

## 고온용 마그네슘 합금의 개발 동향

하성호<sup>†</sup> · 이진규 · 김세광

한국생산기술연구원

### Development trend of high temperature Mg alloys

Seong-Ho Ha<sup>†</sup>, Jin-Kyu Lee, and Shae K. Kim

Adv. Mater. Div., Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 406-840, Korea

#### 1. 서 론

Mg 합금은 비강도가 우수하고 전자파 차폐 특성을 가지고 있어 노트북, 캠코더, 휴대폰 케이스 및 자동차 부품에 널리 이용되고 있다[1]. 현재 Mg 합금의 사용분야는 크게 항공우주 분야, ICT, 자동차 분야, 건축 구조재, 주방, 의료, 레저, 전동 공구 등이 있다. 이중 휴대폰, 노트북 케이스 등 ICT 분야가 각광받고 있지만 가장 큰 시장은 자동차 부품소재 시장이 될 가능성이 크다. 현재 자동차 배기가스 규제가 강화됨에 따라 차량의 경량화가 가능한 Mg 소재가 주요 부품으로 대체되고 있다[2]. 유럽, 일본 등 선진국의 고급 자동차에는 이미 프레임, 핸들, 에어백 등에 Mg 제품이 적용되어 30%의 경량화를 이루었으며 30~60개의 부품의 무게를 줄일 수 있다. 이렇듯 Mg 합금은 항공우주분야와 자동차 분야에서는 탁월한 경량성으로 ICT 분야에서 박판성형이 가능하며, 전자파 차폐효과가 있음이 경쟁력이다. 이러한 장점이 건축 구조재 분야에서도 구리, 니켈 등 고가 자재의 대체품으로 각광받는 이유가 되고 있다. 이 외에도 Mg 합금은 스포츠, 레저 용품에 이르기까지 그 적용이 확대되고 있다[3].

한편, Mg 합금 부품의 제조는 현재 주로 다이캐스팅과 같은 주조공정에 의해서 이루어지고 있다. 현재 상용화된 다이캐스팅용 마그네슘 합금 중 대표적인 합금인 AZ91D와 AM50, AM60 등은 Mg-Al 계 합금으로 가격이 저렴하고 주조성이 좋고 또한 응고 시  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 상이 생성되어 실온에서 높은 강도를 나타냄으로써 널리 사용되고 있다[4]. 그러나 이들 합금 내에 존재하는  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 상의 낮은 열안정성으로 인해 고온 특성, 특히 크리프 저항성이 낮아 자동차 동력전달계 부품과 같이 높은 온도에 노출되는 부품에는 적용이 힘들다는 단점이 있다. 게다가 항공기의 트랜스미션 케이스 등은 보다 높은 온도에서 사용되기 때문에 내열 특성이 우수한 합금의 개발이 요구되며 지금까지 이 부분에 대한 연구가 국내외적으로 활발히 이루어지고 있다[5].

지금까지 국내외적으로 연구개발된 고온용 Mg 합금에 대하여 정리된 자료가 있지만, 최근의 활발한 연구와 더불어 다시

한번 정리를 할 필요가 있다고 생각되어 최근의 고온용 Mg 합금 개발 현황을 포함하여 고온용 Mg 합금 개발동향에 대하여 전반적으로 정리하고자 하였다.

#### 2. 고온용 Mg 합금의 적용 및 개발

고온용 Mg 합금은 적용 분야로는 자동차용과 항공기용으로 분류되고 각 적용분야에 대한 사용온도도 다르다. 또한 제조방식에 따라 다이캐스팅용과 사형주조용으로 분류된다. 본고에서는 다이캐스팅용 합금과 사형주조용 합금, 이 두 가지로 분류하여 서술하고자 한다.

먼저 다이캐스팅용 합금은 제조공정 특성상 용탕 가압 시 발생하는 와류로 인해 최종 제품 내 많은 기공이 형성되기 때문에 열처리를 하지 않는다. 이유는 열처리 시 이러한 기공들이 존재할 경우 제품 표면에 블리스터를 일으키는 원인이 되기 때문이다. 따라서 제품 제조 후 바로 부품으로 적용되기 때문에 열처리를 거쳐 강화된 다른 합금에 비해 고온 특성이 낮기 때문에 주로 약 200°C이하의 부품에만 적용된다. 따라서 주요 적용 분야는 자동차 동력전달계 부품인 자동변속케이스 및 엔진블록 등에 주로 적용이 된다.

사형주조의 경우에는 주조 시 용탕의 와류 발생이 크지 않으므로 다이캐스팅과 비교하여 기공이 적기 때문에 비교적 건전한 제품을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 따라서 사형주조용 합금의 경우에는 RE, Ag, Th와 같은 원소를 첨가한 후에 주조상태에서 열처리를 통하여 합금의 특성을 얻기 때문에 200°C이상의 온도에 적용이 가능하다[6]. 주로 항공기 동력전달계 부품에 적용되며 헬기의 기어박스하우징 및 커버, 엔진커버 등이 이에 해당된다.

#### 3. 고온용 마그네슘 합금의 개발 현황

##### 3.1. 다이캐스팅용 합금

우수한 고온특성을 가진 합금의 설계를 위해서는 생산성과 크리프 저항성, 강도, 내식성 그리고 비용적인 측면을 고려해야

<sup>†</sup>E-mail : badguy1999@kitech.re.kr

만 한다. 다이캐스팅용 합금의 경우에는 Mg-Al 계 합금을 기본으로 하여 Si, RE, Ca, Sr 등을 첨가하여 합금설계를 하게 되는데 Al 함량이 많은 경우에는 합금의 실온 강도와 유동성을 증가시키지만 고온에서 불안정한  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 상을 생성시키기 때문에 고온에서 크리프 저항성이 감소된다는 단점이 있고 반대로 Si, RE, Ca, Sr 등과 같은 첨가원소들의 양이 많아지게 되면 용탕의 유동성 감소 및 금형점착과 같은 제조상의 문제를 일으키고 뿐만 아니라 합금의 가격이 증가한다는 단점이 있다. 따라서 고온특성과 구조성, 비용 등을 고려하여

첨가원소들 간의 적절한 조합이 필요하다. Table 1과 2는 각각 다이캐스팅용 Mg 합금의 강도와 크리프 저항성을 나타낸 것이다.

3.1.1 Mg-Al-Si 계 합금

다이캐스팅용 고온용 마그네슘 합금의 개발의 시작은 1970년경에 Volkswagen에 의해서 개발된 Mg-Al-Si 합금계이다. Mg에 Si를 첨가하면 Mg<sub>2</sub>Si 상이 생성되는데 이것은 저밀도, 높은 경도, 낮은 열팽창계수 및 높은 용점(1085°C)을 갖기 때문에 합금의 고온에서의 안정성을 증가시킨다[7].

Table 1. Tensile properties of Mg die casting alloys[22,27,29].

Alloy (Company)	Room Temp.			150°C		
	YS (MPa)	UTS (MPa)	E. (%)	YS (MPa)	UTS (MPa)	E. (%)
AZ91D (Hydro Magnesium)	139	204	3	105	128	14.38
AM60B (Hydro Magnesium)	130	213	6.35	-	-	-
AS41 (Volkswagen)	136	197	4	94	153	17
AS31 (Volkswagen)	120	220	9	90	140	18
AS21x (Volkswagen)	121	210	5.5	87	130	20
AE42 (Dow Chemical)	128	220	10	88	140	23
AE44 (Hydro Magnesium)	135	240	10	-	-	-
AX51*	128	192	7	102	161	7
AX52*	161	228	13	-	-	-
AJ50X (Noranda Magnesium)	126	194	7	101	142	5
AJ52X (Noranda Magnesium)	134	212	4.52	110	163	12
AJ62x (Noranda Magnesium)	143	240	7	116	166	27
AJX500 (General Motors)	133	236	10	101	152	16
ACM522 (Honda)	158	200	4	138	175	7
MRI153M (DSM/Volkswagen)	170	250	6	135	190	17
MRI230D (DSM/Volkswagen)	180	235	5	150	205	16
AM-HP2 (CSIRO/AMT)	142	163	2.6	135	152	4

Table 2. Creep properties of Mg die casting alloys[27,29].

Alloy (Company)	Tensile Creep, %					
	at 50 MPa, 200 hrs		at 50 MPa, 500 hrs		at 70 MPa, 100 hrs	at 70 MPa, 200 hrs
	150°C	175°C	150°C	175°C	175°C	175°C
AZ91D (Hydro Magnesium)	2.7	-	6.35	-	-	-
AM60B (Hydro Magnesium)	-	-	-	-	-	11.53
AS41 (Volkswagen)	0.05	2.48	0.07	-	-	-
AS31 (Volkswagen)	-	-	-	-	-	-
AS21x (Volkswagen)	0.19	1.27	-	-	-	8.95
AE42 (Dow Chemical)	0.06	0.33	0.08	-	-	0.18
AE44 (Hydro Magnesium)	-	-	-	-	-	-
AX51*	-	-	-	-	-	-
AX52*	-	-	-	-	0.06	-
AJ50X (Noranda Magnesium)	-	-	-	-	-	2.67
AJ52X (Noranda Magnesium)	0.04	0.05	0.03	0.09	-	0.14
AJ62x (Noranda Magnesium)	0.05	0.05	-	-	-	-
AJX500 (Noranda Magnesium)	-	-	-	-	-	-
ACM522 (Honda)	-	-	-	-	-	-
MRI153M (DSM/Volkswagen)	0.18	-	-	-	-	4.01
MRI230D (DSM/Volkswagen)	-	-	-	-	-	0.24
AM-HP2 (CSIRO/AMT)	-	-	-	-	-	-

대표적인 합금으로는 AS41(Mg-4Al-1Si)과 AS21(Mg-2Al-1Si) 합금이 있다. 이들 합금은 AZ91 합금에 비해 높은 열저항성과 마모저항성을 나타내지만 낮은 Al 함량으로 인해 낮은 유동성과 부식저항성을 나타낸다. 따라서 Al 함량을 3%(AS31)로 조정하게 되면 AS41과 AS21 합금 간의 유동성과 크리프 저항성의 적절한 조합이 가능할 수 있다[8]. 최근에 AS21 합금에 0.15%의 RE를 첨가하여 AS21X를 개발하였으나 크리프 저항성면에서는 그다지 큰 효과를 나타내지 못했으나 부식저항성을 향상시킬 수 있었다[9].

### 3.1.2 Mg-Al-RE 계 합금

1972년에 Al 함량이 4% 이하인 합금에 1~2%의 RE를 첨가하면 크리프 저항성이 향상된다는 것이 보고되었고 이를 토대로 AE41, AE42 합금이 개발되었다[10]. 이 합금은 높은 크리프 저항성을 나타내지만 가격이 비싸다는 단점이 있다. Mg-Al 합금에 RE를 첨가하게 되면 Al-RE 계 고온 안정상이 생성되는데, 이 화합물들에 대한 상 구분은 매우 복잡하여 이 부분에 관한 다양한 연구가 진행되어왔다.

Polmear는 Mg-Al-RE 합금은 서냉 시에 조대한  $Al_2RE$  상을 생성시키기 때문에 다이캐스팅과 같이 급냉 시에만 사용가능하다고 보고해왔으며[11], 또한 AE42 합금 내에는  $Al_2RE$  상이 생성된다고 보고되어왔다. Pettersen은 RE/Al의 비가 1.4 일 경우에는  $Al_{11}RE_3$  상이 생성된다고 보고하였다[12]. 이와 같이 고온안정상인 Al-RE 계 화합물로 인해 높은 크리프저항성을 나타낸다. AE41, AE42 외에도 AE 합금 시리즈로 AE35와 AE82 합금이 개발되었고 최근에는 Norsk Hydro사에서 개발한 AE44 합금이 있다[13]. 이 합금은 우수한 고온 특성과 구조성, 부식저항성을 갖는다.

### 3.1.3 Mg-Al-Ca 합금

RE 등의 원소들과 마찬가지로 Ca의 첨가는 Mg 합금의 고온 특성에 크게 기여한다. 또한 값이 비싼 RE에 비해 값이 싸고 가볍기 때문에 RE 대체 원소로 많은 각광을 받아왔다. Mg-Al 2원계 합금에 Ca를 첨가하게 되면 Ca/Al 비에 따라 제 2상의 생성거동에 차이가 있다. 그 비가 0.8 이상이면  $Mg_2Ca$ 와  $Al_2Ca$  두 상이 생성되며 그 이하일 경우에는  $Al_2Ca$  상이 생성된다[14].  $Al_2Ca$  상의 생성은 합금의 고온 특성에 크게 기여하며 또한  $\beta$ 상의 생성을 억제시킨다. 대표적인 Mg-Al-Ca 계 합금으로는 Canada의 ITM사에서 개발한 AC51 합금이 있으나 이 합금은 크리프 저항성 면에서 AE42에 비해 우수하지 못한 것으로 보고되었다[15]. 또한 GM사에서 이 합금계에 Sr를 첨가하여 AXJ 합금을 개발하였다. 이 합금은 AE42 합금보다 우수한 내크리프 특성을 나타내었다.

### 3.1.4 Mg-Al-Sr 합금

Canada의 Noranda Magnesium Co.에서 개발한 합금으로 AJ51, AJ52, AJ62 합금이 있다[16]. AZ52 합금은 위 합금들 중 가장 높은 크리프 저항성을 나타내며 AJ62x 합금은 구조성과 크리프 저항성이 적절하게 조합된 합금이다. Mg-Al-Sr 내의 고온안정상은  $Al_4Sr$ 로 Sr/Al의 함량비가 0.3 이상일 경우에 나타나는 것으로 보고 되었다[17].

### 3.1.5 최근 개발 현황

최근 몇 년간 Mg-Al 합금에 RE와 알칼리 토금속 원소들을

혼합 첨가하여 합금을 개발한 연구가 활발히 진행되어왔다. ACM522는 Honda사에서 하이브리드 자동차의 오일 팬에 적용하기 위하여 개발한 합금으로 AE42에 비해 개선된 크리프 저항성을 나타낸다[18]. Mg-Al-Ca-RE의 또 다른 개발합금으로 Dead Sea Magnesium (DSM)과 Volkswagen AG에서 개발한 MRI 시리즈가 있다. MRI 153과 MRI 230은 150°C와 180°C에서 우수한 고온 특성을 나타내며 뿐만 아니라 MRI 153은 AZ91과 유사한 구조성을 나타내며 상온에서 또한 높은 강도를 나타내기 때문에 현재 상용화된 고온용 마그네슘 합금 중에서 가장 우수한 특성을 나타내는 합금이다[19].

Mg-Al-Ca-RE 계 합금 외에도 Mg-Al-Ca-Sr 계 합금에 대한 연구도 또한 진행되어왔다. Noranda와 GM에서 개발한 AXJ 합금은 소량의 Ca과 Sr이 첨가된 합금으로 고온에서 아주 우수한 크리프 저항성을 나타낸다[20]. 호주 CSIRO사와 Advanced Magnesium Technologies사에서 AM-HP2을 개발했다. AM-HP2 합금은 파워트레인 분야에서 주로 적용되며 요구되는 온도에서 우수한 다이캐스팅 공정 특성과 크리프 저항성을 겸비하고 있는 새로운 합금으로 알려졌다[21,22]. AM-HP2 합금은 AZ91D 합금과 거의 유사한 다이캐스팅 특성을 가지고 있으며, 높은 온도에서 엔진 크랭크 축에 요구되는 특성 사양을 충족시킨다. 크리프 거동은 150°C에서 177°C사이의 온도에서, 보다 넓은 스트레스 영역 내에서 결정되었다.

### 3.1.6 Mg-Al-AEO(Alkaline Earth Oxide) 합금

최근 Mg-Al 계 합금에 CaO과 SrO와 같은 알칼리 토금속 산화물을 첨가하여 합금의 고온특성을 개선하는 연구가 진행 중에 있다[23,24]. 이 연구에 따르면 Mg-Al 합금 용탕에 CaO과 SrO를 첨가하게 되면 환원반응이 일어나고 합금 내 Al과 반응하여 각각 고온 안정상인  $Al_2Ca$ 와  $Al_4Sr$ 을 형성하는 것으로 보고되었다[25]. 환원반응에 의해서 제 2상을 형성시키기 때문에 기지 내 고용의 과정을 거치지 않아 더 많은 양의 고온 안정상을 생성시킬 수가 있다. 따라서 기존의 Ca, Sr 첨가량보다 좀 더 적은 양의 첨가량도 고용상의 형성없이 고온 안정상을 생성시킬 수 있기 때문에 기존의 Ca 및 Sr 첨가 시 발생되었던 열간균열, 금형소착, 유동성 감소 등의 공정상의 문제들을 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 배경을 토대로 CaO과 SrO이 첨가된 고온용 마그네슘 합금 개발에 관한 연구가 진행되고 있다.

## 3.2 사형주조용 합금

사형주조용 합금은 Al 합금과 마찬가지로 T6 열처리를 통해서 기지 내 석출상들을 생성시킴으로써 합금의 고온 특성을 증가시키며, Ag, Th, RE 등의 원소들을 첨가하여 합금설계를 한다. 첨가원소들의 가격이 전체적으로 비싸다는 단점이 있기 때문에 이를 고려한 합금 설계가 요구된다. Table 3은 대표적인 사형주조용 Mg 합금의 강도와 크리프 저항성을 표로 나타낸 것이다.

### 3.2.1 Mg-Y 계 합금

대표적인 합금으로 WE43과 WE54가 있다. 영국의 Magnesium Elektron, Ltd (MEL)사에서 개발 및 적용하고 있는 합금으로 기존의 사형주조용 합금에 주로 첨가되었던 Ag, Th 등의

Table 3. Properties of Mg sand casting alloys[27,29,30].

Alloy (Company)	Room Temp.			150°C			Stress to produce 0.2% creep-strain	
	YS (MPa)	UTS (MPa)	E. (%)	YS (MPa)	UTS (MPa)	E. (%)	200°C	250°C
WE43-T6 (MEL)	180	260	6	175	210	7	160	60
ZE41-T5 (MEL)	140	220	5	120	170	22	50	20
ZC63-T6 (MEL)	158	240	4.5	134	180	14	63	-
MEZ-T6 (MEL)	76	107	2	-	-	-	-	-
MRI-201S-T6 (DSM/Volkswagen)	170	260	6	170	245	11	160	75
MRI-202S-T6 (DSM/Volkswagen)	150	250	7	145	220	15	100	40
AM-SC1 (CSIRO/AMT)	120	206	4	118	190	11	80	40

고가의 첨가원소 대신 비교적 값이 싼 Nd, Y 등의 원소와 미량의 Gd, Dy, Ce 등의 RE를 첨가되었다[26]. WE43와 WE54 합금은 옹고 시  $\beta$ -Mg<sub>14</sub>Nd<sub>2</sub>Y 상을 생성시키고 525°C에서 균질화처리를 하게 되면 Mg<sub>9</sub>Nd 상이 생성된다.

한편 MEL 사에서는 Elektron 21 (0.2~0.5%Zn-2.6~3.1%Nd-1.0~1.7%Gd) 합금을 개발하였다. 이 합금은 WE43과 비교하여 유사한 특성을 가지면서 보다 가격이 저렴하여 전 세계 항공기용 주조부품회사에 독점 공급하고 있다.

### 3.2.2 Mg-Zn-RE 합금

WE 시리즈와 마찬가지로 영국의 Magnesium Elektron, Ltd (MEL) 사에서 개발한 ZE41 합금이 있다. 이 합금은 150°C까지 적절한 강도를 나타낸다. 또한 EZ33 합금은 250°C까지 주조성, 크리프 저항성, 강도 면에서 우수한 특성을 나타낸다 [27]. 이 합금들은 기지 내에는 Mg<sub>12</sub>Ce 혹은 Mg<sub>27</sub>Ce<sub>2</sub>와 같은 Mg-RE 화합물이 결정립계에 생성되어 합금을 강화시킨다.

### 3.2.3 최근 개발 현황

최근 개발 현황으로는 먼저 MEL 사에서 개발한 MEZ 합금(Mg-RE-Zn 계)이 있다. 이 합금은 가격이 비교적 저렴하고 우수한 크리프 저항성을 가진다 [28]. 다음으로는 Dead Sea Magnesium과 Volkswagen AG에서 개발한 MRI 시리즈 중에서 사형주조용 합금인 MRI-201S와 MRI-202S가 있다[29]. 이 합금들은 T6 조건에서 250~300°C까지 우수한 기계적 특성과 크리프 저항성을 나타낸다. 뿐만 아니라 주조성, 용접성, 치수 안정성 및 부식저항성 면에도 우수한 특성을 나타낸다. 이 합금들은 WE43 합금에 비교하여 저렴하고 ZE41에 비교하여 우수한 강도와 크리프 저항성을 나타낸다. MRI 시리즈 외에도 호주의 CSIRO사와 Advanced Magnesium Technologies사에서 자동차 엔진의 crankcase에 적용하기 위해 개발한 AM-SC1이 있다[30].

## 4. 결 론

지속적인 유가상승과 화석연료의 고갈 및 이산화탄소 배출에 의한 지구온난화의 문제에 직면해있는 지금 자동차 경량화는 전세계적으로 집중되어왔다. 이 가운데 자동차 부품으로써의 Mg 합금의 적용은 국제적으로 큰 관심을 받고 있다. 특히 엔진진블록이나 트랜스미션케이스 등과 같은 고온에 노출되는 동력

전달계 부품에 우수한 고온특성과 가격 경쟁력을 지닌 Mg 합금을 적용하게 되면 향후 자동차 배기가스 배출을 감소할 수 있고 또한 연료저감의 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

현재 이를 위해 고온에서의 우수한 기계적 특성을 가질 뿐만 아니라 주조성 및 부식저항성, 가격경쟁력 면에서 적절한 수준을 갖춘 합금을 개발하는 연구가 활발하게 진행 중에 있다. 앞으로 자동차 외에 항공기 분야에서도 적용이 증가할 전망이다이며 따라서 이 분야에 대한 지속적인 연구와 투자가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- [1] B. L. Mordike and T. Ebert: Mater. Sci. Eng., "Magnesium Properties-applications -potential", A302 (2001) 37-45.
- [2] W. Ha et al. : J. All. Com., "Effects of cover gases on melt protection of Mg alloys", 422 (2006) 208-213.
- [3] H. Friedrich and S. Schumann: J. Mater. Proc. Tech., "Research for a "new age of magnesium" in the automotive industry", 117 (2001) 276-281.
- [4] Xinghao Du and Erlin Zhang: Materials Letters, "Microstructure and mechanical behaviour of semi-solid die-casting AZ91D magnesium alloy", 61 (2007) 2333-2337.
- [5] G. Ben-Hamu et al.: Journal of Alloys and Compounds The relation between microstructure and corrosion behavior of Mg-Y-RE-Zr alloys431 (2007) 269-276
- [6] B. L. Mordike: Mater. Sci. Eng., "Creep-resistant magnesium alloys", A324 (2002) 103-112.
- [7] B. Bronfin et al.: Mater. Sci. Eng., "Preparation and solidification features of AS21 magnesium alloy", A302 (2001) 46-50.
- [8] V. V. Agalakov: Proceedings of the 6th International Conference Magnesium Alloys and Their Applications, "Development of the New Creep Resistant Alloy AS31", (2005) 18-24.
- [9] E. Evangelista et al.: Mater. Sci. Eng., "High-temperature behaviour of as die-cast and heat treated Mg-Al-Si AS21X magnesium alloy", A 387-389 (2004) 41-45.
- [10] Huang Deming et al.: Materials Letters, "Indentation creep behavior of AE42 and Ca-containing AE41 alloys", 61 (2007) 1015-1019.
- [11] I. J. Polmear: Light Alloys, "Metallurgy of Light Metals, 3rd addition", Arnold, London (2007).
- [12] G. Pettersen: Mater. Sci. Eng., "Microstructure of a pressure die cast magnesium 4wt.% aluminium alloy modified with rare earth additions", A207 (1996) 115-120.

- [13] A. Kielbus: *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, "Microstructure of AE44 magnesium alloy before and after hot-chamber die casting", 20 (2007) 459-462.
- [14] R. Ninomiya et al.: *Acta Metall. Mater.*, "Improved heat resistance of Mg-Al alloys by the Ca addition", 43 (2007) 669-674.
- [15] L. Han et al.: *Materials Letters*, "Effect of Ca additions on microstructure and microhardness of an as-cast Mg-5.0 wt.% Al alloy", 62 (2008) 381-384.
- [16] B. Jing et al.: *Scripta Mater.* "Effect of extrusion on microstructures and mechanical and creep properties of Mg-Al-Sr and Mg-Al-Sr-Ca alloys", 55 (2006) 1163-1166.
- [17] M. Aljarrah et al.: *Sci. Tech. Adv. Mater.*, "Microstructural characterization of Mg-Al-Sr alloys", 8 (2007) 237-248.
- [18] K. Seiichi et al.: *Honda R&D Tech. Rev.*, "Development of Lightweight Oil Pans Made of a Heat-Resistant Magnesium Alloy", 12 (2000) 167-174.
- [19] E. Aghion et al.: *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, "Newly developed magnesium alloys for powertrain applications", 55 (2003) 30-33.
- [20] C. Zhang et al.: *Magnesium Technology 2006*, "Microsegregation and Microstructure in Directionally Solidified Mg4Al, Mg5Al3Ca and AXJ 530 alloys", (2006) 45-50.
- [21] T. Abbott et al.: *Magnesium Technology 2006*, "AM-lite: a new magnesium diecasting alloy for decorative applications", (2006) 481-486.
- [22] M. A. Gibson et al.: *Magnesium Technology 2006*, "AM-HP2: A new magnesium alloy with improved diecastability and creep strength for powertrain applications", (2006) 327-332.
- [23] S. K. Kim et al.: "CaO Added Magnesium and Magnesium Alloys and Their Manufacturing Method Thereof", KR Patent 2005-0016143 (2005).
- [24] H. H. Jo et al.: "SrO Added Magnesium and Magnesium Alloys and Their Manufacturing Method Thereof", KR Patent 2007-0007012 (2007).
- [25] S. H. Ha: Master Thesis, Sungkyunkwan University, Seoul (2006).
- [26] C. Sanchez et al.: *Mater. Sci. Eng.*, "Elevated temperature behaviour of rapidly solidified magnesium alloys containing rare earths". 221 (1996) 48-57.
- [27] M. O. Pekgulyuz and A. A. Kaya: *Adv. Eng. Mater.* 5, No. 12 (2003) 866.
- [28] G. Song and D. StJohn: *Journal of Light Metals*, "The effect of zirconium grain refinement on the corrosion behaviour of magnesium-rare earth alloy MEZ", 2 (2002) 1-16.
- [29] A. P. Druschitz et al.: *Light Metals for the Automotive Industry*, "Evaluation of Structural and High-Temperature Magnesium Alloys", SAE 2002 World Congress Detroit, Michigan (2002).
- [30] C. Bettles et al.: "AMC-SC1: A New Magnesium Alloy Suitable for Powertrain Applications", SAE 2003 World Congress & Exhibition Technical Papers, 2003-01-1365.