creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사 학위논문

AZ31 마그네슘 합금의 크리이프 특성과 단시간 크리이프 수명 예측

2008년 2월

부경대학교 대학원

설계생산자동화공학전공

전 성 호

공학석사 학위논문

AZ31 마그네슘 합금의 크리이프 특성과 단시간 크리이프 수명 예측

지도교수 강 대 민

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2008년 2월

부경대학교 대학원

설계생산자동화공학전공

전 성 호

목 차

ABSTRACT

제 1 장. 서론 ····· 1

제 2 장. 크리이프 이론 ····· 4

2.1 크리이프 곡선 ····· 4

2.2 크리이프 변형기구 ····· 7

2.2.1 크리이프 온도 의존성 ····· 8

2.2.2 크리이프 속도의 응력 의존성 ····· 10

2.3 초기연신률법(ISM)의 이론 ····· 11

제 3 장. 실험 장치 및 방법 ····· 13

3.1 실험 시편 ····· 13

3.2 실험 장치 ····· 14

3.3 실험 방법 ····· 15

제 4 장. 실험 결과 및 고찰 ····· 17

4.1 크리이프 활성화에너지 측정결과 ····· 19

4.2 크리이프 속도의 응력 의존성 ····· 20

4.3 AZ31 마그네슘 합금의 ISM에 의한 크리이프 수명 예측 ····· 25

4.3.1 크리이프 응력과 정상 크리이프 속도와의 상관성 ····· 25

4.3.2 크리이프 응력과 초기 연신률과의 상관성 ····· 26

4.3.3 크리이프 파단수명과 초기 연신률과의 상관성 ····· 28

4.3.4 LMP-ISM에 의한 고온 크리이프 수명 예측식 도출 ····· 30

4.3.5 ISM에 의한 단시간 크리이프 수명 예측식 도출 ····· 33

4.4 SEM을 이용한 미세조직 관찰 결과 ····· 37

제 5 장. 결론 ····· 41

참고문헌 ····· 43

전성호의 공학석사 학위논문을 인준함

2008년 2월

주 심 구 양 (인)

위 원 곽 재 섭 (인)

위 원 강 대 민 (인)

A study on the creep properties of AZ31 magnesium alloy and creep life prediction of a short time

Sung-Ho Jun

Graduate School of Mechanical Engineering,
Pukyong National University

Abstract

As the machine industry develop recently, the use of the serviceable material is increasing. A study on development of magnesium alloy and high creep characteristics and rupture life prediction was advanced actively. However, there are very few studies on high creep life prediction of AZ31 magnesium alloy to an initial strain method(ISM). Thus, in this study was investigated about relationship expression of creep stress vs steady state creep rate and relationship expression of creep stress vs initial strain, relationship expression of creep life vs initial strain through high creep experiment of AZ31 magnesium alloy. And then, creep rupture life prediction expression was investigated by ISM.

The creep deformation will investigate about the activation energy Qc and the applied stress in the temperature range of 160~180℃ and stress range of 109~141MPa.

제 1 장. 서론

마그네슘 합금은 밀도가 1.8g/cm^3 정도로서 현재까지 개발된 상용 구조용 합금 중에서 최소의 밀도를 가짐과 동시에 우수한 비강도 및 비 탄성 계수를 가지고 있다. 또한 알루미늄의 2/3 정도로 적은 열량으로도 용해가 가능하며, 응고 잠열이 작아 알루미늄에 비하여 빨리 응고하고 열전도율은 알루미늄의 약 70%정도의 장점을 지니고 있다. 특히 진동, 충격 등에 대한 흡수성이 탁월하고 전기 및 열 전도도, 가공성 및 고온에서의 피로, 충격특성 등이 우수하고, 실용 합금 중에서 비중이 가장 작으며 석출경화로 높은 강도를 얻을 수 있어 주조, 압출 및 판재 등의 형태로 선박, 자동차, 항공기 등의 수송 기기, 방위산업 및 일반기계 등 무게 절감을 위한 경량화가 필수적인 분야에서의 요구조건에 부합되는 여러 가지 우수한 특성을 지니고 있다. 현재 선진 자동차 제조회사에서는 경량화에 대한 가장 가능성이 있는 재료로 마그네슘합금을 이용한 부품개발에 관심이 집중되고 있다. 이와 같이 마그네슘 합금의 중요성에 대한 인식은 매우 높지만 상용화 정도는 알루미늄 합금 등 기타 경량 소재에 비교하여 매우 낮은 편이다. 이처럼 상용화가 본격적으로 이루어지지 못했던 이유는 마그네슘 합금의 친 산화성으로 인하여 용해가 곤란하고 상온에서의 연성과 내식성이 낮기 때문이었다. 또한 결정구조가 조밀육방격자(HCP)이기 때문에 상온에서의 소성가공은 매우 어려운 단점을 지니고 있다. 상온에서 마그네슘 합금은 조밀육방격자 금속의 특성상 변형모드의 제한으로 인하여 큰

변형을 수용할 수 없다. 따라서 부가적인 변형모드의 인가를 위하여 일반적으로 고온에서의 열간 가공이 행하여 진다. 따라서 300℃정도의 고온에서는 연성이 급격하게 증가하므로 열간 압출이나 열간 압연등의 소성가공이 가능하다. 그러므로, 마그네슘 합금의 인장시험을 수행하여 소재의 온도에 따른 고온에서의 크리이프 특성을 파악하는 연구가 필요하다.

그리고, 최근 10여 년 동안에는 중국에서의 마그네슘 잉곳(ingot) 공급량이 크게 증가하였고, 동시에 적용 부품의 수가 증가함에 따라 잉곳의 가격 또한 1993년 이후 지속적으로 감소하였으며 현재 알루미늄과의 가격차가 단위 무게 당 알루미늄의 1.5배 내외로 마그네슘 합금 제품의 가격 경쟁력이 크게 상승하고 있는 추세이다. 지금까지의 마그네슘 합금 부품은 주로 다이캐스팅 공정을 위주로 한 일반적인 주조공정에 의하여 제조되어 왔으나, 이 방법은 주조 결함을 많이 함유하고, 특히 두께 1mm 이하의 박판제품의 제조 시에는 많은 불량률 때문에 실질적으로 제조가 불가능하다는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해 최근 일본에서는 마그네슘 합금 박판을 제조하고, 이를 성형함으로써 제품을 제조하는 기술을 개발하여 전자부품의 양산에 적용하고 있다. 특히, 이러한 고상 성형에 의한 부품 제조기술은 생산성이 높고, 표면조건이 우수하기 때문에 불량률이 낮아 기업의 가격 경쟁력을 높일 수 있는 장점이 있다. 그리고, AZ31 마그네슘 합금은 우수한 성형성과 강도 그리고 내식성이 뛰어나 주로 압출재나 압연재 등으로 가공되어 사용되고 있지만, 철 합금이나 알루미늄 합금 등의 다른 연성금속보다 소성가공이 쉽지 않아서 성형성 향상에

관한 연구가 계속되고 있다.

한편, 최근 기계공업의 발달에 따라 고온에서 사용가능한 재료의 사용이 점차 증가되고 있다. 이러한 고온에서 사용할 수 있는 마그네슘 합금의 개발과 함께 고온 크리이프 특성과 파단 수명 예측에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 초기 연신으로 파단수명 예측이 가능한 기준 파라미터가 고응력, 단기간 파단시간에 대하여 얻어져, 초기 연신율이 크리이프 응력, 파단수명, 정상 크리이프 속도와 정량적인 상관관계가 존재함이 입증된 바 있다.[1, 2] 그러나, AZ31 마그네슘 합금의 고온 크리이프 수명을 ISM[3-5](Initial Strain Method, 초기연신률법)에 의하여 예측평가한 연구는 거의 없다.

본 논문에서는 AZ31 마그네슘 합금의 고온에서 크리이프 실험을 통하여 크리이프 응력과 정상 상태 크리이프 속도와의 상관성, 크리이프 응력과 초기 연신률과의 상관성, 초기연신률과 파단수명과의 상관성을 규명하고 ISM에 의한 크리이프 파단수명 예측식 도출, 타 예측식인 LMP법[6]과 LMP-ISM[4]과의 비교 검토하여, 실제로 적용할 수 있는 유용하고 신뢰성있는 파단수명예측식을 완성하였다. 그리고, AZ31 마그네슘 합금의 활성화 에너지(Q_c) 및 부가응력지수(n)에 대한 실험결과를 토대로 온도 $0.4T_m$(용해온도)하에서 크리이프 변형기구에 대해 연구해 보고자 한다.

제 2 장. 크리이프 이론

2.1 크리이프 곡선

재료가 일정한 변형력 아래서 시간의 흐름에 따라 천천히 연속적으로 변형하여 가는 현상 즉 일정하중 하에서 시간에 따라 서서히 재료에 생기는 소성변형을 크리이프라 한다. 크리이프의 예를 들면, 고무줄에 추를 매달면 순간적으로 고무는 늘어나지만 그대로 방치해두면 시간이 흐름에 따라 고무는 서서히 늘어난다. 이와 같은 현상은 고분자물질인 플라스틱에서 현저히 나타나지만, 철강과 같은 금속재료 또는 콘크리트 등에서도 일어난다.

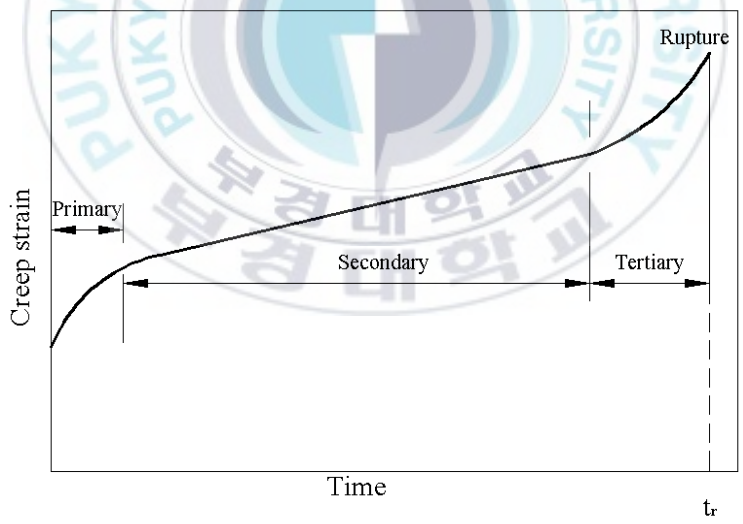


Fig. 1 Typical creep curve

이러한 크리이프의 성질은 일정하중 하에서 시간에 따라 측정된 변형량 “연신율-시간”의 좌표에 표시한 크리이프 곡선에 의하여 결정된다. 고온에서는 Fig. 1과 같이 표준 크리이프 곡선은 크게 세가지의 영역으로 명확히 분리된다. 크리이프 초기 단계인 A는 1차크리이프(천이 크리이프)구역으로 크리이프 속도가 시간의경과에 따라 점차 감소되는 특성을 보이고 이 구역에서는 소성변형과 탄성변형이 공존한다. 1차 크리이프 종료 후 B영역에서는 크리이프 속도가 어느 정도 일정하게 되는데, 이 구간을 2차 크리이프(정상상태 크리이프)라 한다. 이 구간에서는 연신과 시간이 일정한 기울기로 거의 직선 관계이며, 크리이프 속도가 가장 느리다. 정상상태 크리이프 단계가 끝나 C영역에서는 크리이프 속도가 점점 증가하는 3차 크리이프(가속 크리이프)가 나타나서 결국 파단에 이르게 된다. 그러나, 저온($T<0.4T_m$)에서는 Fig. 2와 같이 회복에 의한 재료의 연화가 일어나지 않으므로 정상 크리이프 속도와 가속 크리이프는 나타나지 않는다. 고온에서 정상 크리이프 곡선은 재료에 하중이 가하여지면서 1차 크리이프 상태에서는 급속히 변형이 시작되고, 재료가 가공경화가 되기 시작하여 변형이 점차 어려워 지고, 재료의 내부응력이 증가하고 유효응력이 감소하므로 크리이프 속도는 감소한다. 시간이 경과함에 따라 재료의 인장으로 단면적이 감소하기 때문에 전위의 구조가 변화하게 되면서 금속의 강도가 증가하고, 내부응력이 감소하게 된다. 이때 가공경화로 인한 내부응력의 증가와 회복에 의한 내부응력의 감소로 서로 균형을 이루어 일정상태로 유지된다. 즉 온도가 증가하면 회복효과가 가공경화 효과를 상쇠 시킨다. 결국, 크

리이프 속도가 일정하게 되는 2차 크리이프, 즉 정상 크리이프에 도달하게 된다. 따라서, 1차 크리이프에서 2차 크리이프의 변화는 일반적으로 온도가 높을수록 더 낮은 변형률에서 일어난다. 마지막 단계인 3차 크리이프, 즉 가속 크리이프는 이러한 회복과 가공경화의 상호작용에 기인하는 것이 아니고 재료의 미세구조상의 결함에 기인한다. 미세구조상의 결함인 동공, 입계분리 혹은 균열, 상변화, 재결정 등이 재료에 발생하면 국부적으로 단면적이 감소 되기 때문에 이러한 부분에 응력이 집중되게 된다. 이러한 현상은 상호원인이 되기도 하고 결과가 되기도 해서 어느 현상이 가속 크리이프의 직접적인 원인인가를 판단하기 힘들다. 그리고, 크리이프 속도는 응력에 의존하기 때문에 결함 부위의 변형률과 변형률 속도가 증가한다. 따라서 이러한 부분에 넥킹이 발생하게 되고 넥킹이 일단 일어나면 넥킹에 의한 응력집중 때문에 파단이 일어난다.

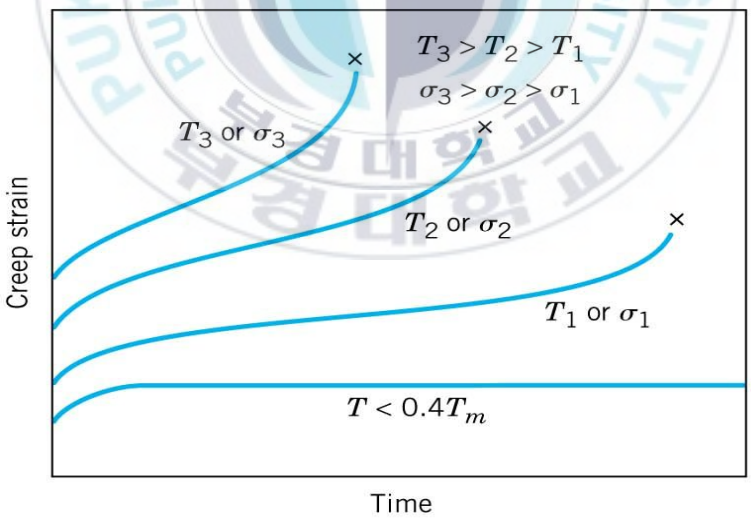


Fig. 2 Schematic representation of various types of creep curve

2.2 크리이프 변형기구

재료의 특성에 따라 일정한 온도와 하중 조건하에 재료는 각기 다른 고유의 변형이 발생한다. 변형이 발생하는 원인을 분석함으로써 크리이프 변형의 이론적 해석이 가능하다. 이러한 변형기구를 이용해서 실제 크리이프 변형을 억제 시키는 방법을 찾아서 재료에 적용함으로써 신재료 개발을 가능하게 할 수 있다. 크리이프 변형을 일으키는 변형기구의 주된 요인이 되는 것은 크리이프 활성화 에너지, 응력지수 등을 파악하면 크리이프 변형기구를 파악 할 수 있다.

2.2.1 크리이프 온도 의존성

크리이프의 온도의존성은 활성화에너지(Q_c)의 특성을 조사함으로써 해석 할 수 있다. 활성화에너지는 열역학적 상태함수로서 활성화에 대한 자유에너지, 즉 Gibbs의 자유에너지 △G를 쓰면 응력과 절대온도는 독립상태변수가 된다. 즉 △G=△G(σ,T)가 되고 등온조건에서는 이 상태함수가 다음 식 (1)과 같다.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad \cdots\cdots (1)$$

여기서, △S는 활성화 엔탈피이고 다음 식 (2)와 같다.

$$\Delta S = \left.\frac{\partial \Delta G}{\partial T}\right|_{\sigma} \quad \cdots\cdots (2)$$

식(1)과 (2)를 결합하면 식(3)과 같다.

$$Q_c = \Delta H = \frac{\partial(\Delta G/T)}{\partial(1/T)} \quad \cdots\cdots (3)$$

여기서, Q_c는 실험에서 측정되는 활성화 에너지이다.

식 (3)을 온도에 대한 크리이프 속도($\dot{\varepsilon}$)와 활성화 에너지(Q)를 Arrhenius식으로 표시하면 식 (4)와 같다.

$$\dot{\varepsilon} = K \exp(-Q/RT) \quad \cdots\cdots (4)$$

여기서, K는 응력과 연신에 대해서는 상수이지만 온도에 대해서는 약간 변화하며, R은 일반 기체 상수, T는 절대온도이다. Q는 크리이프 기구의 실제 활성화에너지이다. 그러나, 실제 활성화 에너지는 크리이프의 변형기구가 명확하게 밝혀지지 않은 상태에서는 실제 활성화 에너지를 결정하는 것은 불가능하다. 그래서, 실험적으로 활성화 에너지를 측정해서 실제 활성화 에너지 값에 가장 가까운 근사치를 구할 수 있다. 그 값을 겉보기 활성화 에너지라고 한다. 즉, 일정하중에서 온도 범위가 작을 때 재료의 조직 및 내부응력의 변화가 일

어나지 않는다고 가정하면 크리이프 속도와 온도의 역수(1/T)의 좌표에서 기울기에 의한 방법으로 정크리이프 상태하의 겉보기 활성화 에너지를 구할 수 있다. 겉보기 활성화 에너지는 식 (5)와 같다.

$$Q_c = \frac{R \ln(\dot{\varepsilon}_2 / \dot{\varepsilon}_1)}{1/T_2 - 1/T_1} \quad \cdots\cdots (5)$$

여기서, $\dot{\varepsilon}_1$는 온도 T_1에서의 최종 크리이프 속도이고 $\dot{\varepsilon}_2$는 T_2에서의 초기 크리이프 속도이다.

Sherby[7, 8]의 연구에 의해 크리이프의 속도에 따라 활성화 에너지는 변화하고, 활성화에너지는 연신의 변화에 관계없이 거의 일정한 값을 갖는다고 하였다. 또한, Garofalo[9]의 연구에서도 활성화 에너지는 연신과 무관한 것으로 나타났다. 활성화 에너지와 응력에 관계에 대한 Seeger[10]의 연구에 의하면 실험적으로 측정된 활성화 에너지는 식 (6)과 같다.

$$Q_c = Q_0 - Vf(\sigma) \quad \cdots\cdots (6)$$

여기서 Q_0는 부과응력이 없을 때의 활성화 에너지, V는 활성화 부피, $f(\sigma)$는 부과응력의 함수이다.

Weertmann[11]의 연구에 의하면 부가응력의 감소에 따라 겉보기 활성화 에너지가 증가하는 것으로 나타났다. 따라서, 활성화 에너지는 온도 변화에 대해서는 민감하게 변화하지만 연신량에는 거의 변화하지 않으며, 부과응력에 따라서는 변화하지만 그 영향은 크지 않은 것을 알 수 있다.

2.2.2 크리이프 속도의 응력 의존성

크리이프 변형속도의 응력의존성은 Cuddy와 Garofalo가 제안한 정상 변형률 속도는 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$\dot{\varepsilon} = K\sigma^{n} \quad \cdots\cdots (7)$$

여기서, K와 n은 일정온도에서의 상수이다.

식 (7)의 양변에 대수를 취하면, 다음 식 (8)을 얻을 수 있다.

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A + n \ln \sigma \quad \cdots\cdots (8)$$

또한 온도조건을 일정하게 하면 A는 일정상수가 되어 lnA는 상수 C로 둘 수 있다. 즉, 응력지수 n값은 다음 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$n = \frac{\ln(\dot{\varepsilon}_2 / \dot{\varepsilon}_1)}{\ln(\sigma_2 / \sigma_1)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (9)$$

이 식에서 응력지수값은 대수 변형률과 대수응력의 그래프에서 직선의 기울기로 표시된다.

2.3 초기 연신률법(ISM)의 이론

ISM은 응력과 온도의 변수인 연신률로써 연신률의 초기값을 가지고 재료의 파단수명을 예측 할 수 있다. 대부분의 재료들은 응력과 온도에 의해 파단수명이 결정되며, 각각의 온도에 따라 그 연신률이 크게 다르게 나타난다. 그리고 온도가 일정하더라도 응력에 따라 각 시험편의 변형량도 서로 다르게 나타난다. 초기 연신률은 시간과 독립적인 변수이다. 하지만, 응력과 온도에는 아주 민감한 변수임에 틀림없다. 즉, 초기 연신률은 온도가 증가할수록 증가하며, 일정 고온하에서 응력의 변화에 대해서도 초기 연신률은 약간씩 다른 값을 가진다. 기존의 크리이프 파단 수명예측식들은 응력, 온도, 정상 크리이프 속도, 활성화 에너지 외에도 많은 변수등을 고려한 복잡한 식이다. 따라서, 본 논문에서는 그와 같은 많은 변수들과 관련된 초기변형과 여러 변수들을 고려한 관계식으로 파단수명을 예측하려는 것이다.

1910년 Andrade[12)]에 의해서 제안된 초기 연신률을 고려한 식은 다음과 같

다.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left(1 - \beta t^{\frac{1}{3}}\right) e^{kx} \quad \cdots\cdots (10)$$

여기서, ε은 시간 t에 따른 변형율이고, ε_0는 초기 연신율, β와 k는 상수이다. 그러나, 이식은 제한된 재료에서만 실증이 되어 그 후 여러 학자들에 의해 수정 보완되었으나 보완된 수식들은 단계별로 그 변형량 과 크리이프 속도를 고려해야 하고, 여러 온도의 범위에서는 오차가 크다고 보고되었다.

1983년 Oh[1)]에 의해 내열강 및 이들의 마찰용접재에 대하여 크리이프 하중 작용 직후의 초기 연신율은 이후 크리이프 특성에 영향을 미친다고 보고하였으며, 그 후 내열강등 에서도 다음과 같은 선형 모델식[13, 14)]을 제안하였다.

$$t_r = K_1(\varepsilon_0)^B \quad \cdots\cdots (11)$$

$$\varepsilon_0 = m(\sigma)^n \quad \cdots\cdots (12)$$

여기서, K_1, b, m, n은 재료정수이다.

그러나, 이들 실험식은 일정온도, 고응력하 에서 극히 짧은 파단시간의 실험결과로서 여러 온도와 응력하에서의 온도-응력-파단수명-초기변형이 포함되는 식의 도출이 필요하다.

제 3 장. 실험 장치 및 방법

3.1 실험시편

크리이프 실험에 사용했던 재료는 AZ31 마그네슘 합금으로 지름 4mm 이고, 표점거리는 16.3mm의 시편을 제작, 사용하였다.

Table 1에 AZ31 마그네슘 합금의 화학적 성분을 나타내었고, Fig. 3은 AZ31 시험편의 형상과 치수를 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of AZ31 (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.

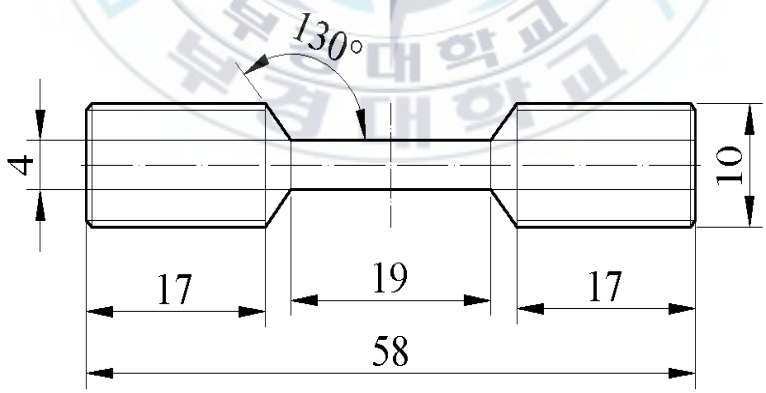
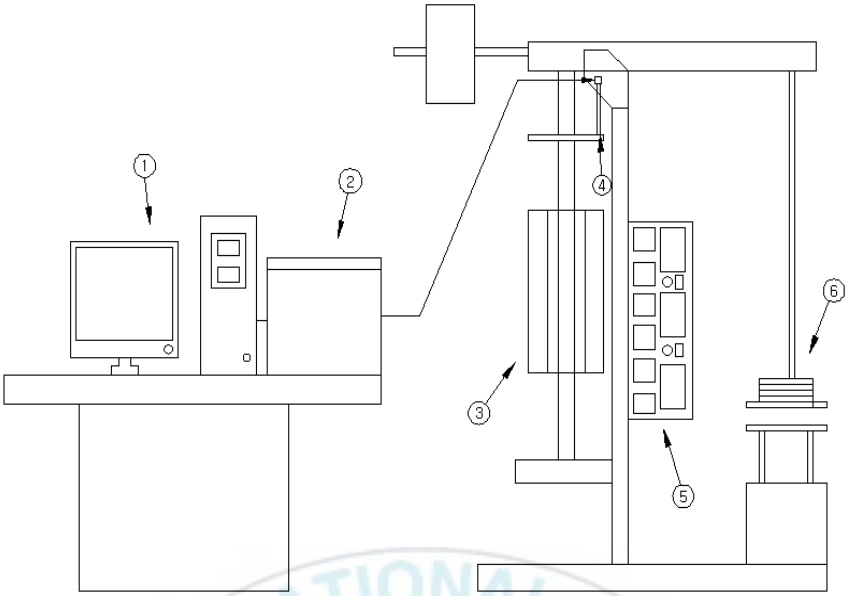


Fig. 3 Creep specimen

3.2 실험 장치

본 실험에서 사용한 크리이프 시험기는 고려전기로에서 제작한 “KF-CT-50” 으로 Fig. 4와 같다. 크리이프시험 장치는 시편을 고정시켜 일정한 하중을 가하는 시험기기와 시험기기에 부착되어 시험편을 가열하는 가열로, 그리고 시험기기로부터 측정된 결과값을 분석, 표현하는 프로세서로 구성되어 있다. 시험기기는 지렛대의 원리로 일정한 거리비를 두고 있는 축을 통해서 시험편에 지속적으로 일정한 하중을 가하게 되는 과정을 거치게 된다. 가열로는 시험편의 상, 중, 하 부분으로 나누어 고르게 가열하며, 열손실을 위해 실험동안 봉하여지게 된다. 마지막으로 결과값을 해석하는 프로세서는 도스 기반의 소프트웨어로 일반적인 크리이프곡선의 형태와 마찬가지로 실시간으로 진행상황을 알 수 있다. 변형량을 측정하는 신장계는 컴퓨터와 직접 연결되어 실험시 화면상에 데이터가 즉시 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.



①computer ②data acquisition board ③furnace

④gauge ⑤control box ⑥load device

Fig. 4 Equipment for creep test units

3.3 실험방법

프로그램 데이터파일 중 하중, 온도, 시편의 각종 정보 등을 입력하고 각 부위의 연결 상태 점검과 센서의 연결 상태를 확인한 후 시편을 시험로에 연결한다. 가장 윗부분인 레벨부분을 봉의 하단 부분의 조정나사를 이용해 수평을 맞춘 다음 컨트롤 박스에서 온도와 시간을 Fig. 5에 따라 화살표 방향으로 조건에 맞게 입력시킨다. 여기서 'LOC는 제어설정, PRG는 프로그램 설정, PTN

은 패턴번호 설정, SEG는 각 부분의 온도 시간 설정'을 나타내고 PTN은 30번까지, SEG는 99번까지 세팅이 가능하다. 세팅 후 실행을 시키고 설정온도까지 온도가 상승되면 하중을 부과하고 컴퓨터 프로그램을 작동시킨다. 작동이 되면 시간과 변위가 나타나고 그래프가 그려진다. 실험을 시작하면 목표치 온도까지 올라가기 전 열팽창으로 인한 약간의 변형이 나타나므로 목표치 온도가 되었을 때 30분간 온도를 유지한 다음 하중을 부과한 다음 실험 데이터를 기록하기 시작한다. 또한 초기 연신률값은 문헌에 의하여 하중이 가해진 후 8분동안의 초기 연신률을 선택하였다. 마스터 크리이프 곡선(master creep curve)을 작성하기 위해서 정크리이프 실험을 실시 하였다.

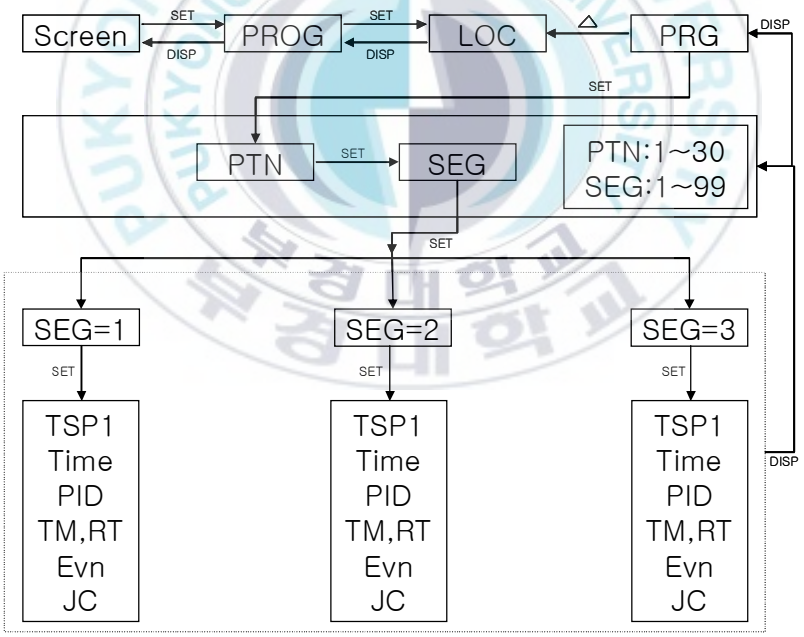


Fig. 5 Flow chart for setting of temperature

제 4 장. 실험 결과 및 고찰

온도조건 150~170℃, 응력조건 109~141MPa 상태 하에서 실험하여 정크리이프 실험에 의한 결과를 시간 증가에 대한 진변형($\varepsilon - \varepsilon_0$)으로 도시한 결과를 Fig. 6~Fig. 8에 나타내었다. 그리고, AZ31 마그네슘합금 시험편에 대한 응력(σ, MPa)과 초기연신률(ε_o (%)), 정상크리이프속도($\dot{\varepsilon}$, s^{-1}), 파단시간(t_r, hr)을 구한 데이터 값은 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Experimental creep data

Temperature (℃)	Stress (MPa)	Initial strain ε_o (%)	creep rate (s^{-1})	Rupture time (hr)
150	109	0.43	3.35×10^{-7}	195.28
	125	0.51	1.55×10^{-6}	50.07
	141	0.59	3.81×10^{-6}	20.73
160	109	0.48	7.51×10^{-7}	85.47
	125	0.56	3.16×10^{-6}	23.83
	141	0.62	7.98×10^{-6}	9.98
170	109	0.51	1.44×10^{-6}	52.07
	125	0.6	6.10×10^{-6}	13.05
	141	0.67	1.48×10^{-5}	5.23

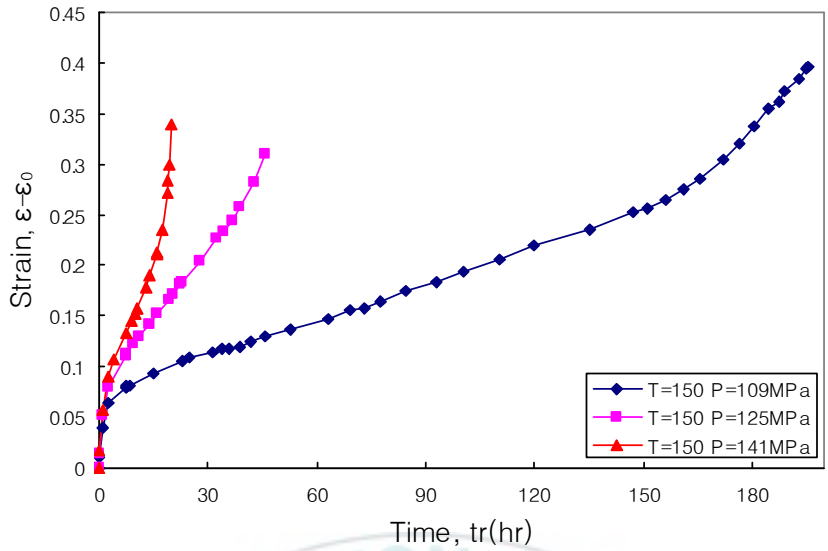


Fig. 6 Creep curves at 150℃

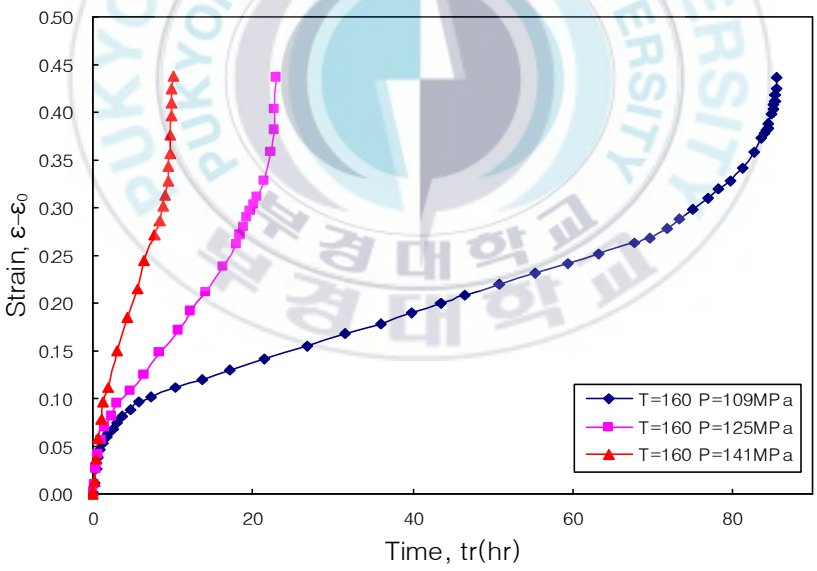


Fig. 7 Creep curves at 160℃

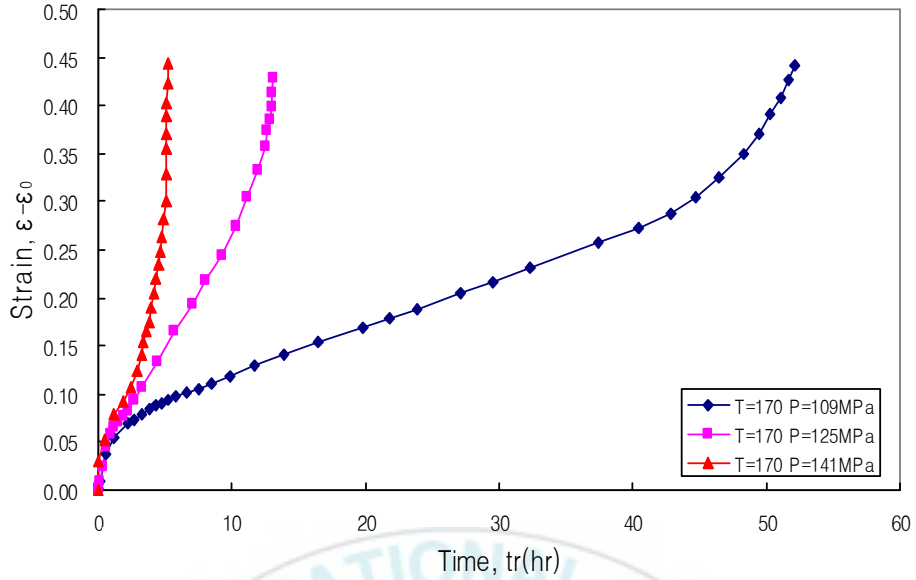


Fig. 8 Creep curves at 170℃

4.1 크리이프 활성화에너지 측정결과

Fig. 9는 응력이 109, 125 및 141MPa, 온도가 150~170℃인 조건하에서의 대수변형률과 온도사이의 관계를 나타낸 것이다. 여기서, 대수 변형률과 온도사이의 관계에서 구한 기울기와 일반 기체상수(R)을 곱하여 150~170℃조건하에서 활성화 에너지를 계산했다. 각 각의 응력에 대해 활성화에너지는 122.9, 118.52 및 114.11kJ/mole로 평균치는 대략 118.51kJ/mole로 나타났다. 또한, Al원소가 Mg기저 안에서 확산활 때의 활성화 에너지 값은 143kJ/mol로 알려져 있다.[15] 본 연구에서 실험한 150~170℃인 조건은

Sherby와 Burke의 연구에 의해 $T<0.4T_m$의 조건이므로 전위교차에 의해 변형이 주도된다고 예상할 수 있다.

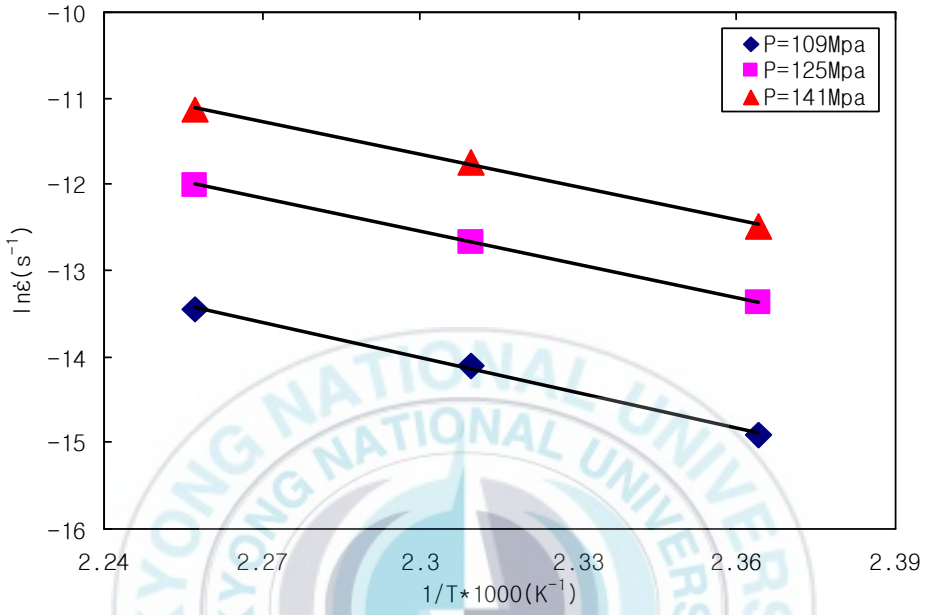


Fig. 9 Creep rate vs. the inverse of temperature for AZ31 magnesium alloy

4.2 크리이프 속도의 응력 의존성 측정결과

Fig. 10은 온도 150~170℃에서 크리이프 속도와 응력과의 관계를 나타낸 것이다. 여기서, 응력지수의 값을 구하기 위해서 식 (9)를 이용했다. 온도가 150~170℃, 응력이 11.14~14.32kg_f/mm^2인 조건에서의 응력지수값은 각각

9.97, 9.71, 9.55으로 약 9.63으로 나타났다. 응력지수 값은 대수변형률과 대수 응력의 그래프에서 직선의 기울기로 표시되고, 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향이 나타났다.

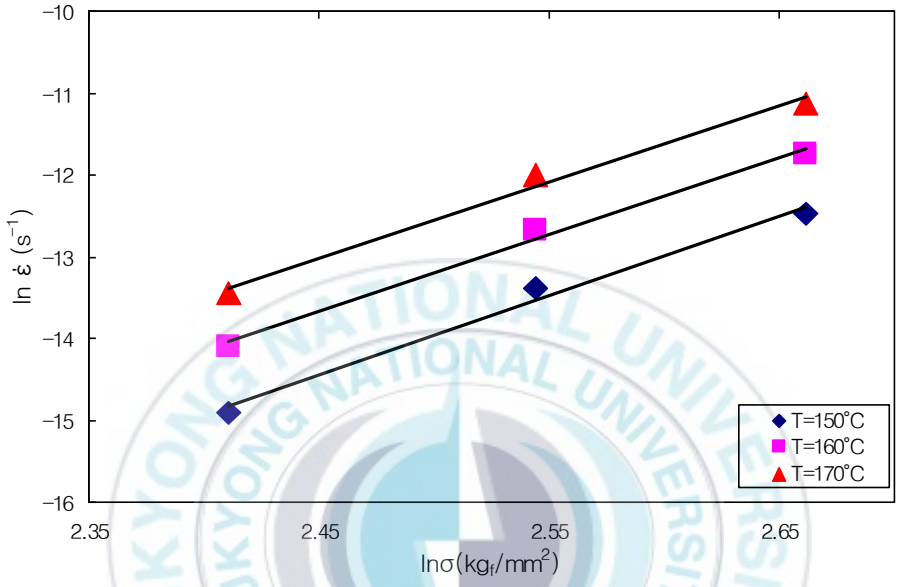


Fig. 10 Stress-dependent of creep rate under 150~170℃

Sherby와 Burke의 연구에 의해서 크리이프의 변형기구를 설명 할 수 있다. 크리이프 속도와 부과응력의 관계는 Fig. 11에서 보는 바와 같이 3개의 구간이 있다. 즉 Ⅰ영역과 Ⅱ영역은 변형속도가 응력의 n승에 비례하는 식으로 표시되는 크리이프 변형, 즉 “power law of creep”이라 한다. 다시 말하면, 제Ⅰ영역에서는 $0.8T_m$ 이상으로 확산이 주로 변형을 주도하고 응력지수 n값은

1이 된다. 제 Ⅱ영역에서는 온도가 $0.5T_m$이상으로 전위활주와 전위상승이 변형을 지배하며 응력지수 n값은 각각 3, 5가 된다. 또한 Ⅲ영역은 크리이프 변형속도가 응력의 지수함수에 비례하여 증가함을 알 수있고 실험적으로 Ⅲ영역이 발생하는 것은 낮은 온도에서 높은 응력을 작용하는 경우이다. 그리고, 제Ⅰ영역은 Nabarro[16]와 Herring[17]에 의해서 제안된 확산크리이프 이론에서변형률 속도의 응력의존성은 동일하고 응력에 일차적으로 비례하는 것, 즉 n=1이 됨을 알 수있다. 제Ⅱ영역은 Weertman, Barrett와 Nix, Lagneborg 등이 제안한 전위상승 이론에서 정상 크리이프 속도는 응력의 4~5승에 비례하고 Weertman과 Friedel의 전위 활주모델에 의하면 정상 크리이프 속도는 응력의 3승에 비례한다. 이러한 이론에 의해서 멱 함수식은 식 (13)과 같다.

$$\dot{\varepsilon}_s = A\sigma^n \quad \cdots\cdots (13)$$

제 Ⅲ영역에서 고 응력일 때 응력과 변형률 속도관계는 지수 함수적 관계이다. 고 응력에서는 교차 슬립 과정에 의해 공공(vacancy)이 과다하게 발생하여 전위 상승과정을 도와 결과적으로 크리이프 변형이 쉽게 일어날 수 있다. 그리고, 저 응력일 때 공공이 과다하게 발생하지 않고 열적 평형공공들이 상승 과정을 지배한다고 가정하면 Barret와 Nix의 전위 조그 크리이프 이론에서 전위는 항상 공공의 소우스(source) 또는 싱크(sink)로서 작용하고 있다. 공공을 방출하는 전위에서의 농도는 식 (14)와 같다.

$$C = C_o \exp(-Nob^2 / KT) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (14)$$

크리이프 속도는 공공의 농도구배에 비례하고 다음과 같이 식 (15), (16)으로 표시된다.

$$\dot{\varepsilon} = KC_o\left(\exp(-Nob^2 / KT) - \exp(-NOb^3 / KT)\right) \quad \cdots\cdots \quad (15)$$

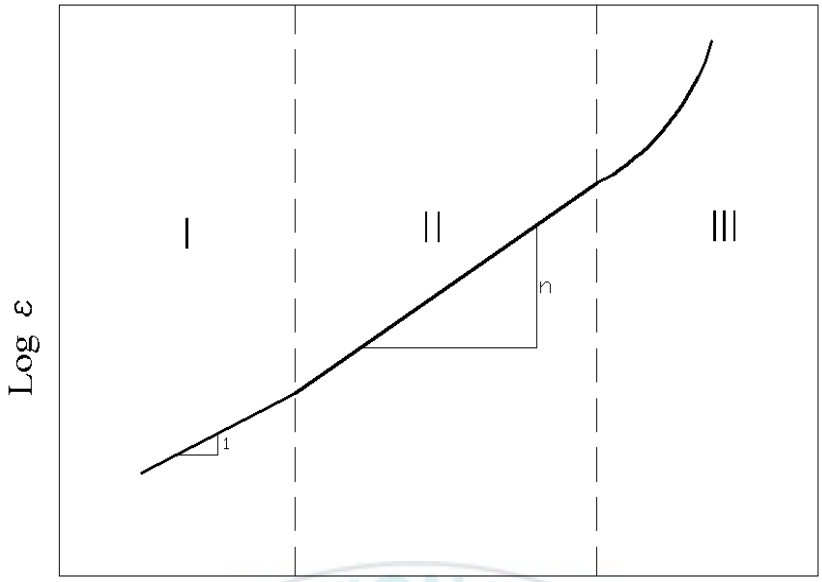
$$\dot{\varepsilon} = K'\sinh(Nob^3 / KT) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (16)$$

온도가 비교적 낮고 응력이 커지면 식 (17)로 나타낼 수 있다.

$$\dot{\varepsilon} = K'\exp(\beta\sigma) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (17)$$

식 (17)은 Sherby 와 Burke의 이론에 의해 제 Ⅲ영역에 해당한다.

본 실험결과에서 Fig. 10을 보면 150~170℃에서는 측정된 응력지수 값은 다소 높게 측정되었고, 그에 대한 멱 함수법칙을 잘 만족한다.



Ⅰ : T>0.8 T_m: Stress directed diffusion

Ⅱ: T≥0.5 T_m: Dislocation climb

$\dot{\varepsilon} = A\sigma^n$

n=5, $Q_C = Q_{sd}$

Dislocation glide

n=3, $Q_C < Q_{sd}$

Ⅲ: T<0.4 T_m: Dislocation intersection:

$\dot{\varepsilon} = A'\exp(\beta\sigma)$ $Qc \ll Q_{sd}$

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

4.3 AZ31 마그네슘 합금의 ISM에 의한 크리이프 수명예측

4.3.1 크리이프 응력과 정상 크리이프 속도와의 상관성

Fig. 12는 150~170℃ 온도에서 크리이프 응력과 정상 크리이프 속도와의 상관성을 나타내며, 서로 선형적으로 증가한다. 본 연구의 실험을 통해서 얻어진 정상 크리이프 속도예측식 ($\dot{\varepsilon}-\sigma$)은 Table 3과 같다.

Table3 Relationship expression of creep stress vs steady state creep rate

Temperature(℃)	Predicted equation
150	$\log\sigma$=0.1041log $\dot{\varepsilon}$+ 2.7
160	$\log\sigma$=0.107log $\dot{\varepsilon}$+ 2.69
170	$\log\sigma$=0.109log $\dot{\varepsilon}$+ 2.67

Table 3은 각각의 온도에서 구한 정상 크리이프 속도식으로 부터 다음과 같이 모델화할 수 있다. 이는 Norton[18]에 의해 제안된 모델식과 일치 한다.

$$\dot{\varepsilon} = m\sigma^n \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (18)$$

여기서, m, n은 재료와 온도의 함수이다.

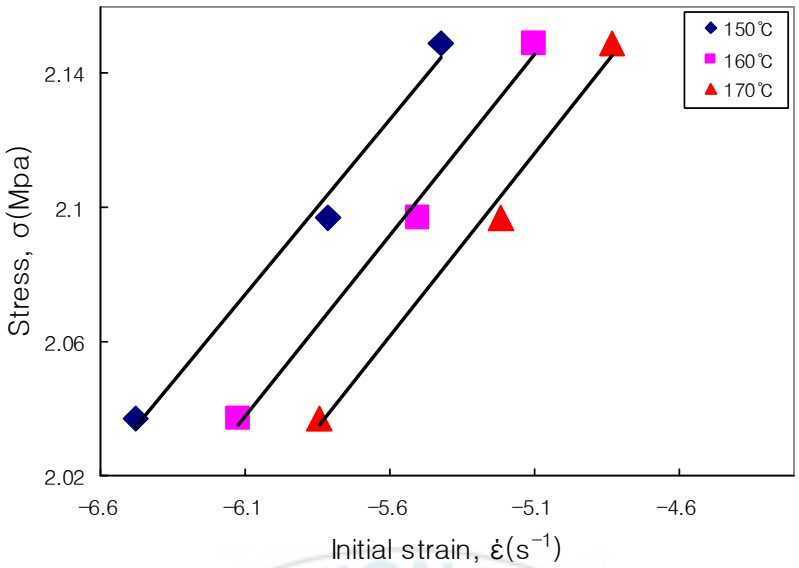


Fig. 12 Relationship of creep stress versus steady state creep rate for AZ31 at 150, 160, 170℃

4.3.2 크리이프 응력과 초기 연신률과의 상관성

Fig. 13은 150~170℃ 온도에서 크리이프 응력과 초기연신률과의 상관성을 나타내며, 서로 선형적으로 증가한다. 그림에서 초기 연신율은 응력이 높아질수록 증가하고, 온도가 상승할수록 그 증가율도 더욱 커짐을 알 수 있다. 실험식은 다음과 같다.

Table4 Relationship expression of creep stress versus initial strain

Temperature(℃)	Predicted equation
150	$\log\sigma = 0.81\log\varepsilon_0 + 2.3$
160	$\log\sigma = 0.89\log\varepsilon_0 + 2.3$
170	$\log\sigma = 0.93\log\varepsilon_0 + 2.3$

Table 4에 있는 식에서 초기 연신률은 크리이프 응력과 선형적으로 정량적 상관성이 존재함을 알 수 있고, 그 일반식은 다음과 같이 모델화 시킬수 있다.

$$\sigma = A\varepsilon_0^{\ B} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (19)$$

여기서, A, B는 재료, 온도의 함수이고, 식 (19)는 식 (12)와 유사함을 알 수 있다.

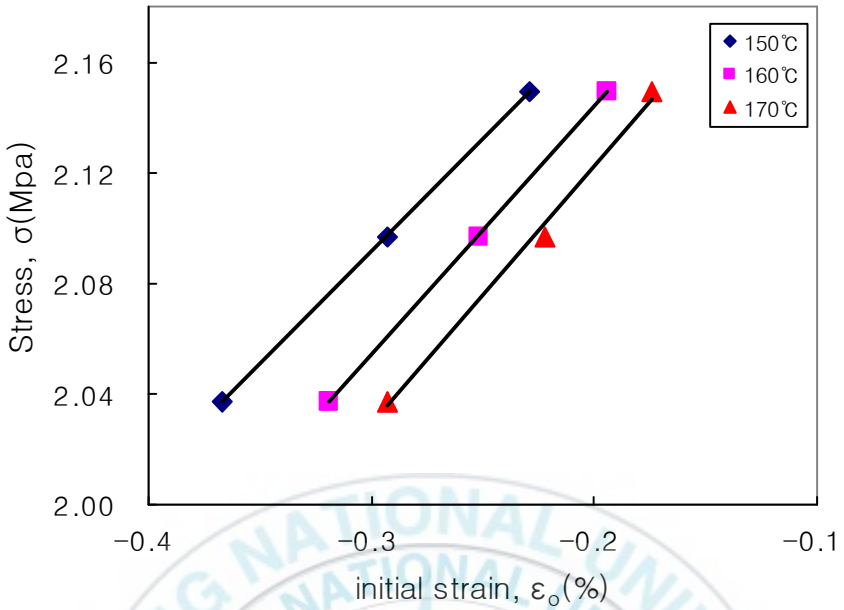


Fig. 13 Relationship of creep stress versus initial strain for AZ31 at 150, 160, 170℃

4.3.3 크리이프 수명과 초기 연신률과의 상관성

Fig. 14는 150~170℃에서의 크리이프 수명과 초기 연신률과의 상관성을 나타낸 것이다. 좌표평면상에서 AZ31은 2차 함수적 관계를 보이고, 그에 대한 실험식은 다음과 같다.

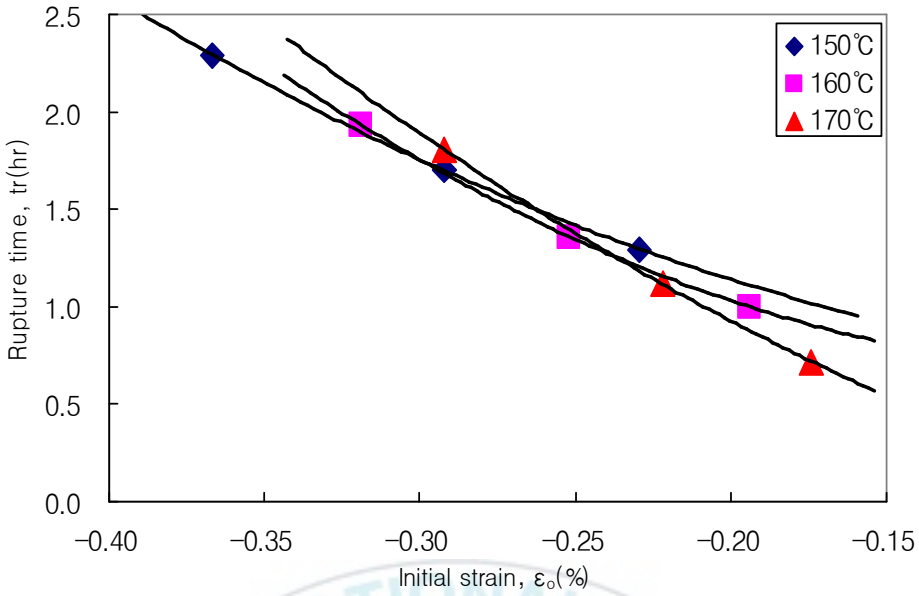


Fig. 14 Relationship of creep life versus initial strain for AZ31 at 150, 160, 170℃

Table 5 Relationship expression of creep life versus initial strain

Temperature(℃)	Predicted equation
150	$\log tr = 11.5(\log \varepsilon_o)^2 + 0.36\log \varepsilon_o + 0.6$
160	$\log tr = 18.9(\log \varepsilon_o)^2 + 2.2\log \varepsilon_o + 0.7$
170	$\log tr = 12.7(\log \varepsilon_o)^2 - 3.24\log \varepsilon_o - 0.23$

Table 5 에서 초기연신률은 본 실험의 범위에서 크리이프 수명과 상관성이 존재함을 알 수있고, Table 5에 대한 식들은 $\log t_r - \log \varepsilon_o$가 2차함수적 관계식이므로 다음과 같이 모델화 시킬 수 있다.

$$\log t_r = \log A + B\log \varepsilon_0 + C(\log \varepsilon_0)^2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (20)$$

$$\text{즉, } t_r = A\varepsilon_o^{\,B+C\log \varepsilon_o} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (21)$$

여기서, A, B, C는 재료와 온도의 함수이다. 식 (21)은 식 (11)과 유사하다.

4.3.4 LMP-ISM에 의한 고온 크리이프 수명예측식 도출

ISM에 의한 크리이프 수명예측식과 LMP법을 이용한 크리이프 파단수명식을 접목시켜서 서로 연립하여 구한 식을 LMP-ISM 크리이프 수명 예측식이라 하여 다음과 같이 도출하였다.

$$LMP = T(\log t_r + C_1) = K_2 \log \sigma + K_3 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (22)$$

여기서, K_2, K_3는 각각의 온도에 대한 재료정수이고, T는 절대온도(K), 내열강의 경우 C_1=21이다.

ISM에 의한 파단수명식은 Table 5에서 다음과 같은 일반식으로 나타낼 수 있다.

$$\log t_r = \log A + B\log \varepsilon_0 + C(\log \varepsilon_0)^2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (23)$$

여기서, A, B, C는 온도항이 있는 재료상수이다.

식 (22)과 식 (23)에서 LMP-ISM 크리이프 수명 예측식은 다음과 같다.

$$2\log t_r = \frac{K_2 \log \sigma + K_3}{T} + \log A + B\log \varepsilon_0 + C(\log \varepsilon_0)^2 - 21 \quad \cdots\cdots \quad (24)$$

식 (24)는 온도, 응력, 수명, 초기연신률이 포함된 LMP-ISM에 의한 크리이프 수명 예측식의 일반식이다. 식 (24)의 재료 정수인 K_2, K_3는 다음과 같이 구하였다. Fig. 15는 150, 160, 170℃에서 AZ31 마그네슘 합금의 응력과 LMP와의 관계를 나타내고 있고, 그에 대한 관계식은 식 (25)와 같다.

$$LMP = -4461\log \sigma + 19049 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (25)$$

여기서, K_2=-4461, K_3=19049 이다.

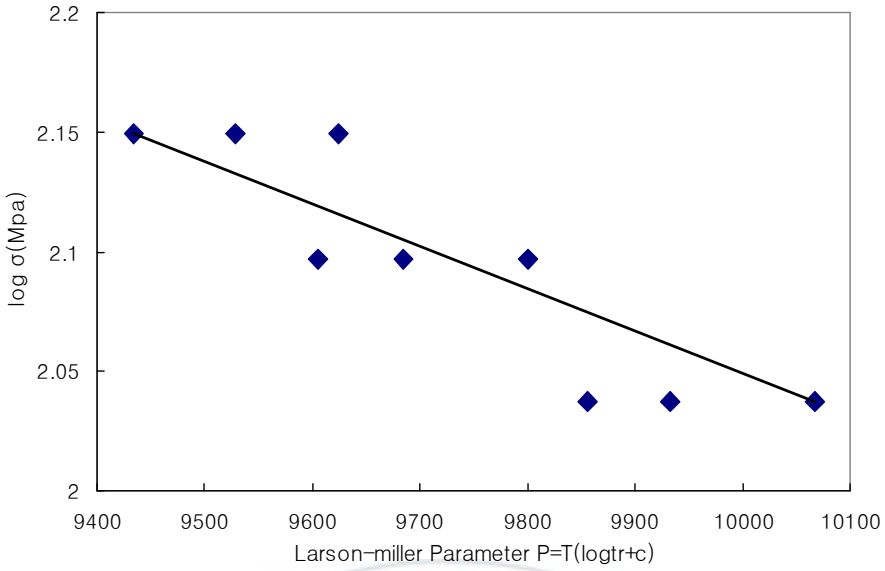


Fig. 15 Relationship between Larson-Miller parameter and stress

따라서, 본 실험을 통하여 초기연신율을 측정함으로써 크리이프 파단수명을 구하는 LMP-ISM에 의한 크리이프 파단수명예측식을 구하였고, 그에 대한 관계식은 다음과 같이 도출되었다.

$$2\log t_r = \frac{K_2 \log\sigma + K_3}{T} + \log A + B\log\varepsilon_0 + C(\log\varepsilon_0)^2 - 21 \cdots\cdots (26)$$

여기서, logA=-0.0053T^2+ 4.54828T-975,

B=-0.0405T^2+ 34.91492T-7522.75,

C=-0.0679T^2+ 58.8871T-12748.49로 나타내어진다.

4.3.5 ISM에 의한 단시간 크리이프 수명예측식 도출

식 (19)를 σ=A$'\varepsilon_o{}^{B'}$로 표현하면, A'와 B'는 온도항이 포함되어 있는 재료상수로서 그 값은 Fig. 13에서 다음과 같이 구해 진다.

$$\log\sigma = B'\log\varepsilon_0 + \log A' \quad \cdots\cdots (27)$$

여기서, logA'=$-0.048\times10^{-3}T^2+0.04089T-6.449$,

B'=$-0.02\times10^{-2}T^2+0.1792T-39.206$로 나타내어진다.

초기 연신율과 응력과의 관계식 $\sigma = A'\varepsilon_0^{B'}$ 와 초기 연신율과 파단시간과의 관계식 $t_r = A\varepsilon_o^{B+C\log\varepsilon_o}$ 에서 온도와 응력과 초기 연신율을 포함하는 크리이프 파단수명예측식은 다음과 같이 도출 할 수 있다.

$$t_r = AA'\varepsilon_0^{B+B'+C\log\varepsilon_o}\sigma^{-1} \quad \cdots\cdots (28)$$

따라서, 식 (28)에서 각각의 응력과 온도하에서 초기 연신율을 측정해서 크리이프 파단수명을 구하는 ISM식은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$t_r = \alpha\varepsilon_o^{\beta}\sigma^{-1} \quad \cdots\cdots (29)$$

여기서, α와 β는 온도에 따라 결정되는 재료정수로서 그 값은 다음과 같다.

즉, $\alpha = AA' = 10^{-5.348\times10^{-3}T^2+4.58917T-981.449}$,

$\beta = B + B' + C\log\varepsilon_o$

$= -0.0407T^2 + 35.0941T - 7561.956 + (-0.0679T^2 + 58.8871T - 12748.49)\log\varepsilon_o$

가 된다.

Table 6은 150, 160, 170℃에서 각 응력에 따라 LMP식, LMP-ISM식, ISM식에 의한 크리이프 수명(파단시간)과 실제 실험치들에 관한 데이터를 초기 연신률의 값과 함께 나타낸 것이다.

Fig. 16에서는 크리이프응력과 크리이프 파단수명과의 크리이프 파단곡선에 관하여 LMP법에 의한 식 (22)와 LMP-ISM에 의한 식 (26)과 ISM에 의한 식 (29)를 비교하여 나타내고 있다. LMP법이나 LMP-ISM 모두는 ISM에 의한 것보다 파단수명이 실제보다 크게 나타나지만, ISM에 의한 데이터는 거의 실험치와 일치하므로 LMP법이나 LMP-ISM에 의한 식보다 ISM에 의한 식이 신뢰성이 높은 것으로 확인되었다.

Fig. 17은 실제 파단시간과 식 (29)인 ISM법 파단수명 예측식과의 관계를 나타낸 것으로 거의 서로 일치함을 알 수 있으므로, 초기 연신률을 고려한 크리이프 파단수명 예측식으로서 신뢰성이 높다고 생각된다

Table 6 Data of creep life prediction

Temperature T(℃)	Stress σ(MPa)	Initial strain ε_o (%)	Creep life by			
			LMP t_r (hr)	LMP-ISM t_r (hr)	ISM t_r (hr)	Experiment t_r (hr)
150	109	0.43	351.72	256.93	157.78	195.28
	125	0.51	82.96	63.47	40.87	50.07
	141	0.59	23.29	21.18	16.17	19.73
160	109	0.48	100.55	98.57	83.36	85.47
	125	0.56	24.52	24.7	21.46	22.83
	141	0.64	7.09	8.65	9.1	9.98
170	109	0.51	30.42	50.07	72.93	52.07
	125	0.6	7.66	11.56	13.85	13.05
	141	0.67	2.28	3.71	5.18	5.23

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

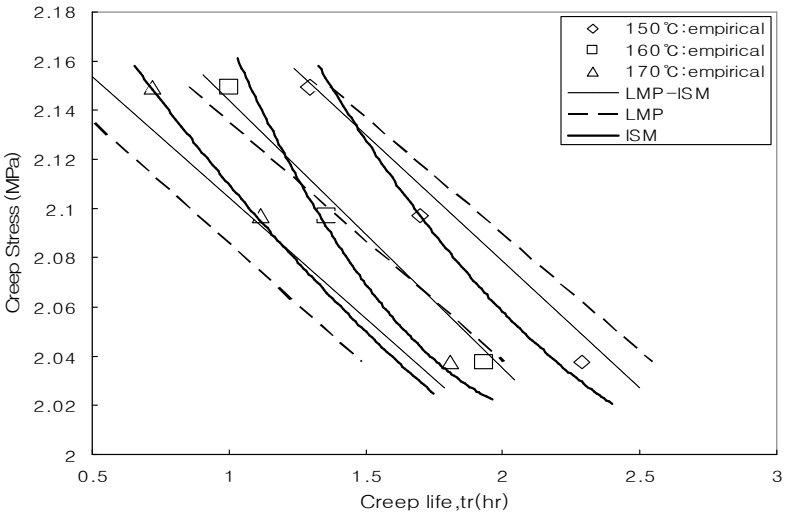


Fig. 16 Comparison of creep curves for AZ31 magnesium alloy with ISM, LMP-ISM and empirical data at 150,160 and 170℃

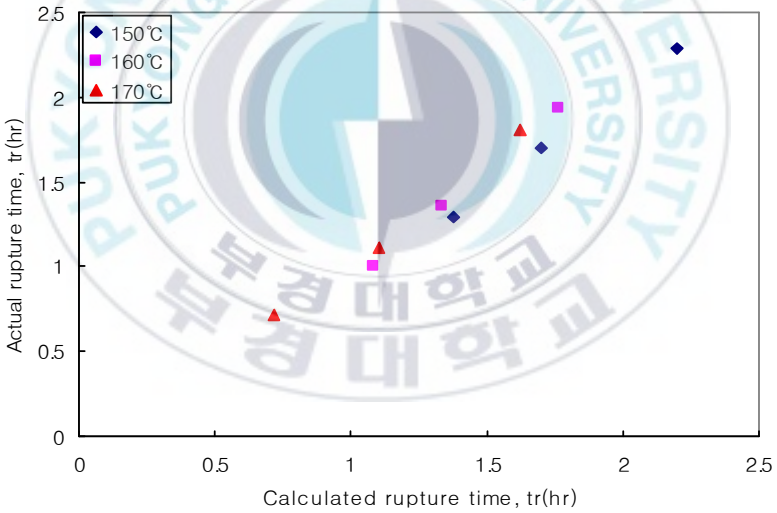


Fig. 17 Comparison of actual rupture time and calculated rupture time for AZ31 magnesium alloy by ISM at 150, 160 and 170℃

4.4 SEM을 이용한 미세조직 관찰 결과

본 실험에서는 HITACHI에서 제작한 “S-2700”인 SEM(Scanning Electron Microscopes, 주사전자현미경)을 이용하여 실험 시편의 파단면의 미세조직을 관찰했다. Fig. 18~23은 온도변화에 따른 파단면을 보여주고 있다.

Fig. 18~20은 응력 109MPa, 온도 150~170℃에서 파단면의 형태는 연성파괴와 백계파괴가 혼재하는 양상을 보이고 있다. 그에 따라 파단면에 균열이 보이고 있으며 온도의 변화에 따라 기공에 의한 파괴가 뚜렷함을 볼 수 있다.

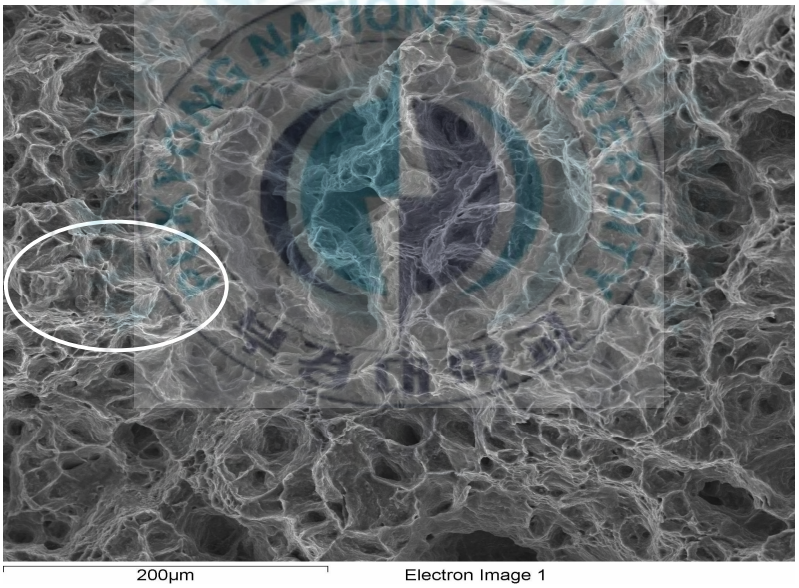


Fig. 18 SEM of AZ31 alloy at 150℃ and 109MPa

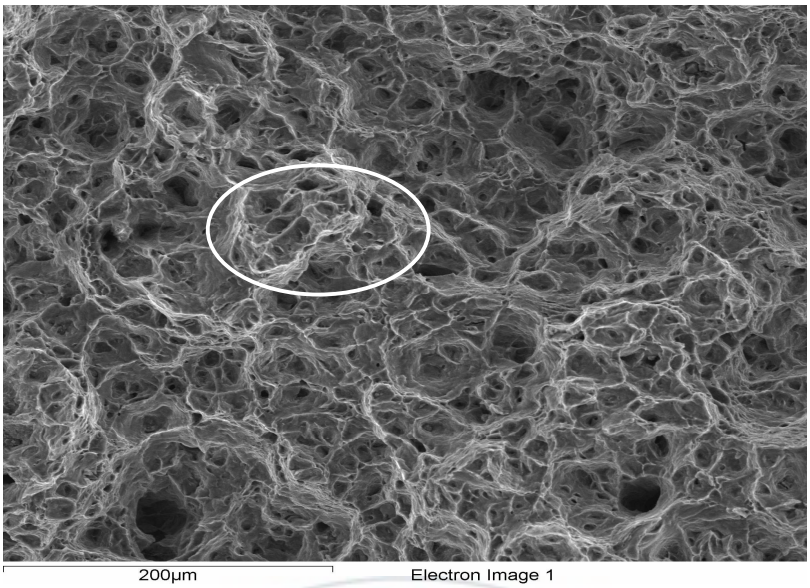


Fig. 19 SEM of AZ31 alloy at 160℃ and 109MPa

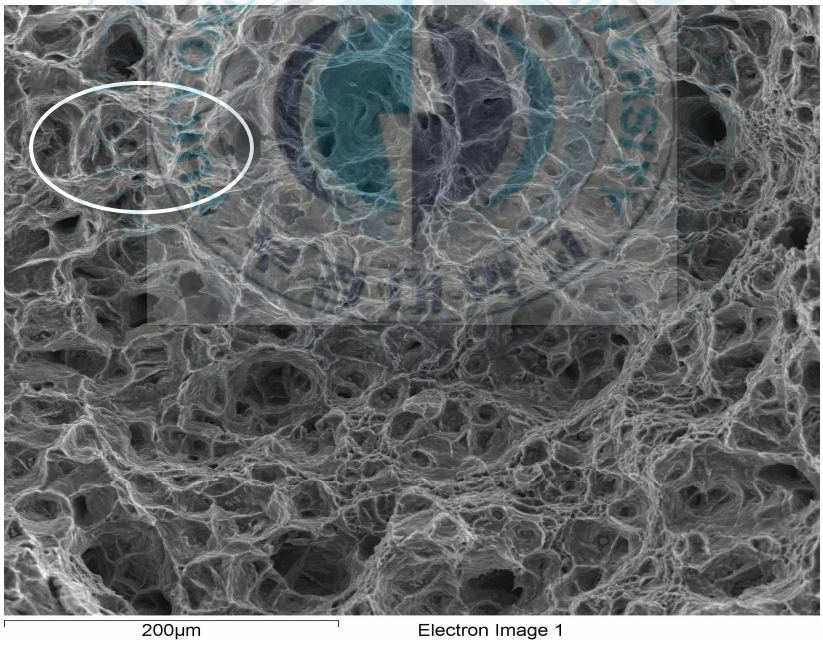


Fig. 20 SEM of AZ31 alloy at 170℃ and 109MPa

Fig. 21~23은 응력 125MPa, 온도 150~170℃에서 파단면의 형태는 응력 109MPa에서 보다 백계파괴에 의한 파면이 많아짐을 뚜렷하게 관찰 할 수 있다. 이러한 원인은 응력이 증가함에 따라 파단면의 인성이 약해지면서 백계파면이 많이 생기는 것을 알수 있다.

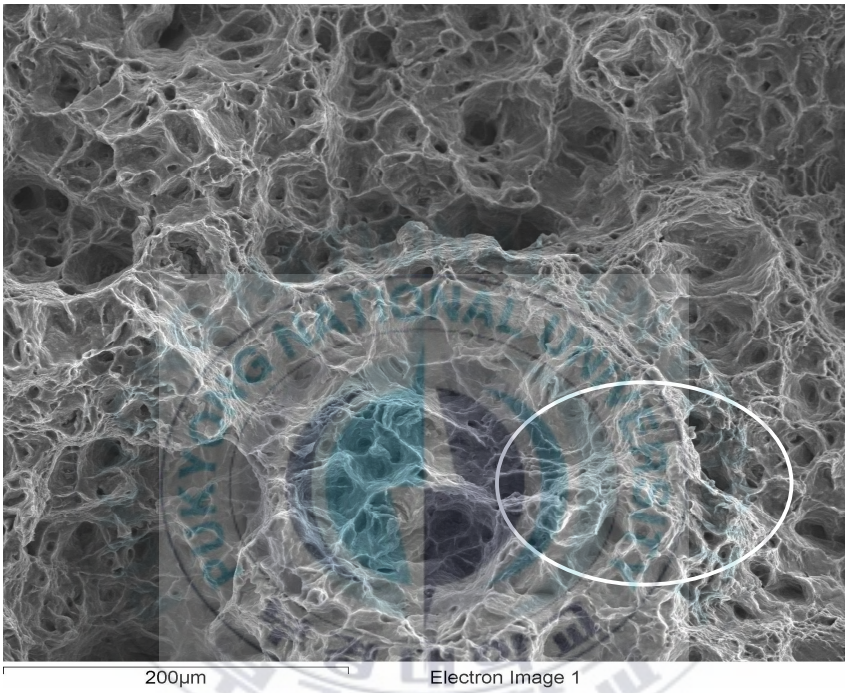


Fig. 21 SEM of AZ31 alloy at 150℃ and 125MPa

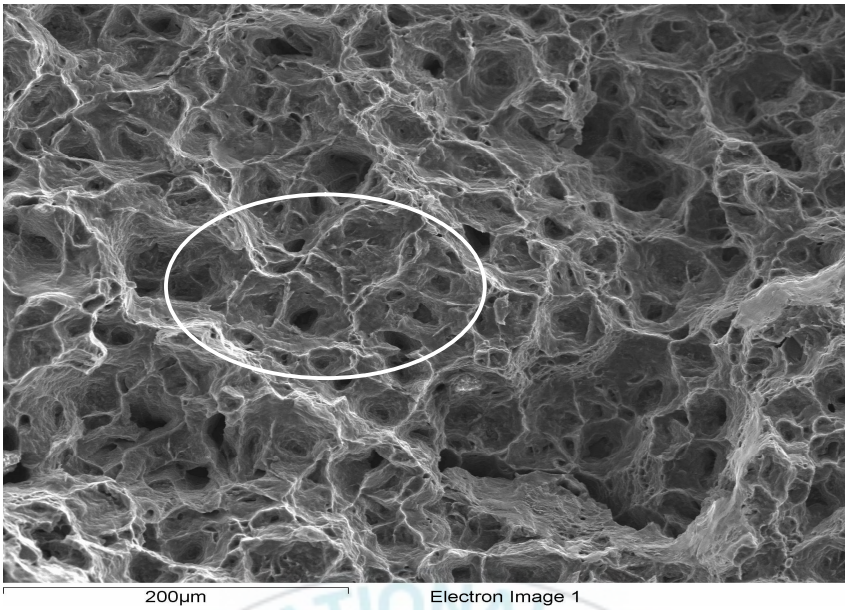


Fig. 22 SEM of AZ31 alloy at 160℃ and 125MPa

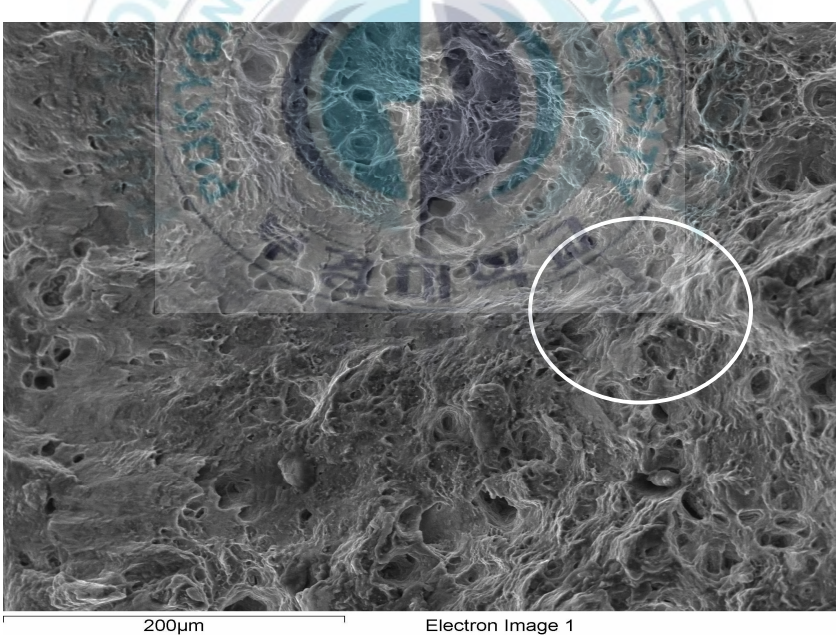


Fig. 23 SEM of AZ31 alloy at 170℃ and 125MPa

5. 결 론

본 연구는 AZ31 마그네슘 합금의 크리이프 특성에 관한 것으로 크리이프 활성화에너지와 크리이프 변형속도의 온도의존성 및 응력의존성을 평가하였으며, ISM(initial strain method)에 의한 단시간 크리이프 수명 예측을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 온도조건 150~170℃의 응력조건 109~141MPa인 경우의 크리이프 변형속도의 온도 의존성을 나타내는 응력지수값은 대략 9.63으로 나타났고 측정된 크리이프 활성화 에너지는 대략 118.51kJ/mole로 나타났다. 위 결과로 보아 온도조건 150~170℃, 응력조건 109~141MPa인 조건에서의 변형기구는 전위교차에 기인한 것으로 추측된다.

(2) 크리이프 수명은 초기 연신률이 증가할수록 감소하고, 크리이프 수명과 초기 연신률과의 상관성에서 좌표평면상 AZ31 마그네슘 합금은 2 차 함수적 관계가 있다. AZ31 마그네슘 합금의 ISM 에 의한 크리이프 수명 예측식은 다음과 같이 도출되었고, 타 예측식인 LMP, LMP-ISM 에 의한 수명식보다 더욱 신뢰성이 높음이 확인 되었다.

$$t_r = \alpha \varepsilon_o^{\beta} \sigma^{-1}$$

여기서,

$$\alpha = AA' = 10^{-5.348\times10^{-3}T^2+4.58917T-981.449}$$

$$\beta = B + B' + C\log\varepsilon_o$$

$$= -0.0407T^2 + 35.0941T - 7561.956 + (-0.0679T^2 + 58.8871T - 12748.49)\log\varepsilon_o$$

(3) 파면의 형태는 연성파괴와 백계파괴에 의한 균열을 보이고 있으며, 온도가 높을수록, 응력이 증가할수록 파면의 균열을 뚜렷하게 나타남을 볼 수 있었다.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

참고문헌

1) Oh, S. K., (1983), “Study on Strength Analysis of Friction Welded Joints and In-Process Monitoring of the Welding Using AE Technique”, Ph.D. Thesis, Keio University, Japan, pp. 119-146.

2) 오세규, (1989), “국산 내열강의 마찰용접 최적화와 장시간 고온 크리프 수명의 초기실시간 예측법개발”, 학술진흥재단 지원 연구결과 보고서(87-89), pp. 11-153.

3) 이원석, (1997), “ISM에 의한 SUH3과 SUH35 마찰용접재의 고온 크리이프 수명예측과 AE 평가에 관한 연구”, 부경대학교 대학원 공학석사 학위논문, pp. 18-51.

4) 이향동, (1997), “로켓 모터 노즐재의 마찰용접재에 대한 ISM에 의한 고온 Creep 수명예측과 AE 평가에 관한 연구”, 부경대학교 대학원 공학석사 학위논문, pp. 17-40.

5) Oh, Sae-Kyoo, Hong-Keun Chang, Min-Hwa Chung and Sang-Guk Lee, (1997), “Development of Long-Time Creep Safety Life Prediction of Steam Turbine Rotor Steel and AE Evaluation,” Proc. The 7th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE, Vol. 4-S19, pp. 21-28.

6) Larson, F. R. and Miller, J., (1957), “A Time Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses,” Transaction of the ASME, pp. 765-775.

7) O. D. Sherby, J. L. Lytton, and J. E., Dorn: Acta. Met. Vol. 5, pp. 219-227.

8) H. I. Huang, O. D. Sherby, and J. E. Dorn, (1956): Trans. AIME, J. of Metals, pp. 1385-1388.

9) F. Garofalo, (1963), Trans. AIME, Vol. 227, pp.351-356.

10) A. Seeger, (1954), Phil. Mag., Vol. 45, pp. 771-773.

11) J. Breen and J. Weertmann, (1955), Trans. AIME, Vol. 203, pp. 1230-1234.

12) Dieter, George E., (1986), Creep, Stress-Rupture, and Stress-Relaxation Testing, in: Metals Handbook(ninth Edition), Mechanical Testing(Vol. 8), pp. 432-470.

13) Oh, S. K., T. Kunio, and A. Hasui, (1986), “Effect of Initial Strain on Evaluation of High Temperature Creep Properties of Friction Welded Joints,” Proc. Of Asian-Pacific Congress on Materials Strength Evaluation-86, pp. 549-554.

14) Oh, Sae-Kyoo, Seon-Jin Kim and Tae-Eun Jeon, (1996), "Development of Long-Time Creep Safety Life Prediction of Steam Turbine Rotor Steel and AE Evaluation(1st Report)-Possibility of Creep Prediction by Initial Strain Method," Proceedings of 6th(1996) International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE, Los Angels, pp. 275-279.

15) S. S. Valgarali and T. G. Langdon, (1982), Acta Metal., Vol. 30, pp. 115

16) Miller, A., 1976, "An Inelastic Constitutive Model for Monotonic, Cyclic and Creep Deformation; Part-I Equations Development and Analytical Procedure," ASME J. of Engineering Materials and Technology, Vol. 98, pp. 97-105.

17) Fred, A. D., Raj, A. V. and Walker, K. P, (1992), "Stress Versus Temperature Dependence of Activation Energies for Creep," ASME J. of Engineering Materials and Technology, Vol. 114, pp. 46-50.

18) Norton. F. H. (1910), "The Creep of Steel at High Temperatures", McGraw Hill, New York, pp. 67.

감사의 글

부족한 제가 한 편의 논문을 제출할 수 있도록 끊임없는 지도를 아끼지 않으신 강대민 지도교수님께 진심으로 감사 드리며, 본 논문을 심사하여 주신 구양 교수님, 곽재섭 교수님 그리고 과내 여러 교수님들께 감사드립니다.

대학원 생활에서 많은 충고와 도움을 준 박사과정 정오형에게도 감사하게 생각합니다. 그리고, 조금의 도움도 제대로 주지 못하면서 함께 부딪히고 지낸 실험실 후배들 여웅, 지영, 경도, 현철, 길성, 성만에게 특히 미안함을 감추지 못하겠습니다. 제가 대학원 생활을 즐겁게 할 수 있도록 격려 해 준 사랑하는 가족들에게도 고마움을 전합니다.

오늘이 있기까지 끊임없는 교육열과 사랑으로 항상 저의 뒷바라지를 해주신 부모님의 은혜에 무엇보다도 감사드리며, 이 모든 영광을 돌리고 싶습니다. 그리고, 부족한 나에게 많은 이해와 사랑을 준 사랑하는 진희와 이 기쁨을 같이하고 싶습니다.

2008년 2월

전 성 호 드림