

# AZ31마그네슘 합금의 고온특성 및 크리이프 변형기구에 관한연구 A Study on the Characteristics of High Temperature and Mechanisms for Creep Deformation of AZ31 Mg Alloy

강대민 · 안정오

D. M. Kang and J. O. An

**Key Words** : Creep rate(크리이프 속도), Deformation mechanism(변형기구), Stress exponent(응력지수), Activation energy(활성화 에너지)

**Abstract** : Magnesium alloys have been widely used for many structural components of automobiles and aircraft because of high specific strength and good cast ability in spite of hexagonal closed-packed crystal structure of pure magnesium. In this study, uniaxial tension tests at high temperature and creep tests are done in order to investigate the characteristics of high temperature and mechanisms for creep deformation of AZ31 Mg alloy. Yield stress and ultimate tensile stress decreased with increasing temperature, but elongation increased from results of uniaxial tension test at high temperature. The apparent activation energy  $Q_c$ , the applied stress exponent  $n$  and rupture life have been determined during creep of AZ31 Mg alloy over the temperature range of 473K to 573K and 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, whose data are sent to computer. At around the temperature of 473K~493K and under the stress level of 62.43~93.59 MPa, and again at around the temperature of 553K~573K and under the stress level of 23.42~39.00MPa, 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, respectively, and a little low to that of the self diffusion of Mg alloy including aluminum. Also rupture surfaces at high temperature have had bigger dimples than those at lower temperature by SEM.

## 1. 서 론

금세기초 이래 크리이프 실험은 광범위한실험 연구 대상이 되어왔고, Phillip와 Andrade의 고전적 연구를 시작으로 25년 동안에 걸쳐서 크리이프 기구에 대한 상세한 연구가 이루어져 왔다. 크리이프 변형기구 중  $0.4T_m \sim 0.7T_m$ 의 온도 범위에서 발생하는 전위 크리이프에 관한 연구로는 Lagneborg가 Mott에 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 요인에 의한 서로 독립적

인 크리이프 변형의 영향을 해석하기 위하여 행하여졌다. 한편 마그네슘 합금은 최근 환경보호 및 에너지 절약 문제가 부각되면서 자동차, 항공기 등의 경량화를 위한 최적의 소재로 평가되고 있고 고온 상태에서 활용도가 많으므로 재료개발을 위해서는 고온에서 마그네슘 합금에 대한 크리이프 특성 연구가 필요하다. 이러한 마그네슘합금의 변형특성에 대한 연구중 Polmear<sup>1)</sup>는 Al의 첨가로  $Mg_{17}Al_{12}$ 상을 형성하는 석출강화원소로 첨가되고 Zn은 고용강화 원소로 활용되어질 수 있고 Mn은 Fe와 화합물을 형성하여 내식성을 증대시킨다고 하였다.

Robert<sup>2)</sup>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 하였다. 그리고 주로 T-5열처리조건이 이용되고 크리이프 저항성을 향상시키기

접수일 : 2005년 2월 28일  
강대민(책임저자) : 부경대학교 기계공학부  
E-mail : dmkgang@pknu.ac.kr Tel. 051-620-1614  
안정오 : 부경대학교 대학원

위하여 AZ80A는 T 6열처리조건을 이용한다고 하였으나 AZ31 마그네슘 합금의 고온특성 및 크리이프 특성에 대한 연구<sup>3,4)</sup>는 대단히 불충분한 실정이다.

본 논문에서는 AZ31 마그네슘 합금의 고온에서 고온인장 실험과 크리이프 시험을 통하여 AZ31 마그네슘 합금의 고온 특성 및 크리이프 변형기구에 대해 예측하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 고온인장시험

고온인장시험은 AZ31마그네슘합금재의 고온물성치(탄성계수, 항복강도, 최대인장강도 및 연신률)의 온도 의존성을 구하기 위하여 행하였다. 온도범위는 상온에서 673K까지의 온도범위에서 실험을 실시한 후 온도변화에 따른 파단면을 관찰하고 기계적물성의 온도 의존성을 조사하였다. 소재는 수입한 AZ31를 사용하였으며 재료의 성분분석결과는 Table1에 나타내었다. 시편제작을 위해 압출용빌릿은 연속주조 시스템의 전기용해로에서 용해하여 만들었으며 예열로에서 예열한 후 1250톤의 압출기에서 압출봉재를 만들었다. 고온인장시험에 사용된 인장시험기는 2축 하중 프레임형태의 ZWICK Z100을 사용하였고 온도를 상승시키기 위하여 전기로를 인장시험기에 부착하였다. 실험에 사용된 크로스헤드속도는 10mm/min으로 일정하게하고 초기하중은 10N으로 파단이 발생할때까지 실험을 행하였다.

Table 1 Chemical composition(Wt.%)

Alloy	Al	Zn	Mn	Fe	Ni	Si	Cu	Mg
AZ312	3.10	1.07	0.30	0.005	< 0.001	< 0.005	< 0.005	Bal.

### 2.2 크리이프 실험

#### 2.2.1 시편

정크리이프 실험에 사용했던 재료는 고온인장시험에 사용했던 재료와 동일하며 시편제작을 위해 NC 선반 가공하여 지름 4mm 표점거리 16.3mm의 시편을 제작하였다. 시편의 규격은 Fig. 1에 나타내었다.

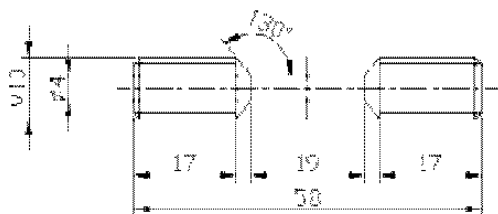


Fig. 1 Geometry of creep specimen

#### 2.2.2 실험장치

본 실험에서 사용한 크리이프 시험기는 고려전기로부터 제작한 'KF CT 50'으로 Fig. 2과 같이 크게 운용 소프트웨어(PART1)와 크리이프 시험기(PART2)의 두 부분으로 나눌 수 있다. Fig. 7의 PART2는 다시 전기로, 신장계 및 부하부로 구성되며 전기로 내에서는 열전대와 전열선, 내화재로 구성 되어 있다. 노 내 온도유지와 시편의 산화 방지를 위해 잘 밀봉되어 있고 로의 사용온도는 최고 1673K다. 변형량을 측정하는 신장계는 컴퓨터와 직접 연결되어 실험 시 화면상에 데이터가 바로 나타난다. 이때 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환시켜주는 변환기에 의해 컴퓨터로 데이터가 전송된다. 그리고 하중부의 바로 밑 부분은 파단 시 충격을 흡수하고 기계의 안전을 위한 완충장치가 부착되어 있고 하중을 부가하는 부하부의 레버비는 1:10이다.

#### 2.2.3 실험방법

프로그램 데이터파일 중 하중, 온도, 시편의 각종 정보 등을 입력하고 각 부위의 연결 상태 점검과 센서의 연결 상태가 부드러운지 확인한 후 시편을 풀 로드에서 연결한다. 가장 윗부분인 레벨부분을 봉의 하단 부분의 조정나사를 이용해 수평을 맞춘 다음 컨트롤 박스에서 온도와 시간을 Fig. 3에 따라 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.

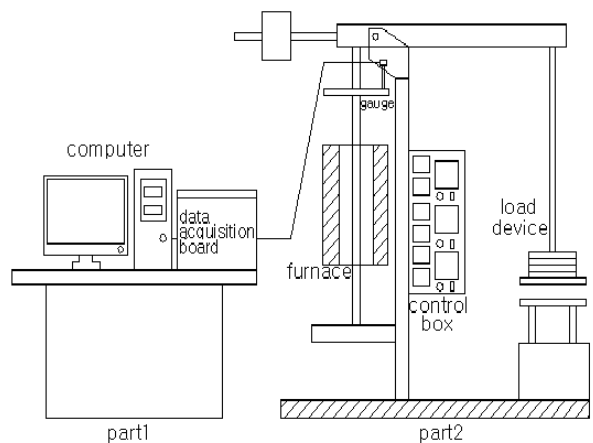


Fig. 2 Equipment for creep experiment

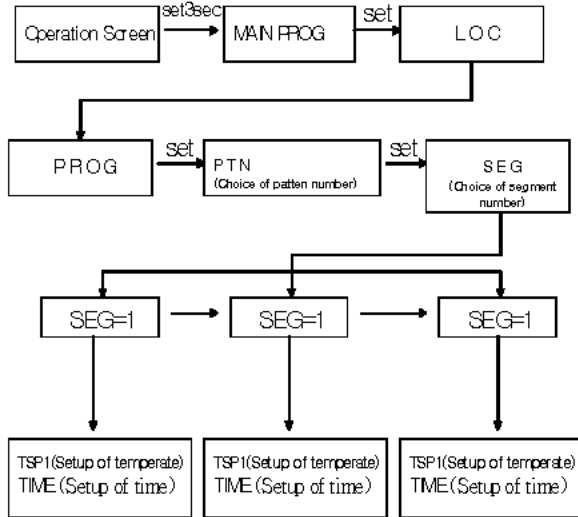


Fig. 3 Flow chart for setting of temperature

### 3. 실험 결과 및 고찰

AZ31재의 고온인장시험결과와 정상크리프 속도의 응력의존성과 정상크리프 속도의 온도의존성을 구하기 위하여, 온도조건 473K~493K, 응력조건 62.43~93.59MPa, 온도조건 553K~573K 응력조건 23.42~39.00MPa상태 하에서 실험하여 계산된 결과는 다음과 같다.

#### 3.1 고온인장시험결과

Fig. 4~6등은 AZ31마그네슘합금의 고온인장시험결과로 각각 항복강도의 온도의 영향, 인장강도의 온도의 영향, 그리고 연신율의 온도의 영향을 나타낸다. 여기서 항복강도와 인장강도는 온도가 증가함에 따라 감소하였고 연신율은 크게 증가하였다.

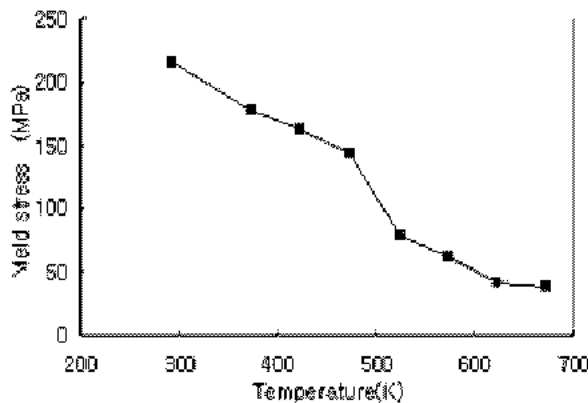


Fig. 4 Relationship between yield stress and temperature

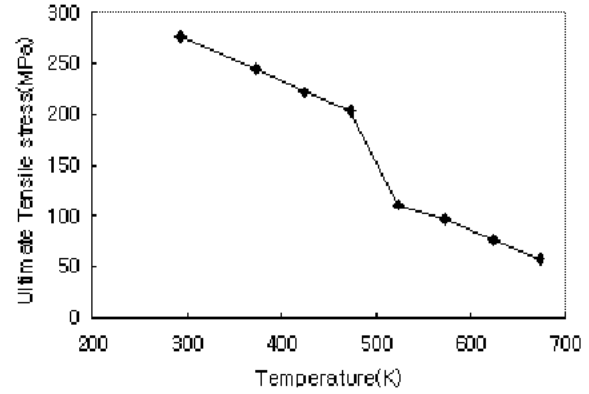


Fig. 5 Relationship between ultimate tensile strength and temperature

Figs. 7, 8등은 각각 337K, 673K에서 파단후의 시편 사진을 나타낸다. 여기서보면 고온이 될수록 변형이 많이 발생하여 파단부의 단면적이 매우 적게 나타났다.

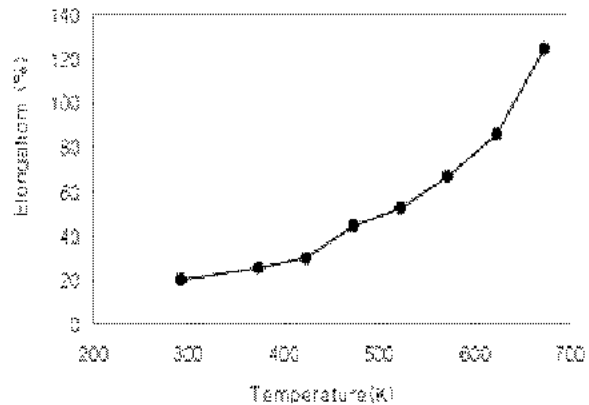


Fig. 6 Relationship between elongation and temperature

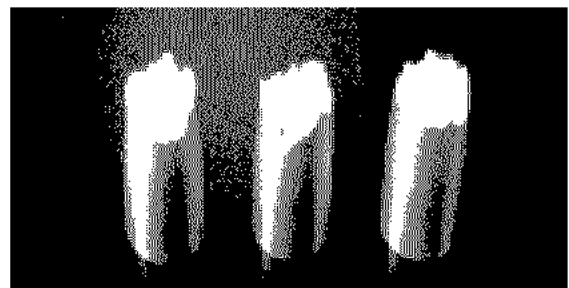


Fig. 7 Specimens tested at 337K

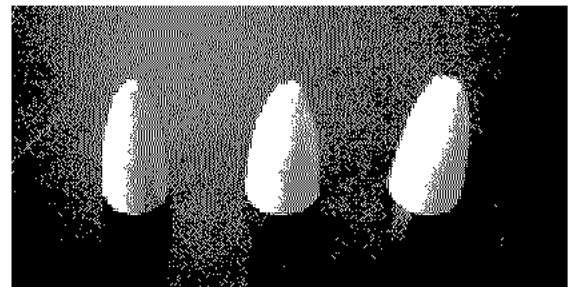


Fig. 8 Specimens tested at 673K

3.2 응력지수의 계산

응력지수의 값을 구하기 위해서 다음과 같이 식 (1)을 이용했다.

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

여기서 작용응력  $\sigma_1, \sigma_2$  하에서 정상상태의 크리이프 속도는 각각  $\dot{\epsilon}_1$  및  $\dot{\epsilon}_2$ 이다. 응력지수  $n$ 값은 대수변형률과 대수 응력의 그래프에서 직선의 기울기로 표시된다. Fig. 9와 Fig. 10은 473K~493K 및 553K~573K 에서 크리이프 속도와 응력과의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 온도가 473K~493K, 응력이 62.43~93.59MPa인 조건에서의 응력지수값은 각각 5.93, 5.86 및 5.76으로 약 5.85로 나타났다. 또한 온도가 553K~573K, 응력이 23.42~39.00MPa인 조건에서의 응력지수 값은 3.67, 3.59 및 3.52로 약 3.59정도로 두 조건 모두 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향이 나타났다.

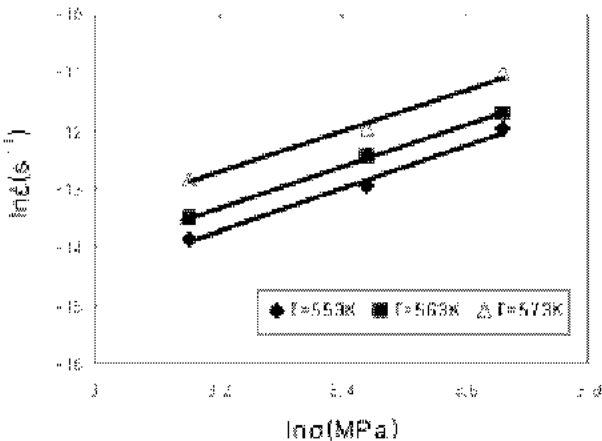


Fig. 9 Stress-dependent of creep rate under 473K~493K

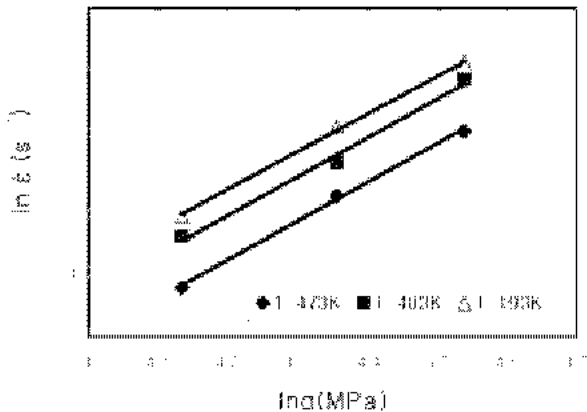


Fig. 10 Stress-dependent of creep rate under 473K~493K

응력지수로서 예상되는 변형기구를 고찰하기 위해서 Sherby와 Burke<sup>5)</sup>의 연구를 언급하면 크리이프 속도와 부과응력의 사이에는 Fig.11에서 보는 바와 같이 3영역이 있다. 즉 I영역과 II영역은 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. 여기서  $T$ 는 실험에 적용된 온도,  $T_m$ 은 켈빈온도로 환산하여 실험에 적용된 온도를 용융온도로 나눈값으로 정의한다. 제II영역에서는 온도가  $0.5T_m$ 이상으로 전위활주와 전위상승이 변형을 지배하며 응력지수  $n$ 값은 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.

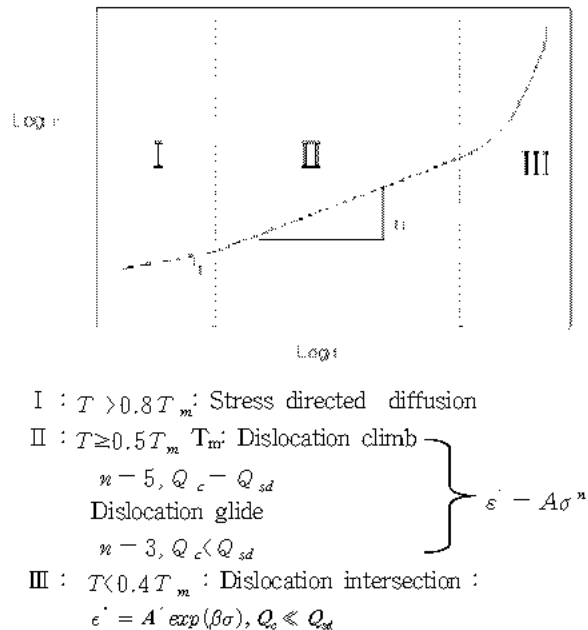


Fig. 11 Influence of stress on steady state creep rate for a typical pure polycrystalline metal

3.3 크리이프 활성화 에너지 측정결과

온도가 473K~493K, 553K~573K 조건하에서 활성화에너지를 계산하기 위해 대수 변형률과 온도사이의 관계에서 구한 기울기와 일반 기체상수(R)를 곱하여 활성화 에너지를 계산했다. Fig.12는 응력이 62.42~93.59MPa, 온도가 473K~493K인 조건 하에서의 대수변형률과 온도사이의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 응력이 62.43, 78.00 및 93.59MPa일 때 각각

활성화 에너지는 149.56, 144.95 및 141.15kJ/mol로 평균치는 대략 145.22kJ/mol로 나타났다.

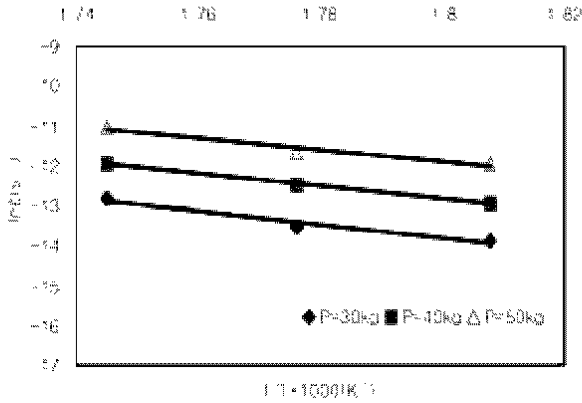


Fig. 12 Stress-dependence of creep rate under 473K~493K

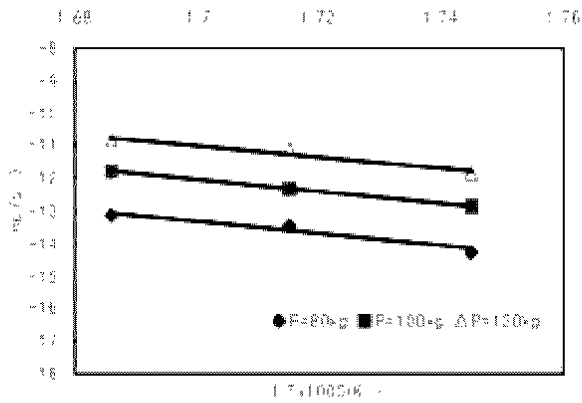


Fig. 13 Stress-dependence of creep rate under 553K~573K

Fig. 13은 응력이 23.42~39.00MPa, 온도가 553K~573K 인 조건에서의 대수 변형률과 온도사이의 관계를 나타낸 것이다. 응력이 23.42, 31.16 및 39.00MPa일 때 각각의 활성화 에너지는 134.37, 129.33, 123.79kJ/mol로 평균치는 129.16(kJ/mol)으로 나타났다. 한편 Al원소가 Mg기저 안에서 확산할 때의 활성화 에너지 값은 143kJ/mol로 알려져 있어<sup>6)</sup>이 내용을 참고하면 온도가 473K~493K 구간에선 전위 상승이고, 온도가 553K~573K구간에선 전위 활주로 추측된다. 또한 여기서 응력이 증가할수록 활성화 에너지가 감소하는 경향이 나타나는데 이 사실은 Seeger<sup>7)</sup>의 설명에 따르면 크리이프는 열적 활성화 과정으로 외부 응력이 크리이프 변형을 저지하는 장애를 낮게 하여 활성화 에너지  $Q_c$ 는 응력에 관계되어 다음 식(2)와 같이 표시하였다

$$Q_c = Q_{sd} - Vf(\sigma) \quad (2)$$

### 3.4 크리이프 파단부의 조직 관찰

Figs 14, 15 등은 각각 온도조건이 573K, 593K, 응력조건이 39.00MPa인 경우의 파단부의 SEM사진 결과를 나타낸다. 여기서 보면 온도가 높을수록 큰 덩플이 나타남을 알 수 있다.

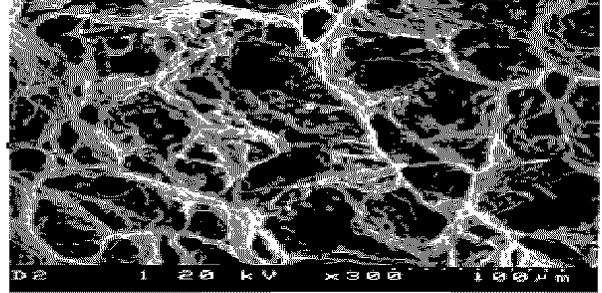


Fig. 14 Result by SEM at 573K and 39.00MPa

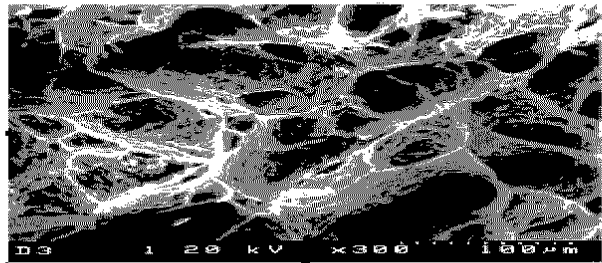


Fig. 15 Result by SEM at 593K and 39.00MPa

## 4. 결 론

고온 인장 시험과 같이 온도조건 473K~493K 응력조건 62.42~93.59MPa, 온도조건 553K~573K 응력조건 23.42~39.00 MPa상태 하에서 크리이프 시험 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 고온인장 시험한 결과 항복강도와 인장강도는 온도가 증가함에 따라 급격히 감소 하였고 반면 연신율을 크게 증가하였다.
2. 온도조건이 473K~493K 응력조건이 62.42~93.59 MPa인 경우의 크리이프 변형속도의응력의존성은 대략 5.85로 나타났고 측정된 크리이프 활성화 에너지는 대략 145.22kJ/mol로 나타났다. 553K~573K 응력조건이 23.42~39.00MPa인 경우의 크리이프 변형속도의 응력의존성은 대략 3.59로 나타났고 측정된 크리이프 활성화에너지는 대략 129.16kJ/mol로 나타났다.
3. 온도조건 473K~493K, 응력조건 62.42~93.59MPa 인 조건에서의 변형기구는 전위상승, 온도조건 553K~573K 응력조건 23.42~39.00MPa인 조건에서의 변형기구는 전위활주로 추측된다.

4. 파단부의 SEM 사진 결과 온도가 높을수록 큰 덩플이 발생하였다.

### 후 기

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

### 참고 문헌

1. I.J. Polmear, 1991, Proceedings of International Conference on Recent Advances in Science and Engineering of Light Metal, Japan Inst. Light Metals, p. 201.
2. C. Sheldon Roberts, 1958, Magnesium and Its Alloys, John Wiley and Sons, Inc., pp. 158~159.
3. J.K Hwang and D.M Kang, 2004, A study on Effect of Temperature of Press Forging on AZ31 Magnesium alloy, J of KSMPE, Vol. 3 No 1, pp. 66~71.
4. 안정오, 강대민, 2004, AZ31 마그네슘 합금의 크라이프 특성에 관한 연구, 한국 자동차공학회 (부산, 울산, 경남지부) 2004년도 추계학술 대회, pp. 67~74.
5. O.D. Sherby and P.M. Burke, 1968, Mechanical Behavior of Elevated Temperature, Progress in Materials Science, Vol. 13, pp. 325~390.
6. S. S. Valgarali and T. G. Langdon, 1982, Acta metal., Vol. 30, p. 1157.
7. A. Seeger, 1954, The Temperature Dependence of the critical Shear Stress and of Work Hardening of Metal crystals, Phil. Mag., Vol. 45, pp. 771~773.