

Mg-Zn-Mn-(Ca)합금의 크리이프 소성변형 및 파단거동에 관한 연구 A Study on the Plastic Deformation and Fracture Behavior of Mg-Zn-Mn-(Ca) Alloys

강대민·박수찬·강경일

D. M. Kang, S. C. Park and K. I. Kang

Key Words : Activation Energy(활성화에너지), Stress Exponent(응력지수), Magnesium Alloy(마그네슘합금), Deformation Mechanism(변형기구), Fracture Behavior(파단거동)

Abstract : In this paper, creep tests of Mg-Zn-Mn and Mg-Zn-Mn-Ca alloy casted by mold under the temperature range of 473.00-573.00K, and the stress range of 23.42-87.00Mpa were done with the equipment of automatic controlled temperature and computer for data acquisition. The activation energies were obtained by relationship between creep rate and temperature, and the stress exponents were obtained by relationship between creep rate and stress. From the experiment results, the activation energies of Mg-Zn-Mn and Mg-Zn-Mn-Ca alloy were 149.87kJ/mol, 147.97kJ/mol, respectively, and the stress exponents of those alloy were 5.13, 5.59, respectively, under the temperature of 473.00-493.00K and the stress range of 62.43-78.00Mpa. And the activation energies of those alloy were 134.41kJ/mol, 129.22kJ/mol, respectively, and the stress exponent of those alloy were 3.48, 3.77, respectively, under the temperature of 553-573Mpa and the stress range of 23.42-39.00Mpa. Also the lifes of Mg-Zn-Mn-Ca alloy were higher than those of Mg-Zn-Mn alloy, and the results of SEM showed fracture surfaces under low temperature had smaller dimples than those under high temperature.

1. 서 론

최근 자동차, 항공기, 고속전철 및 기타 수송기기의 소재를 경량재료로 대체하려는 경향이 뚜렷해지는 이유는, 고비강도의 경량재료를 사용함에 따라 수송기기의 중량을 감소시키고 고온강도를 비롯한 여러 요건에 대하여 종래의 소재보다 우수한 기능들을 갖춘 재료를 채택함으로써 엔진효율을 높이는 등 수송기기의 성능향상을 도모하여 연료절감의 효과를 이룰 수 있기 때문이다. 더욱이 자동차의 수가 크게 증가함에 따라 자동차에 대한 종래의 안정성과 주행성능에 대한 요구이외에 환경문제, 자원의 절약 등에 대한 요구 또한 크게 대두되고 있다. 선진각국의 자동차회사 및 연구소에서는 자동차부품에 적용할 수 있는 새로운 경량재료로서 알루미늄

합금, 마그네슘합금, 티타늄합금, 복합재료, 플라스틱 등에 대한 많은 연구가 이루어지고 있고 이중 마그네슘합금은 매우 중요한 관심의 대상이 되고 있다. 한편, 고온고압의 조건하에서 사용되는 구조물 등 각종 장비들은 시용상 안전문제로 고온에서 발생하는 크리이프 변형과 파단을 억제하는 재료개발을 위해 다양한 금속재료의 크리이프 변형기구에 대해 오래전부터 많이 연구되어왔고,^{1),2),3)} 마그네슘합금에 대한 크리이프특성에 대한 연구로는 W.Blum 등에 의하여 새로운 크리이프 저항 합금 AJ51재료를 크리이프 실험한 결과 다른 마그네슘합금재료보다 크리이프 저항이 매우 우수하다는 것이 확인되었다. S. Robert 등⁴⁾은 ZK60, AZ80A는 강도적인 측면에서 매우 유리한 마그네슘합금이며, 소성가공에서 성형성이 양호하고 인성이 우수하여 압출에서도 적용이 가능하다고 하였으며 M.S. Dargusch 등은 다이캐스트 마그네슘 AZ91과 AS21 합금의 크리이프 거동과 미세조직에 관한 연구에서 이러한 재료의 398.00-448.00K의 온도범위에서 일정하중 크리이프 속도를 위한 응력지수 값은 저용

접수일 : 2005년 11월 30일, 채택확정 : 2006년 8월 3일
강대민(책임저자) : 부경대학교 기계공학부
E-mail : dmikang@pknu.ac.kr Tel. 051-620-1614
박수찬, 강경일 : 부경대학교 대학원

력에서는 약 2정도의 값으로, 고응력에서는 약 5정도의 값으로 나타났다. 또한 J.P. Eum 등⁵⁾은 Mg-Zn합금에 3원소로서 Mn 및 Ca를 첨가한 합금을 개발하여 개발된 합금의 기본적인 물성치 상온 인장특성, 가공경화지수 및 강도계수를 측정하였고 D.M.Kang 등^{6,7)}은 여러가지 마그네슘합금의 고온 크리이프실험을 통하여 크리이프 변형특성과 파단수명을 측정하였으나 마그네슘모재에 Zn, Mn, 및 Ca등을 첨가한 Mg-Zn-Mn-(Ca)계의 합금재료의 크리이프 변형에 대한 연구는 지속적으로 필요한 실정이다.

본 연구에서는 마그네슘모재에 Zn을 3%, Mn을 1%, 그리고 Ca를 0.2%를 첨가, 주조하여 제작된 Mg-Zn-Mn-Ca합금과 Zn을 3%, Mn을 1%를 첨가하여 주조제작된 Mg-Zn-Mn합금 등의 크리이프 활성화에너지와 응력지수, 그리고 크리이프 파단수명 및 파단부의 SEM 사진관찰 등을 통하여 이러한 합금의 크리이프 변형특성과 파단거동 등을 파악하고자한다.

2. 실험방법

2.1 재료 및 시편제작

본 연구에 사용된 Mg-Zn-Mn합금과 Mg-Zn-Mn-Ca합금을 제조하기 위하여 우선 Mg과 용점차이가 큰 Mg-3%Mn 모합금을 제조하였다. 이때 사용된 마그네슘은 순도 99.8%이상의 것을 사용하였고 993K에서 순 마그네슘을 용해한후 순수 Mn을 첨가하여 승온 1073.00-1093.00K에서 40분을 유지 후 교반한 다음 다시 20분 유지, 교반한 후 주조하였으며 이때 몰드는 423.00K로 예열하였다. 정 크리이프실험에 사용된 크리이프시편은 실험장치를 고려하여 지름 4mm 표점거리 16.30mm의 시편을 제작하였다. 시편의 규격과 Mg-Zn-Mn-(Ca)합금제조를 위한 용해로는 각각 Fig. 1-2에 나타내었다.

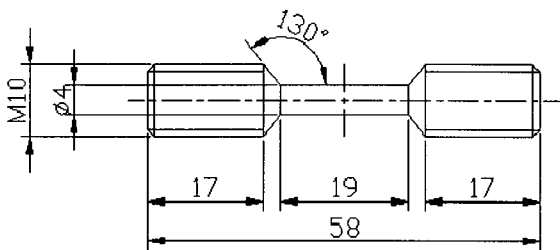


Fig. 1 Creep specimen

2.2 크리이프 실험장치 및 방법

본 실험에서 사용한 크리이프 시험기는 Fig. 3에 나타내었고 크리이프 시험기는 다시 전기로, 신장계 및 부하부로 구성되어있고 전기로내에서는 열전대와 전열선, 내화재로 구성되어있다. 노내 온도유지와 시편의 산화방지를 위해 잘 밀봉되어있고 변형량을 측정하는 신장계는 컴퓨터와 직접 연결되어 실험시 화면상에 데이터가 아날로그신호를 디지털신호로 변환시켜주는 변환기에 의해 컴퓨터로 데이터가 전송된다. 크리이프 실험은 Fig. 3의 장치를 이용하여 다음과 같은 실험순서로 행했다.

- 가. 컴퓨터에 실험조건 등을 입력한다.
- 나. 시편을 풀-로드에 연결한다.
- 다. 콘트롤 박스내에 있는 프로그램을 이용하여 시간과 온도를 조건에 맞게 입력하여 실행시킨다.
- 라. 실험온도까지 상승되면 하중을 부가하고 컴퓨터 프로그램을 작동시킨다.

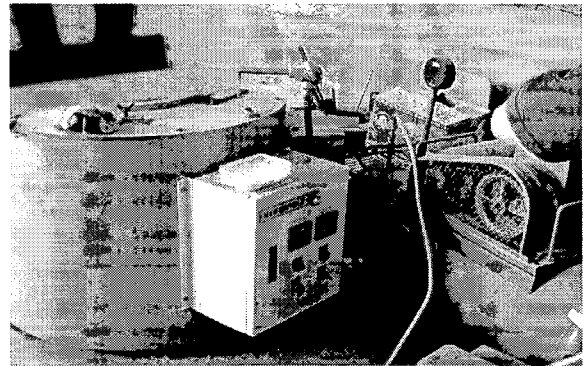


Fig. 2 Furnance for Mg-Zn-Mn-(Ca) alloy

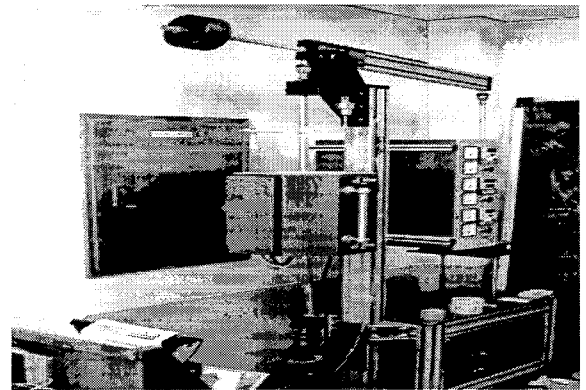


Fig. 3 Creep tester

3. 실험결과 및 고찰

3.1 크리이프실험 결과

Mg-Zn-Mn합금과 Mg-Zn-Mn-Ca합금에 대한

정상크리이프 속도의 응력의존성과 온도의존성을 계산하기위해 크리이프 파단수명 등을 고려하여 온도조건 473.00-493.00K 응력조건 62.43-78.00Mpa, 온도조건 553.00-573.00K 응력조건 23.42-39.00Mpa 상태하에서 정크리이프 실험을 행하였다. Fig. 4와 Fig.5 등은 각각 Mg-Zn-Mn합금재와 Mg-Zn-Mn-Ca재의 온도조건 473.00-493.00K 응력조건 62.43-78.00Mpa상태하에서의 정 크리이프 실험결과에서 변위를 구하여 아래식(1)으로 표현되는 진변형률로 환산하여 시간에 따른 진변형률의 관계를 나타내었다.

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

여기서 ϵ 는 진변형률, e 는 공칭변형률로 나타낸다.

이 결과에서 Ca가 첨가된 마그네슘합금이 첨가되지 않는 마그네슘합금보다 가속 크리이프가 시작되는 시점의 크리이프 변형량이 적게 나타났고 시험 후 경과시간은 크게 나타났다.

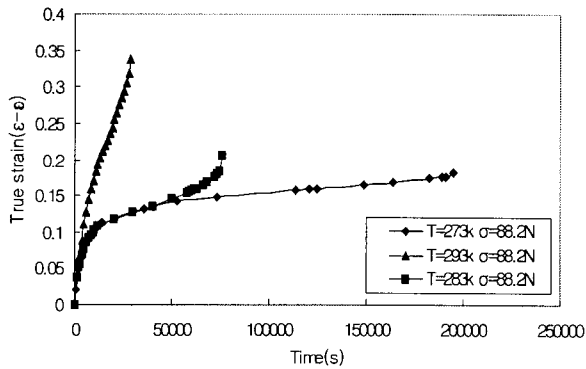


Fig. 4 Creep results for the range of temperature of 473.00-493.00K of Mg-Zn-Mn alloy

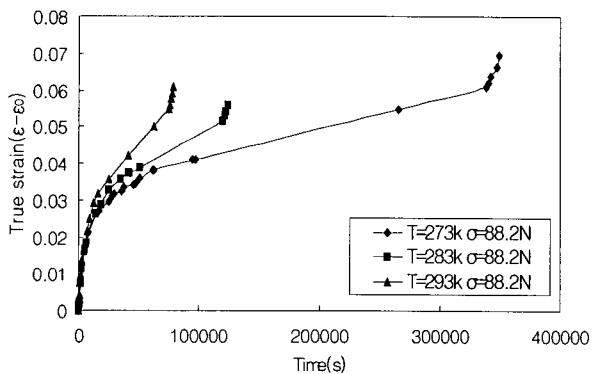


Fig. 5 Creep results for the range of temperature of 473.00 - 493.00K of Mg-Zn-Mn-Ca alloy

3.2 크리이프 활성화에너지 측정결과

크리이프 활성화에너지는 정상상태 크리이프속도의 대수 변형률과 온도사이의 관계에서 구한 기울기와 일반 기체상수를 곱하여 계산하였다. Fig. 6과 Fig. 7등은 각각 Mg-Zn-Mn합금과 Mg-Zn-Mn-Ca합금의 온도조건 473.00-493.00K 응력조건 62.43-78.00Mpa하에서 대수변형속도와 온도사이의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 Mg-Zn-Mn합금인 경우에는 응력이 62.43, 70.17 및 78.00Mpa일때 각각 활성화에너지는 152.19, 150.07 및 147.35kJ/mol로 대략 149.87kJ/mol로 나타났고 Mg-Zn-Mn-Ca합금인 경우에는 150.77, 148.66 및 138.48kJ/mol로 평균치는 대략 147.97kJ/mol로 나타났다. 온도조건 553.00-573.00K 응력조건 23.42-39.00Mpa상태하에서 정크리이프 실험을 행한결과, Mg-Zn-Mn합금인 경우에는 응력이 23.42, 31.16 및 39.00Mpa일때 각각 활성화에너지는 139.58, 134.47 및 129.18kJ/mol로 대략 134.41kJ/mol로 나타났고 Mg-Zn-Mn-Ca합금인 경우에는 141.19, 127.23 및 119.23kJ/mol로 평균치는 대략 129.22kJ/mol로 나타났다. 이러한 결과에서 응력이 증가할수록 활성화에너지가 감소되는 것은 Seeger⁸⁾는 크리이프는 열적활성화 과정으

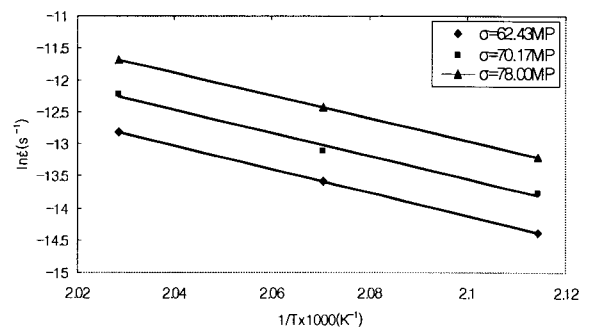


Fig. 6 Relationship between temperature and creep rate with Mg-Zn-Mn alloy

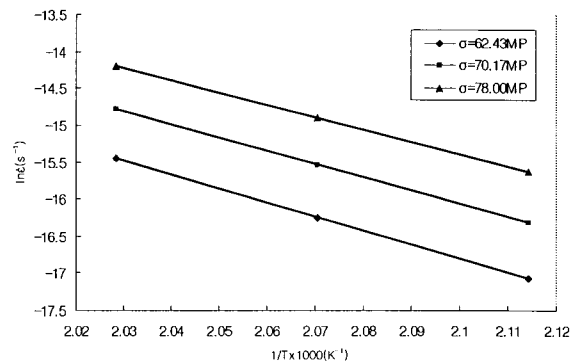


Fig. 7 Relationship between temperature and creep rate with Mg-Zn-Mn-Ca alloy

로 외부 응력이 크리이프 변형을 저지하는 장애를 낮게하기 때문으로 언급하였다. 또한 S.H. Im⁹⁾ 등은 Zr계 합금의 크리이프특성에 관련된 연구에서 응력에대한 활성화에너지값은 응력이 증가할수록 거의 직선으로 감소함을 보여 본 실험결과와 같은 경향이 나타났다.

3.3 크리이프속도의 응력의존성측정결과

크리이프속도의 응력의존성을 계산하기위하여 일정온도에서 부가하중을 변동시켰다. Fig. 8 과 Fig. 9 등은 각각 Mg-Zn-Mn합금과 Mg-Zn-Mn-Ca합금의 온도조건 473.00-493.00K 응력조건 62.43-78.00Mpa하에서 대수변형속도와 부가응력사이의 관계를 나타낸 것이다. Mg-Zn-Mn합금인 경우의 응력지수 값은 5.24, 5.13 및 5.02으로 약 5.13로 나타났고 Mg-Zn-Mn-Ca합금인 경우의 응력지수 값은 6.53, 6.06 및 5.59로 약 6.06으로 나타났다. 온도조건 553.00-573.00K 응력조건 23.42-39.00Mpa 상태하에서 정크리이프 실험을 행한 결과, Mg-Zn-Mn합금인 경우에는 3.55, 3.50, 및 3.40으로 약 3.48로, Mg-Zn-Mn-Ca합금인 경우에는 4.80, 4.63 및 4.46으로 약 4.63으로 나타났다.

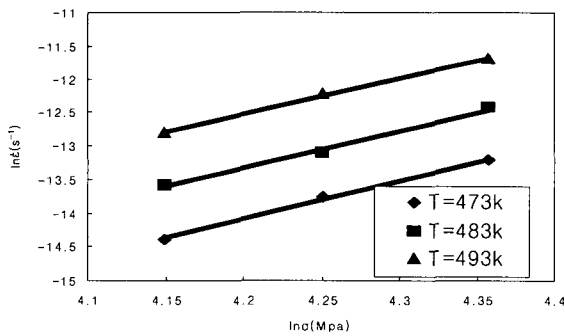


Fig. 8 Relationship between applied stress and creep rate with Mg-Zn-Mn

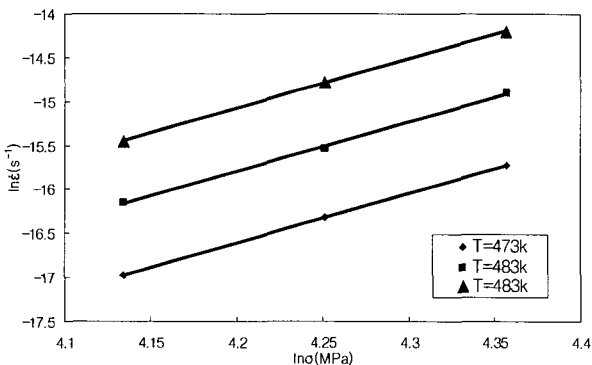


Fig. 9 Relationship between applied stress and creep rate with Mg-Zn-Mn-Ca

S.H. Im⁹⁾ 등은 Zr계 합금의 크리이프특성에 관련된 연구에서 정크리이프에 대한 응력지수값은 온도가 증가할수록 응력지수값은 거의 선형적으로 감소하게 나타나 본 실험결과와 같은 경향이 나타났다.

3.4 크리이프 파단수명 및 SEM사진결과

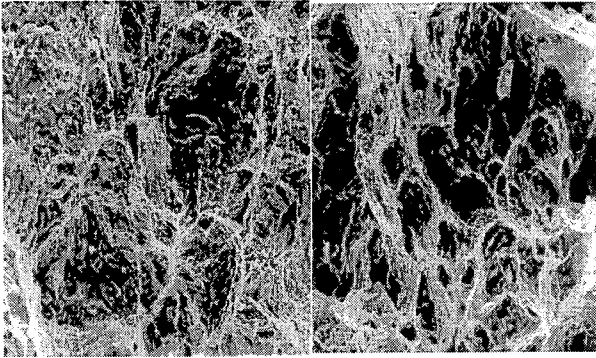
Mg-Zn-Mn 및 Mg-Zn-Mn-Ca합금의 파단수명을 예측하기위하여 여러가지 온도 및 응력조건에서 크리이프 실험을 행하였다. Table 1은 Mg-Zn-Mn합금 및 Mg-Zn-Mn-Ca합금의 파단수명을 나타낸 것이다. 이 결과에서 Mg-Zn-Mn-Ca합금의 파단수명은 Mg-Zn-Mn합금의 파단수명보다 상당히 개선됨을 일 수 있다. 이러한 결과는 마그네슘합금에서 Ca첨가시 결정립의 미세화효과에 인한 것으로 사료된다.

Table 1 Creep rupture life of Mg-Zn-Mn and Mg-Zn-Mn-Ca alloy

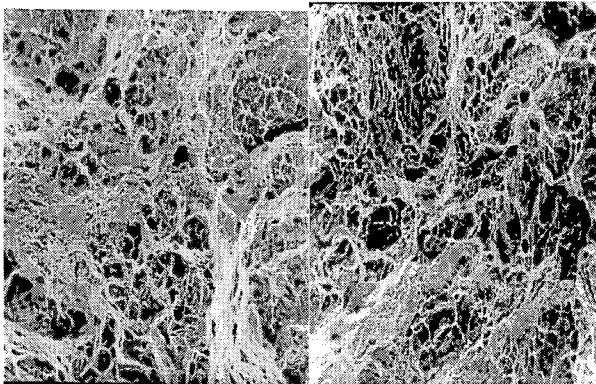
Temperature (°C)	Stress(Mpa)	Rupture time (s)	
		Mg-Zn-Mn-Ca	Mg-Zn-Mn
200	62.43	709,740	428,700
	70.17	339,400	195,060
	78.00	152,820	54,840
210	62.43	271,761	156,240
	70.17	123,960	62,980
	78.00	74,000	37,980
220	62.43	157,200	98,460
	70.17	78,259	23,500
	78.00	32,220	14,280
280	23.42	497,160	229,560
	31.16	128,720	72,720
	39.00	30,950	16,740
290	23.42	270,600	171,360
	31.16	71,340	33,060
	39.00	19,760	13,500
300	23.42	159,000	135,180
	31.16	54,000	24,000
	39.00	12,600	4,800

Fig. 10은 Mg-Zn-Mn 및 Mg-Zn-Mn-Ca합금에 대해 온도가 563.00K, 부가응력이 23.42Mpa의 파단부분을 SEM 사진촬영한 것이고 Fig. 11은 Mg-Zn-Mn 및 Mg-Zn-Mn-Ca합금에 대해 온도가 473.00K, 부가응력이 78.00Mpa에서의 파단부의 조직사진결과이다. 여기서보면 저온, 고응력인 상태의

파단면에는 작은 크기의 덩플이 많이 존재함을 알 수 있고 고온, 저응력상태의 파단면에서는 큰 덩플이 존재함을 알 수 있다.



a)Mg-Zn-Mn alloy b)Mg-Zn-Mn-Ca alloy
Fig. 10 SEM under 23.42Mpa and 563.00K of Mg-Zn-Mn and Mg-Zn-Mn-Ca alloys



a) Mg-Zn-Mn alloy b) Mg-Zn-Mn-Ca alloy
Fig. 11 SEM under 78.00Mpa and 473.00K of Mg-Zn-Mn and Mg-Zn-Mn-Ca alloys

4. 결 론

주조제작된 Mg-Zn-Mn-Ca합금과 Mg-Zn-Mn합금 등의 크리이프 활성화에너지와 응력지수, 그리고 크리이프 파단수명 등을 구하고 파단부의 조직을 SEM 사진관찰한결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Mg-Zn-Mn합금과 Mg-Zn-Mn-Ca합금의 온도 조건 473.00-493.00K 응력조건 62.43-78.00Mpa, 온도조건 553.00-573.00K 응력조건 23.42-39.00 Mpa상태하에서 활성화에너지를 측정한 결과, Mg-Zn-Mn합금인 경우에는 각각 149.87kJ/mol, 134.41kJ/ mol로 나타났고 반면, Mg-Zn-Mn-Ca 합금인 경우에는 각각 147.97kJ/mol, 129.22kJ/ mol로 나타났다.

- 2) Mg-Zn-Mn합금과 Mg-Zn-Mn-Ca합금의 온도 조건 473.00-493.00K 응력조건 62.43-78.00Mpa, 온도조건 553.00-573.00K 응력조건 23.42-39.00 Mpa상태하에서 응력지수를 측정한 결과, Mg-Zn-Mn합금인 경우에는 각각 5.13, 3.48로 나타났고 Mg-Zn-Mn-Ca합금인 경우에는 6.06, 4.63으로 나타났다.
- 3) 크리이프 활성화에너지는 부가응력이 증가할수록 감소하고 응력지수는 온도가 증가할수록 감소하였다.
- 4) Mg-Zn-Mn합금 및 Mg-Zn-Mn-Ca합금의 크리이프 파단수명을 측정한 결과, Mg-Zn-Mn-Ca합금의 파단수명은 Mg-Zn-Mn합금의 파단수명보다 상당히 개선되어 이러한 결과는 마그네슘합금에서 Ca첨가시 결정립의 미세화효과에 인한 것으로 사료된다.
- 5) Mg-Zn-Mn 및 Mg-Zn-Mn-Ca합금에 대해 파단면을 SEM 사진촬영한 결과 저온, 고응력인 상태의 파단면에는 작은 크기의 덩플이 많이 존재하였고 고온, 저응력상태의 파단면에서는 큰 덩플이 존재하였다.

후 기

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

참고 문헌

1. F. R. N. Nabarro, 1948, In Report of a Conference on the Strength of Soilds, The Physical Society, London, p.75
2. C. Heering, 1957, J. of Appl. Phys. Vol.21, p.437,
3. O. D. Sherby, J. L. Lytton, and J. E. Dorn, 1950, Acta. Met. Vol.5, pp.219~227
4. C. Sheldon Roberts, 1995, Magnesium and Its Alloys, John Wiley and Sons, Inc., pp.158 ~ 159
5. J. P. Eum, et.al., 1999, Development of Mg-Zn-(Mn, Ca) alloys, 한국주조학회 제 19권 제 1호, pp.7-14
6. D. M. Kang, and et.al., 2005, A study on the creep deformation mechanism and fracture time of ZM31magnesium alloy, proceedings of 2005

Spring Conference of KSMP, pp.282-287

7. D. M. Kang, and et.al., 2005, A study on the creep deformation characteristic of AZ31 Mg alloy at high temperautre, Transactions of KSAE, Vol.13, No.13, pp.186-192
8. A. Seeger, 1954, The temperature dependence of the critical shear stress and of work hardening of metal crytals, Phil. Mag., Vol. 45, pp. 771-773
9. S. H. Im, and et. al, 1997, The creep characteristics of Zirconium-base alloy, J. of the Korean Society for heat treatment Vol. 10, No. 3, pp. 198-208