

Mg-Zn-Mn-(Ca)합금의 크리이프 변형거동에 관한 연구

강대민* · 구양 · 심성보

부경대학교 기계공학부

A Study on the Creep Deformation Behavior of Mg-Zn-Mn-(Ca) Alloys

Dae-Min Kang* · Yang Koo · Sungbo Sim

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea
(Received 9 January 2006 / Accepted 24 April 2006)

Abstract : In this paper, creep tests of Mg-Zn-Mn and Mg-Zn-Mn-Ca alloys, which were casted by mold with Mg-3%Zn-1%Mn and Mg-3%Zn-1%Mn -0.2%Ca, were done under the temperature range of 473 - 573K and the stress range of 23.42-78.00Mpa. The activation energies and the stress exponents were measured to investigate the creep plastic deformation of those alloys, and the rupture lifes of Mg-Zn-Mn alloy were also measured to investigate the fracture behavior. From the results, the activation energy of Mg-Zn-Mn and Mg-Zn-Mn-Ca alloys under the temperature range of 473 - 493K were measured as 149.87, 145.98KJ/mol, respectively, and the stress exponent were measured as 5.13, 6.06 respectively. Also the activation energies Mg-Zn-Mn and Mg-Zn-Mn-Ca alloys under the temperature range of 553 - 573K were obtained as 134.41, 129.22KJ/mol, respectively, and tress exponent were obtained as 3.48, 4.63, respectively. Finally stress dependence of rupture life and the activation energy of rupture life of Mg-Zn-Mn under the temperature range of 473 - 493K was measured as 8.05, 170.0(KJ/mol), respectively, which were a little higher than the results of steady state creep.

Key words : Magnesium alloy(마그네슘 합금), Creep rate(크리이프 속도), Deformation mechanism(변형기구), Stress exponent(응력지수), Activation energy(활성화에너지), Rupture life(파단수명)

Nomenclature

e : engineering strain
ε : true strain
ε̇ : creep rate
σ : stress
Q_c : activation energy
Q_f : activation energy of rupture time
n : stress exponent
n' : stress dependence of rupture time

A, A1, A', B, D : constant value
R : gas constant
T : temperature

1. 서론

마그네슘 합금은 알루미늄합금, 티타늄합금, 복합재료, 플라스틱등과 함께 경량재료로서 1808년 H. Davy에 의해 발견된 은백색이고 구조용 재료를 사용할 수 있는 가장 가벼운 금속으로 최근 자동차 산업과 전자산업 등과 같은 경량 구조물에 크게 주목을 받고 있다.¹⁾ 한편 고온조건에서 사용되는 부품

*Corresponding author, E-mail: dmkgang@pknu.ac.kr

및 구조물들은 크리이프 변형이 발생하고 이로 인해 파단이 발생하기때문에 이러한 크리이프 변형과 파단을 억제하는 재료개발을 위해 다양한 금속재료의 크리이프 변형과 특성에 관한 연구가 오래전부터 많이 연구되어왔다.^{2,4)} 마그네슘 합금에 대해 크리이프 특성에 관한 연구로는 M. Liu등⁵⁾에 의해 Mg-Al-Ca합금의 크리이프 거동과 기계적 성질에 대해 연구하였고 W.Yan등⁶⁾은 AZ91D합금의 크리이프 저항에 Si, Ca와 Sr의 효과에 대해 연구하였다. 그리고 J.P. Eum등⁷⁾은 마그네슘과 아연합금에 3원소로서 망간과 칼슘을 첨가한 합금을 개발하여 개발된 합금의 기본적인 물성치인 상온에서의 인장특성, 가공경화지수 및 강도계수등을 측정하였고 D.M.Kang등^{8,9)}은 마그네슘 합금의 크리이프 실험을 통하여 고온 크리이프 변형특성을 연구하였으나 아직도 마그네슘모재에 고인성을 지니는 아연, 망간 및 칼슘등을 첨가한 Mg-Zn-Mn-(Ca)계 합금의 크리이프 변형과 파단에 관한 연구는 지속적으로 필요한 실정이다. 본 연구에서는 마그네슘 모재에 아연 3%, 망간 1%, 그리고 칼슘 0.2%를 첨가, 주조제작된 Mg-Zn-Mn-Ca합금과 아연 3%, 망간 1%를 첨가하여 주조제작된 Mg-Zn-Mn합금등의 크리이프 실험을 통하여 이러한 재료의 크리이프 변형과 파단거동을 알아보고자한다.

2. 실험방법

2.1 실험재료 및 시편

본 연구에 사용된 Mg-Zn-Mn합금과 Mg-Zn-Mn-Ca합금을 제조하기위하여 Mg-3%Mn 모합금을 제조하였다. 이때 사용된 마그네슘은 순도 99.8%이상의 것을 사용하였고 993K에서 순수 마그네슘을 용해한후 순수 망간을 첨가하여 승온 1073-1093K로 승온하여 40분 유지후 교반한 다음 다시 20분 유지, 교반한후 주조하였으며 이때 몰드는 423K로 예열하였다. 크리이프 실험에 사용된 실험시편은 Fig. 1과 같이 NC 선반가공하였다.

2.2 실험장치 및 방법

본 실험에서 사용된 크리이프 시험기는 Fig. 2에 나타내었고 크리이프 시험기는 다시 전기로, 신장

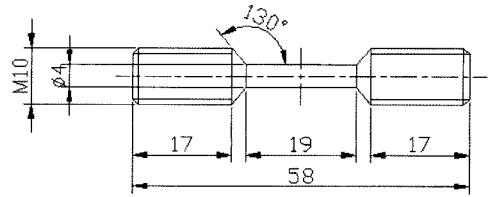


Fig. 1 Creep specimen

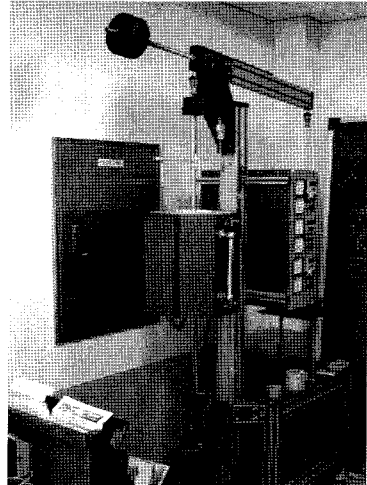


Fig. 2 Creep tester

계 및 부하부로 구성되어있다. 노내 온도유지와 시편의 산화방지를 위해 잘 밀봉되어있고, 변형량을 측정하는 신장계는 변환기에의해 컴퓨터로 데이터가 전송된다. 크리이프 실험을 위한 온도는 온도 콘트롤 박스내에있는 프로그램을 이용하여 조건을 설정하였다. Fig. 1에 표시되어있는 치수단위는 mm로 나타낸다.

2.3 실험조건

Mg-Zn-Mn합금과 Mg-Zn-Mn-Ca합금을 이용하여 응력이 23.42-39.00 Mpa조건이고 온도가 553 - 573K 조건에서, 그리고 응력이 62.43 - 78.00 Mpa조건이고 온도가 473 - 493K조건에서 크리이프 실험을 행하였다. 크리이프 실험조건중 온도는 순수 마그네슘의 호모로스온도(사용온도와 용융온도의 비)를 0.5이상으로 하고 부가응력은 소모되는 실험시간을 고려하였다. 그리고 정상 크리이프 속도의 응력의 존성을 파악하기위해 일정온도에서 부가 응력조건을 변화하였고, 온도의존성을 파악하기위하여 일정

응력에서 온도조건을 변화하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 크리이프 활성화에너지 측정결과

Mg-Zn-Mn합금과 Mg-Zn-Mn-Ca합금에 대한 정 크리이프속도의 온도의존성과 응력의존성을 구하기 위하여 실험결과에서 변위를 구하여 식 (1)에 의하여 진 변형률을 계산하였다.

$$\epsilon = \ln(1 + e) \quad (1)$$

식 (1)에서 구한 진 변형률을 이용하여 크리이프 변형의 열적 활성화과정을 고려해서 $\dot{\epsilon}$ 와 Q_c 의 관계를 식 (2)와 같이 Arrhenius식으로 표시할 수 있다.

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^n \exp(-Q_c/RT) \quad (2)$$

식 (2)에서 응력일정 상태하에서는 식 (3)으로 표현된다.

$$\dot{\epsilon} = B \exp(-Q_c/RT) \quad (3)$$

Fig. 3과 Fig. 4 등은 각각 Mg-Zn-Mn합금과 Mg-Zn-Mn-Ca합금에 대한 응력이 62.43 - 78.00Mpa 조건이고 온도가 473 - 493K조건에서의 대수 변형률속도와 온도사이의 관계를 나타낸 것이다. 크리이프 활성화에너지는 식 (3)에 나타내있는 정상상태 크리이프속도의 대수 변형률과 온도사이의 관계에서 구한 기울기와 일반 기체상수를 곱하여 계산한 후 Table1에 나타내었다. 이 결과에서 473 - 493K 조건에서의 Mg-Zn-Mn합금과 Mg-Zn-Mn-Ca합금의 크리이프 활성화에너지값은 각각 149.87, 145.98 KJ/mol이고 반면 온도가 553 - 573K조건에서는 각각 약 134.41, 129.22KJ/mol으로 나타나 Ca이 첨가된 마그네슘 합금의 크리이프 활성화에너지값이 적게 나타났다. Fig. 5는 응력이 23.42-39.00 Mpa인 조건에서 크리이프 활성화에너지와 부가응력사이의 관계를 나타낸 것으로 이 결과에서 크리이프 활성화에너지는 부가응력이 증가할수록 감소한다는 것을 알 수 있다. 이것은 크리이프는 열적 활성화 과정으로 외부응력이 크리이프 변형을 저해하는 장애를 낮게하기때문으로 추측되고 부가응력에 대한 크리이프 활성화에너지의 관계는 Table 2에 나타내었다.

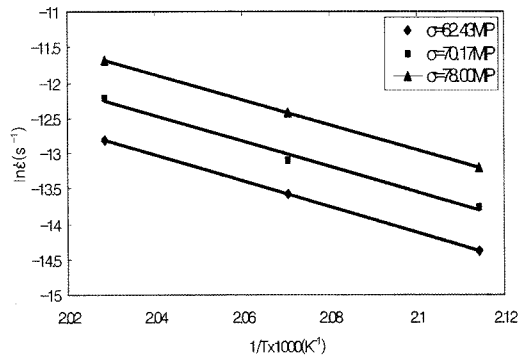


Fig. 3 Temperature vs. creep rate (Mg-Zn-Mn alloy)

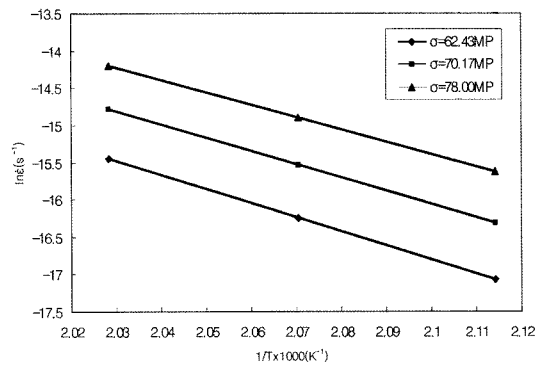


Fig. 4 Temperature vs. creep rate (Mg-Zn-Mn-Ca alloy)

Table 1 The activation energy for Mg alloys

stress (Mpa)	Q_c of Mg-Zn-Mn (kJ/mol)	Q_c of Mg-Zn-Mn-Ca (kJ/mol)
23.42	139.58	141.19
31.16	134.47	127.23
39.00	129.18	119.23
62.43	152.19	150.77
70.17	150.07	148.66
78.00	147.35	138.48

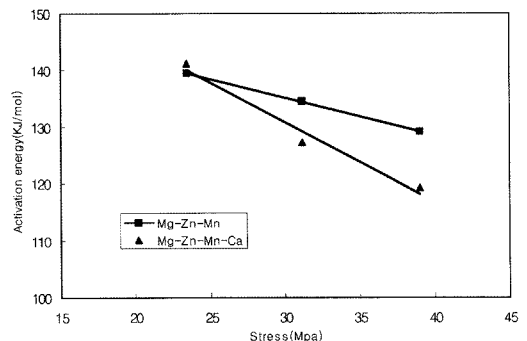


Fig. 5 Stress vs. activation energy for Mg alloys

Table 2 Relationship between σ and Q_c for Mg alloys

Stress	Mg-Zn-Mn	Mg-Zn-Mn-Ca
23.42-39.00	$-0.67\sigma + 155.23$	$-1.41\sigma + 173.16$
62.43-78.00	$-0.31\sigma + 171.73$	$-0.79\sigma + 201.45$

3.2 크리이프 속도의 응력의존성 측정결과

Mg-Zn-Mn합금과 Mg-Zn-Mn-Ca합금에 대한 정 크리이프 속도의 응력의존성을 구하기위하여 일정 온도에서 부가응력을 변동시켰다. 식 (2)에서 온도를 일정하게하면 식 (4)와 같이 된다.

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^n \quad (4)$$

Fig. 6와 Fig. 7 등은 각각 Mg-Zn-Mn 합금과 Mg-Zn-Mn-Ca 합금에 대한 응력이 62.43 - 78.00 Mpa 조건이고 온도가 473 - 493K 조건에서의 대수 변형률 속도와 대수응력사이의 관계를 나타낸 것이다. 응력지수값을 구하기위하여 식 (4)에서 정상상태 크리이프 속도의 대수변형률과 대수응력사이의 관계에서 구한 기울기에서 응력지수값과 온도에 대한 응력지수값의 관계를 각각 Table 3,4에 나타내었고 이 결과에서 응력지수값은 온도가 증가할수록 선형적으로 감소한다는 것을 알 수 있다. 그리고 Mg-Zn-Mn합금과 Mg-Zn-Mn-Ca합금인 경우, 온도가 473 - 493K 조건에서 측정된 응력지수는 각각 5.13, 6.06으로 나타났고 반면 온도가 553 - 573K 조건에서는 각각 3.48, 4.63으로 나타나 Ca이 첨가된 마그네슘 합금의 응력지수값이 크게 나타났다. 이것은 Ca의 첨가가 마그네슘합금의 결정립 미세화에 큰 영향을 미친다고 추측된다.

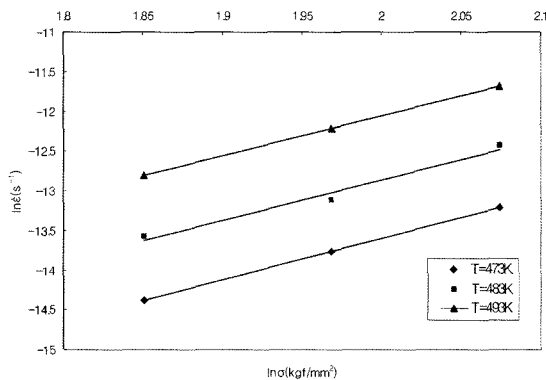


Fig. 6 Stress vs. creep rate for Mg-Zn-Mn alloy

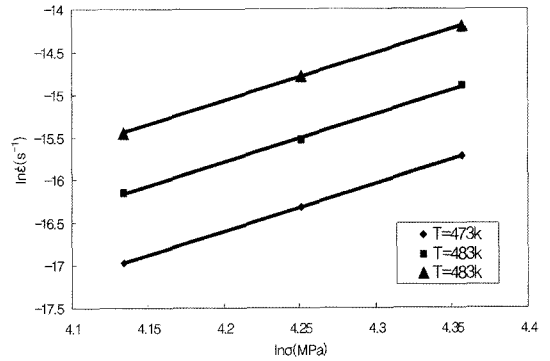


Fig. 7 Stress vs. creep rate for Mg-Zn-Mn-Ca alloy

Table 3 The stress exponent for Mg alloys

Temp(K)	n of Mg-Zn-Mn	n of Mg-Zn-Mn-Ca
473	5.24	6.53
483	5.13	6.06
493	5.02	5.59
553	3.55	4.8
563	3.50	4.63
573	3.40	4.46

Table 4 Relationship between temperature and stress exponent for Mg alloys

Temp.(K)	Mg-Zn-Mn	Mg-Zn-Mn-Ca
473-493	$n = -0.01T + 7.4$	$n = -0.05T + 15.9$
553-573	$n = -0.01T + 5.66$	$n = -0.02T + 9.56$

3.3 크리이프 파단수명

Mg-Zn-Mn합금의 온도와 응력에 따른 크리이프 파단수명 결과는 Table 5와 같다.

일반적으로 합금이나 금속재료에서 정 크리이프 속도와 파단수명과의 관계는 식 (5)로 표현할 수 있다.

Table 5 Creep rupture life of Mg-Zn-Mn alloy

Temperature (K)	Stress(Mpa)	Rupture time (s)
473	62.43	428,700
	70.17	195,060
	78.00	54,840
483	62.43	156,240
	70.17	62,980
	78.00	37,980
493	62.43	98,460
	70.17	23,500
	78.00	14,280

$$\dot{\epsilon}t_f = const. \quad (5)$$

식 (2)와 식 (5)에서 크리이프 파단수명과 응력사이의 관계를 구하면,

$$t_f = A' \sigma^{n'} \exp(Q_f/RT) \quad (6)$$

크리이프 파단수명의 응력의존성을 구하기 위하여 대수 파단수명과 대수응력의 관계를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 8은 온도조건 473 - 493K에서 대수응력과 대수파단시간과의 관계를 나타낸 것으로 이 결과에서 473 - 493K조건에서의 파단수명에 대한 응력의존성은 약 8.05로 나타나 정 크리이프 속도의 응력의존성보다 약간 크게 나타났다.

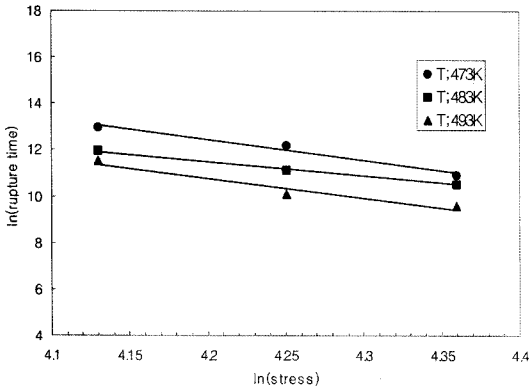


Fig. 8 Stress vs. rupture time for Mg-Zn-Mn alloy under 473-493K

식 (6)에서 응력을 일정하게 하면 식 (7)로 된다.

$$t_f = D \exp(Q_f/RT) \quad (7)$$

크리이프 파단을 위한 활성화에너지를 구하기 위하여 대수 크리이프 파단수명과 온도의 역수와의 관계를 Fig. 9에 나타내었다. 이 결과에서 473 - 493K조건에서는 약 170.7(KJ/mol)로 나타나 정 크리이프의 활성화에너지값보다 약간 크게 나타났다.

4. 결론

주조제작된 Mg-Zn-Mn합금과 Mg-Zn-Mn-Ca합금의 응력이 23.42-39.00 Mpa조건이고 온도가 553 - 573K조건에서, 그리고 응력이 62.43 - 78.00 Mpa조

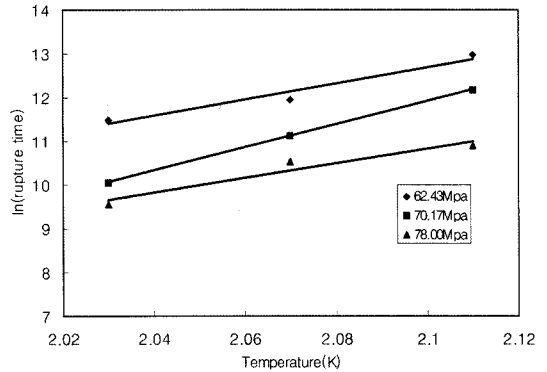


Fig. 9 Temperature vs. rupture time for Mg-Zn-Mn alloy under 473-493K

건이고 온도가 473 - 493K조건에서 실험을 행한 결과 다음과같은 결론을 얻었다.

- 1) Mg-Zn-Mn합금과 Mg-Zn-Mn-Ca합금인 경우, 온도가 473 - 493K조건에서 측정된 크리이프 활성화에너지는 각각 약 149.87, 145.98KJ/mol으로 나타났고, 반면 온도가 553 - 573K조건에서는 각각 약 134.41, 129.22KJ/mol으로 나타나 Ca이 첨가된 마그네슘 합금의 크리이프 활성화 에너지값이 적게 나타났다.
- 2) Mg-Zn-Mn합금과 Mg-Zn-Mn-Ca합금인 경우, 온도가 473 - 493K조건에서 측정된 응력지수는 각각 5.13, 6.06으로 나타났고 반면 온도가 553 - 573K조건에서는 각각 3.48, 4.63으로 나타나 Ca이 첨가된 마그네슘 합금의 응력지수 값이 크게 나타났다.
- 3) Mg-Zn-Mn합금인 경우에 473 - 493K조건에서 측정된 파단수명의 응력의존성은 약 8.05정도의 값으로 정 크리이프속도의 응력의존성보다 약간 크게 나타났다.
- 4) Mg-Zn-Mn합금인 경우에 473 - 493K조건에서 측정된 파단수명을 위한 활성화에너지는 170.7 (KJ/mol)정도의 값으로 나타나 정 크리이프의 활성화에너지값보다 약간 크게 나타났다.

후 기

이 논문은 2005년도 부경대학교 기성회 학술연구비(과제번호: PK-2005-062)에 의하여 연구되었음.

References

- 1) D. M. Kim, H. S. Kim and S. I. Park, "Magnesium for Automotive Application," Journal of KSAE, Vol.18, No.5, pp.53-67, 1996.
- 2) V. Sklenicka, M. Pahutova, K. Kucharova, M. Svoboda and T. G. Langdon, "Creep Processes in Magnesium Alloys and Their Composites," Metallurgical and Materials Transactions A, Vol.33A, pp.883-888, 2002.
- 3) S. S. Manson and C. R. Ensign, "A Quarter-Century of Progress in the Development of Correlation and Extrapolation Methods for Creep Rupture Data," Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.101, pp.317-325, 1979.
- 4) W. E. White and I. L. May, "On Time-Temperature Parameters for Correlation of Creep - Rupture Data in Stainless Steel Weldments," J. of Engineering Materials and Technology, Vol.100, pp.319-332, 1978.
- 5) M. Liu, Q. Wang, X. Zeng, G. Yuan, Y. Zhu, and W. Ding, "Mechanical Properties and Creep Behavior of Mg-Al-Ca Alloys," Materials Science Forum Vols.488-489, pp.763-766, 2005.
- 6) W. Yan, X. Shoumei, L. Wenhui and Z. Zhiwen, "Effect of Si, Ca and Sr on the Creep-resistance of AZ91D Alloy," Materials Science Forum Vols.488-489, pp.767-770, 2005.
- 7) J. P. Eum, S. G. Lim and B. Y. Hur, "Mg-Zn-(Mn, Ca)합금의 개발", 한국구조학회, 제19권 제1호, pp.7-14, 1999.
- 8) J. O. An, K. I. Kang and D. M. Kang, "A Study on the Creep Deformation Mechanism and Fracture Time of ZM31 Magnesium Alloy," Proceedings of Spring Conference of KSMP, pp.282-287, 2005.
- 9) J. O. An, D. M. Kang, Y. Koo and S. B. Sim, "A Study on the Creep Deformation Characteristic of AZ31 Mg Alloy at High Temperature," Transactions of KSAE, Vol.13, No.13, pp.186-192, 2005.