

고온용 마그네슘합금의 개발 현황 및 응용

김경현, 손근용 | 한국기계연구원

1. 서론

최근의 산업발달에 따라 자동차, 항공기 등의 수송기기 분야는 점차 경량화, 고성능화를 추구하고 있다. 또한, 증가되는 환경 문제와 화석 연료의 고갈에 따라 국제적으로 자동차 배기가스의 규제가 심화되고 있으며, 이에 따라 미국, 일본 및 유럽 등에서는 하이브리드 연료전지 자동차를 비롯한 고연비 경량차의 개발을 진행하고 있다.

마그네슘은 비중이 1.74로서 알루미늄(비중 2.70)보다 35%이상 가볍고 강도 및 굽힘 탄성률이 우수하여 자동차 및 항공기 등의 부품으로 사용되어 왔으며 최근 그 사용량이 급격히 증가하고 있다. 1993년 이후 지난 10여년간 미국, 일본 및 유럽 등에서는 마그네슘 합금의 사용량이 매년 12%이상 증가되어 왔으며, 향후 그 사용량이 계속 증가될 것으로 예측되고 있다^[1].

마그네슘합금의 주요 적용 분야는 자동차 부품을 비롯하여, 휴대용전자부품, 항공기 및 스포츠·레저용품에 이르기까지 산업 전반에 걸쳐 매우 다양하다. 현재 사용되고 있는 마그네슘 합금 중에서 Mg-Al계 다이캐스팅용 합금인 AZ91D는 다른 다이캐스팅용 마그네슘합금에 비해 강도가 높고, 가격이 싸며, 주조성이 좋기 때문에 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 이 합금은 고온 특성, 특히 크리프 저항성이 낮아 자동차의 트랜스미션케이스 등의 동력 전달계 부품과 같이 높은 온도(>150°C)에 노출되는 부품에는 사용하기가 어려운 단점이 있다^{[2],[3]}. 더욱이, 항공기의 트랜스미션케이스 등은 보다 높은 온도(>200°C)에서 사용되기 때문에 내열 특성이 우수한 마그네슘합금의 개발이 필수적으로 요구되고 있으며, 국내외적으로 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 본 논문에서는 내열 마그네슘합금의 최근 연구개발 동향과 적용 현황 및 전망에 대해 기술하고자 한다.

2. 내열마그네슘합금의 구분 및 적용 분야

내열 마그네슘합금은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 하나는 열처리를 하지 않고 사용하는 다이캐스팅용 내열합금이고, 다른 하나는 열처리를 이용하여 기지 내에 제 2상을 석출시킴으로써 고온특성을 향상시키는 사형주조용 내열합금이다. 각각의 합금은 그 적용대상부품 뿐 아니라 사용 온도가 다르고, 합

금 설계 및 제조 방식도 차이가 크기 때문에 구분하여 기술하고자 한다.

2.1 다이캐스팅용 내열 합금

다이캐스팅용 합금은 제조 공정의 특성상 용탕이 금형의 게이트(gate)를 통과하여 제품을 이루는 캐비티(cavity)내로 진입할 때 와류가 많이 발생하고, 따라서 제품에 많은 기공을 내포하게 된다. 이러한 잔존 기공은 후에 용체화처리를 포함한 열처리를 할 경우 제품 표면에 블리스터(blisters)를 일으키는 요인이 되기 때문에 통상적으로 열처리를 하지 않는다. 따라서, 다이캐스팅용 내열합금은 열처리를 하지 않고 바로 주조 상태에서 적용을 하므로, 열처리를 거치는 석출경화형 내열 마그네슘합금에 비해 고온 특성이 낮으며, 200°C 이하의 부품에만 적용이 되고 있다.

다이캐스팅용 내열 합금의 주요 적용 대상 분야는 자동차이다. 대상 부품은 내열 특성이 요구되는 동력전달계 부품(powertrain component)으로서 그림 1에 나타낸 바와 같이 부품의 사용 조건에 따라 차이가 있으나, 자동변속기케이스(auto transmission case)와 엔진블록(engine block)이 주요 대상 부품이다. 수동 변속기의 경우 구동 온도가 비교적 낮기 때문에 폭스바겐사 등에서 AZ91D합금을 이용하여 일부 적용되고 있으나, 자동 변속기의 경우에는 구동 온도가 150°C 이상으로 더 높을 뿐 만 아니라, 엔진 블록의 경우 190~200°C에 노출이 되므로 이와 같은 고온에서 강도 및 내크리프 특성이 우수한 다이캐스팅 합금이 사용되어야 한다.

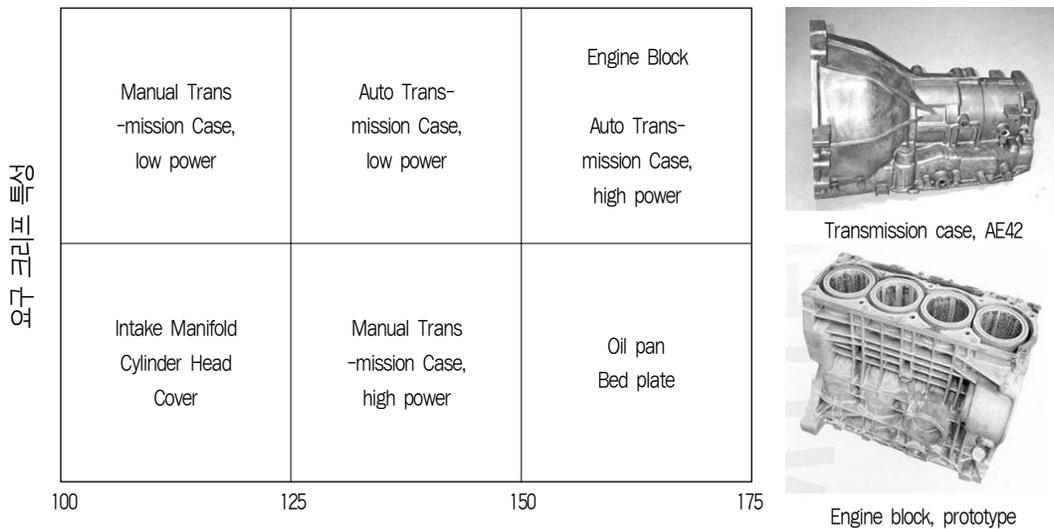


그림 1. 다이캐스팅용 내열마그네슘합금의 적용 대상 부품 및 요구 특성^[4]

2.2 사형주조용 내열 합금

사형주조용 합금은 다이캐스팅합금에 비해 용탕의 와류가 크지 않으며, 상대적으로 높은 유동성을 요구하지 않으므로, 다이캐스팅 부품에 비해 결함이 적고 건전한 주조품을 얻을 수 있다. 따라서, Y, Ag, Th, Nd 등의 원소를 첨가하여 열처리를 이용한 시효경화합금이 주로 개발되어 적용되고 있고^{[5]-[6]}, 가용

온도 범위도 200°C 이상으로 다이캐스팅 합금에 비해 현저히 높다.

열처리형 내열 마그네슘합금의 주요 적용 대상은 항공기이다. 최근 헬리콥터 및 항공기의 성능향상 및 경량화로 인하여 부품들이 보다 가혹한 조건에서도 견디기 위해 고온 및 내식성이 우수한 마그네슘 합금들이 요구되고 있다. 이들 열처리형 내열마그네슘합금은, 그림 2에 나타난 바와 같이 헬리콥터의 기어박스하우징 및 커버, 발전기 하우징, 엔진커버 및 부품 등에 주로 적용되고 있으며, 경주용 자동차의 엔진 블록이나 피스톤 등에도 일부 적용되고 있다^[7]. 실제로 영국 MEL사에서 최근 WE43 및 WE54 합금을 개발하여 전세계 항공기 및 특수방산부품업체에 독점 공급하고 있다.

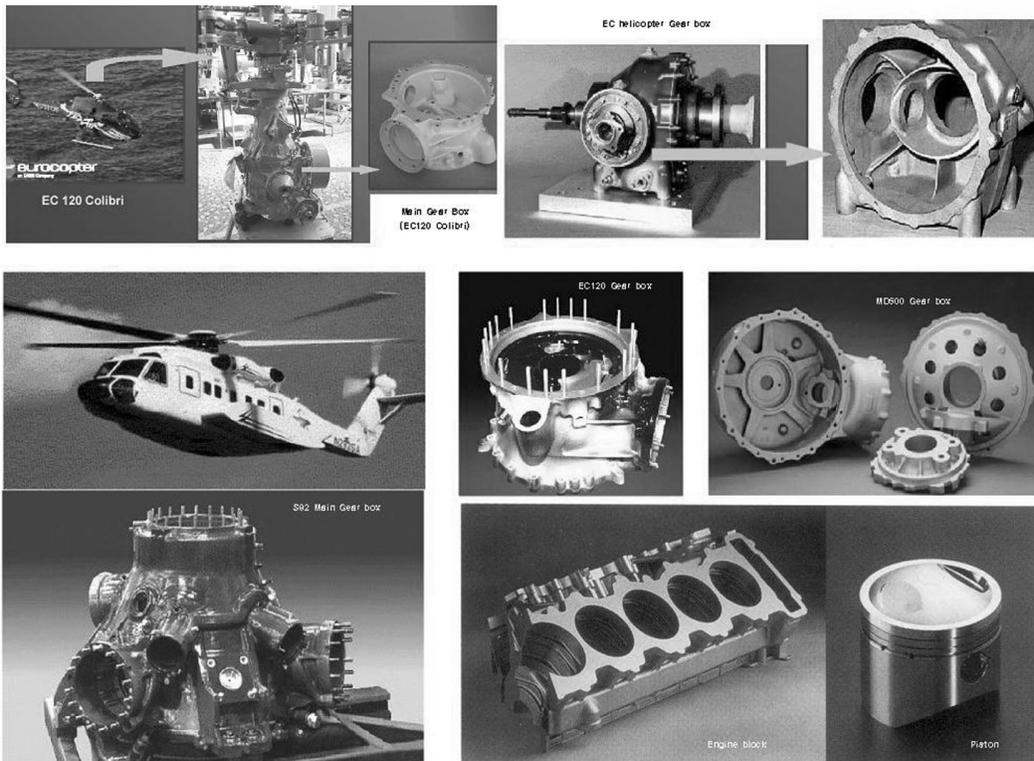


그림 2. 사형주조용 시효경화형 내열마그네슘합금의 적용 부품 - 헬리콥터용 기어박스 및 경주용 자동차의 엔진블록 및 피스톤^[7]

3. 기술개발 현황

내열마그네슘합금 개발에 대한 연구는 자동차부품에 적용할 목적으로 진행되고 있는 다이캐스팅용 합금과, 헬리콥터의 기어박스에 사용되는 열처리용 사형주조 내열마그네슘합금으로 나눌 수 있으며, 그림 3에 합금 개발 추이를 나타내었다. 다이캐스팅합금의 경우 Mg-Al계 합금을 대부분 기본 조성으로 하고, 이에 Si, 희토류 원소(rare earths), Ca 혹은 Sr 등을 첨가하여 새로운 합금을 개발하고 있다^{[8]-[10]}. 대부분의

다이캐스팅합금은 Al을 주합금원소로 함유하고 있는데, 그 이유는 강도와 용탕의 유동성을 향상시키기 때문이다. 그러나, Al을 많이 함유하게 되면, 고온에서의 내크리프 특성이 감소하는 단점이 있다.

사형주조를 이용한 열처리형 합금은 알루미늄과 마찬가지로 T6 열처리를 통해 마그네슘기지내에 미세한 제 2상을 석출시킴으로써 고온강도 및 내크리프 특성을 향상시키는 합금이며, Ag, Th, Y, Nd 등의 합금원소를 첨가하여 새로운 합금을 개발하고 있다. 본 장에서는 각각의 내열 합금에 대한 합금개발 현황과 특성을 간단히 소개하고자 한다.

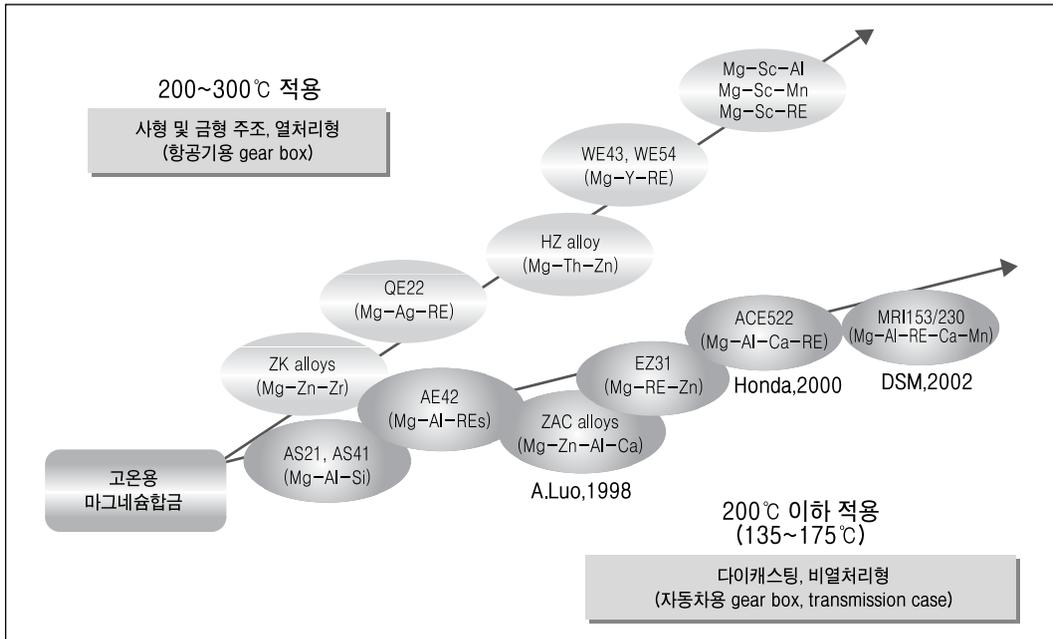


그림 3. 내열마그네슘합금의 개발 추이

3.1 다이캐스팅용 내열 합금

3.1.1 합금 설계

우수한 다이캐스팅용 내열마그네슘합금 개발을 위해서는 생산성 측면과 고온 크리프특성을 포함한 기계적 특성, 그리고 내식성 및 비용적인 측면을 고려해야 한다. 먼저 다이캐스팅 합금에서 내열특성, 특히 내크리프 특성을 향상시키기 위해서는 크리프 변형 메커니즘에 대한 이해가 필요하다. 현재 제시되고 있는 Mg-Al계 마그네슘합금의 크리프 변형 메커니즘은 원자의 확산에 의해 제어되는 전위의 climb이 크리프 변형의 윗속단계로 작용한다는 이론과 결정립계의 슬립(grain boundary sliding)거동으로 보고되고 있다^{[11]-[12]}. 이와 함께 고려해야 할 사항은 결정립계에 생성되어 있는 제 2상의 안정성이다. 특히 크리프 변형 중에 발생하는 전위의 이동과 고착(pinning)등은 다이캐스팅합금에서는 결정립계에 생성되어 있는 제 2상의 특성과 밀접하게 관계되어 있으며, 따라서 결정립계에 발생하는 제 2상의 생성 특성 및 분포도 등을 제어하는 것이 중요하다. AZ91D합금의 내크리프 특성이 취약한 이유 중의 하나는 응고 중에 생성된 $Mg_{17}Al_{12}$ 상의 불안정성에 있다. 특히, 다이캐스팅 합금은 결정립크기가 제품의 두께에 따라 다

르지만 약 10~30 μm 정도로 매우 작기 때문에 안정한 제 2상을 결정립계에 정출시켜 결정립계를 강화시키는 것이 중요하다. 따라서, 이를 정리하면 다음과 같다^[13].

- 알루미늄이 주 합금원소로 첨가되는 경우, 알루미늄과 친화력이 강한 원소를 선택, 반응시켜 제거함으로써 내크리프 특성을 감소시키는 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 상의 생성을 억제
- 결정립계에 고온에서 안정한 제 2상을 정출시켜 결정립계를 강화
- 마그네슘 기지내에 미세하고 안정한 정출물을 분포시켜 전위의 이동을 방해하도록 기지를 강화

한편, 다이캐스팅의 가장 중요한 장점 중의 하나는 높은 생산성인데, 이 생산성에 중요한 영향을 주는 요인은 용탕의 유동성, 금형과의 점착성, 열간 균열 등의 결함 발생문제 등이 있다. 따라서, 내열특성을 향상시키는 방안 뿐 만 아니라, 이와 같은 생산성에 영향을 주는 요소도 같이 고려해야 우수한 합금을 개발할 수 있다.

3.1.2 개발현황 및 특성

3.1.2.1 국내외 합금 개발 현황

국외의 경우 내열합금개발과 관련한 연구는 GM을 비롯하여 Honda 자동차, DSM, Noranda Magnesium 등에서 연구개발이 이루어지고 있는데, 최근의 연구 결과를 보면 합금개발에 관한 결과는 대부분 1998년 이후 보고되고 있으며, 최근 수 년 사이에 연구가 활발히 이루어지고 있다. 최근에 개발된 합금을 그룹 별로 살펴보면 다음과 같다.

- GM - ZAC, AXJ합금
- Honda 자동차 - ACM522 합금
- DSM (Dead Sea Magnesium Co., Israel) - MRI series
- Noranda Magnesium - AJ합금
- JSW (Japanese Steel & Works) - Semi-solid 성형용 high Ca합금

위의 그룹이외에도 마그네슘합금의 내열 특성과 관련한 연구가 Hydro Magnesium사 및 호주의 CISRO, 미시간대학 및 이스라엘의 Ben Gurion 대학 등이 기업과 연계하여 활발히 진행되고 있다.

국내에서는 한국기계연구원, 서울대, 포항공대 등의 연구기관 및 대학에서 내열 마그네슘합금개발에 관한 연구를 수행하고 있다. 서울대의 경우 현재 이스라엘의 Ben Gurion 대학과 함께 내열 합금 개발에 대한 국제공동 연구를 수행하고 있고, 포항공대에서도 주조용 합금을 개발하기 위한 연구를 시도하고 있으며, 2003년 PSTAM학회에서 연구 결과를 소개한 바 있다. 개발합금은 MX1, MX2 로 표시하여 기존 합금과 비교하였는데^[14], 특성이 보다 나은 MX1합금의 경우 내열특성이 AE42합금과 유사하여 아직까지 150°C 이상의 온도에서 적용하기에는 어려울 것으로 판단되고, 보다 우수한 내열특성을 가지는 합금의 개발에 대한 연구가 필요한 실정이다.

3.1.2.2 개발 합금의 종류 및 특성

현재 알려지고 있는 다이캐스팅용 내열합금은 대부분 다른 상용 다이캐스팅합금과 마찬가지로 알루미늄을 주 합금 원소로 포함하고 있다. 그 주된 이유는 알루미늄이 용탕의 유동성을 향상시키기 때문이다. 그러나 또한 $Mg_{17}Al_{12}$ 상을 형성시킴으로써 내열특성을 감소시키는데, 이를 극복하기 위해 알루미늄과 친화력이 강한 미시메탈 등의 희토류 원소 (rare earths, RE), Ca 및 Sr 등의 원소를 첨가하여, 기지내에서 Al 화합물의 형태로 정출시켜 $Mg_{17}Al_{12}$ 의 생성을 억제시킴으로써 그 효과를 감소시키는 방향으로 합금 개발이 이루어지고 있다. 현재 개발된 합금의 특성을 요약하면 다음과 같으며, 열거한 주요 개발합금의 150°C에서의 기계적 특성을 표 1에 나타내었고, 내크리프 특성과 주조성 및 가격을 그림 4에 비교하였다.

(1) Mg-Al-X 계 합금

① Mg-Al-RE 합금

- 1972년에 Al함량이 4%이하인 경우 미쉬메탈을 Mg-Al합금에 1-2% 첨가시 내크리프 특성이 증가한다는 것이 보고되었^[15], 이를 근거로 AE-series 합금(AE41, AE42 및 AE21)이 개발되었음.
- AE42합금은 범용으로 사용되는 AZ91에 비해 내크리프 특성은 우수하나, 약 10%정도 비싸고, powertrain component로 사용하기에는 내열 특성이 취약한 단점이 있음.

② Mg-Al-Si 합금

Mg₂Si 정출상을 이용한 합금으로서 AS21 혹은 AS41 등의 합금이 있음. 이 합금들은 AZ91D 혹은 AM50에 비해 내크리프성이 다소 높으나, 내식성이 약한 단점이 있음. 최근 Hydro magnesium 사에서 AS21합금에 0.15%RE(Ce-rich Misch Metal)를 첨가하여 AS21X를 개발하였으나^[16], 내크리프성은 그다지 우수하지 못한 편임.

③ Mg-Al-Ca 합금계

- Mg-Al합금에 Ca를 첨가하면 내크리프 특성이 크게 개선되는 것으로 보고 되고 있으나, 열간균열 및 금형과의 점착성을 증대시켜 생산성을 감소시키는 문제가 있음. 폭스바겐에서 AZ81에 Ca를 1% 첨가하여 내크리프특성이 향상된다고 하였으나, 다이캐스팅시 발생하는 die sticking 및 hot cracking 문제 때문에 적용되지 못하였음. 최근에 이 합금계는 Canada의 ITM 사에 의해 AC51합금으로 재개발되었으나^[8], 내크리프특성은 AE42에 비해 그다지 우수하지 못한 편임.
- 한편 GM에서 이 합금계에 Sr을 첨가하여 AXJ 합금을 개발하였는데, 이 합금은 AE42에 비해 약 25%정도 내크리프 특성이 우수한 것으로 보고됨^[17].

④ Mg-Al-Sr 합금

Canada의 Noranda Magnesium Co. 에 의해 개발된 합금으로 AJ51x (5Al-1.2Sr) 및 AJ52x (5Al-1.8Sr)가 있음^[18]. 이 합금은 AE42에 있는 rare earth 원소를 Sr로 대체시킴으로써 내크리프특성을 향상시키고자 한 것으로, 내열특성은 우수하나 주조성이 낮아 sound filling을 위해 주조 온도를 올려야 하는 단점이 있음.

(2) Mg-Al-X-Y계 복합합금

① Mg-Al-Ca-Sr 합금

GM R&D center에서 개발한 합금으로 AM50 base에 1.7-3.3%Ca 및 0.2%Sr을 첨가한 합금임. 이 합금은 크리프 특성이 매우 우수하나, 주조성이 나쁘고, 열간 균열이 쉽게 발생한다는 것이 단점임.

② Mg-Al-Ca-RE 합금

Honda에서 ACM522 (or ACE522)로 개발한 합금으로 Ca 및 Rare earth를 첨가하여 AE42에 비해 내크리프특성이 우수하고, 내열 및 내식특성이 A384합금과 유사한 것으로 발표^[19]하였으나, 단가가 AE42에 비해 비싼 것이 단점임.

③ Mg-Al-RE-Ca-Mn (MRI -series)합금

Dead Sea Magnesium Co. 와 Volkswagen AG가 공동으로 개발한 합금으로서 MRI 153M 과 MRI230D의 두 종류가 있음^[20]. MRI153M합금은 베릴륨을 함유하지 않는 저가의 합금으로 150°C까지 사용할 수 있음. MRI 230D는 190°C까지 적용가능한 다이캐스팅합금으로 현재 보고 되고 있는 합금 중 내크리프 특성이 우수하고 주조성이 좋아 비교적 상용화의 가능성이 가장 높은 합금이라 할 수 있음.

(3) 기타합금 (Al이 주합금원소가 아닌 합금계)

① Mg-RE-Zn 합금 (EZ31, EZ33 합금)

MEL사에서 개발한 합금으로 Al을 첨가하지 않고, RE earth를 주합금원소로 사용하여 내크리프특성을 향상시킨 합금임^[21]. 그러나, rare earth의 함량이 높은 관계로 AE42에 비해 단가가 높다는 단점이 있음.

② Mg-Zn-Al-Ca 합금

Mg-Al-Ca합금에서 발생하는 주조성의 문제를 Zn를 8% 첨가하여 개선한 합금으로^[8], 주조성이 AZ91D와 유사하고, 기계적 특성 및 내식성이 우수하다고 알려져 있으나, 공정조직의 온도가 낮아 (385°C), 실용합금으로서 AE42에 비해 내크리프 특성이 그다지 우수하지 못하다는 단점이 있음.

표 1. 주요 다이캐스팅용 내열합금의 고온 인장 특성 비교^{[13],[16]-[21]}

특 성		AZ91D	AE42	AS21	AX51	A52x	ACE522	EZ31	MRI153	MRI230	380Al ²
고온 인장 특성, 150°C	YS (MPa)	105	100	87	102	108	138	78	135	150	149
	UTS (MPa)	160	160	120	161	164	175	-	190	205	255
	El.(%)	18	22	27	7	14	7	8	17	16	6
내열특성, 상대치 ¹		1	8	7	10	9	10	9	8	10	>10
내식성, 상대치 ¹		9	8	8	8	8	9	-	10	8	-
주조성, 상대치 ¹		10	7	9	5	6	4	6	9	6	10
비 고											Al합금

¹ Max value: 10으로 기준함

² 현재 자동차의 트랜스미션케이스 사용되고 있는 알루미늄합금 소재임

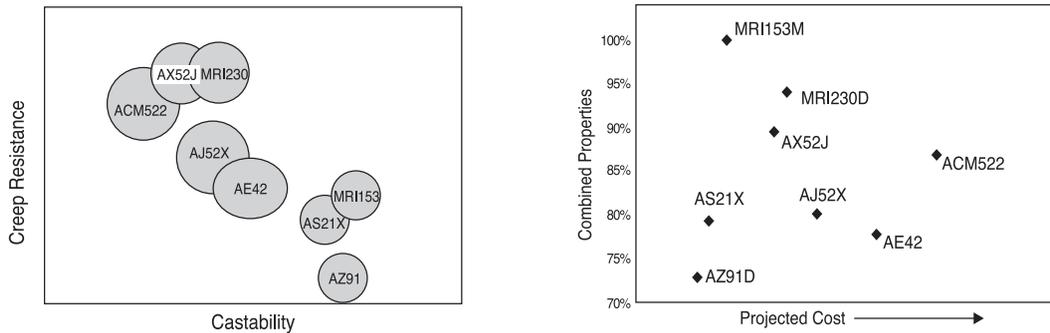


그림 4. 다이캐스팅용 내열합금의 크리프 특성과 주조성 및 가격의 비교^[20].

3.2 사형주조용 내열 합금

3.2.1 합금 설계

사형주조형 합금은 열처리에 의해 기지내에 제 2상을 석출시켜 고온강도 및 내열특성을 향상시키는 합금이다. 합금원소는 석출이 일어날 수 있도록 마그네슘기지내의 고용도가 온도에 따라 크게 변하는 원소면 가능하나, 주 사용 온도가 200°C 이상의 고온이므로, 고온에서도 성장이 잘 일어나지 않고 안정한 석출물이면 좋다. 첨가 원소는 Ag, Th, Y, Nd 등이 주 합금원소이나, 최근에는 Sc를 첨가하여 고온특성을 크게 향상시킨 결과를 발표하고 있다. 주 적용 분야가 항공기용 부품이므로 소재의 단가보다도 성능에 더 비중을 두어 개발을 하고 있다.

3.2.2 개발현황 및 특성

3.2.2.1 국내외 합금 개발 현황

열처리를 이용한 항공기용 내열마그네슘합금 분야에서는 영국의 Magnesium Elektron, Ltd (MEL)사 및 호주의 CSIRO, 그리고 노르웨이의 Hydro Magnesium 사가 주도적으로 연구를 수행하고 있으며, 이외 독일 등 선진 각국에서도 항공기, Missile, 특수방산 분야 등에 적용할 목적으로 250~300°C에서도 사용 가능한, 고온강도와 내식이 우수한 마그네슘합금 개발에 대한 연구를 활발히 진행하고 있다.

기존의 사형주조용 내열마그네슘합금은 고가의 Ag가 20-30%, 방사성물질인 Th이 1.0% 가 첨가되어 문제시되고 있으며, 또한 사용온도도 200°C로 낮으므로 영국의 Magnesium Elektron, Ltd (MEL)사에서는 Ag, Th원소대신 비교적 값이 싼 Nd, Y 등의 원소와 미량의 Gd, Dy, Ce 등의 희토류원소(Rare Earth Metal)로 대체하여 300°C에서도 사용 가능한 WE43 및 WE54 합금을 개발, 적용하고 있다. 또한 WE43합금과 소재특성이 유사하면서 가격이 보다 저렴한 Elektron 21 합금을 개발하여^[22] 전 세계 항공기용 주조 부품 회사에 독점 공급하고 있다.

한편, 최근 독일 Clausthal 대학에서는 350-400°C온도에서 사용되어질 수 있는 초고온용 Mg-Sc-Mn, Mg-Sc-Ca계 마그네슘합금을 개발하였고, 현재 그 제조기술, 석출상 규명 및 특성분석 등의 연구를 수행하고 있지만 초고가의 Sc 함유로 적용에는 아직 문제가 되고 있다^[23].

국내에서는 한국기계연구원이 “마그네슘합금에 의한 항공기용 부품 제조기술 개발”에 관하여 1993년

부터 5년간 러시아항공재료연구소(VIAM)와 과학기술부 국제공동연구사업으로서 고강도 마그네슘합금 제조기술과 헬리콥터부품 제조기술을 개발하면서 일부 고온용 마그네슘합금에 대하여 실험한 바 있다. 러시아 Spec.인 고온강도 마그네슘합금 ML10(Mg-Nd-Zn) 및 ML19(Mg-Y-Nd)합금에 대하여 VIAM과 공동으로 미세조직 및 고온특성을 분석하였다^[24]. ML10합금은 사용온도가 200°C 이고 ML19 마그네슘합금은 2%Y, 2%Nd, 0.4%Zn를 함유한 것으로 250°C까지 사용 가능한 재료이며 영국 MEL이 개발한 WE43합금과는 다른 합금재료이다. VIAM 연구소는 과거 러시아항공재료개발의 핵심적인 역할을 하였으며 MIG19 전투기의 경우 재료의 96%를 VIAM에서 직접 개발하여 러시아 제조업체로 하여금 품질인증까지 해 주는 종합 항공재료 전문 연구소 역할을 해 왔었다.

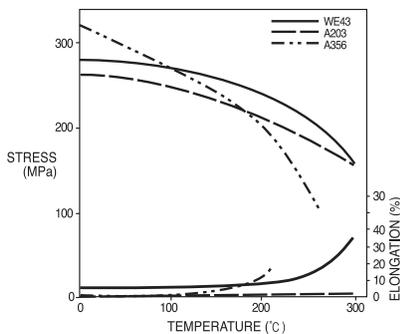
한편, 국내 기업에서는 현대자동차에서 조성이 3-10wt%Zn, 0.5-4.0%Ag, 0.1-4.0%Si, 0.1-2.0%의 Ca를 함유하는 고강도 내열마그네슘 합금을 개발하였는데^[25] 이 합금은 은(Ag)을 다량 함유하고 있고, 열처리를 통한 석출현상을 이용하여 고온강도를 향상시킨 합금이며, 아연을 다량함유하고 있어 가용 온도범위가 다소 낮은 단점이 있다.

3.2.2.2 개발 합금의 종류 및 특성

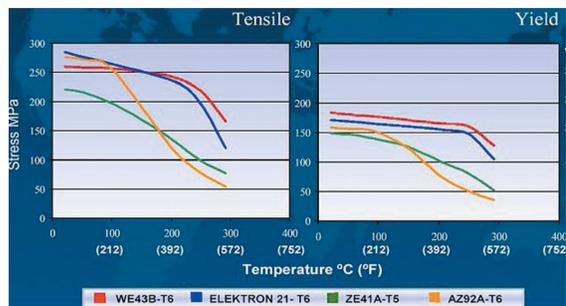
(1) 고온 특성

사형주조용 내열 마그네슘합금은 알루미늄합금 무게의 67% 정도 밖에 되지 않지만 그림 5(a)와 같이 Y를 4% Nd를 3% 함유하고 있는 WE43합금의 경우, 250°C에서의 고온인장강도가 225MPa로서 고온용 알루미늄합금인 203합금의 185MPa보다 훨씬 우수하다. 알루미늄 주조합금으로 가장 많이 사용되고 있는 A356합금은 100°C 까지는 강도가 우수하나 그 이상 온도부터는 급격히 저하하여 250°C에서는 110MPa밖에 되지 않아 최근 개발된 WE43 마그네슘합금에 비하여 강도가 급격히 떨어지고 있다.

한편, 이 합금을 다른 마그네슘합금과 비교해 보면, 그림 5(b)와 같이 WE43B 합금의 경우 250°C까지 우수한 고온강도를 유지하다가 그 이상 온도부터는 서서히 떨어지는데, AZ92A 마그네슘합금은 상온부터 100°C까지는 270MPa의 우수한 강도를 유지하나 그 이상 온도부터 급격히 떨어져 250°C에서는 70MPa에도 지나지 않는다. 또한 4% Zn와 1% rare earth 원소가 첨가된 ZE41A 합금의 경우 상온강도는 220MPa로 다소 떨어지나 200°C에서의 고온강도는 AZ92A합금보다 우수하다.



(a) 알루미늄합금과의 비교



(b) 마그네슘합금과의 비교

그림 5. WE43 내열마그네슘합금의 고온인장 특성 비교^[26]

그림 6은 마그네슘합금별 200°C, 100h 크리프 특성을 비교 시험한 것으로서 고온용 마그네슘합금인 WE54 및 WE43합금의 크리프강도가 165MPa 및 161MPa로서 AZ81합금의 12MPa보다 13.5배나 우수한 크리프강도를 가지고 있다. 또한 2% Ag와 2% 희토류원소가 첨가된 QE22합금은 통상 200°C 까지 사용 가능하다고 하지만 200°C, 100h 크리프 특성이 88MPa로서 WE합금보다는 크게 떨어지고 ZE41이나 AZ81보다는 우수한 크리프강도를 보이고 있다.

최근에 독일 Clausthal 대학에서 개발한 고온용 마그네슘합금은 Sc 원소를 첨가한 Mg-Sc-Al, Mg-Sc-Mn 및 Mg-Sc-RE 합금을 개발하였는데 이들 합금은 300°C에서 사용되는 WE43 및 WE54합금보다 훨씬 높은 350-400°C온도에서 사용되어질 수 있는 합금이다. 그림 7은 350°C온도와 30MPa 응력에서 변형거동을 실험한 것으로서 Mg-Sc-Mn합금은 WE43합금보다 100배 정도 고온에서 안정한 합금이라는 것을 알 수가 있다.

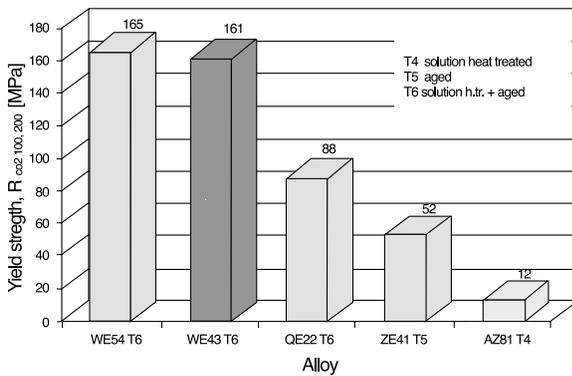


그림 6. 마그네슘합금별 크리프 특성 비교^[26]

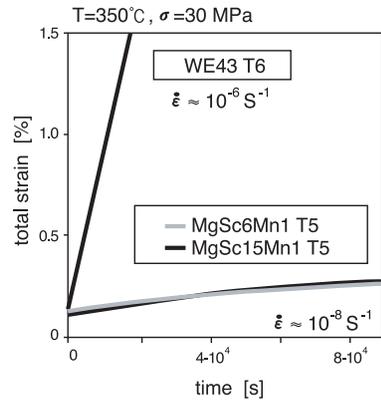


그림 7. 최근에 독일 Clausthal 대학에서 개발한 고온용 마그네슘합금

(2) 내식 특성

WE43 마그네슘합금의 내식성을 그림 8에 다른 합금과 비교하여 나타내었다. 고온용 마그네슘합금인 WE43합금의 부식율은 20mpy로서 A356 및 고온용 알루미늄합금인 203과 가장 많이 사용되는 AZ31E 합금과 유사하게 탁월한 내식성을 보이고 있으며 ZE41이나 AZ91C 마그네슘합금보다 낮아 내식성이 우수하다. WE43합금과 AZ91C합금 시험편을 연마하여 상온의 3.5% NaCl용액에 17일간 유지시킨 후 표면을 관찰한 결과 그림 9에 나타낸 것과 같이 WE43합금의 표면상태가 훨씬 양호하여 내식성이 우수하다는 것을 알 수 있다.

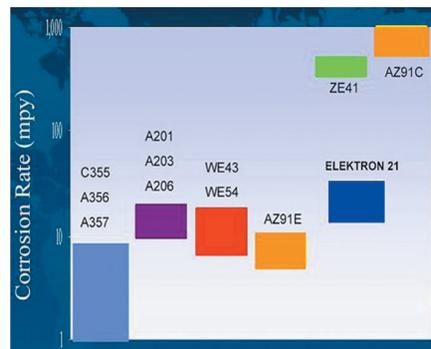


그림 8. 마그네슘합금 종류별 부식특성 비교

여기서 Mg(OH)₂막 내부에 Y, Nd의 화합물이 존재하는데, 이 원소들이 마그네슘합금의 내식성 향상에 중요한 역할을 한다. 즉, Mg(OH)₂와 MgH₂막의 안정성을 향상시키는 역할을 Y 및 희토류 원소가 하

로 이들 원소가 마그네슘합금의 부식성 향상에 중요하다고 생각되어진다.

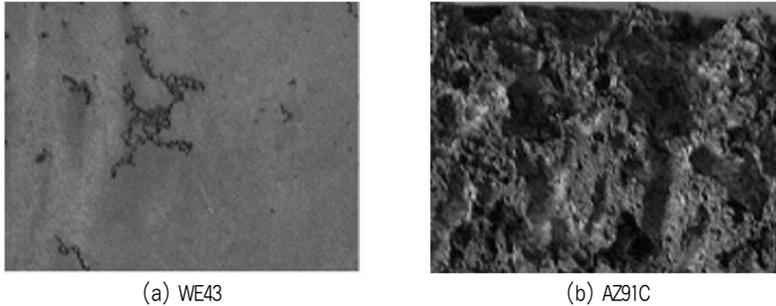


그림 9. WE43 합금과 AZ91C 합금에 대한 내식특성 비교

4. 요약 및 결론

최근의 유가 상승과 화석연료의 고갈, 이산화탄소 배출에 의한 대기오염에 따른 지구 온난화 등의 문제로 자동차의 경량화 문제는 국제적으로 중요한 이슈가 되고 있다. 현재 유럽의 폭스바겐사에서는 1리터카 (연비 100km/liter)의 개발이 완료된 상태이며, 향후 자동차 부품 중에서 약 100 kg까지 마그네슘 합금이 적용될 전망이다. 특히, 높은 내크리프 특성과 적정가격의 내열 마그네슘합금의 개발로 자동차의 트랜스미션케이스나 엔진블록 등 동력전달부품 (powertrain components)에 적용되게 되면, 현재 연간 6천만대 가까이 이상 생산이 되고 있는 자동차시장에의 파급효과가 클 뿐 아니라, 자동차 연비향상 및 연료절약에 의한 대기 오염의 감소효과를 이룰 수 있을 것이다.

자동차 뿐 아니라, 항공기 분야에서의 적용량도 증가할 것으로 예측되며, 향후 지속적인 합금개발을 통해 고성능, 고기능의 경량 내열합금을 개발함으로써, 국제적인 항공기의 성능향상에 기여할 것으로 판단되며, 지속적인 연구 개발 및 투자가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] H.I. Kaplan, "Magnesium Supply and Demand 2001", 59th Annual World Magnesium Conference, Montreal, Canada, 2002, p.1.
- [2] C. Suman, SAE Technical Paper, No. 910416, 1991.
- [3] K.Y. Sohn, J.A. Yurko, J.W. Jones, J.E. Kearns, and J.E. Allison, SAE Technical Paper, No. 980090, 1998.
- [4] H. Westingen, Presentation at KIMM, March 2004.
- [5] H. Karimzadeh, Ph.D. thesis, University of Manchester, 1985.
- [6] W. Unsworth and J.F. King, Proc. of Magnesium Technology, The Institute of Metals, London, 1987, p.25.
- [7] 영국 Magnesium Elektron Ltd (MEL) 자료

- [8] A. Luo and T. Shinoda, SAE Technical Paper No. 980086, 1998.
- [9] P. Labelle, M. Pekgulyuz, M. Lefebvre, and R. Bouchard, SAE Technical Paper No. 2002-01-0079, 2002.
- [10] K.Y. Sohn, J.W. Jones, and J.E. Allison, TMS Proc. of Magnesium Technology 2000, March 12-16, 2000, Nashville, Tennessee, p. 271.
- [11] A. Couret and D. Caillard, Acta metallurgica, vol. 33 (1985), no. 8, p.1447.
- [12] M. Dargusch, M. Hisa, C.H. Caceres and G.L. Dunlop, Proc. of Third International Magnesium Conference, Manchester, UK, 1996 p.153.
- [13] A. Luo, Magnesium Alloys 2003, Materials Science Forum, Vols 419-422 (2003), p. 57.
- [14] M.S. Yoo, Y.C. Kim, S. Ahn, and N.J. Kim, Magnesium Alloys 2003, Materials Science Forum, Vols 419-422 (2003), p.419.
- [15] G. Forester, Light Metal Age, October, 1972, p.11.
- [16] K. Pettersen, H. Westengen, J.I. Skar, M. Videm, and L.-Y. Wei, in Magnesium Alloys and Their Applications, 2000, Weinheim, p.29.
- [17] B.R. Powell, V. Rezhetz, A.A. Luo, J.J. Bommarito, and B.L. Tiwari, US patent 6,264,763, 2001.
- [18] M.O. Pekgulyuz and E. Baril, in Magnesium Technology 2001, TMS proceedings, 2001, p.119.
- [19] S. Koike, K. Washizu, S. Tanaka, T. Baba, and K. Kikawa, SAE Technical Paper No. 2000-01-1117, 2000.
- [20] Magnesium Alloys-Science, Technology and Applications, ed. by E. Aghion and D. Eliezer, The Israeli Consortium for the Development of Magnesium Technology, 2004.
- [21] I.P. Moreno, T.K. Nandy, J.W. Jones, J.E. Allison and T.M. Pollock, in Magnesium Technology 2002, TMS proceedings, 2002, p.111
- [22] P. Lyon, Magnesium Technology 2004, p.311
- [23] Stulkova, Modike, Materialwissenschaften und Werkstofftechnik, 32 (2001).
- [24] 김경현, 이정무, “항공기용 마그네슘합금부품 제조기술 개발” 연구보고서, 1997.
- [25] 박순찬, 현대자동차, 국내특허 2003-0055753, 2003, 7월.
- [26] P. Lyon, 19th European Rotorcraft Forum, 1993.



김 경 현

- 한국기계연구원 재료연구부 책임연구원
- 관심분야 : Mg, Al합금개발 및 부품제조개발
- e-mail : khkim@kmail.kimm.re.kr



손 근 용

- 한국기계연구원 재료연구부 선임연구원
- 관심분야 : Mg합금개발, 압출 및 주조기술
- e-mail : ksohn@kmail.kimm.re.kr