



# Mg-Zn-Y 합금의 크리프 저항성에 미치는 칼슘의 영향

이윤희 · 임현규 · 김도형 · 김도향<sup>†\*</sup>

준결정재료 연구단/연세대학교 금속시스템공학과

## Effect of calcium addition on creep properties in Mg-Zn-Y alloys

Yoon-Hee Lee, Hyun-Kyu Lim, Do-Hyung Kim, and Do-Hyang Kim<sup>†\*</sup>

Center for Non-crystalline Materials / Dept. of Metallurgical Eng., Yonsei University Seoul 120-749, Korea

### Abstract

In the present study, the high temperature mechanical properties and creep resistance of Mg-Zn-Y-Ca alloys has been investigated. The Mg-4Zn-0.8Y alloy consists of  $\alpha$ -Mg matrix and icosahedral quasicrystalline phase. Calcium addition into Mg-4n-0.8Y based alloy results in the formation of  $\tau$ (Ca<sub>2</sub>Mg<sub>6</sub>Zn<sub>3</sub>) and Mg<sub>2</sub>Ca as the second solidification phases. Creep properties of the Mg-Zn-Y and Mg-Zn-Ca based alloys measured at applied stresses between 65 MPa and 85 MPa are significantly improved with adding calcium and yttrium, respectively. The improved creep resistance is due to the formation of thermally stable Mg<sub>2</sub>Ca phase.

**Key words :** Magnesium, Mg-Zn-Y, Interdendritic phase, Creep, n-value

(Received August 17, 2007 ; Accepted September 18, 2007)

### 1. 서 론

마그네슘 합금은 상용구조 재료 중에서 가장 낮은 비중을 가지고 있어 환경 보전과 에너지 절감에 대한 사회적 관심이 높아짐에 따라 그 연구가 활발히 진행되고 있다[1]. 특히 높은 비강도 및 내진성, 내충격성 등의 많은 장점으로 인하여 자동차, 항공기 등의 수송 수단, 방위 산업 및 일반 기계 등의 무게 절감을 위한 경량화 소재로서 요구되는 여러 가지 우수한 특성을 지니고 있다. 그러므로 마그네슘 합금은 그 적용범위가 더욱 더 커지고 수요도 급증하고 있다[2]. 하지만 자동차, 항공기 등 운송수단의 경량화를 목적으로 사용 되는 마그네슘합금은 낮은 내열성으로 인하여 사용에 많은 제약을 가지고 있다.

현재 상용합금으로 널리 사용되는 AZ91, AM50, AM60 등의 마그네슘 합금은 약 120°C 이상의 온도에서 Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 상이 열적으로 취약하여 자동차용 부품 중에서 고온에서 사용되는 동력전달 및 엔진 주변 부품소재로서의 적용이 어렵다[3,4]. 또한 기존의 대표적인 내열 마그네슘 합금은 WE, AE, AJ 시리즈[5] 등이 있으나 모두 고가의 원소를 다량 포함하기 때문에 높은 비용으로 인하여 산업에 일반적으로 적용하기 어렵다는 약점을 가지고 있다. 따라서 새로운 내열 합금의 개발이 요구되고 있는 실정이다.

최근, 열적으로 안정한 준결정상을 포함하는 Mg-rich 영역의 Mg-Zn-Y 삼원계 합금이 상온에서 높은 항복 강도 및 우수한 연신을 가진다고 보고되어 있다[6]. 따라서 본 연구에서는: 1) Mg-Zn-Y 삼원계 합금에 내열성을 향상 시키기 위하여 마그네

슘 합금에 첨가 되었을 때 결정립 미세화의 역할을 하고[7], 마그네슘과 결합하여 안정한 금속간 화합물인 Mg<sub>2</sub>Ca 상을 형성[8]한다고 알려져 있는 칼슘을 첨가하여 고온 크리프 저항성을 높이고자 하였다; 2)또한 Mg-Zn-Y 삼원계 합금에 칼슘을 첨가하였을 때 형성되는  $\tau$  (Ca<sub>2</sub>Mg<sub>6</sub>Zn<sub>3</sub>) 상의 형성 및 역할을 규명하기 위해서 Mg-Zn-Ca 삼원계 합금에서 상 분석 후 이트륨을 첨가하는 실험추가 등 두 가지 루트로 연구를 진행하였다.

특히, 최근 보고된 연구[9]에서 Mg-Zn-Ca 삼원계 합금의 경우 삼사정 구조의  $\tau$  (Ca<sub>2</sub>Mg<sub>6</sub>Zn<sub>3</sub>; 공간군: P-31c; 격자상수: a=0.97 nm, c=1.0 nm)상이 존재한다는 것이 새롭게 보고되어 있어, Mg-5.6Zn-2.4Ca 삼원계 합금을 제작하여 초정 마그네슘과  $\tau$  상의 존재를 확인하고자 하였고, 이트륨을 첨가하여, 크리프 저항성의 향상 여부를 확인하였다.

### 2. 실험방법

실험에 사용된 합금들의 조성은 Table 1에 나타내었다. 합금 조성에 따라 ZW41, ZWC412, ZC62, 및 ZCW6207으로 명명하였으며, 모합금은 마그네슘(99.8%)과 아연(99.98%), 칼슘(99.5%) 및 Mg-20.8Y 모합금(wt%)을 사용하여, SF<sub>6</sub>+CO<sub>2</sub>의 보호가스 분위기 하의 전기로에서 용해하였다. 마그네슘 용탕에 아연 및 칼슘 그리고 Mg-Y 모합금을 장입하였으며, 칼슘의 산화를 방지하기 위해 아연 포일을 이용하여 장입하였다.

ZW41, ZWC412 합금은 700°C 의 용탕을 150°C로 예열된 금형에 주입한 후 100 MPa로 60초 동안 가압하는 용탕 단조

<sup>†</sup>E-mail : dohkim@yonsei.ac.kr

Table 1. Chemical composition of the alloys studied.

Alloy ID	Nominal composition (wt%)				Remarks
	Zn	Ca	Y	Mg	
ZW41	4		0.8	Bal.	Squeeze casting
ZC62	5.6	2.4		Bal.	
ZWC412	4	2	0.8	Bal.	Squeeze casting
ZCW6207	5.6	2.4	0.7	Bal.	

법을 이용하여 길이 8 cm, 최대 직경 5 cm 크기의 시편으로 제조하였다. 또한 추가 실험인 ZC62, ZCW6207 합금의 경우, 주조 시 용탕의 산화를 방지 하기 위해, 도가니를 직접 수냉 시키는 일종의 DC(direct chill) 주조법을 이용하였으며, 직경 55 mm의 스틸 도가니를 사용하였다.

이와 같이 제조된 합금의 미세조직은 Picric acid 6 g + Acetic acid 5 ml + Distilled water 10 ml + Ethyl alcohol 100 ml 의 용액으로 부식시킨 시편을 광학 현미경(LEICA DMRM optical microscope)을 사용하여 관찰하였다. 또한 X-선 회절 분석기(RIGAKU, CN2301) 및 투과 전자 현미경(JEOL, 2100F)을 사용하여 상 분석을 행하였으며 합금의 성분은 EDS(OXFPRD) 및 INCA 프로그램을 이용하여 분석하였다.

기계적 특성을 확인하기 위한 인장 시험은 dog-bone 모양의 시편(게이지 길이 10 mm)으로 초기 변형율  $10^{-3}/s$ 의 일정한 크로스 헤드 속도 하에 수행하였다. 그리고 크리프 시험은 지름 6 mm, 게이지 길이가 25 mm인 봉상 시편을 사용하였으며, 200°C의 온도와 65 MPa, 75 MPa 및 85 MPa의 응력 하에서 시험을 수행하였다.

### 3. 결 과

#### 3.1. 미세조직 변화 및 상 분석

Fig. 1은 ZW41, ZWC412, ZC62, ZCW6207 합금의 주조 후 광학 현미경으로 관찰된 조직을 보여 주고 있다. Fig. 1(a)는 용탕 단조법으로 제작된 ZW41 합금의 조직으로 기존에 보고된 바와 같이 초정 마그네슘과 제 2상으로서 준결정상이

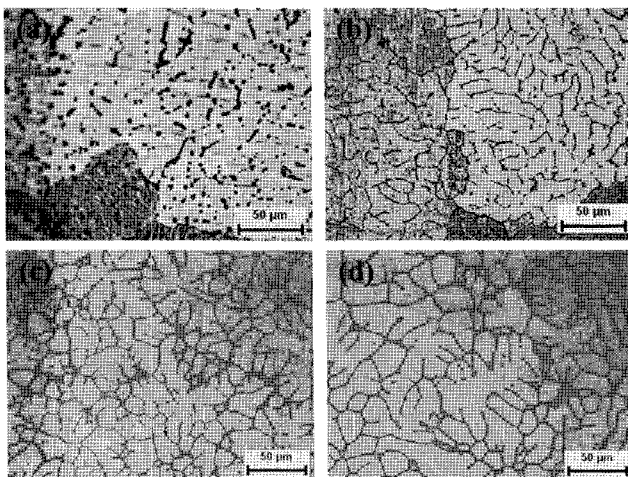


Fig. 1. Optical micrographs of (a) ZW41, (b) ZWC412, (c) ZC62 and (d) ZCW6207 alloys

수지상 사이 영역에 존재하는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 2의 X선 회절 분석 결과에서도 확인할 수 있었다. 또한 Fig. 1(b)는 칼슘이 첨가된 용탕 단조된 ZWC412 합금의 광학 현미경 조직이다. ZWC412 합금의 경우 수지상 사이 영역의 제 2상의 양이 늘어나고, network 구조를 가지는 새로운 상이 형성된 것을 알 수 있었다. 이 합금에서의 제 2상은 Fig. 2의 X선 회절 분석 결과에서 알 수 있듯이  $\tau$  ( $Ca_2Mg_6Zn_3$ )상 및  $Mg_2Ca$ 상으로 확인되었다. Fig. 1(c)의 ZC62 합금은 통상의 응고 조직과 같이 초정 마그네슘 수지상정과 제 2상으로 응고된 수지상 사이 상이 network 구조를 이루며 존재함을 볼 수 있다. 이트륨의 양이 0.7 wt% 첨가된 ZCW6207 합금의 경우 역시 network 구조를 가진 제 2상이 수지상 사이에 존재하는 것을 관찰 할 수 있었다.

Fig. 2는 ZW41, ZWC412, ZC62 및 ZCW6207 합금의 주조 상태에서 X선 회절 분석을 행한 결과이다. ZW41 합금은 초정 마그네슘과 준결정상으로 이루어진 것을 확인할 수 있다. 또한 칼슘이 첨가된 ZWC412의 경우 위에서도 언급한 바와 같이, 초정 마그네슘과  $\tau$  ( $Ca_2Mg_6Zn_3$ )상 및  $Mg_2Ca$  상의 피크가 나타난 것을 알 수 있다. ZC62 합금의 경우에는 최근에 보고된 바와 같이  $\alpha$ -Mg 과  $\tau$  상, 즉 두 상만이 존재함을 확인할 수 있었고 이트륨이 첨가된 ZCW6207 합금에서는  $\alpha$ -Mg 과  $\tau$  상 뿐만 아니라  $Mg_2Ca$ 상 및  $Mg_3Y_2Zn_3$ 상이 공존 함을 확인할 수 있었다.

X선 회절 분석으로 확인한  $\tau$  상,  $Mg_2Ca$  그리고  $Mg_3Y_2Zn_3$  상의 조성 및 구조를 확인하기 위해서 투과전자현미경을 통하여 ZWC412, ZC62 및 ZCW6207 합금의 상을 분석해 보았

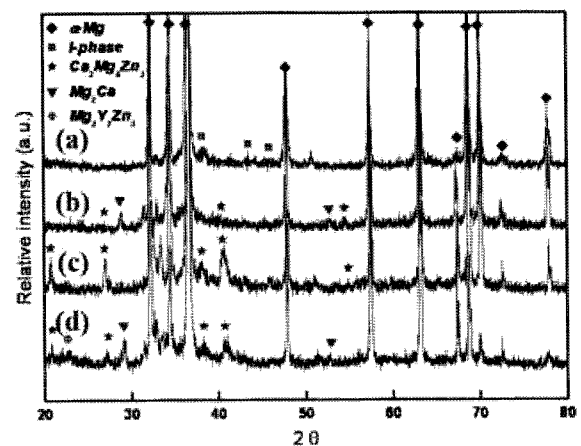


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of (a) ZW41, (b) ZWC412, (c) ZC62 and (d) ZCW6207 alloys

다. Fig. 3은 투과 전자 현미경을 통하여 ZWC412 및 ZC62 합금의 명시야 상과 제한시야 회절도형을 나타내었다. Fig. 3(a)는 ZWC412 합금의 명시야 상으로, 칼슘의 첨가로 인해 Mg<sub>2</sub>Ca상이 생성됨을 알 수 있었다. 회절도형을 분석한 결과, [3-11]의 정대축을 갖는 육방정 구조를 가지고 있으며, Table 2의 EDS 분석 결과, Zn가 2.92 at% 고용되어 있는 Mg<sub>2</sub>Ca 상임을 확인하였다. Fig. 3(b)는 ZC62의 명시야 상으로, α-Mg 과 τ 상이 수지상간 공정구조를 가지며 존재하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 Fig. 3(b)의 회절도형을 분석한 결과, [2-21]의 정대축을 갖는 삼사정 구조의 τ 상임을 확인 하였다. Table 2의 EDS 분석 결과에서도 Mg(48.3 at%), Ca(17.1 at%), Zn (34.23 at%) 로 이루어진 τ 상 임을 확인 할 수 있었다. Jardim 등[9]은 급속 응고한 Mg-6Zn-1.5Ca 리본에서 τ 상은 리본 두께의 위치에 따라, α-Mg 결정립 내부와 결정립계에 존재하는 부분, 결정립 내부에만 존재하는 부분 그리고 결정립의 triple junction 부분에만 존재하는 부분으로 나뉜다고 보고 하고 있으나, 본 연구에서는 느린 냉각 속도로 인하여, 용질 원자의 이동 시간이 충분하고 또한 유동성이 크기 때문에 α-Mg 결정립 내부에서는 관찰 할 수 없었으며, 단지 수지상간 영역에서 α-Mg 과 공정 구조를 이루며 존재하는 것으로 사료된다.

Fig. 4는 ZCW6207 합금의 주조 상태에서 관찰한 τ, Mg<sub>2</sub>Ca 및 Mg<sub>3</sub>Y<sub>2</sub>Zn<sub>3</sub>상의 명시야 상과 제한시야 회절도형을 나타내었다. ZCW6207 합금은 X선 회절 결과에서도 알 수 있듯이 제 2 응고상이 세 종류의 상으로 이루어 졌으며, 이들은 Fig. 4(a)의 명시야 상에서 보이는 것과 같이 수지상간에 존재함을 알 수 있다. Fig. 4(a)에 α로 표시한 영역의 회절도형을 분석한 결과 [2-21]의 정대축을 갖는 삼사정 구조의 τ 상임을, β 로 표시한 부분은 [001]의 정대축을 갖고 육방정 구조를 가지

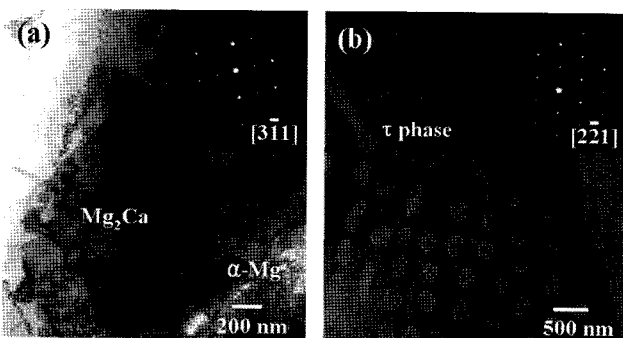


Fig. 3. TEM images of (a) ZWC412 and (b) ZC62 alloys (SADPs inserted in bright field images represent Mg<sub>2</sub>Ca and t phases, respectively.)

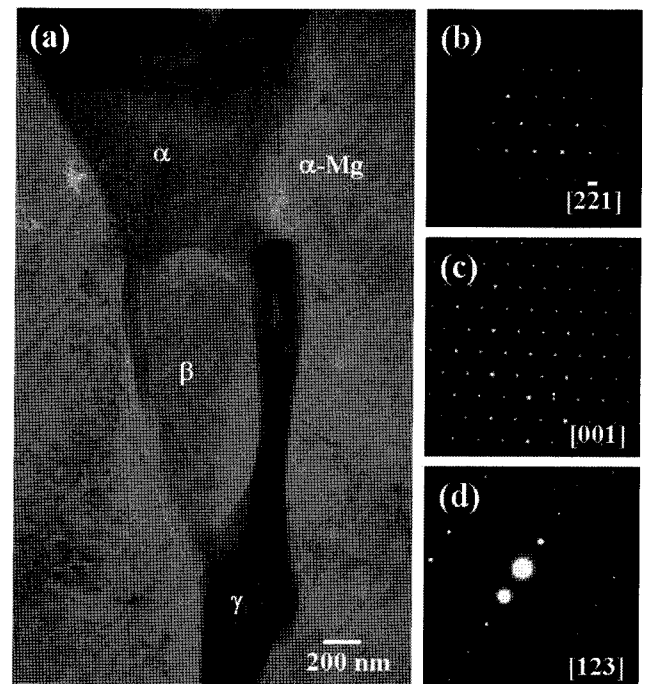


Fig. 4. TEM images of ZCW6207 alloys; (a) Bright field image and (b)-(d) SADPs of phases marked by α, β and γ in the BF image

는 Mg<sub>2</sub>Ca 상임을 확인 할 수 있었고, Table 2의 EDS 분석 결과에서도 Mg(63.59 at%), Ca(31.74 at%), Zn(4.61 at%)로 이루어진, 즉 ZWC412 합금에서와 같이 Zn가 4.61 at% 고용 되어 있는 Mg<sub>2</sub>Ca 상임을 확인 할 수 있었다. Fig. 4(a)에 γ 로 표시한 수지상간 영역은 회전 패턴 분석 결과 [123]의 정대축을 가지고 입방정 구조를 가진 Mg<sub>3</sub>Y<sub>2</sub>Zn<sub>3</sub> 상임을 확인하였다. 그리고 Table 2의 EDS 분석 결과에서도 Mg(30.70 at%), Y(22.36 at%), Zn(45.61 at%)로 이루어진 Mg<sub>3</sub>Y<sub>2</sub>Zn<sub>3</sub> 상임을 확인 할 수 있었다.

### 3.2. 기계적 특성

Fig. 5는 ZW41, ZWC412, ZC62, 및 ZCW6207 합금의 주조 후 상온에서의 인장 시험 결과를 나타내었다. ZW41 합금은 기존에 알려진 바와 같이 준결정상과 초정 마그네슘 기지의 낮은 계면 에너지로 인하여 항복 강도 64 MPa, 그리고 상대적으로 큰 연신율인 16.4%를 보였다. 반면에 ZWC412 합금은 제2응고상으로 τ상 및 Mg<sub>2</sub>Ca 상이 존재하였으며, 항복 강도 104.8 MPa, 연신율 3.3% 의 기계적 특성을 보여 준

Table 2. EDS results of the 2nd Phases in ZWC412, ZC62 alloy and ZCW6207 alloys.

Alloy ID	Phase	Elements (at%)			
		Mg	Zn	Ca	Y
ZWC412	Mg <sub>2</sub> Ca	61.87	2.92	34.43	0.78
ZC62	τ	48.43	34.38	17.19	-
ZCW6207	τ	53.68	28.46	17.15	0.71
	Mg <sub>2</sub> Ca	63.59	4.61	31.74	0.1
	Mg <sub>3</sub> Y <sub>2</sub> Zn <sub>3</sub>	30.7	45.61	1.33	22.36

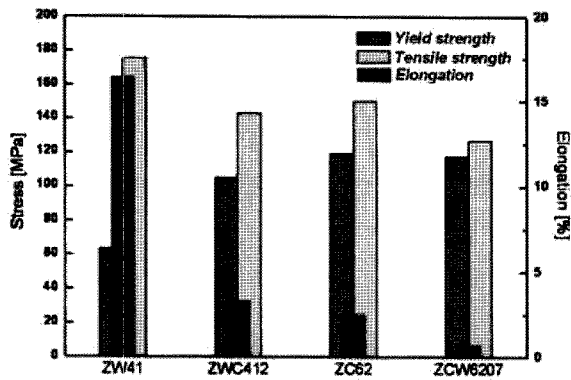


Fig. 5. Results of tensile test at room temperature.

결정 외에 다른 제2응고상이 존재함에 의해 연신율이 급격하게 감소함을 볼 수 있었다.

ZC62 합금은 제2응고상으로  $\tau$ 상 만이 존재하였으며, 항복강도 119 MPa, 연신율 2.5% 를 나타내었으며, 이트륨이 0.7 wt% 첨가된 ZCW6207 합금의 경우 제2응고상으로  $Mg_2Ca$  상 및  $Mg_3Y_2Zn_3$  상이 추가로 형성되었으며, 항복강도 117.5 MPa 및 연신율 0.73% 의 기계적 특성을 확인하였다. ZWC412, ZCW6207 합금에서는 특히, 제2응고상으로 존재하는 취성이 매우 높은 Laves 상인  $Mg_2Ca$  상에 의해 연신율이 줄어든 것으로 사료된다.

### 3.3. 크리프 특성

ZW41, ZC62, ZWC412 및 ZCW6207 합금에 대해 200°C 에서 65 MPa-85 MPa 에서 크리프 시험을 행하였으며 그 결과를 Fig. 6 및 Table 3에 나타내었다. Fig. 6은 200°C, 85 MPa 에서 수행한 크리프 시험 결과를 나타내고 있다. ZWC412, ZCW6207 합금이 크리프 특성이 ZW41 및 ZC62 합금에 비해 아주 우수한 경향을 나타내고 있다. ZW41과 ZC62 삼원계 합금의 경우 크리프 속도가  $1.01 \times 10^{-4}$  /s 및  $3.13 \times 10^{-5}$  /s로 24시간 및 75시간 이전에 파단이 일어난 것을 볼 수 있다.  $\tau$  상 및  $Mg_2Ca$  상 등을 관찰 할 수 있는 ZCW6207 및 ZWC412 합금의 경우 크리프 특성이 우수해져 크리프 속도가 각각  $3.06 \times 10^{-6}$ /s 및  $1.63 \times 10^{-7}$ /s로 감소하였다. 이는 ZC62 합금에 이트륨을 첨가하면서 생성되거나 ZW41 합금에 칼슘을 첨가하여 생성된 열적으로 안정한  $Mg_2Ca$  상이 생성되어 크리프 특성이 증가한 것에 기인되는 것으로 사료된다.

$Mg_2Ca$  상의 용융온도는 512°C로 이 온도는 상용화된 AZ, AM 계열의 마그네슘 합금에 내재되어 있는  $Mg_{17}Al_{12}$  상의 용융온도 보다 높다. 따라서 온도가 상승함에 따라 제 2상이 분

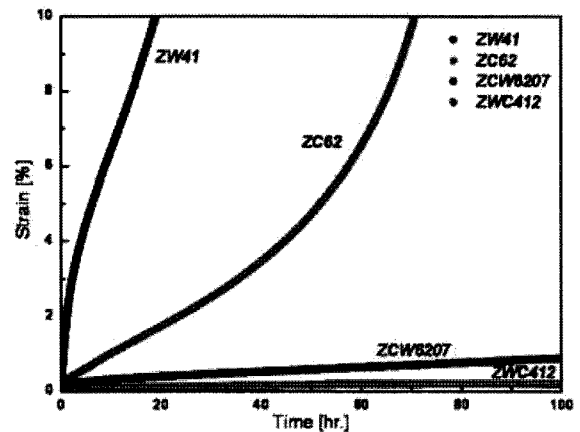


Fig. 6. Results of creep test (condition: 200°C/85 MPa)

해되어 기계적인 성질을 저하시키는 영향이 적을 것으로 사료된다. 그리고 이트륨, 칼슘이 같이 첨가됐을 때, 생성된  $Mg_2Ca$  상과  $Mg_3Y_2Zn_3$  상이 200°C 온도에서 초정 마그네슘 상의 변형을 억제하는 강력한 지지대 역할을 하며 초정 마그네슘과 제2상 간의 미끄럼 현상을 억제하는 기능을 수행하기 때문에 높은 크리프 저항성을 보여준다. 65 MPa-85 MPa에서의 조사된 합금의 크리프 속도를 Table 3에 나타내었다. 또한 ZWC412 합금의 경우 ZCW6207 합금에 비해 크리프 특성이 94퍼센트 감소한 것으로 보아 일반 주조법 보다 용탕단조법이 크리프 저항성을 높인 것으로 사료된다.

## 4. 고 찰

본 연구에서 얻어진 크리프 결과를 비교 분석하기 위해서 관찰된 크리프 거동에 대한 메커니즘을 확인하는 것이 필요하다. 크리프는 열적 활성화 과정이므로 온도의 효과는 아래에 주어진 Arrhenius type 식으로 표현되며 크리프 변형 기구를 지배하는 활성화 에너지 항  $Q$ 를 포함하며  $A$ 와  $n$ 은 온도와 응력에 무관한 상수이고  $R$ 은 기체상수이다.

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

응력 지수  $n$ 은 공업적으로 상용되는 많은 고온 재료의 경우 응력의 범위에 따라 다른  $n$  값을 갖는 것이 실험 결과로 알려져 있다. 여기서 크리프 메커니즘을 확인하기 위하여 필요한 응력지수인  $n$ 값은  $n = (\delta \log \dot{\epsilon} / \delta \log \sigma)$  만족하는 값이다. 즉  $n$ 값은 일정한 온도와 다른 하중 조건에서 구해진 크리프 실험 데이터가 나타내는 기울기를 나타낸다. 본 연구에서는 크리프

Table 3. The secondary creep rate (65 MPa, 75 MPa and 85 MPa at 200°C).

Alloy ID	Secondary creep rate (/s)		
	65 MPa	75 MPa	85 MPa
ZW41			$1.01 \times 10^{-4}$
ZC62	$3.74 \times 10^{-6}$	$8.18 \times 10^{-6}$	$3.13 \times 10^{-5}$
ZCW6207	$4.58 \times 10^{-7}$	$7.75 \times 10^{-7}$	$3.06 \times 10^{-6}$
ZWC412		$1.28 \times 10^{-7}$	$1.63 \times 10^{-7}$

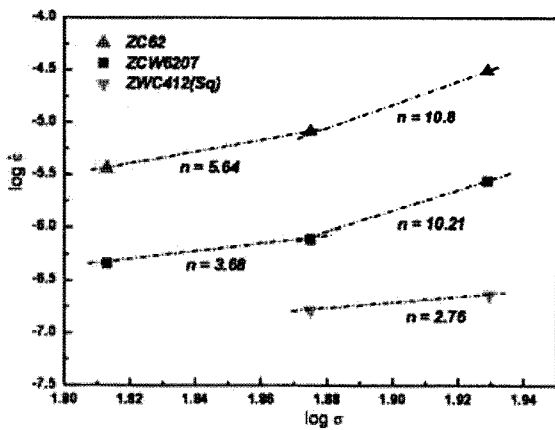


Fig. 7. Applied stress dependence of secondary creep rate at 200°C

시험이 진행된 온도 200°C로 고정하고 65 MPa~85 MPa 하중 조건에서 실험한 후의 크리프 저항성을 Fig. 7에 나타내었다. ZC62의 경우에는 65 MPa~75 MPa에서 상대적으로 높은 응력지수인  $n = 5.64$ 의 값을 나타내었고, 75 MPa~85 MPa에서도 마찬가지로 높은 값 ( $n = 10.8$ )이 나타난 것을 보여주고 있다. 그러나 ZCW6207의 경우 낮은 응력(65 MPa~75 MPa)에서 상대적으로 낮은 응력지수인  $n = 3.68$ 로 측정되었고, 75 MPa~85 MPa에서는  $n = 10.21$ 로 높은 값을 나타내었다.

이는 낮은 응력(65 MPa~75 MPa)에서  $n = 3.68$ 의 응력지수를 가지는 ZCW6207의 경우 크리프 변형기구가 전위 활주 크리프로 사료되고, 반면에 응력지수가  $n = 5.64$ 인 ZC62의 경우 전위 활주와 고온에서 발생하는 전위 상승이 지배적인 역할을 한다고 볼 수 있다. 그리고 가장 우수한 크리프 저항성을 보이는 ZWC412 합금의 경우 높은 응력(75 MPa~85 MPa)에서 역시  $n = 2.76$ 으로 크리프 변형기구가 전위 활주 크리프를 유지함을 확인 할 수 있다. 반면에 다른 합금들은 높은 응력(75 MPa~85 MPa)에서 기울기의 변화가 큰 것으로 보아 power-law break down이 일어난 것으로 설명된다.

### 5. 결 론

Mg-Zn-Y, Mg-Zn-Ca 삼원계 합금에 각각 칼슘과 이트륨을 첨가하여, 생성되는 제 2상을 확인하고, 그에 따른 크리프 성

질에 미치는 영향을 연구한 후 다음과 같은 결론을 내렸다.

1. 용탕단조법으로 제작한 ZWC412 합금의 경우  $\alpha$ -Mg,  $\tau$  상 및  $Mg_2Ca$  상이 생성된 것을 확인하였고, 0.7wt%의 이트륨 첨가된 ZCW6207 경우 결정립계에  $\tau$  상,  $Mg_2Ca$  상 뿐 아니라  $Mg_3Y_2Zn_3$  상이 생성된 것을 확인하였다.
2. ZWC412, ZCW6207 합금에서 생성된  $\tau$  상을 삼원계 합금인 Mg-5.6-Zn-2.4Ca 조성에서 초정 마그네슘과  $\tau$  상 ( $Ca_2Mg_3Zn_3$ ; 공간군: P-31c; 격자상수:  $a = 0.97$  nm,  $c = 1.0$  nm)이 공정 구조를 가지며 수지상 간 영역에 존재하는 것을 확인 할 수 있었다.
3. 200°C와 65 MPa~85 MPa에서 수행한 크리프 실험에서 ZW41, ZC62 삼원계 합금 보다 칼슘과 이트륨이 각각 첨가된 ZWC412 및 ZCW6207 합금의 크리프 저항성이 급격히 향상 되었음을 확인 할 수 있었다. 이는 열적으로 안정한  $Mg_2Ca$  상의 생성에 기인 한 것이다.

### 참고문헌

- [1] M. S. Yoo, K. S. Shin and N. J. Kim: Metall. Mater. Trans. A, "Effect of  $Mg_2Si$  particles on the elevated temperature tensile properties of squeeze-cast Mg-Al alloys," Vol. 35A 2004, 1629
- [2] S. Schumann and H. Friedrich: Materials Science Forum, "Current and future use of magnesium in the automobile industry," Vol. 51, 2003, 419
- [3] A. A. Nayeb-Hashemi and J. B. Clark: "Phase Diagrams of Binary Magnesium Alloys," ASM, Metals Park, 1988
- [4] Regev M, Rosen A, Bamberger M.: Metall Mater Trans A, "Qualitative model for creep of AZ91D magnesium alloy," Vol. 32A, 2001, 1335
- [5] I. P. Moreno, T. K. Nandy, J. W. Jones, J. E. Allison, and T. M. Pollock: Scripta Mater "Microstructural characterization of a die-cast magnesium-rare earth alloy," Vol. 45, 2001, 1423
- [6] H. K. Lim, J. Y. Lee, W. T. Kim, D. H. Kim: J. Kor. Foundrymen's Soc. "Study on castability and creep properties of Mg-Zn-Y-X (X = Al or Mn) alloys as casting alloy," Vol. 26, 2006, 34
- [7] Guangyin Y, Manping L, Wenjiang D, Inoue A.: Mater. Sci. Eng. A, "Microstructure and mechanical properties of Mg-Zn-Si-based alloys," Vol. 357, 2003, 314
- [8] Miyazaki T, Kaneko J, Sugamata M.: Mater. Sci. Eng. A, "Structures and properties of rapidly solidified Mg-Ca based alloys," Vol. 181/182, 1994, 1410
- [9] P. M. Jardim, G. Solórzano, J. B. Vander Sande: Mater. Sci. Eng. A, "Second phase formation in melt-spun Mg-Ca-Zn alloys," Vol. 381, 2004, 196 (Captions of Figures and Tables)