

기술講座

마그네슘합금 부품의 제조기술

나영기 · 임창동 · 신광선*†

Processing Technology of Magnesium Alloys and Components

Young-Gee Na, Chang-Dong Yim and Kwang-Seon Shin*†

1. 서 론

최근 들어 전세계적으로 환경오염에 대한 위기의식이 증대됨에 따라 선진국을 중심으로 세계 각국은 각종 환경규제를 강화하여 환경오염을 억제하려는 노력을 기울이고 있다. 특히 자동차에서 배출되는 배기가스는 지구 온난화의 주요원인으로 지적되고 있으며, 따라서 자동차산업의 중심지인 미국, 일본 및 유럽을 선두로 하여 각국은 배기가스에 대한 규제를 강화하고 있다. 일례로 1999년 6월 전세계 100여 개국 정부 대표들이 오존층 파괴 물질에 대한 몬트리올 협약을 강화하는 것을 주제로 제네바에서 회의를 가졌으며, 미국 환경보호국(EPA)은 같은 해 5월 경차와 트럭에 대해 2004년에 효력을 발휘하게 되는 배출표준안을 제출한 바가 있다[1,2].

이러한 시대적 상황에 따라 자동차 및 항공기 등의 수송기기의 경량화를 통한 연비향상의 필요성이 절실하게 대두되고 있으며 선진국에서는 이미 연비향상을 위해 막대한 투자와 연구개발을 수행하고 있다. 특히 자동차산업이 국가의 주요 기간산업으로 간주되고 있는 우리 나라의 경우에도 세계 시장에서 경쟁력을 갖추기 위해서는 배기가스 규제기준을 만족시키기 위한 연구개발이 절실한 실정이다.

마그네슘합금은 밀도가 1.8 g/cm³ 정도로서 현재까지 개발된 상용 구조용 합금 중에서 최소의 밀도를 가짐과 동시에 우수한 비강도 및 비탄성 계수를 가지고 있

다. 특히 진동, 충격 등에 대한 흡수성이 탁월하고 전기 및 열 전도도, 가공성 및 고온에서의 피로, 충격 특성 등이 우수하여 자동차, 항공기 등의 수송 기기, 방위산업 및 일반 기계, portable computer 등 무게 절감을 위한 경량화가 필수적인 분야에서의 요구조건에 부합되는 여러 가지 우수한 특성을 지니고 있다. 현재 선진 자동차 제조회사에서는 경량화에 대한 가장 가능성 있는 재료로 마그네슘합금을 이용한 부품 개발에 관심이 집중되고 있으며, 국제마그네슘협회(IMA)의 보고에 따르면 1996년 약 72,300톤의 마그네슘이 다이캐스팅 분야에서 사용되었으며 2000년에는 120,000톤을 넘어설 것으로 추정하고 있다[3].

마그네슘합금은 응고잠열이 작아 주조 시 cycle time이 감소하여 생산성이 높으며 치수안정성과 기계가공성이 우수하여 후처리 공정을 간소화시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다. 현재 가장 널리 사용되는 마그네슘합금 부품의 제조방법은 다이캐스팅공정이며 그 외에 저압 금형주조, 압출, 압연, 단조 등의 방법이 사용되고 있다. 최근에는 부품의 특성과 생산성을 향상시킬 수 있는 신제조 공정으로서 반응고 성형공정을 적용하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이 글에서는 마그네슘합금의 용해, 재활용 기술과 현재 사용되고 있는 대표적인 마그네슘합금 부품의 제조방법 및 신제조 공정을 살펴보고 국내외 자동차 산업에서의 마그네슘제 자동차 부품의 적용현황과 앞으로의 전망에 대하여 고찰해 보고자 한다.

서울대학교 재료공학부(School of Materials Science and Eng., Seoul National Univ.)
 *항공재료연구센터(Center for Advanced Aerospace Materials)
 †E-mail : ksshin@snu.ac.kr

2. 마그네슘합금 부품 제조기술

2.1 용해기술

마그네슘은 산소와의 반응성이 매우 커서 370°C이하에서는 MgO의 얇은 부동태막을 형성하지만, 370°C이상에서는 이 피막이 성장하여 다공질의 막이 되면서 부동태 효과가 소멸되고, 425°C에서는 Mg 증기가 발화하게 된다. 물과는 폭발적으로 반응하여 Mg(OH)₂와 H₂를 형성하여 폭발의 위험성을 가진다. 따라서 마그네슘의 용해시 산소와 H₂O의 차단이 필요로 한다. 한편 Fe₂O₃와 맹렬한 발열반응을 일으키기 때문에 반드시 용탕과 접촉하는 장치들의 녹을 제거해야 한다. 이 밖에도, 공기중의 질소와 반응하여 생긴 Mg₃N₂와 H₂O와의 반응, 내화재를 이루는 SiO₂와의 반응 등도 마그네슘 용탕의 산화손실의 원인이 된다[4]. 이러한 마그네슘 용탕의 산화를 방지하는 방법으로는 flux의 사용과 보호가스의 사용이 제안되고 있다. Flux는 용탕과 산소와의 반응차단으로 조업중 고온산화 및 발화를 방지하는 역할을 하는 것으로 flux의 조성은 MgCl₂, KCl 및 기타 금속염화물의 혼합물이며, 경우에 따라서는 소량의 CaF₂와 MgO를 포함하기도 한다. 그러나 flux를 사용한 용탕보호방법은 표면층의 용탕손실 및 불순물 혼입 등의 문제점을 가지고 있다. 보

호가스는 용탕표면 산화막의 치밀화 및 특성변화 등에 의하여 노출 용탕면적을 최소화함으로써 용탕을 보호하는 역할을 하며, 보호가스의 종류로는 SO₂, CO₂, 불활성기체, SF₆ 및 이들의 혼합가스 등을 들 수 있다. 표 1은 이들 보호가스의 종류별 효율 및 특성을 나타내는 것으로 SF₆가스가 사용이 가장 효율적임을 알 수 있다. 그러나 실제 조업에서는 공기/CO₂+SF₆의 혼합가스가 널리 이용되고 있으며, 표 2에 용탕온도에 따른 혼합가스의 실제 적용 예를 나타내었다[5-8].

표 2로부터 합금의 표면산화가 급속하게 진행되는 370°C부터 620°C까지는 보호가스의 유량을 적게 하여도 표면 산화가 일어나지 않으며, 대기 중의 수분의 영향도 크지 않은 것을 알 수 있다. 합금이 완전히 용해된 후 표면에서의 증발이 비교적 적은 620~730°C 온도 구간에서는 상대습도 및 교반 유무에 따라 보호가스의 유량을 적절하게 조절해야 함을 알 수 있다. 730°C 이상의 온도에서는 표면에서의 증발이 서서히 증가하며 교반에 의하여 용탕 표면에 항상 새로운 용탕이 노출될 경우에는 보호가스의 유량을 증가시켜 주어야 한다. 또한, 온도가 상승할수록 보호가스의 유량 및 SF₆가스의 혼합비율을 증가시켜 주어야만 용탕을 효과적으로 보호할 수 있다.

그러나 최근들어 환경오염에 대한 위기의식이 증가

Table 1. Efficiency and characteristics of protection gases for magnesium melt[7].

종류	소비량 (ℓ/시간)	비용		용탕손실(%)	특성
		원/시간	원/용탕1톤		
N ₂	720	129	503	2.5	다량의 용해에 사용, Dross 형성 유도
SO ₂	180	120	470	1.8	공급과 취급 용이, 양호한 보호피막형성
CO ₂	600	237	879	2.0	용탕표면에 산화물층 형성
SF ₆	1	61	235	0.35	SO ₂ 에 비하여 50%의 경비 절감

Table 2. Protection method of magnesium melt using mixed gas[8].

온도(°C)	작업조건		유량(cc/min.)	최적조성(vol.%)
	교반	상대습도(%)		
370620	N	<70	50	74.7air + 25CO ₂ + 0.3SF ₆
	Y	>70	50	
620730	N	<70	100	74.7air + 25CO ₂ + 0.3SF ₆
	Y	<70	150	
	N	>70	150	
	Y	>70	200	
730790	N	<70	150	74.7air + 25CO ₂ + 0.3SF ₆
	Y	<70	250	74.7air + 25CO ₂ + 0.3SF ₆
	N	>70	200	74air + 25CO ₂ + 1SF ₆
	Y	>70	300	74air + 25CO ₂ + 1SF ₆

함에 따라 SF₆가스에 대한 여러 가지 문제점이 대두되고 있다. SF₆가스는 높은 화학적 안정성과 대기 상공에서의 오랜 잔존시간으로 인하여 지구온난화를 유발한다고 알려져 있다. SF₆가스의 대기상공에서의 잔존시간은 약 3,200년으로 추정되고 있으며, 지구 온난화 효과를 수치적으로 나타내는데 사용되는 GWP값으로 표현하면 CO₂가스의 약 23,900배, 즉 1 kg의 SF₆가스는 약 24톤의 CO₂가스에 해당하는 온난화 효과를 가져온다고 보고되고 있다. 이러한 문제점으로 인하여 SF₆가스의 사용은 향후 억제되리라 예상되며 마그네슘 산업에 미치는 타격은 매우 클 것으로 예상된다. 따라서 이와 대등한 효과를 가지면서 환경문제를 유발하지 않는 새로운 용탕보호 방안의 개발이 요구되고 있다.

2.2 재활용기술

마그네슘합금 부품 개발에 있어서 실제적인 측면에서 가장 큰 애로점은 경쟁재료에 비하여 상대적으로 높은 제조원가 문제를 극복해야 한다는 점이다. 따라서 마그네슘합금이 다른 경쟁 재료와의 가격 경쟁력을 확보하기 위해서는 제품 생산 과정에서 발생하는 스크랩의 재활용기술 개발이 절실히 요구된다. 마그네슘합금 스크랩의 재활용시 가장 큰 문제점은 스크랩의 오염에 따른 부품의 제반특성 저하에 있다. 스크랩의 오염원인으로는 도가니 및 금형으로부터 유입되는 Fe에 의한 오염, oil 또는 solvent의 혼입에 의한 오염 및 비금속개재물의 혼입에 의한 오염 등을 들 수 있으며, 결국 재활용기술 개발에 있어서 선행되어야 할 점은 스크랩을 재용해한 용탕의 청정화 방안이다. 현재까지 제시되고 있는 마그네슘합금 스크랩 용탕의 청정화 방안으로는 교반 및 Ar 가스 bubbling 또는 C₂Cl₆ 등과 같은 접종제 첨가에 의한 탈가스처리 방안과 내식성에 악영향을 미치는 Fe 등의 불순물 제거를 위한 Mn등의 합금원소첨가 방안 등이 있다.

스크랩 재활용시 회수율을 증가시키기 위해서는 용탕을 청정화하여 청정용탕과 드로스(dross), 슬러지(sludge) 등을 분리한 후 청정용탕만을 공급할 수 있는 방안의 개발이 필요하다. 그림 1은 용탕 교반 및 탈가스처리(S30AR), 접종제 첨가(S30AR.10), 스크랩 표면의 피클링(pickling) 처리(S30AR.CL) 등을 행하여 용탕청정화를 수행 후 청정용탕부분 및 드로스부분의 부식시험 결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 청정

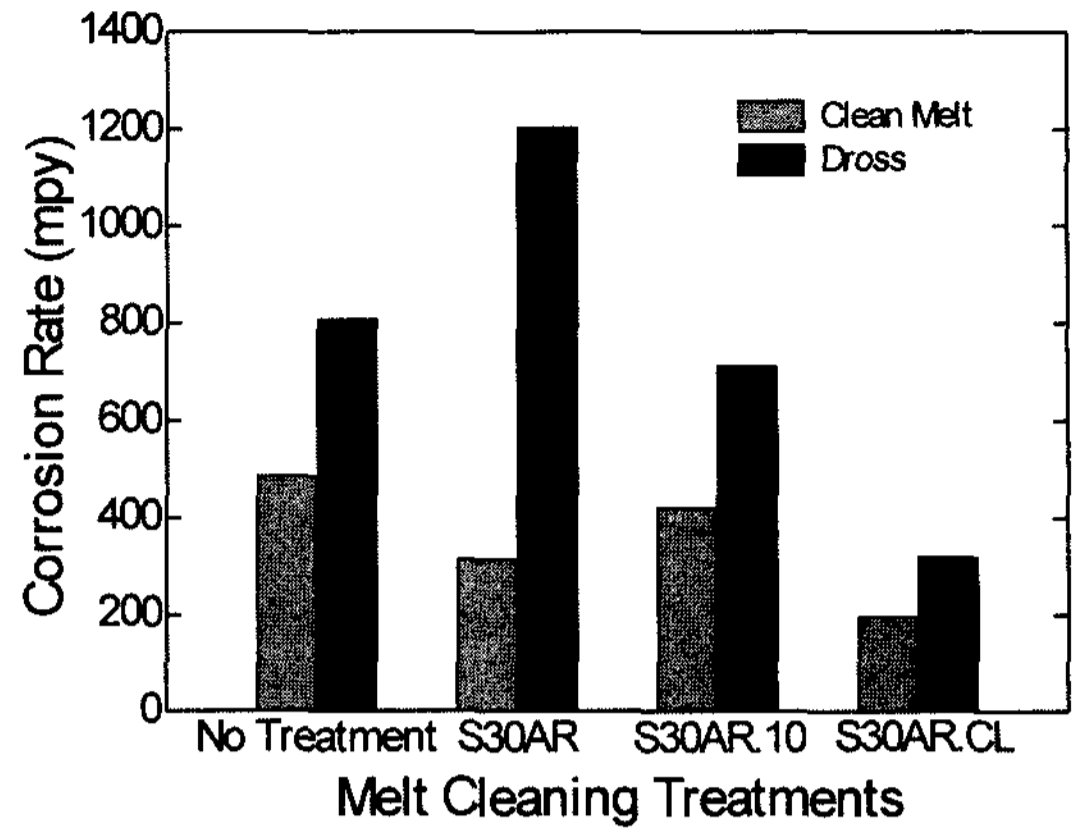


Fig. 1. Effect of melt cleaning treatments on corrosion rate of recycled cast magnesium alloy[8].

용탕부분에서는 피클링 처리를 행한 경우가 가장 우수한 내식성을 나타내고 있다. 청정용탕 부위에서는 교반과 Ar bubbling을 행한 경우가 접종제까지 첨가한 조건에 비해 내식성이 뛰어나지만 드로스 부위에서는 오히려 부식속도가 가장 크게 나타난다. 이는 교반과 Ar bubbling에 의하여 게재물이나 내식성에 악영향을 미치는 불순물 등이 효과적으로 분리되었기 때문인 것으로 판단된다.

2.3 다이캐스팅기술

현재 자동차산업에서 사용되는 마그네슘합금 부품은 90%이상이 다이캐스팅공정에 의하여 제조되고 있다. 다이캐스팅용으로 사용되는 마그네슘합금의 종류는 그 용도에 따라 AZ 계열의 범용합금, AM 계열의 고인성합금 및 AS와 AE 계열의 내열합금으로 분류되고 있다. 범용합금의 경우, 대표적인 합금은 AZ91D로서 비강도, 주조성 및 내식성이 우수하여 주로 엔진 bracket 류나 valve cover 등에 사용되고 있다. 주조상태에서 고강도 및 고인성을 가지는 AM계의 경우 steering wheel이나 seat frame 등에 그 적용이 확대되고 있으며, 우수한 고온성질 및 고온인성을 갖는 내열합금은 AS41 및 AE42를 중심으로 transmission case 또는 transmission cover 등에 적용되고 있다. 표 3은 대표적인 다이캐스팅용 마그네슘합금의 특성을 나타내고 있다[9].

마그네슘은 우수한 다이캐스팅 특성을 가지고 있다. 마그네슘의 유동특성은 알루미늄이나 아연보다 우수하

Table 3. Material properties of diecasting magnesium alloys.

물성	합금			
	AZ91D	AM60B	AM50	AE42
밀도 (g/cm ³)	1.81	1.79	1.78	1.79
항복강도(MPa)	160	130	120	140
인장강도(MPa)	230	220	220	225
연신율(%)	3	68	610	810
피로강도 (MPa, 5 × 10 ⁷ cycle)	70	70	70	-
충격치(J, unnotched)	2.2	6.1	9.5	5.8
경도 (Brinell)	75	62	57	57

Table 4. Comparison of hot chamber and cold chamber diecasting method [10].

	Hot Chamber	Cold Chamber
용량 (ton)	315	600
사출압력 (MPa)	20	40
Shot rate (shots/h)	140	70
효율	0.85	0.8
사출 가능한 두께 (mm)	0.6	1.2
Scrap 발생율(%)	40	60
표면 상태	매우 양호	양호
금형 수명(shots)	약 600,000	약 400,000

기 때문에 두께가 매우 얇은 다이캐스팅 제품을 제조할 수 있다. 다이캐스팅에는 hot chamber 방식과 cold chamber 방식이 있으며, 마그네슘의 경우 두 가지 유형 모두 적용될 수 있다는 장점을 가지고 있다. Hot chamber의 경우 사출압력이 cold chamber에 비하여

낮은 반면, 금형 수명이 길고 생산성이 높으며, 작은 부품의 생산에 효율적이다. 이에 반하여 cold chamber의 경우는 사출압력이 높아 다양한 크기의 부품에 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 다음의 그림 2와 3은 이들 두 가지 다이캐스팅 방식을 도식적으로 나타낸 것이며, 표 4는 각각의 대표적인 특징을 서로 비교하여 나타낸 것이다[10,11].

다이캐스팅공정에 의하여 생산된 마그네슘 부품은 재료, 다이캐스팅 기계 및 금형 등과 관련된 공정변수에 의하여 품질이 좌우된다. 재료와 관련된 변수로는 적용되는 마그네슘합금의 종류, 용탕의 온도 및 shot 부피 등이 있다. 한편, 다이캐스팅 기계와 관련된 공정변수는 사출속도 및 사출압력과 관련되는 것으로 표 5에 구체적인 조업조건을 예시하였다. 표 5는 그림 4와 같이 시사출한 transmission case에 대하여 알루미늄합금과 마그네슘합금의 다이캐스팅 주조조건을 비교하여 나타낸 것이다. 표에서 알 수 있듯이 마그네슘합금의 경우 고속속도가 알루미늄에 비하여 상당히 빠른 것이 요구되는데, 이것은 마그네슘합금의 응고잠열이 작아

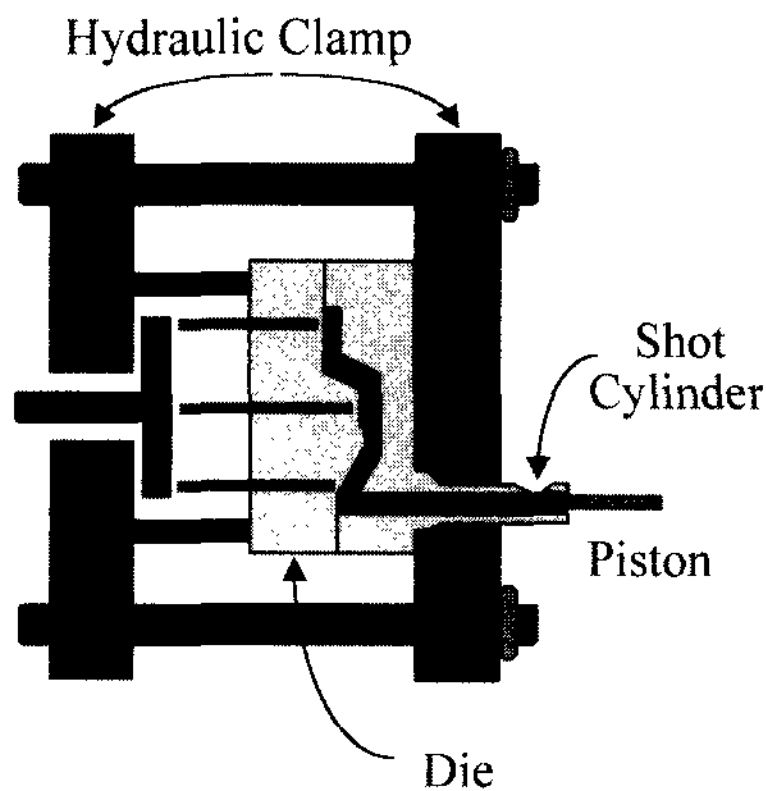


Fig. 2. Cold chamber diecasting.

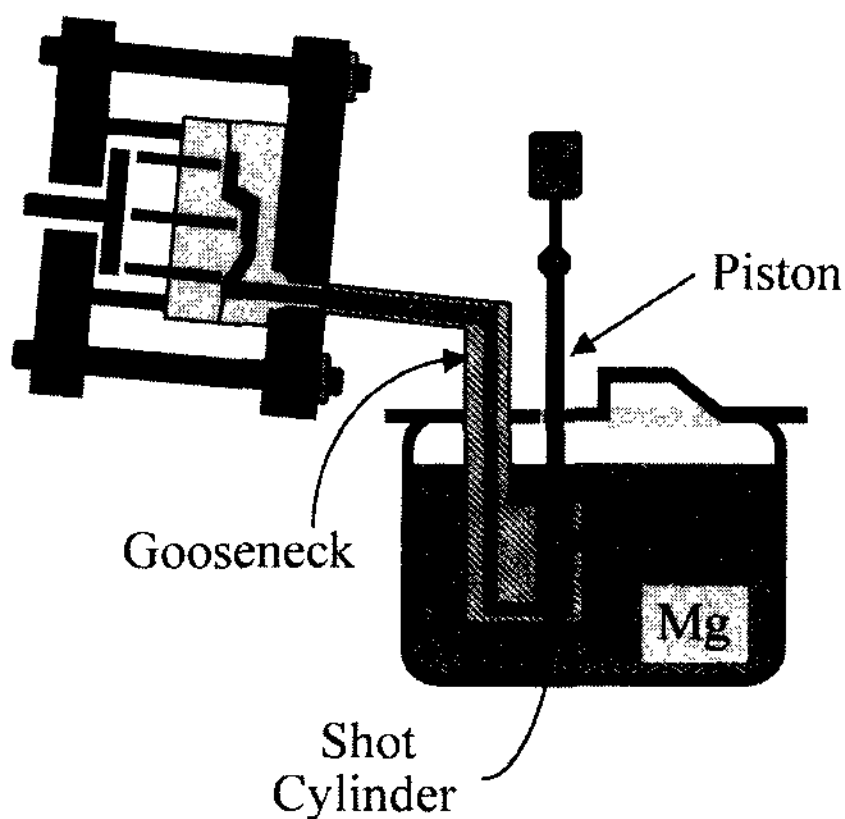


Fig. 3. Hot chamber diecasting.

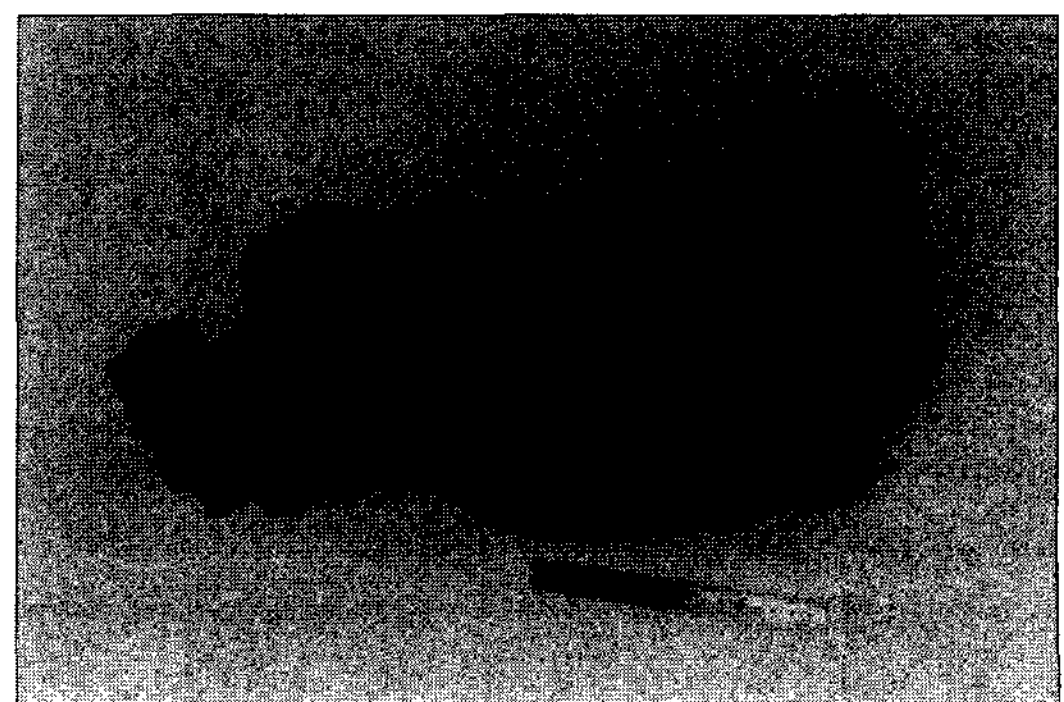


Fig. 4. Transmission case.

Table 5. Operation conditions of transmission case [8].

	Transmission Case	
	Al Alloy	Mg Alloy
Low Speed (m/sec)	0.3	0.3
High Speed (m/sec)	1.8	4.5
High Speed Point (mm)	400	220
Dwell Time (sec)	22	11
Casting Pressure (kg/cm ²)	500	420
Spray Time (sec)	14	8
Melt Temperature (°C)	650	690
Total Cycle Time (sec)	75	50

짧은 시간 내에 성형이 이루어지므로 용탕을 cavity내로 가능한 한 빠른 시간 내에 충전시켜 결함을 최소화하기 위한 것이다. 또한 고속으로의 절변 위치도 슬리브 주입구 통과 후 바로 고속으로 전환하도록 설정하여야 한다. 주조압력은 알루미늄과 마그네슘합금의 경우 큰 차이는 없었으나, 성형시에 요구되는 시간은 마그네슘합금이 알루미늄합금에 비하여 1/2 정도이다. 이 형제를 도포하는 시간 역시 마그네슘합금이 알루미늄합금에 비하여 짧는데 이는 철 성분과 친화력이 작은 마그네슘합금의 장점으로 얻을 수 있는 공정상의 이점이다.

마그네슘합금을 이용한 다이캐스팅시 발견되는 주조 결함으로는 cold shut 및 불완전한 충전, 균열, blister, sink, shrinkage 및 가스에 의한 기공, 비금속 개재물 등을 들 수 있으며, 양호한 주조품을 생산하기 위해서는 공정변수의 조절을 통하여 이들 주조결함을 억제하여야 한다. 탕경계 및 불완전 충진을 방지하는 방안으로는, shot rate 조절이나 금형의 가열에 의한 금형표면온도의 증가, 사출속도, 사출압력 및 gate 크기 조절을 통한 cavity fill rate의 증가, 용탕 주입 온도의 증가, overflow 부피의 증가 등이 있다. 균열은 사출조건을 개선하거나 hot spot을 억제하기 위하여 금형의 온도를 올리거나, overflow 및 국부냉각에 의하여 방향성응고를 조장함으로써 억제할 수 있다. 한편, 주조품 전체가 뒤틀려서 사출되는 경우에는 die-opening 온도를 감소시키고, 주조품이 dragging 되는 경우에는 die-opening 온도를 증가시킨다. 부풀음은 주조품 표면 근처의 가스기공에 의하여 발생하는 것으로, 용탕의 난류거동을 최소화하거나 금형내 cavity 배출을 개선하여 용탕에 포집되는 기체량을 감소시킴으로써 억제할 수 있다. 부분적으로 용탕공급이 결핍되면 수축에 의한

sink가 발생하며, 이는 사출압력이나 shot weight를 증가시켜 용탕압력을 극대화하거나, 금형의 국부적인 냉각을 증가시키거나, 또는 금형설계시 heavy section을 제거함으로써 해결할 수 있다. 주조품 내에서 발견되는 기공은 수축에 의한 것과 가스에 의한 것으로 나눌 수 있다. 수축에 의한 기공은 용탕의 부적절한 주입에 기인하며, 방향성응고의 조장, 적절한 용탕온도의 유지 및 사출압력의 증가에 의하여 억제된다. 한편, 가스에 의한 기공은 shot sleeve 충진을 최대화하고, 사출속도를 감소시키거나 금형 내에서 용탕 유동 양상을 최적화 하여 용탕의 난류거동을 억제하며, cavity 배출을 최대화함으로써 제거한다. 비금속개재물은 용탕의 오염에 기인하며, 이를 억제하기 위해서는 용탕과 접촉하는 모든 장비를 최대한 청결하게 유지하여야 한다.

2.4. 압출 기술

마그네슘합금 부품을 만드는 공정은 크게 두 가지로 분류될 수 있는데, 하나는 다이캐스팅등과 같은 주조 공정이며 다른 하나는 압출, 압연, 단조 등과 같은 소성가공공정이다. 대부분의 마그네슘부품은 주조공정, 특히 다이캐스팅공정에 의해 제조되지만, 주조재의 경우 낮은 강도와 shrinkage 등에 의한 결함은 피할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 이에 반하여 압출, 압연 및 단조와 같은 성형공정의 경우에는 기계적 성질이 우수하며 내부결함이 없는 제품을 만들 수 있다는 장점을 가지고 있다.

현재까지 다양한 금속성형기술이 개발되었으며 마그네슘합금의 경우 이들 대부분의 공정을 적용할 수 있다. 마그네슘합금에 적용되는 주요한 소성가공공정은 압출과 단조 두 가지이며 이는 마그네슘의 결정구조에 기인한다. 마그네슘의 결정구조는 조밀육방구조(HCP)이며 소성변형에 필요한 슬립계가 3개뿐이다. 따라서 냉간가공시 가공성이 떨어져 성형을 어렵게 만든다. 반면에 알루미늄의 경우는 체심입방구조(BCC)를 가지며 12개의 슬립계가 존재하므로 많은 양의 변형이 가능하다. 이러한 이유로 인하여 마그네슘합금은 냉간가공이 어렵다. 230°C 이상의 온도에서는 마그네슘의 슬립계가 12개로 증가하며 보다 쉽게 성형할 수 있다. 따라서 마그네슘합금의 경우에는 열간가공을 통해 원하는 모양으로 성형이 가능하다[11].

압출은 길고 곧은 모양의 봉, 관, 선, 판상을 제조하는데 사용되는 공정이며 합금의 종류와 금형 형상에

Table 6. Mechanical properties of extrusion magnesium alloys [11].

합금	Temper	항복강도 (MPa)	최대인장강도 (MPa)	연신율 (%)	특성
AZ31B&C	F	185	255	14	성형성이 가장 좋으며 용접성이 우수
AZ61A	F	215	310	15	용접성 우수
AZ80A	F	240	335	11	열처리를 통한 특성 향상이 가능하며 용접성 우수
	T5	260	380	6	
ZK60A	F	255	335	14	열처리를 통한 특성 향상이 가능하나 용접성이 나쁨
	T5	295	355	12	

따라 복잡한 모양의 단면도 제조가 가능하다. 또한 압출은 다른 공정에 비하여 후처리가 단순하고 비용이 저렴하며 생산속도가 높아 경제적인 공정이다. 마그네슘합금의 경우 일반적으로 260~425°C의 온도에서 압출을 수행한다[12]. 압출공정에 사용되는 대표적인 마그네슘합금에는 네 가지가 있으며 이들의 종류와 기계적 특성을 표 6에 나타내었다.

2.5 반응고/반용융 성형기술

1970년대 초 미국 MIT에서는 금속이 반응고 상태일 경우 교반에 의해 점성이 감소하는 디소트로픽(thixotropic) 특성을 가지며 이러한 반응고 금속을 고액공존 영역으로 가열하였을 경우 약 60%의 고상을 함유한 상태에서도 액상과 같은 유동성을 갖는다는 사실을 발견하였다. 이러한 발견을 토대로 고상과 액상이 공존하는 반응고 상태에서의 잇점을 이용한 새로운 공정이 개발되었으며 이를 반응고 성형(semi-solid forming) 또는 디소캐스팅(thixocasting)이라 한다. 그림 5는 온도범위에 따라 적용 가능한 각종 성형 공정을 나타낸 것이다[13].

반응고 성형은 금속을 고상과 액상이 공존하는 반응고(또는 반용융) 상태로 가열하여 제품을 성형하는 공정으로서, 압연, 단조, 압출 및 사출성형 등의 성형공정을 이용하여 종래의 성형공정으로는 얻을 수 없는 새로운 기능의 금속제품의 제조를 가능하게 한다. 또한 이 성형기술은 복잡한 형상의 제품을 실행상(net

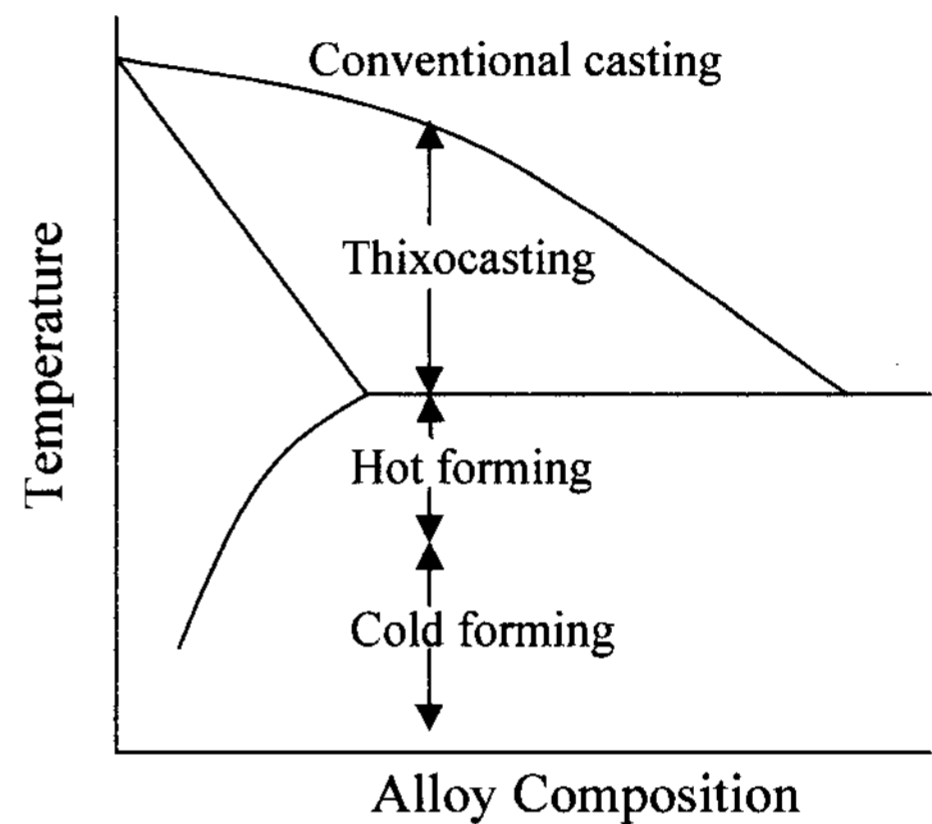


Fig. 5. Phase diagram indicating the temperature range for different forming processes.

shape)에 가깝게 성형할 수 있고, 더 우수한 기계적 성질을 가진 제품을 더 저렴하게 생산할 수 있어 국내에서도 관심을 가지고 활발히 연구가 진행되고 있다. 다음의 표 7은 반응고 성형공정과 다른 성형공정의 장단점을 비교하여 나타낸 것이다.

반응고 성형공정의 핵심이 되는 요소기술로는 ① 구상조직제어에 의한 반응고 원소재 제조기술, ② 원소재를 다시 반용융 상태로 금속균일 가열하는 재가열 기술, 그리고 ③ 반응고 금속의 성형가공기술인 반응고 성형기술 등의 3가지 요소공정기술로 대별된다. 반응고 성형에 필요한 원소재 중 마그네슘합금의 경우

Table 7. Comparison of various forming precesses.

	나쁨	보통	좋음
원소재 가격	단조	용탕 단조	금형주조
내부 집적도	다이캐스팅	금형주조	반용융성형단조
기계적 특성	다이캐스팅	금형주조	반용융성형단조
정형성/치수안정성	단조	금형주조	반용융 성형
완제품 가격	단조	용탕 단조	반용융 성형

Table 8. Manufacturers of raw materials for semi-solid forming .

Company	Products	Remarks
Alumax (USA)	Produce SSM Al feedstock of 16,000 ton/year in Ferdale, Washington, USA	Owns patents for both MHD castings and SIMA. They only produce feedstock for their own in-house semi-solid forming.
Dow Chemical (USA)	Produce Thixomag [®] Mg alloy for Thixomolding [®] process.	Thixomat reports that this feedstock materials is supplied in quantities of 450 kg.
Ormet (USA)	Produce 3 and 4 inch Al billets, and will produce 5 and 6 inch billets.	Currently building a \$15 million plant in the USA to produce A356 and A357 alloys under the licence of France Pechiney.
Pechiney (France)	Supplies 3 Al alloys, A356, A357, and Al-Si7Cu3Mg, in both 3 and 6 inch billets.	All feedstock shipped to the USA.
Alusuisse (Swiss)	Produces 3 and 4 inch Al billets in Chippis, Swiss.	Also produce SSM components for automotive application.
Stampal (Italy)	Recently installed a production line for casting vertical Al billets with 3 and 4 inch dia.	
Althix (Japan)	Produce SSM Al alloy billets under the license of Pechiney.	

고액공존구역이 비교적 넓은 Mg-Al계 합금이 적용 가능하며 그 중 다이캐스팅 분야에서 널리 사용되는 AM, AZ계열의 마그네슘합금이 관심의 대상이 되고 있다. 이러한 재료를 반응고 상태에서 성형하기 위해서는 먼저 반응고 원소재가 필요하며, 이 원소재는 일반적으로 전자기 교반법을 이용하여 제조하고 있다. 이러한 반응고 원소재가 가져야할 조건은 초정입자가 미세하여야 하며, 개재물, 기포, 편석 등이 없어야 한다. 현재 반응고 원소재를 생산하는 회사들은 표 7에 나타난 바와 같이 세계적으로 그리 많지 않은 편이며, 대부분이 알루미늄합금 반응고 소재를 생산하고 있으며 이들 회사들 중에는 대외판매의 목적이 아닌 자사의 제품성형을 위해서만 원소재를 제조하는 곳도 있다.

제조된 원소재를 성형하기 위해서는 성형시 요구되는 유동성 또는 고상률을 갖도록 재가열하여야 하며, 일반적으로 60~80%의 고상률을 유지하도록 가열온도를 설정한다. 생산적 측면으로 볼 때 가열속도는 빨라야 하지만, 동시에 금속조직적으로 균일한 내부 조직을 갖기 위해서는 가열된 재료내의 온도가 균일하여야 한다. 이러한 특징으로 인하여 급속균일 재가열 기술은 반응고 성형에 필수적인 핵심기술중의 하나이며, 가열장치로는 일반적으로 고주파 가열장치를 이용한다.

성형하기에 적당한 온도로 재가열된 빌렛은 빌렛 이송장치에 의하여 사출프레스의 사출 슬리브내에 이송된 후 성형되게 된다. 그림 6은 반응고 성형공정을 개략적으로 나타낸 것이다. 그림에 나타난 성형공정 중 제품 성형 단계에서 적용되는 반응고 성형가공법으로는 반응고 단조법, 반응고 압출법, 반응고 다이캐스팅

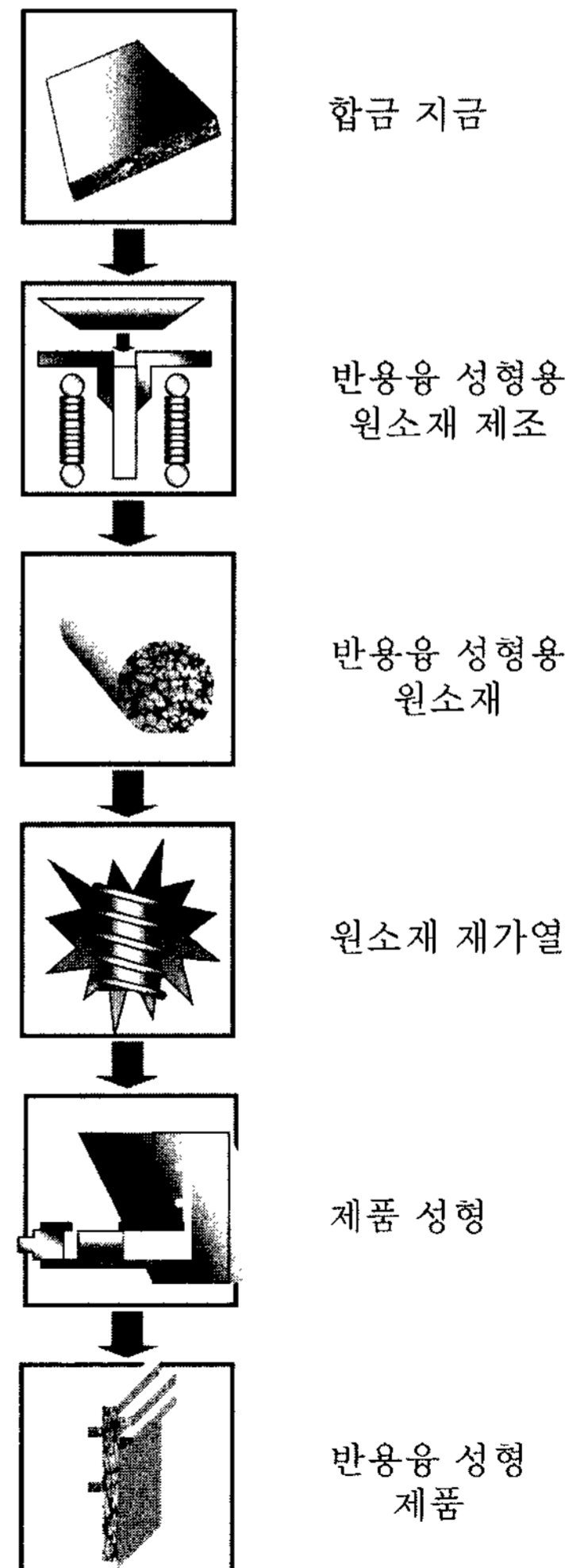


Fig. 6. 반응고 성형가공 공정의 개략도.

법 등이 있다. 다음은 이러한 가공공정의 특징을 간략히 나타내었다[14-16].

(1) 반응용 단조공정: 반응용 단조공정은 최근 들어 개발된 공정으로 빌렛을 반응용 상태로 가열한 후 금형에 장입하고, 주로 밀폐된 형단조를 실시하여 제품을 얻는 방법이다. 외부응력을 가함에 따라 빌렛내부에서의 액상의 단독유동과 표면으로의 액상성분 유출이 발생하므로, 반응고 단조제품의 내부조직은 불균일하기 쉬우며, 보통 표면부의 액상성분에 의해 구성된 조직이 많다. 이러한 내부조직의 불균일성은 제품특성상 바람직하지 않을 경우도 있으나, 역으로 액상성분의 유동특성을 이용하여 제품의 내부에서 표면으로 서로 다른 조직분포를 통해 기계적 특성을 부여하는 경우도 있다. 또한 반응용금속의 양호한 접합성을 이용하고, 두 종류 이상의 모재를 조합시킨 빌렛을 반응용 단조하여 성형과 접합을 동시에 실시하고 각종 복합제품을 제조하는 것도 가능하다.

(2) 반응용 압출공정: 반응용 압출 가공공정은 일반적인 열간압출공정과 기본적으로 같다. 그러나 빌렛의 고상율이 75% 이하가 되면 스스로 붕괴되는 경우가 있으므로, 적정용기의 사용과 온도유지에 주의를 요한다. 반응용 압출의 경우는 반응용 단조와 달리 액상성분이 독자적으로 유동하기는 어렵다. 많은 경우, 압출개시시에 약간의 액상성분이 선행되어 유출되는 경향을 제외하면 거의 균일한 유동, 변형을 하여 압출된다. 반응용 압출공정은 다른 반응용 가공공정에 비하여 가장 광범위하게 연구되어 있고, 제품의 내부조직과 기계적 특성이 균일하여 향후 여러 분야에 적용될 가능성이 많다.

(3) 반응용 다이캐스팅공정: 반응용 성형 또는 다이캐스팅공정으로서 현재 개발과 응용이 진행된 공정은 빌렛 사출성형공정과 칩(chip)형태의 마그네슘 원소재를 사출성형기에 장입하여 제품을 제조하는 텍소몰딩(Thixomolding)공정이 있다. 빌렛 사출성형공정은 현재 알루미늄합금에 적용되고 있는 반응용성형 공정으로서 빌렛 상태의 소재를 고주파 유도가열에 의해 반응용화한 후 이것을 다이캐스팅기의 컨테이너에 장입하여 금형내로 사출하는 방법으로 최근 마그네슘합금에 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 반면에 텍소몰딩법은 1987년 Dow Chemical사에 의해 개발된 성형공정으로 다른 반응고 성형공정과 달리 교반을 통한 반응고 원소재의 제조가 필요하지 않다는 장점을

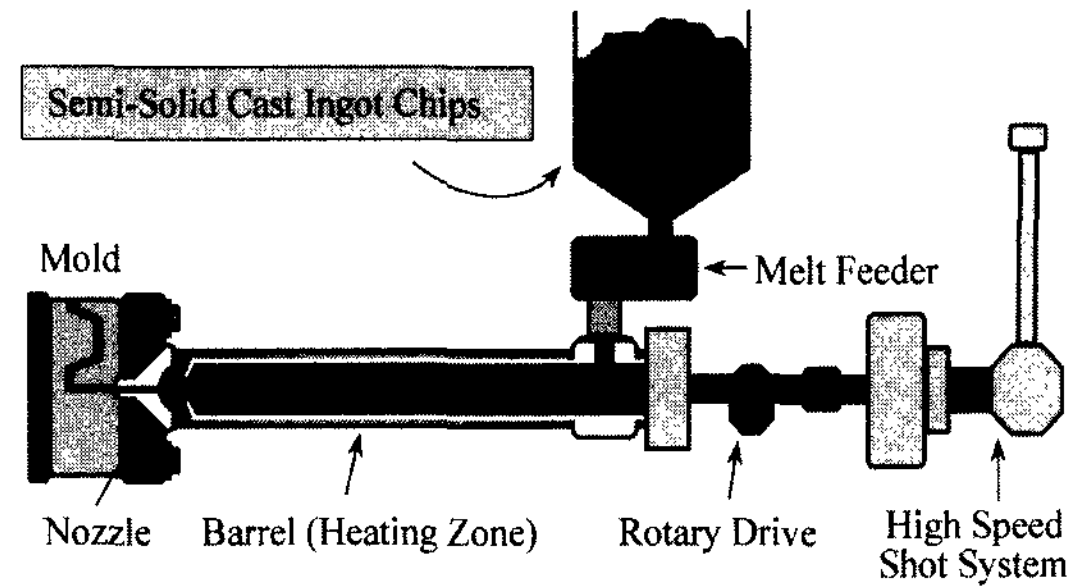


Fig. 7. Schematic drawing of Thixomolding process.

Table 9. Comparison of mechanical properties of semi-solid formed and diecast magnesium alloys.

재료	제조방법	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	연신율 (%)
AM50A	Thixomolding	139.5	268.7	20.0
	Diecasting	112.1	232.2	13.0
	Ref. Value	125	210	10
AM60B	Thixomolding	147.5	278.2	18.8
	Diecasting	114.5	238.8	11.6
	Ref. Value	130	220	8
AZ91D	Thixomolding	156.7	259.8	6.0
	Ref. Value	150	230	3

가지고 있다. 텍소몰딩 장치의 개략적인 모양을 그림 7에 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 텍소몰딩법은 원소재를 칩형태로 공급하며 스쿠류를 통해 이송중 반응용상태로 가열된 후 노즐을 통하여 금형내로 사출하고 성형하여 제품을 얻는 방법이다.

앞에 언급한 바와 같이 반응고 성형공정은 반응고 금속의 특성으로 인하여 기존의 성형공정에 비하여 금형 수명, 생산성, 실험상 제어능력이 우수하다는 장점을 가지고 있는 동시에 내부결함이 적은 우수한 품질의 제품을 제조할 수 있다. 다음의 표 9는 다이캐스팅용으로 널리 사용되고 있는 AM50A, AM60B, AZ91D합금을 텍소몰딩법으로 반응고 성형한 경우와 일반적인 다이캐스팅한 경우의 기계적 성질을 비교하여 나타낸 것이다[17]. 표에 나타난 바와 같이 모든 합금의 경우에 반응고 성형한 경우가 더 우수한 기계적 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

3. 마그네슘합금 적용 현황

경량재료로서의 마그네슘합금의 장점이 인식되기 시

작하면서, 자동차 및 항공기 등의 수송기기 제작업체를 중심으로 다이캐스팅용 마그네슘합금의 사용량은 꾸준히 증가하여 왔으며, 마그네슘합금을 적용범위를 확대하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 다이캐스팅용 마그네슘합금의 주요 소비산업은 자동차 산업으로 전체 마그네슘합금 소비량의 75% 이상을 차지하고 있으며, 현재 마그네슘의 주요 소비지역은 미국으로서 1996년 다이캐스팅 부품 분야에서 미국의 사용량은 38,000톤으로 유럽의 15,000톤, 기타지역의 26,000톤에 비해 월등히 사용량이 많다[3].

현재 적용되고 있는 주요 마그네슘 부품으로는 steering wheel 및 steering column 부품, dashboard mounting bracket, transmission housing 등이 있다. 일례로 독일의 Volkswagen에서는 transmission housing을 AS41 마그네슘합금으로 제작하여 50여만대의 Beetle 모델에 적용한 바 있으며, Benz의 500SI에는 seat frame에 마그네슘합금의 적용되고 있다. 또한 미국의 GM은 캐딜락의 cylinder head cover, oil filter case에 마그네슘합금을 사용하였고, Ford의 링컨 마크 VI에는 각종 housing에 적용되고 있다. 한편, 일본 도요다 크라운에는 pedal bracket 및 housing을, 혼다의 NSX에는 cylinder head cover, intake manifold cover 및 chamber 등의 부품에 마그네슘합금의 적용되고 있다. 특히 스웨덴의 Volvo사에서는 전체 차체의 40% 이상을 마그네슘합금으로 제작한 시작품 자동차를 제작하기도 하였다[10]. 최근 들어, 미국, 유럽, 일본에서는 연료 1L당 30km 이상을 주행할 수 있는 초저연비 차세대 자동차를 개발하기 위하여 차체 중량

을 약 40% 정도 감소시키기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 주요 적용 소재로서 마그네슘합금의 적용범위 확대를 추진하고 있다. 이러한 최근의 연구 개발 동향을 볼 때, 낙관적인 전망에 의하면 2000년대 중반에는 자동차 한 대당 20kg 이상의 마그네슘합금이 채택되리라 예상된다. 다음의 표 10은 자동차 부품의 요구 특성에 따른 마그네슘합금의 적용예를 나타낸 것이다[18,19].

마그네슘합금은 자동차 뿐만 아니라, 경량화가 요구되는 항공기, 군수용품, 휴대용 가전제품 및 공구, 스포츠/레저 용품에도 폭 넓게 적용되고 있으며, 그 적용범위는 급속하게 증가할 것으로 예상된다. 다음의 표 11은 상기의 분야에서 현재 적용되고 있는 마그네슘합금 부품의 예를 나타낸다.

4. 맺음말

마그네슘합금은 탁월한 경량성으로 인하여 알루미늄, 플라스틱 등과 더불어 연비향상을 위한 자동차부품용 재료로서 크게 부각되고 있다. 국제 원자재 시장에서 마그네슘합금의 가격은 지난 수년 동안 큰 변동이 없었으나 최근에 들어 중국의 마그네슘 수출에 기인하여 가격이 하락하고 있다. 또한 최근에 마그네슘합금에 대한 전세계적인 수요량의 증가에 발맞추어 합금 제조를 위한 설비투자 및 생산량이 점차 증가하고 있어 향후 원소재 가격의 하락과 안정세가 예상되고 있다. 따라서 전술한 바와 같은 마그네슘합금의 장점들을 고려해 볼 때, 알루미늄과의 충분한 가격 경쟁력을 가질 수

Table 10. Applications of magnesium alloys according to the properties required for automotive components .

특성	부품
경량성, 가공성, 치수안정성저가 다이캐스팅 용이성	Cylinder head cover, Clutch, Transmission housing
경량성, 가공성, 저가 다이캐스팅 용이성	Carburetor
경량성, 방진성	Pan, Pan housing
경량성	Grill, Clutch pedal bracket, Panel, Steering column component
경량성, 인성	Seat frame, Steering wheel core

Table 11. Applications of magnesium alloys in various industries.

적용분야	부품
항공기	Auxiliary power unit, Inlet diffuser Auxiliary gearbox, Landing wheel, Front housing
군수용품	Manpack radio, Tank gear box, Helicopter gearbox Transmission housing
휴대용 가전제품	Cellular phone case, Notebook case, Head arms Disk drive carriage, Ribbon lift
휴대용 공구류	Power nailer, Chain saw housing Circulate saw frame, Drill housing
스포츠/레저 용품	Archery bow handles, Bicycle frame parts Fishing fly reel, Tennis racket

있을 것으로 판단된다. 한편, 마그네슘합금의 적용분야는 플라스틱의 적용분야와 유사하다. 그러나 플라스틱은 여러 가지 장점에도 불구하고 재활용이 어려워 환경오염을 유발한다는 결정적인 단점을 가지고 있다. 반면 마그네슘합금의 경우 플라스틱보다 우수한 강도를 가지면서도 재활용이 가능하여 환경오염문제를 일으키지 않는다는 장점을 가지고 있다. 특히 재활용의 경우 새로운 제조공정을 통한 제조원가의 하락과 더불어 마그네슘 원소재의 가격을 낮출 수 있는 가장 중요한 문제로서, 각국에서는 마그네슘합금 scrap을 재활용하기 위한 연구, 투자가 활발히 이루어지고 있다.

현재 마그네슘합금은 여러 분야의 자동차 부품용 재료로서 사용되고 있으며, 앞으로 그 사용범위는 계속 확대될 것으로 전망된다. 특히 engine valve cover, engine head 등의 엔진 부품에 마그네슘합금을 적용하기 위해서는 고온특성과 내식성이 향상된 새로운 마그네슘합금의 개발이 절실히 요구되며, 자동차 내장 재료에 적용되는 경우에도 합금 자체의 경량성 뿐만 아니라 높은 강도와 인성이 요구되므로 향후 자동차 부품에 적용될 마그네슘 합금계가 매우 다양화되리라 예측된다. 또한 최근의 thin wall casting 기술의 발전과 함께 마그네슘의 높은 열전도도와 열적 안정성, 우수한 전자파 차폐능으로 인하여 cellular phone, video camera, potable computer 등의 전자산업에서의 적용 추세도 지속적으로 증가하고 있다.

마그네슘합금을 이용한 자동차부품의 생산에 있어서 아직은 각 분야에서의 지속적인 연구개발이 필요한 실정이다. 즉, 환경오염으로 인한 대체 보호가스의 개발, 재활용 기술 개발, 마그네슘합금의 강도, 인성 및 고온 특성의 향상, 고내식성 합금의 개발, 반응고 성형 공정 등의 신제조기술의 개발 등 아직은 해결해야 할 많은 문제점을 가지고 있다. 따라서 이러한 마그네슘부품 제조 관련 기술의 지속적인 연구개발은 최근 자동차 부품 제조 기술상의 최대 관심사가 되고있는 경량화에

대한 가장 효과적이고 확실한 해결 방안을 제시해 줄 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Environment News Service (ENS), (1999).
- [2] GNET Service, Global Environment & Technology Foundation, (1999).
- [3] P. Aroule : Proceedings of International Magnesium Association (IMA), Annual World Magnesium Conference, (1998).
- [4] S. E. Housh and J. S. Waltrip : SAE Technical Paper #900786 (1990).
- [5] J. F. Heffron and D. Saha : Die Casting Tech., (1993) 323.
- [6] C. F. Baker : SAE Technical Paper #900787 (1990).
- [7] A. Kaye and A. Street : Butterworths Monographs in Materials, 131.
- [8] C. D. Yim, M. Y. Jang, K. S. Shin, H. K. Lee and S. C. Choi : Bulletin of the Korean Institute of Metals and Materials, 10 (1997) 795-806.
- [9] Norsk Hydro Magnesium Co.
- [10] R. Fink : Proceedings of International Magnesium Association (IMA), Annual World Magnesium Conference, (1998).
- [11] S. O. Shook : SAE Technical Paper #900790 (1990).
- [12] B. Dale and J. Hudspeth : SAE Technical Paper #950426 (1995).
- [13] H. Gjestland : SAE Technical paper #930753 (1993).
- [14] J. C. Lee and H. I. Lee : Bulletin of the Korean Institute of Metals and Materials, 10 (1997) 129-138.
- [15] M. Kiuchi : Proceedings of 165th 소성가공 symposium, (1995) 1.
- [16] A. Namba : Light Metals, 45(6), (1995) 346.
- [17] S. LeBeau and R. Decker : Proceedings of 5th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Golden, Colorado, USA, (1998).
- [18] S. C. Park and K. S. Shin : Bulletin of the Korean Institute of Metals and Materials, 9 (1996) 160-171.
- [19] N. K. Park and J. M. Lee : Machines and Materials, Autumn, (1992).