

마그네슘 합금 개발 동향

김도향, 한요섭, 이호인

Recent Developments in Magnesium Alloys.

D. H. Kim, Y. S. Han, H. I. Lee

1. 서론

마그네슘 합금은 밀도가 알루미늄 합금의 2/3, 철합금의 1/5 수준으로 현재까지 개발된 합금중 가장 낮은 밀도를 가지고 있으며 여타 경량재료와 비교하여 손색이 없는 비강도 및 비탄성 계수를 갖고 있다. 이외에 진동, 충격, 전자파 등에 대한 흡진성이 탁월하고 전기, 열전도도, 가공성 및 고온에서의 피로, 충격 특성이 우수하여 자동차, 항공기, 방위산업 및 일반 기계 등에 경량화 소재로서 요구되는 여러 우수한 특성을 지니고 있다. 이러한 마그네슘 합금은 두차례의 세계대전을 치르면서 사용량이 급증하였으나, 그 후 최근 수년전까지는 고강도 알루미늄합금 개발 등 여타 경량재료에 밀려 사용량이 거의 제자리에 머물고 있는 실정이었다. 그러나 최근 세계적으로 에너지 절약 및 환경 공해 규제가 대폭 강화됨에 따라 자동차, 항공기 수송 수단의 소재 경량화는 매우 긴박한 과제가 되어있다. 예를 들면 자동차 산업의 경우 평균 연료 소비 기준(CAFE) 및 배기가스 규제가 1995년경 부터 대폭 강화됨에 따라 현 자동차 무게의 약 10%이상의 경량화를 이루어야 하며 이에 최경량합금으로서의 마그네슘합금은 매우 중요한 위치를 접하게 되었다. 이에따라 최근 수년간 마그네슘합금의 사용량이 급증하고 있다. 예를 들면, 유럽지역의 경우 자동차부품으로 사용된 마그네슘합금의 양이 1980년 1,680톤에 불과하던 것이 1987년에 6,700톤, 1991년에는 11,000톤으로 예상되는 등 최근 10년사이에 경이적인 사용량의 증가를 보이고 있다. 이와 같은 마그네슘합금의 사용량 증가는 경량재료에 대한 시대적인 요구 뿐만 아니라 이에 따른 마그네슘 합금 관련 기술의

진보에 따른 것이다. 마그네슘 합금 관련 기술은 크게 합금 설계와 제조공정으로 분류 될 수 있으며, 본 기술 해설에서는 이 두 가지분야의 기술 개발 내용 및 동향과 수송분야에 응용을 소개해 보고자 한다.

2. 합금 설계 기술

2.1. 내열 마그네슘 합금

내열 마그네슘 합금으로서 처음 개발된 합금은 EK31(Mg-3RE-0.5Zn)이다. 이 합금은 그 후 아연을 함유한 4원계 합금 ZRE1(Mg-2.7Zn-5-2.25RE-0.6Zr)합금으로 대체되었으며, 주조성이 우수하여 질코늄을 함유한 대표적인 마그네슘합금이 되었다. 이에 내열성이 우수한 합금을 얻기 위해서 질코늄 첨가에 의한 합금개발에 초점이 모아졌다. 북미지역에서는 EZ33-T5라 칭해진 ZRE1은 대표적인 내열 마그네슘 합금으로 사용되어지고 있으며, 실용적으로 우수한 특성을 갖는 합금은 최근에도 계속 개발되어지고 있다. 현재 개발된 대표적인 내열 마그네슘 합금의 표준 성분 및 인장 특성을 표1에 나타내었다. ZRE1은 약 260℃까지의 온도영역에서 사용이 가능하며, 주조성도 양호하다. ZRE1합금의 희토류 금속을 토륨으로 치환하면 사용 범위가 증가하여 ZT1의 경우 약 340℃까지 사용 가능하여진다. 그러나, 토륨을 함유하는 ZT1 합금 및 MTZ계 합금의 용도는 안전상의 문제등으로 인하여 현재 감소 추세에 있다.

상기 기술한 합금은 비교적 넓은 온도 영역에서 우수한 인장강도를 가지나, Mg-RE-Zr합금의 특성은 은을 첨가하고 희토류원소 세립을 네오뎀으로

로 치환함에 의해서 본질적인 개선을 이룰 수 있다. 북미지역에서 QE22-T6라 칭해지는 MSR합금은 열처리후 높은 인장 강도를 갖고 우수한 고온 특성을 갖게 된다. 이 계통의 합금은 여러가지 종류의 것이 개발되었으며, QH21합금의 경우 네오듐의 일부를 토륨으로 치환함에 의해서 우수한 상온 및 고온특성을 얻을 수 있었다. 가격이 높고 변동이 심한 은에 대해서는 최근 EQ21로서 낮은 은함량을 포함한 합금이 도입되었다.

최근 새로운 합금으로서 개발된 Mg-Y-Nd-Zr계의 WE54는 MSR합금과 비교하여 우수한 고온 강도의 성능을 가진 합금으로서 특히 290°C근방에서의 고온 특성이 향상 되었다.

북미 지역에서 ZE41로 칭해지는 RZ5합금(Mg-4.25Zn-1.23RE-Zr)은 가장 많이 사용되어지는 사형 주물 및 인베스트먼트주조용 마그네슘합금으로 알려져 있다. RZ5합금은 우수한 주조성과 주조시 porosity가 나타나지 않는 특성을 가지고 있어 주물 두께에 관계 없이 동일한 성질을 가지며, 내압이 요구되는 주조에도 사용되어진다. RZ5로 제작된 주물은 넓은 영역에 걸쳐서 사용되어진다. 예를 들면, 헬리콥터 기아포크, 고속회전의 자동차 부품, 비디오 카메라, 군대용 장비, 컴퓨터 부품, 시험 기구, 항공기 부품 및 모터 사이클의 휠 등에 사용되어지고 있다. 위의 항공 및 자동차 부문외에 최근들어 경량 마그네슘 합금의 필요성이 점차 인식됨에 따라 새로운 용도가 계속 나타나고 있으며 새로운 합금의 개발, 특히 자동차 신합금의 개발 연구가 활발히 행해지고 있다.

위의 RZ5외에 다이캐스팅등 주조용 합금으로 많이 사용되는 Mg-Al, Mg-Zn계 합금도 온도에 대한 보다 우수한 특성이 요구되어 진다. 특히 위에서 언급된 바와 같이 최근 자동차등에 경량재료의 필요성이 증가 됨에 따라 내열성의 개선은 더욱 시급히 요구되어지고 있다. Mg-Al계 합금은 가장 보편적인 합금으로서 이중 대표적으로 많이 보급된 AZ91합금은 마그네슘에 알루미늄의 첨가가 9%정도로서 유동성, 강도, 연성의 최적 조합을 갖는 합금으로 여겨지고 있다. 그러나 AZ91합금은 합금중에 대량의 저융점공정($Mg_{17}Al_{12}$)을 함유하기 때문에 내크립성이 문제가 되어 왔으며, 알루미늄양을 증가시키면 강도는 향상되나 연성이 감소하게 되는 문제가 있어왔다. 이에 AM60은 AZ91보다 연성과 충격강도가 높은 합금으로 개발되어졌으며, AS41과 AS42합금은 내크립특

성이 개선된 합금으로서 특히 AS21합금은 현행 다이캐스팅용 마그네슘 합금중에 최고의 내크립 특성을 갖는 것으로 알려져 있다. 이외 AE22, AE41, AE42, AE43, AE52X2 등 일련의 Mg-Al-Mn계 신합금의 개발이 계속되어지고 있다. 최근에는 Mg-Al계 합금외에도 Mg-Zn합금에 대해서도 내열성의 향상을 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 Mg-Zn계 이원 합금에 나타나는 취화 현상 및 고온 취화 현상을 극복하기 위해서 제3원소의 첨가 영향에 대한 연구가 주로 이루어 졌다. 그 결과 Mg-Zn합금에 동을 첨가하였을 때 가장 우수하였으며, 특히 연성이 개선되었다. 전반적으로 볼 때 신합금 Z63(Mg-5.5-6.5Zn-2.4-3.0Cu-0.25-0.75Mn)의 성질은 현재 보편적으로 사용되고 있는 Mg-Al-Zn합금에서 일어나는 성질보다 우수하다. 특히 고온에서 강도의 유지는 Mg-Al-Zn합금보다 우수하며, 이는 우수한 크립 강도를 반영하고 있다. 실제 주조조건하에서 금형 및 정밀 주조기술을 이용하여 제조된 주조품의 경우 이들 합금이 확실히 우수한 주조성을 갖고 있다.

2.2. 내식합금

마그네슘합금이 경량 합금 소재로서 이용되기 위해서 가장 문제가 되는 것중의 하나가 내식성문제이다. 질코늄을 함유한 합금은 철, 동 및 니켈이 10-20ppm의 범위의 경우 고순도 합금이라 할 수 있으며, 내식성이 현저히 향상된다. 내식성의 우열은 각기 사용용도에 따른 특수한 시험에 의해 결정되며, 질코늄을 포함한 합금은 염수침적시험에서 표준적으로 600-1,000mpy의 부식성을 가지는 AZ91C합금보다는 우수하지만 HPAZ91보다는 우수하지 못하다. 또한 Mg-Zr 계로 최근 개발된 WE54합금은 내고온성 합금으로서 아주 우수한 특성을 가지고 있으며, 내식성 또한 우수하여 고순도 Mg-Al합금과 마찬가지로 고온용 알루미늄 주조합금과 거의 같은 정도의 내부식특성을 갖고 있다.

최근 수년간 마그네슘합금의 다이캐스트, 즉 자동차나 컴퓨터의 주물로서 다이캐스트주물의 사용이 급증하고 있다. 이것은 위에서 언급되었듯이 고순도 마그네슘 합금의 개발에 기인된 바 크다. 고순도 합금에서 불순물의 한계는 Fe<0.005%, Ni<0.001%, Cu<0.015%이다. AZ91 및 AM60에 있어서 Mn은 각각 0.15 및 0.25%이하 수준이며, 고순도 합금의 명칭은 AZ91D,E 및 AM60B이다.

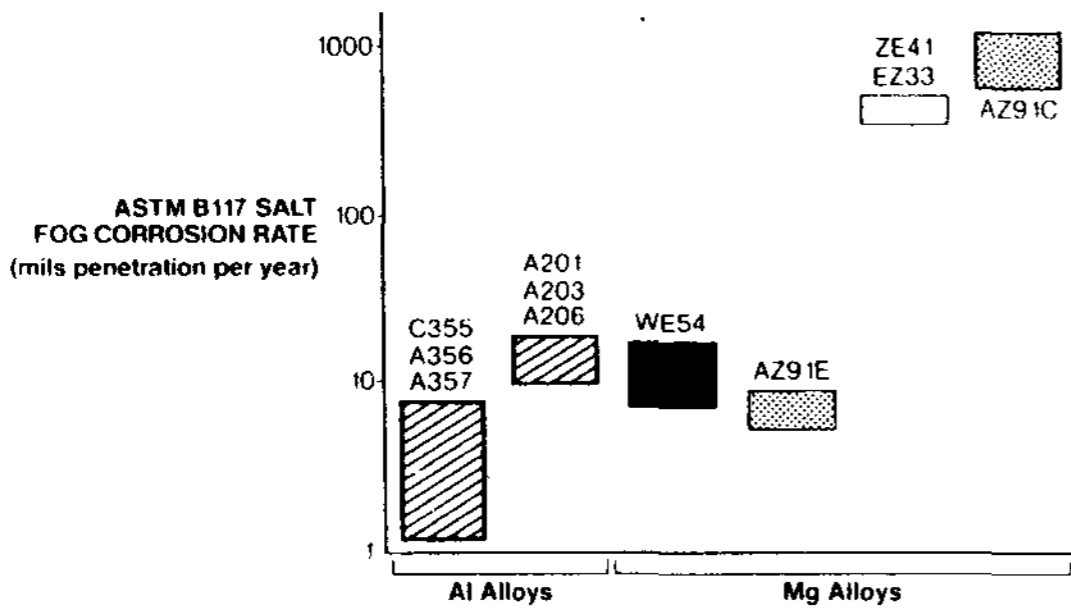


그림 1 마그네슘 및 알루미늄합금의 내부식성 비교

최근의 연구에서 마그네슘의 내식성에 영향을 미치는 중금속불순물의 한계가 확립되었으며, 마그네슘 합금의 부식기구에 대한 새로운 규명과 함께 니켈, 동, 철 함유량과 철과 망간의 비율을 조절 한 Mg-Al-Zn계 및 Mg-Al계의 합금개발의 연구가 진행되고 있다. 이상의 내식 마그네슘 합금들의 성능을 알루미늄 합금과 비교한 결과가 그림 1에 나타나 있다. 이들은 알루미늄합금에 가까운 내식성을 갖고 있다.

2.3. 초경량 합금

마그네슘에 초경량 금속 원소 리튬(Li, 밀도:0.

53g/cm³)을 첨가하면 기존 경량 마그네슘합금 보다 저 밀도의 즉 밀도 1에 가까운 초경량(super light)합금이 된다. 예를 들면 리튬이 16wt% 첨가되면 밀도는 1.3g/cm³이 되어서 현재 활발히 연구가 되고 있는 Al-Li 합금에 약 1/2의 밀도가 된다. 따라서 기존의 Mg-Al-X, Mg-Zn-X 계 합금보다 높은 비강도와 비강성이 얻어 질 수 있다. 또한 리튬이 10wt% 이상 첨가되면 BCC 구조의 β 단상으로 변하게 된다. 이러한 결정구조의 변화로 종래 마그네슘 재료가 HCP 구조로 인한 냉간 가공성의 불량을 획기적으로 개선할 수 있다.

이러한 초경량 합금으로서 Mg-Li-Al 계 합금이 가장 주목을 받고 있다. 이합금은 1960년대에 NASA가 중심이 되어 항공기 제조업체들로부터 인공위성, 소형 로켓과 미사일용으로 연구 개발이 추진되어 LA91(Mg-9Li-1Al), LA141A(Mg-14Li-1Al), LAZ933(Mg-9Li-3Al-3Zn) 등의 실용합금들이 개발되었다. 이들 초경량 Mg-Li 합금들은 개발된지 오래되었으나 기존 마그네슘의 경우와 같이 상온 강도, 내식성, 고온 강도 및 내 creep 성의 부족으로 상용으로의 범위가 제한되어 왔다. 이에 대해서 최근의 경량화 추세와 신 제조기술의 발달에 힘입어 문제점들이 개선되고 있다. 제 3,4

표1. 내열마그네슘 합금 개발

Alloy	Year of introduction	Nominal composition(%)*					YS MPa	UTS MPa	E %
		Zn	RE	Th	Ag	Y			
ZRE1-T5	1950	2.2	2.7				100	150	3
ZT1-T5	1955		2.2	3.0			95	200	3
MTZ-T6	1955			3.0			95	200	3
QE22-T6	1961		2.0**		2.5		180	255	2
WE54-T6	1985		3.0***			5.5	185	255	3

* 모든 합금은 0.5-0.7% Zr을 함유하고 있음
 ** Nd rich rare metals
 *** Nd and heavy rare metals

표2. 초경량 Mg-Li-Al 합금 성질

Alloy	Density (g/cm ³)	0.2% YS (MPa)	UTS (MPa)	E (%)	Specific UTS (MPa.cm ³ /g)
Mg-9Li-1Al *	1.444	167	181	27.7	125
Mg-9Li-3Al *	1.467	226	260	10.2	177
Mg-9Li-5Al *	1.482	216	268	9.0	181
LA141A-T7	1.350	137	154	10.0	114

* Annealed 350°C, 1 Hr

의 원소 첨가와 가공 열처리 공정의 연구를 통하여 초경량합금의 특성 향상이 최근 활발히 이루어지고 있으며 표 2는 Mg-Li-Al 합금들과 대표적인 상용합금 LA141A의 기계적 성질을 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 실험한 합금들은 마그네슘 기지의 $\alpha+\beta$ 조직으로 Al 함량을 변화시키면서 안정화 열처리한 것이다. 복합조직이 β 단상 조직의 LA141A보다 강도 및 비강도에서 우수하며 연성도 양호하여 고강도의 초경량합금 개발의 가능성이 크게 있다. 앞으로 내식성과 고온 강도의 개선이 되면 새로운 경량소재로 각광을 받을 수 있다.

3. 주조기술

통상적인 마그네슘 합금 주조품의 제조 공정으로는 사형 주조법, 금형 주조법, 다이캐스트등이 있다. 본 기술해설에서는 SF₆ 가스를 이용한 합금의 용해, 급탕장치의 자동화 등 최근 개발되어지고 있는 합금의 용해처리기술 및 신주조법으로 주목받고 있는 스퀴즈 캐스팅, 반응용 가공법과 급속응고법등의 특성과 효과를 살펴보았다.

3.1. Fluxless 용해

통상적인 마그네슘 합금의 용해법은 용탕의 산화를 방지하기 위해서 염화물기의 flux를 사용하며, 이로 인해 환경에 유해한 영향을 미치고 산화물이 용탕에 유입되는 등 주조품의 품질에 상당한 영향을 미쳤다. Fluxless 용해법은 1970년대에 개발 확립된 용해법으로서 염화물기 flux에 대신하여 SF₆/공기 혹은 CO₂ 분위기하에서 마그네슘 합금을 용해하면 합금의 산화를 방지하고 flux의 사용시 문제가 되었던 환경오염 문제와 flux가 용탕에 혼입되는 문제를 해결할 수 있으며, 이에 따라 마그네슘 합금 주물의 품질을 획기적으로 향상시킬 수 있게 되었다. SF₆ 가스를 사용함으로써 얻어지는 또하나의 장점은 용해시 용탕 손실의 감소이다. 또한 염화물기 flux는 탄소강제 용해 pot를 부식시켜 문제를 발생시키며, SF₆ 가스도 강을 부식시키기는 하나 마그네슘 용탕 보호시 사용되는 약 0.3-0.5%의 농도는 거의 문제가 되지 않는다.

3.2. 급탕장치

용융 마그네슘 합금은 온도가 높아지면서 산화

가 쉽게 되어 연소되는 경향이 있기 때문에 다이캐스트기등에 용탕을 주입하기 위해서 특별한 설비를 필요로 하게 된다. 현재까지 개발된 급탕장치로는

- 가스에 의한 이동펌프 (그림2)
- 원심력을 이용한 펌프 (그림3)
- 중력측량법 (그림4)
- 자동급탕장치

등을 들 수 있으며, 이중 처음 두가지는 산업계에서 오래동안 성공적으로 사용되었던 급탕시스템인 반면, 중력측량법은 최근에 개발된 방법이다. 이 세가지 방법은 가열된 급탕 튜브를 사용해야 하나 자동 급탕시스템의 경우에는 현재 알루미늄 주조현장에서 사용되는 방법을 응용한 것으로서 가열된 급탕 튜브를 사용할 필요가 없다. 이들 시스템의 장단점은 표3에 나타내었다.

3.3. 스퀴즈 캐스팅(용탕단조)법

스퀴즈 캐스팅법(squeeze casting)은 액상의 금속이 다이 내에서 고압하에서 응고하는 프로세스로서 가스 및 응고시 수축에 의한 porosity의 형성을 억제함으로써 거의 100%에 가까운 치밀한 제품을 얻는 주조법이다. 스퀴즈캐스팅의 기본적인 원리는 수십년전에 이미 알려졌으나, 일본 유럽 등지에서 상업화되어 제품생산에 이용되기 시작한 것은 최근의 일이다. 스퀴즈 캐스팅의 특성은 건전한 주조조직 생성 뿐만 아니라 금형과 주물 계면접촉이 현저히 개선되어 급냉응고가 되어 조직의 미세화, 표면 윤곽의 뛰어난 재현성과 생산성 증가가 이루어지며 탕도나 탕구가 최소화되므로 정량급탕시 소재의 yield가 다른 주조법보다 높다. 또한 주탕후 금형에 기계적 가압으로 성형 및 응고가 이루어져서 주조용 소재이외의 전신 가공제도 제조 가능등 다양한 장점들이 있다. 그림 5에 각종 중력 주조법과 스퀴즈캐스팅법에 의해서 제조된 AZ91 마그네슘합금의 주조상태와 강화 열처리한 경우에 기계적 특성치 비교를 나타내었다. 각 경우에 다른 주조법보다 스퀴즈 캐스팅 제품이 가장 강도와 연성이 우수하며 특히 강화 열처리시 연신율이 높게 유지되면서 강도 향상이 이루어지고 있어 고품질을 얻는데 효과적임을 알 수 있다.

스퀴즈 캐스팅법에서의 압력은 합금의 용해온도와 기지조직내에 용질원소의 고용도에 영향을 미치기 때문에 이와 같은 장점을 이용한 새로운

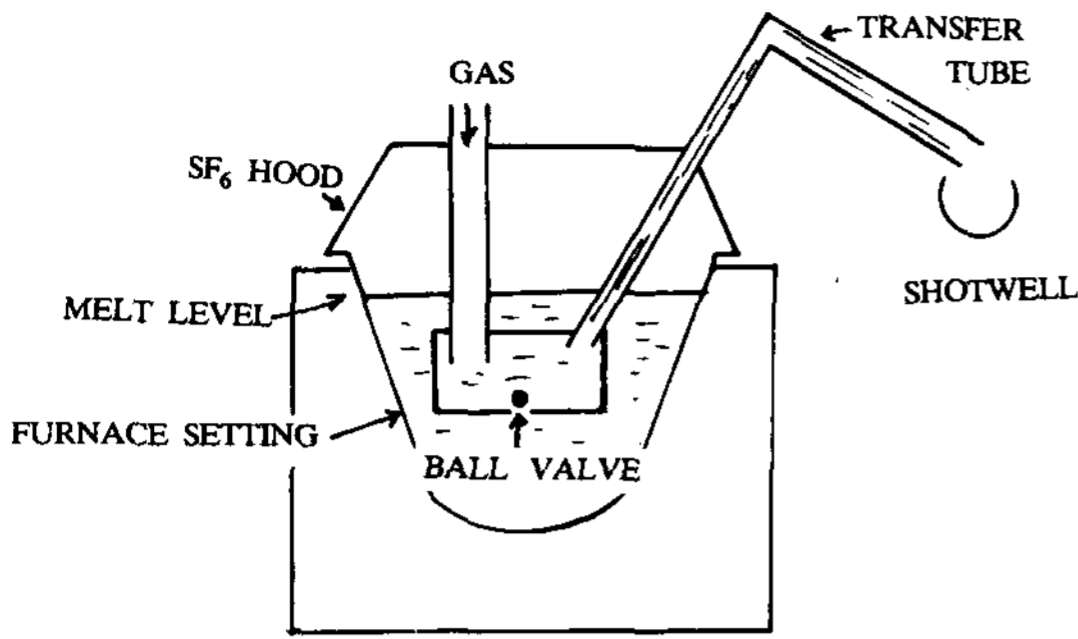


그림 2 마그네슘합금 급탕 장치(가스에 의한 이동 펌프식)

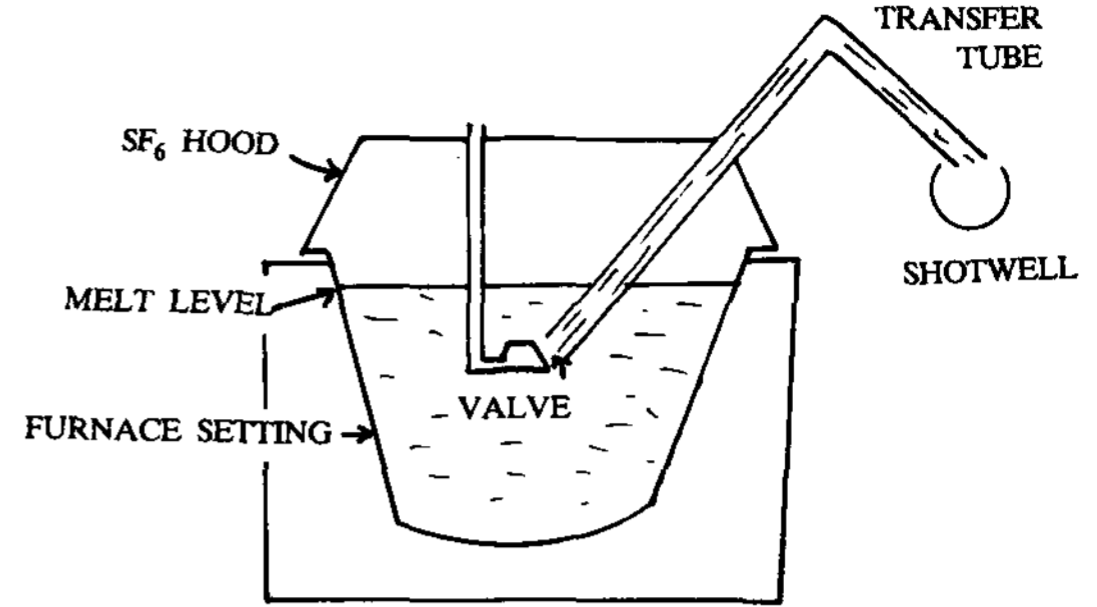


그림 4 마그네슘 합금 급탕장치(중력측량법)

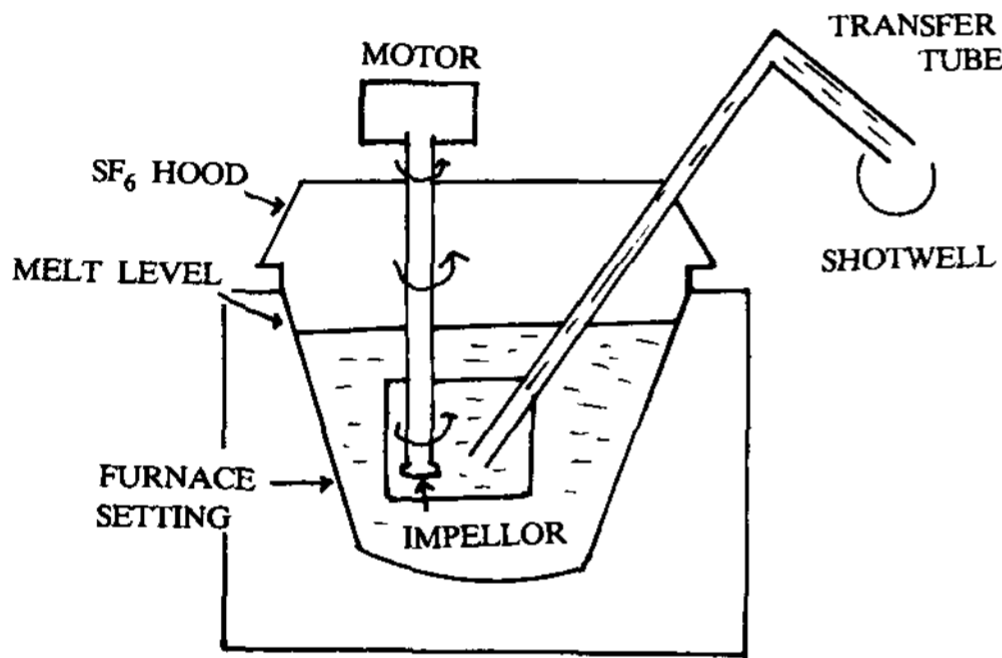


그림 3 마그네슘합금 급탕 장치(원심력을 이용한 펌프식)

합금이 개발이 가능하다. 최근 비교적 고가 합금인 QH21, QE22, WE54 등과 같은 수준의 크립, 피로 강도 등이 스퀴즈 캐스팅법에 의해 제조된 HTM1이란 합금에서 얻어질 수 있었다. 그림 6은 이들 내열 마그네슘 합금들과 최근 개발된 새로운 가공용 마그네슘 합금인 ZCM711의 180°C, 100MPa 하중에서 creep 특성을 나타낸 것이다. 여기서 스퀴즈 캐스팅 용 신합금이 다른 전신가공용 마그네슘합금들보다 내 creep성이 우수하게 나타났으며 피로특성도 아울러 양호하게 보고되고 있다.

표3. 각 마그네슘 합금 급탕 장치의 장단점

방식	장점	단점
수동래들식	가장단순 유연성	안정된 주물제조를 위해 숙련 작업자 필요
가스 이동식	운동부분이 없음 작업자 불필요 자동화 용이	11b 이하 소형주물 제조 불가능 pump운전상 Valve seat 청결유지 운반 튜브가열요
원심 펌프식	작업자 불필요 대량 운반 가능 자동화 용이 용탕수위 제어용이	11b 이하 주물제조 불가능 운반 튜브가열요 운동부분
중력 측량식	작업자 불필요 이동부분 없음 자동화 용이	용탕 수위관리가 중요함. 운반튜브 가열요 소형 주물제조 불가능 Valve 누수 위험로를 상승이동시켜야 함
자동 래들식	작업자 불필요 주물치수제한 없음 가열튜브 불필요 AI에로 적용 가능함	금속이 래들에 소착위험이 있음 래들 청소 관리철저

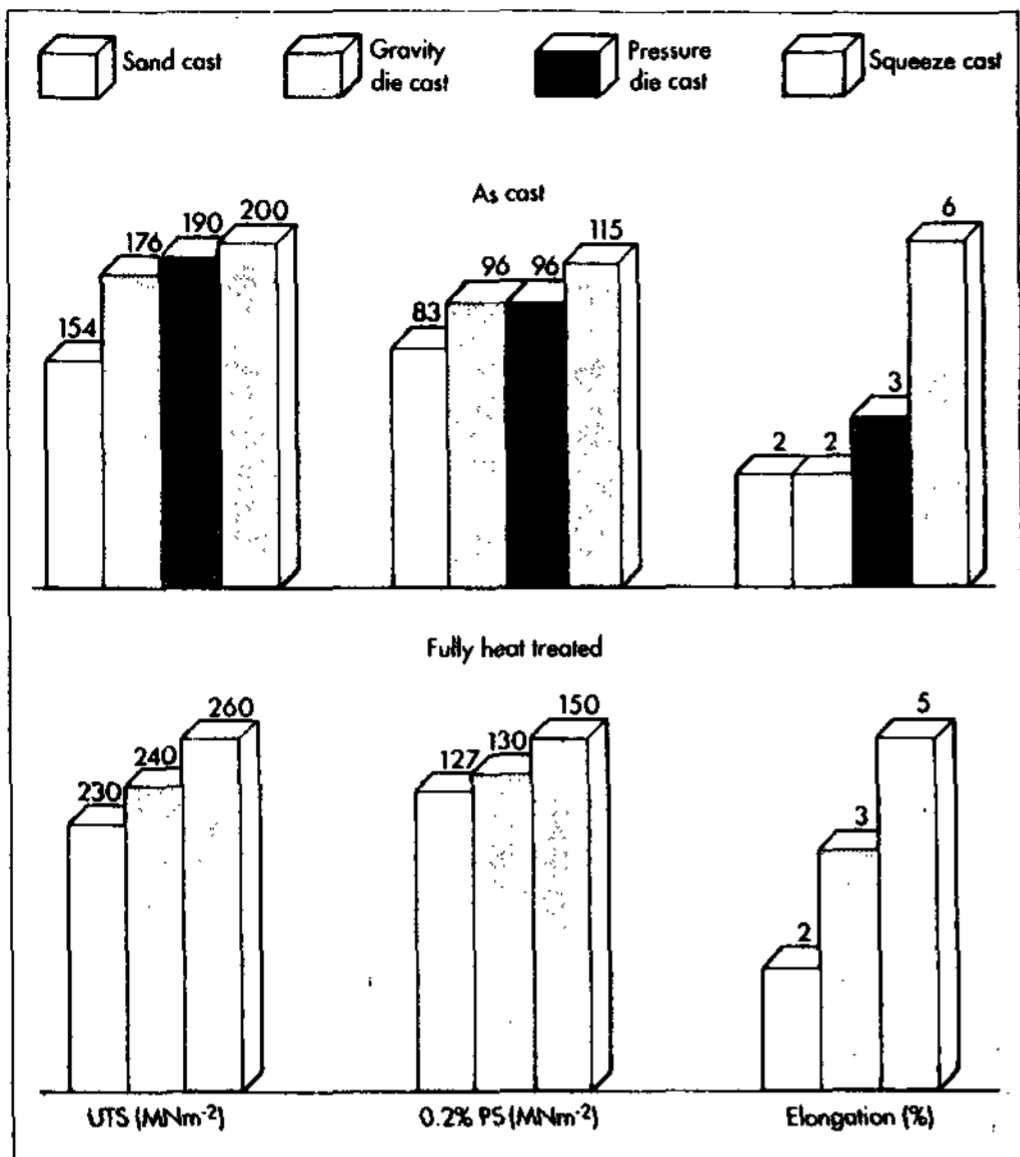


그림 5 용탕단조, 중력다이캐스트, 고압 다이캐스트 AZ91 합금의 기계적 특성 비교

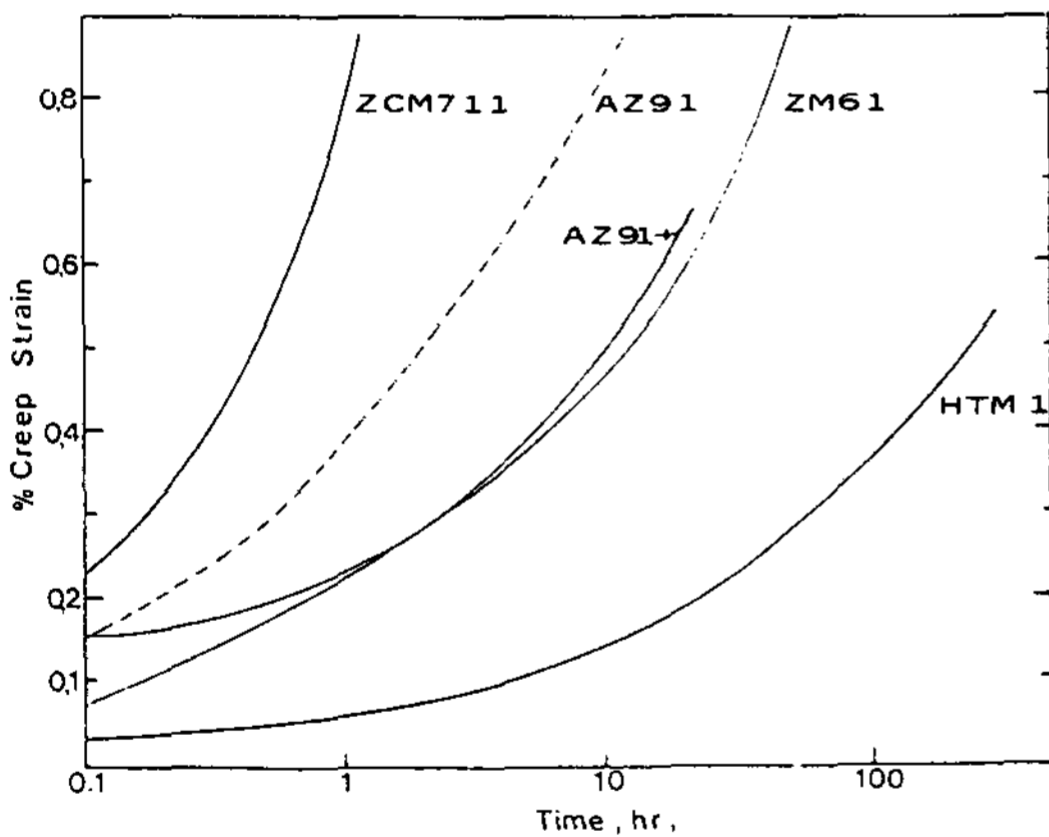


그림 6 마그네슘 합금의 크립 특성(시험온도: 423K, 하중 100MPa)

3.4. 반응용 가공법

1970년대 초에 Fleming등에 의해서 응고 도중의 합금을 교반시킴에 의해서 수지상(dendrite)이 파괴되어 비교적 구형의 고상 입자가 생기게 되고 따라서 비교적 낮은 응력하에서도 액상 금속과 같이 변형이 용이하게 될 수 있다는 사실이 알려졌다. 더욱이 이와 같은 고상 입자를 함유한 고액공존 합금 slurry는 디소트로픽(thixotropic)

성질을 갖고 있음이 밝혀졌다. 즉 slurry의 점성도는 교반속도와 교반시간이 증가함에 따라 감소하는 특성이 있다. 또한 교반을 중단하면 다시 점성도가 증가하고 합금의 강성이 증가하여 교반이 힘들게 된다. 고액 공존 영역에서 일단 수지상 구조가 파괴되어 디소트로픽 성질을 갖고 있는 고액 합금 slurry를 바로 다이캐스팅등의 방법에 의해서 제품을 생산하는 응고 프로세스가 Rheocasting 혹은 Stircasting이다. 반면 교반에 의해서 수지상구조가 파괴된 합금을 완전히 응고시켜 인고트를 제조한 후 이를 절단하여 다시 고액 공존 영역까지 부분 재용해를 시키면 형태는 고체상태이나 교반은 액상금속과 같이 용이하게 이루어질 수 있게 된다. 이와 같은 합금의 응고중 교반시 나타나는 특성을 이용한 프로세스가 Thixocasting이다.

이러한 반응용합금의 특성을 이용한 응고가공 프로세스는 주로 마그네슘 및 알루미늄합금등의 응고 온도범위가 낮고, 비교적 고액 공존영역이 넓은 합금계에 대한 적용이 개발되어 지고 있다. 특히 최근에는 비교적 낮은 강도와 낮은 응고 온도 범위를 갖는 마그네슘 합금을 반응용 가공법에 의한 제품생산이 주목을 받고 있다. 이에 다우 케미칼사에서는 반응용 가공법을 이용하여 플라스틱제품 제조에 사용되는 Injection moulding process와 유사한 Thixomoulding process를 개발하여 각광을 받고 있다. 또한 최근 개발되어 주목을 받고 있는 Metal powder moulding process 즉, 금속 분말과 결합제(binder)가 혼합하여 성형, 소결하는 process과 비교하였을때도 여러 장점을 지닌 제조 공정이다. 그림 7에 개략적으로 나타난 바와 같이 Thixomoulding process는 bulk상의 금속 합금이 feed되어 고액 공존 영역으로 가열, 교반에 의해서 변형 저항이 저하된 상태에서 다이에 injection이 되어 제품이 형성되게 된다. 즉 종래의 합금의 완전 용해후 이것을 다이에 주입하여 제품을 제조하는 공정보다 훨씬 공정이 간소화되었으며, 특히 합금을 고액 공존영역까지만 가열하므로 flux, 슬래그, 스크랩 등의 용해 관련 손실방지 및 에너지의 절약을 기할 수 있게 되었다. 또한, 고액 공존의 합금 slurry가 다이를 채움으로 인해 다이캐스팅 제품에 흔히 나타나는 porosity의 감소를 기할 수 있다. 표4에 AZ91D 마그네슘합금의 다이캐스트 제품과 Thixomoulding process에 의한 제품의 특성치를 비교하였다.

3.5. 급속응고법

급속응고법에 의한 부품의 생산은 최근 일부 합금계에서 자리를 잡아가는 응고 가공기술의 하나로써 마그네슘 합금의 경우 역시 많은 관심을 받고 있다. 급속응고법은 응고시의 고액 계면을 초당 수십미터이상의 빠른 속도로 움직이도록 하여 기지조직내 용질 원자의 고용도를 증가시킴과 동시에 준안정상, 준 결정상, 비정질상등의 새로운 상을 형성하고 아울러 조직의 미세화를 촉진시키는 프로세스이다. 급속응고방법은 크게 세가지로 분류되어질 수 있다. 첫번째는 분말atomization과 같은 spray 혹은 droplet 형성, 두번째는 멜트스피닝과 같은 연속적인 chill casting 그리고 세번째는 동질의 냉각표면하에서 in-situ rapid melting 및 resolidification등이다. 이와 같은 세가지 분류의 급속응고법은 성공적으로 마그네슘 합금에 적용되어져 왔고 자세한 예는 표 5에 나타내었다.

급속응고 효과로 기존 마그네슘 합금의 문제점을 개선 및 향상시키고자 하는 연구가 많이 이루어지고 있다. 그 첫째는 고용도 증가에 대한 것이다. 최대 평형 고용도는 전신재합금의 조성을 좌우하는 주요 요소이다. 1 at% 이상의 평형고용도를 가지는 합금 원소들은 마그네슘에 원자크기비로 약 15% 이하이며 이들이 급속응고시 재질변화의 효과가 크게 나타난다. 특히 마그네슘에서 고용증가는 hcp 구조의 c/a 비를 감소시켜 냉간

가공성을 향상시킨다. 그 원소로서 Li와 Ag가 있다. 반면 다른 원소들은 이 비를 유지 또는 증가시키는 작용을 한다.

둘째로 새로운 상 생성이 있다. 새로운 결정상이 Mg-Sn, Pb 에서 형성됨을 표5에서 나타나 있다. 한편 Cu, Zn, Ni를 10-20at% 첨가하여 급속응고하면 비정질이 생성되며 이들은 매우 열적 안정성이 우수한 것으로 보고되고 있다. 또한 이 비정질을 열분해하여 우수한 성질의 미소결정질이 얻어지고 있어 이에 대한 연구가 활발히 되고 있다.

셋째로 조직 미세화와 분산상(dispersoid) 생성이다. 앞의 두 효과는 급속응고의 특정 열적, 조성적 조건에서 나타나지만 이 효과는 일반적으로 나타난다. ZK60 마그네슘 합금을 급속응고한 경우에 일반 주조시의 수지상정크기(DAS)가 60 μ m에서 5 μ m으로 미세화가 되었다. 그로인해 압축강도 향상과 균질화 및 내식성 향상이 이루어졌다. 한편 급속응고에 의한 안정한 미세결정립 조직의 생성에는 마그네슘에 고용도가 적으며 안정된 이차 분산상의 선정이 중요한 요인이 된다. 그림 8은 마그네슘에서 분산상들의 고용도와 용점간의 관계를 나타낸 것이다. 최소 고용도를 보이는 Mg₂Si, Mg₂Ba, Mg_xCe 와 phase lanthanide 들이 급속응고에서 매우 효과적으로 결정립 미세화와 열적안정성과 고온 강도 향상을 가져오고 있음이 보고되어 있다. 이들의

표4. Thixomould 및 고압다이캐스트(HPDC) 마그네슘합금의 제특성 비교

Type	Part	% Porosity		
HPDC	Tensile Bar	3.2		
Thixomold	Tensile Bar	1.7		
HPDC	Gear Case Cover	3.4		
Thixomold	Gear Case Cover	1.4		

Type	Alloy	YS,ksi	UTS,ksi	% Elong
HPDC	AZ91	23.1	30.5	3.3
Thixomold	AZ91	23.4	30.6	3.9

Type	Alloy	Corrosion Loss(mils /year)
HPDC	AZ91D	<10
Thixomold	AZ91D	6

표5. 마그네슘 합금에 대한 각 급냉응고법의 적용 및 그 효과

Technique	Product	Alloy	Effect
(1) <u>Spray or droplet</u>			
Gas atomization	Powder	Representative engng. alloys	Improved mechanical properties in extrusions
Rotary (spin-disc) atomization	Powder /Shot	ZK60B, ZE62	Increased compressive yield strength
Rotation electrode	Shot	ZK60A	Increased tensile and impact strength
Gun quench	Splat	Mg-12 to 23Al* Mg-14 to 18 Sn* Mg-16 to 23 Pb*	Solid solubility extension Net fcc phase
Catapult quench	Splat	Mg-1 to 6Mn* Mg-0.4 to 1.5Zr*	Solid solubility extension
Two-piston	Splat	Representative engng. and novel alloys	Microstructural refinement Enhanced hardening
(2) <u>Continuous chill casting</u>			
Chill-block	Ribbon or	Mg-30at%Zn	Metallic glass formation
melt-spinning	Strip	Mg-Al-Zn plus Si /Mn or Si /RE	Increased strength and corrosion resistance
Twin-roll quench	Flake	Mg-9Li ⁺ plus Si or Ce	Increased strength at elevated T
Melt-overflow	Strip	AM60	Cost lower than rolled Mg foils
(3) <u>Melt-in-situ</u>			
Laser or electron beam surface melting	Treated Surface	ZK60 MA21	Microstructural change Improved corrosion resistance
* at.% + wt.%			

최적화와 특성 규명에 대한 연구가 추진되고 있다.

4. 공업제품에 응용

마그네슘의 소비를 용도별로 비유를 보면 표 6 과 같이 나타나고 있다. 주로 알루미늄 합금 원소로 절반이상이 사용되고 그외에 다른 합금원소나 첨가제로서 이용되고 있고 자체로서 제품화는 20% 내외이다. 이중에서 주로 다이캐스팅이 대부분으로 그 비율이 증가할 것으로 예측된다. 구조재로서 이용은 주로 항공 및 우주용에 그 경량효과로 활용되어 왔으며 고품질의 합금개발과 제조법의 향상으로 컴퓨터, OA기기, stereo/video,

자동차부품 등을 중심으로 그 응용이 활발하게 이루어져 미국, 일본 등에서는 최근 5년간에 약 50%의 신장율을 보이고 있다. 표 7은 마그네슘의 차량부품 응용 경향을 보여주고 있다. 여기서 마그네슘의 이용은 경량화가 최고 원인이며 기타 내구성과 설계 특성등이 그 동기가 되고 있다. 한편 마그네슘의 경쟁재료로서 알루미늄합금과 비교하면 특성면에서 비슷한 성능을 가지고 있고 가격면에서 고가이므로 이것이 실용화에 큰 과제가 되어 왔다. 이에 대하여 본 기술해설에서 살펴 보았듯이 제조 공정의 개선과 마그네슘에 적합한 금형 설계 및 고 품질 소재 개발로서 가격경쟁력을 확보하고 있다.

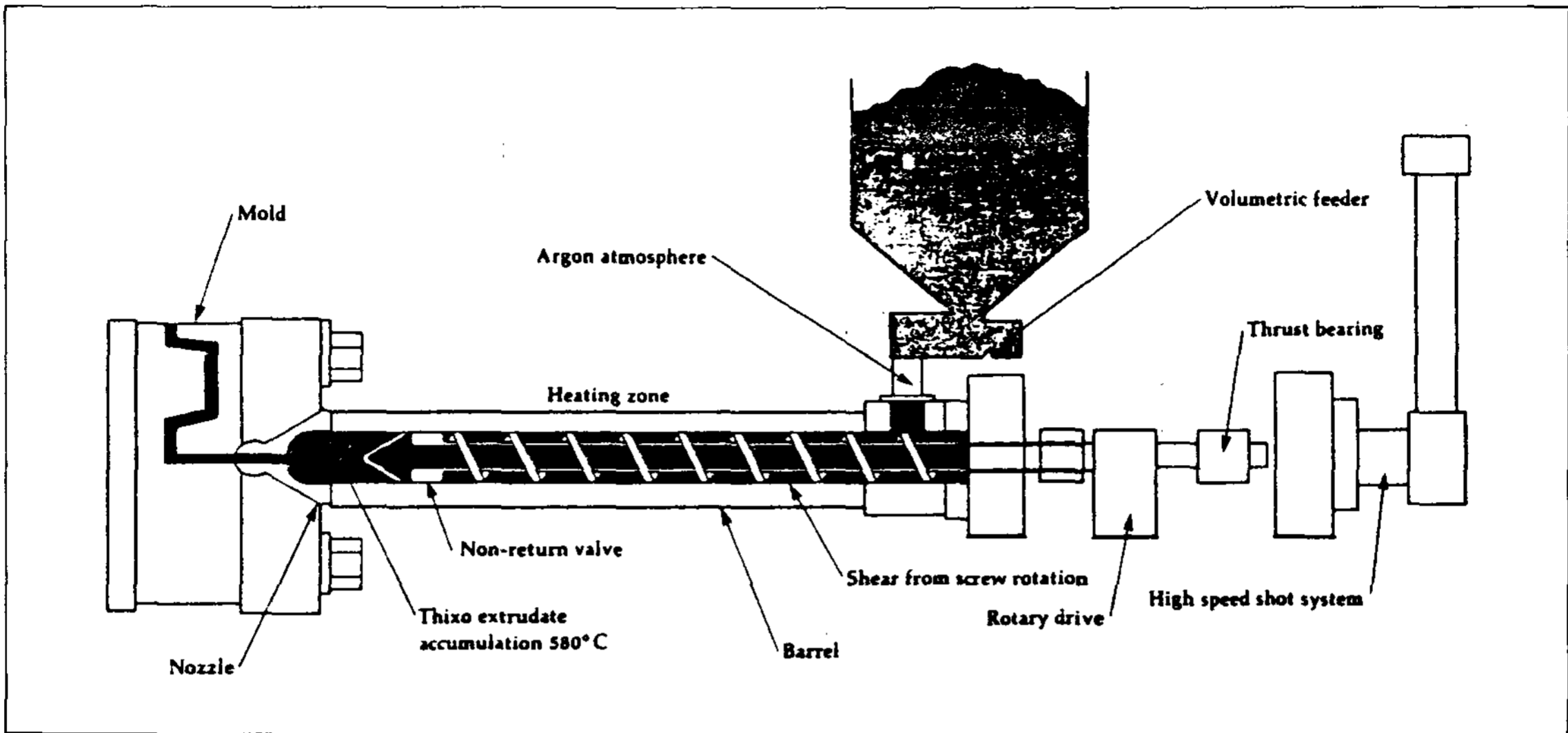


그림 7 마그네슘 합금 Thixotropic injection molding

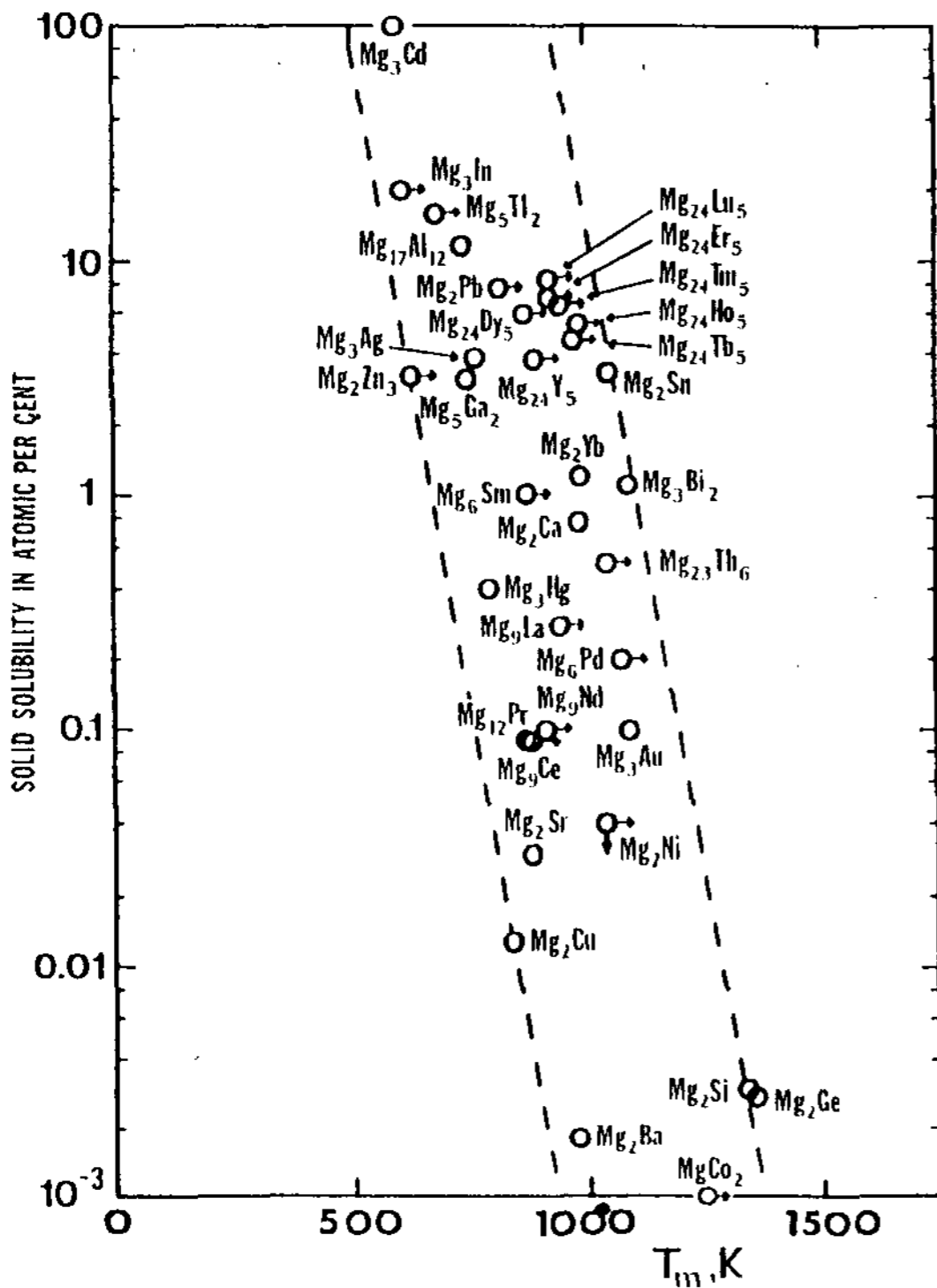
표6. 마그네슘 소비경향

END USE CATEGORIES	1986	1990
Aluminum Alloying	128	132
Nodular Iron	11	13
Desulfurization	23	33
Chemical /Reduction	27	27
Pressure Die Casting	8	10
Structural	8	10
Other	6	6
Total	238	272

Part Name	Lbs (x 1000)	Primary Competitive Material	Reasons for Magnesium	\$*
Trasfer Case	4500	Al	Weight Savings	P
Brake /Clutch Brackets	4230	Steel	Weight Savings	C
EGR Valve	460	Al	Weight Savings	C
Air /Fuel Covers	430	Al	Weight Savings	C
Wiper Hosing	370	Zn	Weight Savings	C
Steering Columm Internal	360	Zn	Weight Savings	C
Side Mirror Bracket	190	Al	Weight Savings	C
Valve Covers	130	Steel	Styling	P

Engine Grill	110	Al	Weight Savings	P
Steering Column Shroud	100	Plastic	Durability	P
Oil Filter Adaptor	100	Al	Weight Savings	C
Ashtray Door	90	Plastic	Durability	P

* C=Competitive (no cost premium for magnesium part)
 P=Premium



배급장치의 자동화에 의해서 용탕의 손실을 방지하고 다이캐스팅 제품등의 생산성을 향상시킬 수 있을 것이다. 또한 기존의 사형, 금형, 다이캐스팅 주조법외에 새로운 용고가공법인 스퀴즈캐스팅 법, 반응용가공법, 급냉용고법등이 개발되어 자리를 잡아가고 있다. 이와 같은 합금 개발 및 제조 공정의 개선이 계속 이루어진다면 마그네슘 합금 주조품은 여타 경량 합금에 비해서 더욱 경쟁적인 위치에 서게 될 것이다.

참 고 문 헌

1. H.G.Paris and W.H.Hunt:Advance in Magnesium Allous and Composites, 1988, publication of TMS.
2. Magnesium Technology, proceedings of london conference, 1986 The institute of Metals
3. W.Unsworth:Magnesium(Japan), vol.18, No.3(1989), p1
4. S.O.Shook :Magnesium(Japan), vol.18, 10(1989), p1
5. D.K.Kirkwood and P.Kapranos:Metals and Materials, Jan.(1989), p16
6. E.B.Warda:Light Metal Age, Feb.(1989), p34
7. R.K.Singh and C.R.Chakavorty:Trans. Indian Inst. Metals, vol.41, No.2,(1988), p153
8. F.H.Froes, Y.K.Kim and F.Hehmann:J. of Metals, Aug. (1987), p14

5. 결 론

최근 경량 소재의 시대적인 요구와 함께 마그네슘 합금의 중요성이 새삼 인식되고 있다. 이와 같은 경향은 특히 자동차나 항공기산업에 있어서 뚜렷이 나타나고 있다. 이와 함께 마그네슘 관련 기술도 끊임없이 개발되고 있다. 합금 설계측면에서는 AZ91 HP나 WE54 등은 마그네슘 합금의 취약점이었던 내부식특성과 고온 특성에 해답을 제시하였으며 더욱 우수한 특성의 합금 개발이 계속되어지고 있다. SF₆ 가스를 이용한 Fluxless용해는 환경 문제의 해결과 함께 마그네슘합금의 청정도를 획기적으로 향상시킬 수 있을 것이며, 용탕

- 9. W.Unsworth and J. King:Metallurgia, May., (1986)
- 10. I.J.Polmear:Light Alloys, Metallurgy of light metals, Edward Arnold Ltd., (1981), p156
- 11. L.A.Carapella:Metal Progress, vol.48 (1945) p297
- 12. J.E.Hillis:SAE Paper 830523. Feb. (1983)
- 13. P.S.Frederick, N.L.Bradley and S.C. Erickson:Advanced Materials Oct. (1988)
- 14. 마그네슘의 차량에 응용:SAE Paper No. 80415-200, 850418, 850433, 880512-4, 880697

한국주물공업협동조합 사무실을 1991. 11. 29. 일자로 다음과 같이 이전키로 결정하였음.

주소 : 서울특별시 영등포구 여의도동 11-11 (한서리버파크 오피스텔 801호)
전화, FAX : 변동없음.

약 도

