 °C~300 °C and under the stress level of 23.42~39.00 MPa, the creep behavior obeyed a simple power-law relating steady state creep rate to applied stress and the activation energy for the creep deformation was nearly equal to that of the self diffusion of Mg alloy including aluminum

From the above results, at the temperature of 200 °C~220 °C the creep deformation for AZ31 Mg alloy seemed to be controlled by dislocation climb but controlled by dislocation glide at 280 °C~300 °C. And relationship between rupture time and stress at around the temperature of 200 °C~220 °C and under the stress level of 62.43~93.59 MPa, and again at around the temperature of 280 °C~300 °C and under the stress level of 23.42~39.00 MPa, respectively, appeared as follow;

$$\log \sigma = -0.18(T+460)(\log t_r+21)+5.92, \log \dot{\sigma} = -0.25(T+460)(\log t_r+21)+8.02$$

Also relationship between rupture time and steady state creep rate appears as follow; $\ln \dot{\epsilon} = -0.88 \ln t_r - 2.45$

Key words : Creep rate(크리이프 속도), Deformation mechanism(변형기구), Stress exponent(응력지수), Activation energy(활성화 에너지), Creep rupture life(크리이프 파단수명)

1. 서론

금세기초 이래 크리이프 실험은 광범위한 실험연구 대상이 되어왔고 오래전부터 크리이프 특성 및 변형기구에 대한 상세한 연구가 이루어져 왔다. 크

리이프 변형기구 중 0.4T_m~0.7T_m의 온도 범의에서 발생하는 전위 크리이프에 관한 연구로는 Lagneborg¹⁾가 Mott²⁾에 의하여 제안된 회복 크리이프 이론을 전위 밀도의 온도와 응력의 의존성을 감안하여 이론식을 제시하였다. 이러한 연구는 반 경험적 또는 현상학적 접근 방식을 통하여 이루어졌으며, 이에 대한 실험은 응력이나 온도와 같은 외적 요인

^{*}To whom correspondence should be addressed.
dmkang@pknu.ac.kr

에 의한 서로 독립적인 크리이프 변형의 영향을 해석하기 위하여 행하여 졌다.

한편 마그네슘 합금은 최근 환경보호 및 에너지 절약 문제가 부각되면서 실린더헤드, 시트프레임 및 엔진커버등 특히 자동차부품에 활용도가 대단히 많으므로³⁾ 경량이면서 우수한 성능을 지닌 재료개발을 위해서는 고온에서 마그네슘 합금에 대한 크리이프 특성 연구가 필요하다.

이러한 마그네슘합금의 변형특성에 대한 연구는 다음과같이 I.J.Polmer⁴⁾는 마그네슘합금에 사용되는 대표적인 원소들의 물리적인 성질과 화학적인 성질에 관하여 연구하였는데 그의 연구에 따르면 Al의 첨가는 Mg17Al12상을 형성하는 석출강화원소로 첨가되고 Zn은 고용강화원소로 활용되어질 수 있고 Mn은 Fe와 화합물을 형성하여 내식성을 증대시킨다고 하였다. Sheerly⁵⁾등은 성형성 향상을 위해 고온에서의 순수 마그네슘의 슬립시스템과 온도의존성에 관하여 연구하였다.

Robert⁶⁾의 연구에 의하면 ZK60, AZ80A는 강도적인 측면에서 매우 유리한 마그네슘합금이며 인장하중이 작용할 시에 비교적 큰 연성을 보여 소성가공에서 성형성이 양호하고 인성이 우수하여 압출에서도 적용이 가능하다고 되었다. 그리고 주로 T-5열처리조건이 이용되고 크리이프 저항성을 향상시키기 위하여 AZ80A는 T-6열처리조건을 이용한다고 하였으나 AZ31 마그네슘 합금의 크리이프 특성에 대한 연구는 대단히 불충분한 실정이다.

본 논문에서는 AZ31 마그네슘 합금의 고온에서 크리이프 시험을 통하여 부가응력지수(n) 및 활성화 에너지(Qc)에 대한 실험결과를 토대로 AZ31 마그네슘 합금의 크리이프 변형기구 및 파단수명을 예측하고자 한다.

2. 실험

2.1 시편 및 실험조건

정크리이프 실험에 사용했던 재료는 AZ31 마그네슘 합금으로 NC선반 가공하여 지름 4mm 표점거리 16.3mm의 시편을 제작하였다. 시편의 규격과 화학적 성분은 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다.

정상 크리이프 속도의 응력의존성과 온도의존성

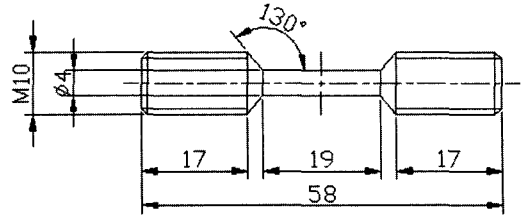


Fig. 1 Creep specimen

Table 1 Chemical composition(Wt.%)

Alloys	Al	Zn	Mn	Fe	Ni	Si	Cu	Mg
AZ31	3.10	1.07	0.30	0.005	<0.001	<0.005	<0.005	Bal.

을 측정하여 변형을 주도하는 변형기구 규명과 master creep curve를 작성하기 위해서 3.1절에 표시된 Table 2와 같은 조건으로 크리이프 실험을 행하였다.

2.2 실험장치

본 실험에서 사용한 크리이프 시험기는 고려전기로에서 제작한 'KF-CT-50'으로 Fig. 2와 같이 크게 운용 소프트웨어(PART1)와 크리이프 시험기(PART2)의 두 부분으로 나눌 수 있다. Fig. 2의 PART2는 다시 전기로, 신장계 및 부하부로 구성되며 전기로 내에서는 열전대와 전열선, 내화재로 구성되어 있다. 노 내 온도유지와 시편의 산화 방지를 위해 잘 밀봉되어 있고 로의 사용온도는 최고 1400°C이다. 변형량을 측정하는 신장계는 컴퓨터와 직접 연결되어 실험 시 화면상에 데이터가 바로 나타난다. 이때 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환시켜주는 변환기에 의해 컴퓨터로 데이터가 전송된

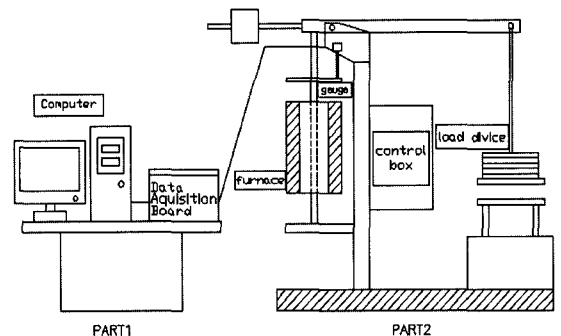


Fig. 2 Equipment for creep experiment

다. 그리고 하중부의 바로 밑 부분은 파단 시 충격을 흡수하고 기계의 안전을 위한 완충장치가 부착되어 있고 하중을 부가하는 부하부의 레버비는 1:10이다.

2.3 실험방법

프로그램 데이터파일 중 하중, 온도, 시편의 각종 정보 등을 입력하고 각 부위의 연결 상태 점검과 센서의 연결 상태가 부드러운지 확인한 후 시편을 플로드에 연결한다. 가장 윗부분인 레벨부분을 봉의 하단 부분의 조정나사를 이용해 수평을 맞춘 다음 컨트롤 박스에서 온도와 시간을 Fig. 3의 화살표 방향으로 조건에 맞게 입력 후 실행시킨다. 실험온도까지 상승되면 하중을 부과하고 컴퓨터 프로그램을 작동시킨다. 작동이 되면 시간과 변위가 나타나고 그래프가 그려진다.

시험을 시작하면 설정 온도까지 올라가기 전 열팽창으로 인한 약간의 변형이 나타나므로 목표치 온도가 되었을 때 하중을 부과한 다음 실험데이터를 기록하기 시작한다.

실험이 시작되면 순간적인 탄성 변형이 나타난 후 서서히 소성 변형이 일어나기 시작한다.

변형과 함께 시편의 단면적은 줄어들며, 시편에는 일정한 하중이 작용하므로 시편이 받는 응력은 변형의 증가와 더불어 차츰 증가한다.

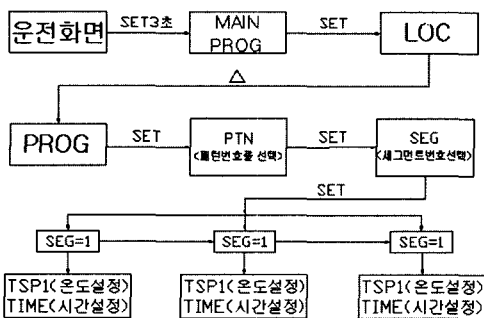


Fig. 3 Flow chart for setting of temperature

본 실험에서는 정상 상태에서의 크리이프 기구를 설명하기 위하여 일정온도 하에서 하중의 변화에 따른 정상 크리이프 속도를 구하고 활성화에너지를 측정하기 위하여 일정하중 하에서 온도 변화에 따른 크리이프 곡선을 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 크리이프 곡선

정상크리이프 속도의 응력의존성과 온도의존성을 규명하기 위하여 온도조건 200°C~220°C 응력조건 62.43~93.59 Mpa, 온도조건 280°C~300°C 응력조건 23.42~39.00MPa 상태하에서 실험하였고 대표적인 실험결과는 Fig. 4~Fig. 5에 나타내었다. 실험 조건 및 크리이프 곡선으로부터 구한 데이터 값은 Table 2와 같다.

Table 2 Condition and result of creep experiment

Temp (°C)	Stress (MPa)	Creep rate (s ⁻¹)	Rature time (s)
200	62.43	6.71X10 ⁻⁷	790000
	78.00	2.67X10 ⁻⁶	166380
	93.59	7.33X10 ⁻⁶	50700
210	62.43	1.41X10 ⁻⁶	282120
	78.00	4.37X10 ⁻⁶	87900
	93.59	1.54X10 ⁻⁵	18660
220	62.43	1.94X10 ⁻⁶	146820
	78.00	7.47X10 ⁻⁶	35760
	93.59	1.99X10 ⁻⁵	14220
280	23.42	9.47X10 ⁻⁷	316200
	31.16	2.35X10 ⁻⁶	111000
	39.00	6.27X10 ⁻⁶	50160
290	23.42	1.34X10 ⁻⁶	237840
	31.16	3.88X10 ⁻⁶	58140
	39.00	8.38X10 ⁻⁶	29520
300	23.42	2.62X10 ⁻⁶	136200
	31.16	6.27X10 ⁻⁶	50220
	39.00	1.60X10 ⁻⁵	16440

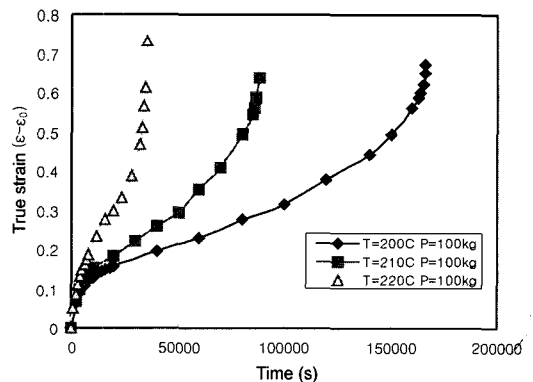


Fig. 4 Family of creep curves at the constant load of 100kgf

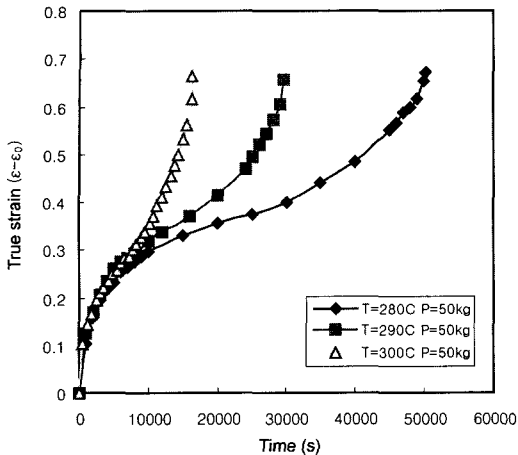


Fig. 5 Family of creep curves at the constant load of 50kgf

3.2 응력지수의 계산

응력지수의 값을 구하기 위해서 다음과 같이 식 (1)을 이용했다.

$$n = \frac{\ln(\dot{\epsilon}_2/\dot{\epsilon}_1)}{\ln(\sigma_2/\sigma_1)} \quad (1)$$

여기서 작용응력 σ_1, σ_2 하에서 정상 상태의 크리이프 속도는 각각 $\dot{\epsilon}_1$ 및 $\dot{\epsilon}_2$ 이다. 응력지수 n 값은 대수변형률과 대수 응력의 그래프에서 직선의 기울기로 표시된다. Fig. 6과 Fig. 7 등은 200°C ~ 220°C 및 280°C ~ 300°C에서 크리이프 속도와 응력과의 관계를 나타낸 것이다.

여기서 온도가 200°C ~ 220°C, 응력이 62.43 ~ 93.59 Mpa 인 조건에서의 응력지수 값은 각각 5.93, 5.86 및 5.76 으로 약 5.85 으로 나타났다. 또한 온도가

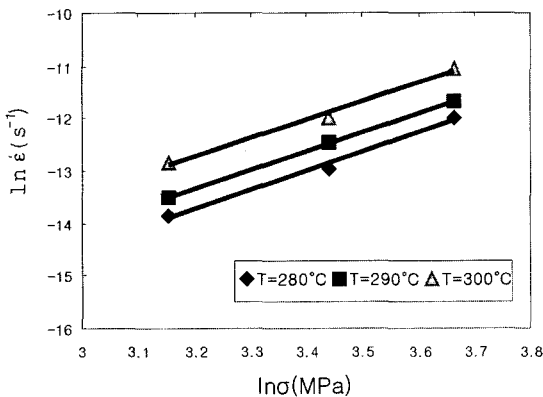


Fig. 6 Stress-dependent of creep rate under 280°C ~ 300°C

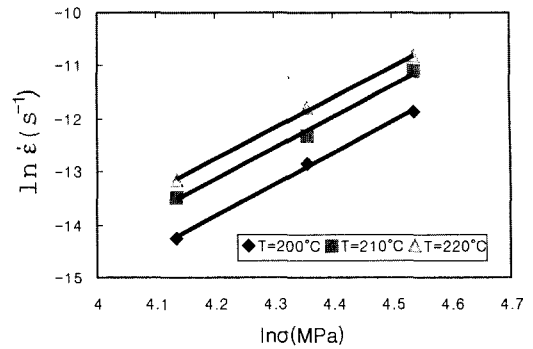
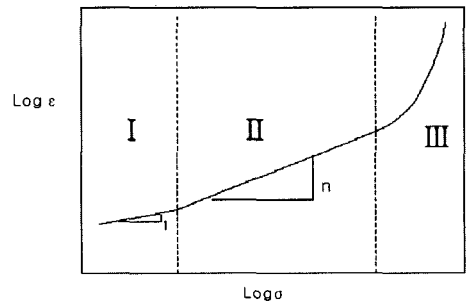


Fig. 7 Stress-dependent of creep rate under 200°C ~ 220°C

280°C ~ 300°C, 응력이 23.42 ~ 39.00 MPa 인 조건에서의 응력지수 값은 3.67, 3.59 및 3.52 으로 약 3.59 정도로 두 조건 모두 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향이 나타났다. 응력지수로서 예상되는 변형기구를 고찰하기 위해서 Sherby와 Burke⁷⁾의 연구를 언급하면 크리이프 속도와 부과응력의 사이에는 Fig. 8에서 보는 바와같이 3영역이 있다. 즉 I 영역과 II 영역은 변형속도가 응력의 n 승에 비례하는 식으로 표시되는 크리이프 변형, 즉 “power law creep”이라 한다. 다시 말하면 제 I 영역에서는 $0.8T_m$ 이상으로 확산이 주로 변형을 주도하고 응력지수 n 값은 1이 된다.



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

Fig. 8 Influence of stress on steady state creep rate for a typical pure polycrystalline metal

제Ⅱ영역에서는 온도가 0.5Tm 이상으로 전위활주와 전위상승이 변형을 지배하며 응력지수 n값은 각각 3, 5가 된다. 또한 Ⅲ영역은 크리이프 변형속도가 응력의 지수함수에 비례하여 증가함을 알 수 있고 실험적으로 Ⅲ영역이 발생하는 것은 낮은 온도에서 높은 응력을 작용하는 경우이다.

3.3 크리이프 활성화에너지 측정결과

200°C~220°C, 280°C~300°C 조건 하에서 활성화 에너지를 계산하기 위해 대수 변형률과 온도사이의 관계에서 구한 기울기와 일반 기체상수(R)을 곱하여 활성화 에너지를 계산했다.

Fig. 9는 응력이 62.43~93.59 MPa, 온도가 200°C~220°C인 조건 하에서의 대수변형률과 온도사이의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 응력이 62.43, 78.00 및 93.59 MPa 일때 각각 활성화 에너지는 149.56, 144.95 및 141.15kJ/mole로 평균치는 대략 145.22kJ/mole로 나타났다.

Fig. 8은 응력이 23.42~39.00MPa, 온도가 280°C~300°C인 조건에서의 대수 변형률과 온도사이의 관

계를 나타낸 것이다. 응력이 23.42, 31.16 및 39.00 MPa 일 때 각각의 활성화 에너지는 134.37, 129.33, 123.79kJ/mole로 평균치는 129.16(kJ/mole)로 나타났다.

한편 Al원소가 Mg기저 안에서 확산할 때의 활성화 에너지 값은 143kJ/mole로 알려져 있어⁸⁾ 이 내용을 참고하면 200°C~220°C구간에선 전위 상승이고 280°C~300°C구간에선 전위활주로 추측된다. 또한 여기서 응력이 증가할수록 활성화 에너지가 감소하는 경향이 나타나는데 이 사실은 다음과 같이 Seeger⁹⁾, Breen과 Weertman¹⁰⁾, Vladimira¹¹⁾ 및 M. Gold¹²⁾ 등의 연구에서 설명된다.

Seeger⁹⁾의 설명에 따르면 크리이프는 열적 활성화 과정으로 외부 응력이 크리이프 변형을 저지하는 장애를 낮게 하여 활성화 에너지 Qc는 응력에 관계되어 다음 식 (2)와 같이 표시하였다.

$$Q_c = Q_{sd} - V f(\sigma) \tag{2}$$

Breen과 Weertman¹⁰⁾ 등은 다결정 주석으로 실험하여 외부응력의 감소에 따라 활성화 에너지는 증가함을 보였고 Vladimira¹¹⁾는 Al과 Al-Mg 합금에서의 Qc는 다음 식 (3)과 같이 나타내었다.

$$Q_c = Q_{sd} - \gamma \sigma \tag{3}$$

또한 M. Gold¹²⁾ 등은 저온이고 고 응력상태에서 a 철의 활성화 에너지를 관찰한 결과 다음과 같이 응력이 증가함에 따라 활성화 에너지는 다음 식 (4)와 같이 감소하였다.

$$Q_c = (67000 - 0.147\sigma) \text{cal/mole} \tag{4}$$

여기서 σ 의 단위는 psi이다. 결국 활성화 에너지는 외부 응력의 증가에 따라 감소하여 이것은 본 실험결과와 일치한다.

3.4 크리이프 파단수명

어느 온도에서 파단수명을 알고 있을 때 다른 온도범위에서의 파단수명을 예측하기 위해 식 (5)와 같이 Lason-Miller 파라미터 P를 이용하였다.

$$P = (T+460)(C+\log t_f) \tag{5}$$

위 식에서 C는 Table2의 데이터를 이용하여 온도의 역수와 로그를 취한 파단시간의 좌표에서 외삽

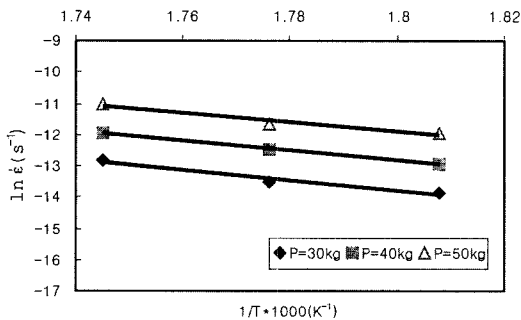


Fig. 9 Stress-dependence of creep rate under 200°C ~ 220°C

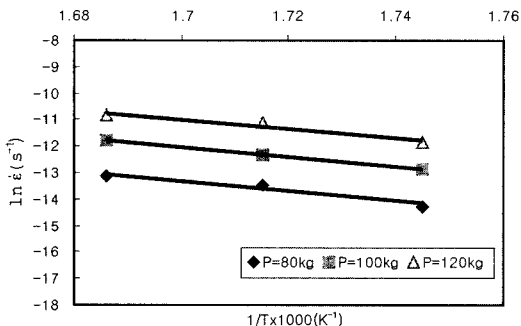


Fig. 10 Stress-dependence of creep rate under 280°C ~ 300°C

법으로 절편을 구하여 얻어질 수 있는 상수값으로 일반적으로 20~23의 값을 가진다. 여기서 구한 LM 파라미터와 응력과의 관계를 Fig. 11에 나타내었다.

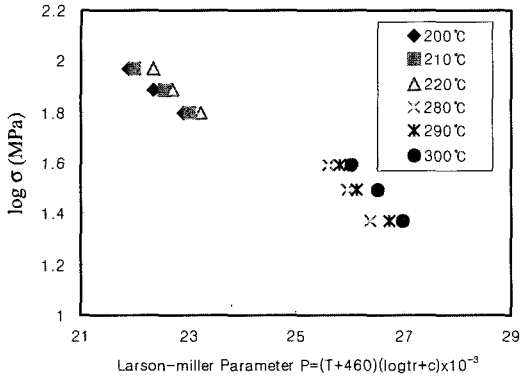


Fig. 11 Relationship between Larson-Miller Parameter and stress

Fig. 11에서 온도 200°C ~220°C 범위에서의 응력에 대한 파단수명의 관계는 식 (6)과 같이 나타났다.

$$\log \sigma = -0.18(T+460)(\log tr+21)+5.92 \quad (6)$$

온도 280°C~300°C 범위에서의 응력에 대한 파단수명의 관계는 식 (7)과 같이 나타났다.

$$\log \sigma = -0.25(T+460)(\log tr+21)+8.02 \quad (7)$$

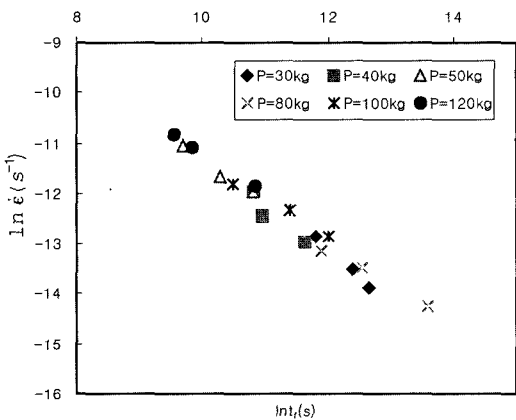


Fig. 12 Relation between the rupture life and temperature

Fig. 12는 정상크리이프 속도와 파단 시간과의 관계를 나타낸 그래프이다. 가로축을 파단시간, 세로축을 정상크리이프 속도로 두면 로그좌표계에서 서

로 선형적으로 반비례하였고 파단수명과 정상크리이프 속도와의 관계는 (8)과 같이 나타났다.

$$\ln \dot{\epsilon} = -0.88 \ln t_f - 2.45 \quad (8)$$

4. 결론

이상과 같이 온도조건 200°C~220°C 응력조건 62.43~93.59 MPa, 온도조건 280°C~300°C 응력조건 23.42~39.00MPa 상태하에서 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 200°C~220°C 응력조건이 62.43~93.59 MPa인 경우의 크리이프 변형속도의 온도 의존성은 대략 5.85로 나타났고 측정된 크리이프 활성화 에너지는 대략 145.22kJ/mole로 나타났다.
- 2) 280°C~300°C 응력조건이 23.42~39.00 MPa인 경우의 크리이프 변형속도의 온도 의존성은 대략 3.59로 나타났고 측정된 크리이프 활성화 에너지는 대략 129.16(kJ/mole)로 나타났다.
- 3) 위 결과로 보아 온도조건 200°C ~220°C, 응력조건 62.43~93.59 MPa 인 조건에서의 변형기구는 전위상승, 온도조건 280°C~300°C 응력조건 23.42~39.00 MPa인 조건에서의 변형기구는 전위 활주로 추측된다.
- 4) 온도 200°C~220°C 범위에서의 파단수명과 응력 사이의 관계식과 온도 280°C~300°C 범위에서의 파단수명과 응력사이의 관계식은 각각 $\log \sigma = -0.18(T+460)(\log tr+21)+5.92$, $\log \sigma = -0.25(T+460)(\log tr+21)+8.02$ 로 나타났다.
- 5) 파단시간과 정상크리이프 속도의 관계는 서로 선형적으로 반비례 관계가 되었고 파단수명과 정상크리이프 속도와의 관계는 $\ln \dot{\epsilon} = -0.88 \ln t_f - 2.45$ 으로 나타났다.

후 기

이 논문은 2003년 한국과학재단 지역대학 우수과학자 지원연구과제(계속과제, 번호:R05-2003-000-10410-0)의 지원으로 수행하였으며 이에 감사의 뜻을 표합니다.

References

- 1) R. Lagneborg, J. of Met. Sci., p.127,1969.
- 2) N. F. Mott, Phil. Mag., p.742,1953.
- 3) D. W. Kim, H. S. Kim and S. I. Park, "Magnesium for Automotive Applications," Journal of KSAE, Vol.18, No.5, pp.53-67, 1996.
- 4) I. J. Polmear, Proceedings of International Conference on Recent Advances in Science and Engineering of Light Metal, p.201, Japan Inst. Light Metals, 1991.
- 5) W. F. Sheerly and R. R. Nash, Trans Metall. Soc. AIME Vol.218, p.416, 1960.
- 6) C. Sheldon Roberts, Magnesium and Its Alloys, John Wiley & Sons, pp.158-159, 1958.
- 7) O. D. Sherby and P. M. Burke, "Mechanical Behavior of Elevated Temperature," Progress in Materials Science, Vol.13, pp.325-390, 1968.
- 8) S. S. Valgarali and T. G. Langdon, J. of Acta Metal., Vol.30, p.1157, 1982.
- 9) A. Seeger, "The Temperature Dependence of the Critical Shear Stress and of Work Hardening of Metal Crystals," Phil. Mag., Vol.45, pp.771-773, 1954.
- 10) J. Breen and J. Weertman, "Creep of polycrystalline Tin," Trans. AIME, Vol.203, pp.1230-1234, 1955.
- 11) C. V. Vladimiloba and V. A. Likhachov, "Activation Energy of Creep process of Metals," Fiz Metal Metalloved, Vol.28, No.4, pp.165-169, 1969.
- 12) K. Linga Murty, M. Gold and Arthur L. Ruoff, "High-Temperature Creep Mechanisms in a Iron and Other Metals," J. of App. Phy., Vol.41, pp.4917-4927, 1962.