급냉법에 의한 고온용 Mg 합금의 개발 전망

(한국기계연구원 박원욱)

1. 서 론

최근 산업이 급속히 발달함에 따라 항공기 및 자동차용 경량구조재료에 대한 개발요구가 에너지절감 및 고속화 측면에서 점점 높아지고 있다. Mg합금은 이런 특성에 적합한 실용금속으로서 밀도가 1.74 g/cm^{3}로 가장 가벼울 뿐 아니라 비강도가 크며, 절삭성 또한 뛰어난 것이 특징으로 항공기 및 자동차 엔진 등의 경량구조재료로서 연구개발의 대상이 되고 있다.

이러한 Mg합금은 좋은 특성에도 불구하고 아직 실용화 및 부품응용면에서는 제한적 용도에 그치고 있는데, 그 이유는 범용의 Mg합금(예: AZ91, ZE41 등)들이 일반적으로 120~150 ℃ 이상의 온도에서 강도가 급격히 감소될 뿐 아니라, Al합금과는 달리 보호성 산화피막이 형성되지 않기 때문에 내식성이 매우 취약해 Mg합금의 사용이 어려웠기 때문이다. 지금까지 이용되는 제조공정은 주로 고압 및 저압 die casting으로서, 국내외의 경우 자동차용 실린더헤드 커버, 트랜스미션 케이스, 디스크 휠, 오일팬 등이 산업화 및 대량생산 단계에 있으나, 비교적 고온에서 사용되는 항공기 및 자동차용 Mg계 엔진합금은 Thixocasting, Squeeze casting 및 Permanent mould casting 등의 신공정에 대한 활발한 연구에도 불구하고 실용화가 거의 제한되어 있는 상태이다.

그러나, 최근에 들어서는 급냉응고법의 장점인 조직 미세화, 비평형상 형성, 화학적 균일성 증가 등을 활용하여 Mg합금의 고온에서의 기계적 성질 및 내식성이 현저히 향상됨에 따라 경량엔진재료로서의 광범위한 응용이 크게 기대되고 있다.

따라서, 본고에서는 국내 항공기 및 자동차용 경량 엔진재료로서 개발 가능성이 매우 높은 고온용 Mg 합금에 있어서 급냉응고법을 이용한 제조공정과 현재까지 개발된 Mg합금들의 특성에 관해 간략히 기술하였다.

2. 급냉응고 Mg합금의 개발현황

2.1. 제조공정

Mg합금은 대기 중에서 산화하기 쉽기 때문에 보호성 분위기에서 용해작업을 해야하며, Al합금보다 열전도율이 낮기 때문에 과냉하기 어려운 단점이 있다. Al합금의 경우는 gas atomization법에 의해 용이하게 급냉응고분말을 얻을 수 있어 과포화고용체의 분해와 준안정상의 생성에 관해 수많은 연구가 행해졌으나, Mg합금의 경우는 위의 단점외에도 용융금속의 반응성이 온도에 따라 급격히 증가하고, 분말 또는 flake의 경우 400~500 ℃ 정도에서 자발적으로 타버리는 위험성이 있어 공정제어가 까다로운 편이다.

따라서, Mg급냉응고합금의 경우에는 gas atomization법 외에 melt spinning법 등의 thin strip 제조 및 파쇄(pulverization)에 의한 제조법이 새로이 부각되고 있다. 여기서는 melt spinning-pulverization에 의한 Mg계 급냉응고합금 제조에 관해 살펴보고자 한다.

2.1.1. Melt spinning

Mg합금의 급냉응고리본을 얻기 위해서는 2가지 melt spinning방법이 사용된다. 즉 free jet melt spinning(jet casting)과 planar flow casting(PFC)법이다. jet cast에서는 용융금속이 crucible 밑의 작은 구멍을 통해 회전하는 wheel에 분사됨으로써, 연속적인 리본이 얻어진다. jet casting은 넓은 범위의 조성에 응용될 수 있지만, 리본 폭이 5 mm이하로 제한된다. 이러한 단점은 PFC법을 채택함으로써 개선할 수 있다. PFC공정은 Fig. 1과 같이 분사 nozzle을 회전하는 chill block에 매우 근접시키고, 직사각형 형상의 orifice를 사용한다. 회전하는 chill block에 안정한 melt pool을 형성시키기 위해 용융금속의 표면장력과 용융금속에 가해지는 분사압력을 적절히 조절할 필요가 있다. 또한 용융금속 표면의 산화 및 공기 포획(air entrapping)을 방지하기 위해 보호성 분위기가 필요하다.

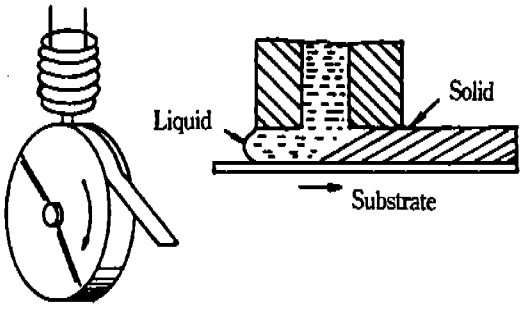

Fig. 1. Schematic illustration of PFC process.

2.1.2. 파쇄

melt spinning 후 리본은 -35~-60 mesh의 크기로 파쇄된다. 일반적으로 최종 분말은 원래 리본의 두께와 비슷한 두께를 가지며, 형상은 불규칙적인 판상을 띠고 있다. Gas atomization에 의한 급냉응고분말은 입도 분포가 넓고, 높은 냉각속도는 미세한 분말에 국한되는데 비해, 이 방법으로 만든 분말은 분말의 크기에 관계없이 균일한 미세조직을 갖는 장점이 있다.

2.1.3. 성형

분말의 성형은 종래의 분말야금공정과 같으며, 파쇄공정을 거치지 않고 리본상태에서 바로 성형되기도 한다. 분말은 can에 넣어 degassing하여, 200~400 ℃에서 1~24시간 동안 진공 열간 성형(vacuum hot pressing)한다. can은 직접 압출되거나 또는 진공열간성형공정을 거친 후 압출되는데, 압출하기 전에 can을 압출온도에서 1/2~4 시간동안 유지시킨 후, 200~400 ℃에서 압출비 14 : 1~18 : 1로 사각형 및 원형으로 압출한다. 성형후에 얻어지는 미세조직은 합금조성 및 성형조건에 따라 결정된다. 지나치게 높은 성형온도 및 장시간 처리는 미세한 결정립 및 석출물을 최적 크기 이상으로 조대화시켜 기계적 성질을 저하시킨다. 급냉응고한 Mg합금에서는 안정한 분산물이 결정립 성장을 억제하여 고온 성형시 조대화를 방지시키며, 이에 따라 성형후의 미세조직은 매우 미세한 결정립으로 이루어지게 된다.

2.2. 합금개발현황

기존의 Mg합금은 크게 나누어 주조용 합금(casting alloy)과 가공용 합금(wrought alloy)으로 대별되는데 가장 많이 사용되는 기존 합금은 Mg-Al-Zn과 Mg-Zn-Zr계 합금으로서 주로 die casting과 압출에 의해 구조재로 성형된다. Mg-Al-Zn계는 주조 상태에서 가장 강인하고 내식성이 우수하며, Mg-Zn-Zr계 합금은 Zn의 고용강화와 MgZn의 중간상의 석출경화에 의해 강도가 상승하지만 주조 조직이 조대하기 때문에 Zr첨가에 의한 결정립 미세화가 필요하다. 이와 같은 합금은 항공기 및 육상 수송기기, 포터블 기기에 널리 사용되나 미흡한 특성들로 인하여 주로 상온용으로 사용되어 왔다.

이에 비해, 급냉응고법으로 제조된 Mg합금은 우수한 기계적 성질과 내식성을 보유하고 있어 항공기 및 자동차용 경량재료로서의 개발연구가 활발히 진행되고 있다. 초기에 개발된 급냉응고합금은 AZ합금에 Y, Nd 등의 희토류원소를 첨가한 재료로서 기존 재료와 특성을 비교하면 상온특성이 고강도 Al합금인 2000계 및 7000계 합금과 비슷한 것으로 나타나 있다. 표 1은 미국의 Allied Signal Inc.에서 개발한 합금들과 기존의 합금들의 특성을 비교한 자료로서, 상온에서의 인장강도와 항복강도값이 매우 높은 것을 알 수 있다. 그러나, 이러한 급냉응고합금은 고온에서의 강도가 일반 주조재보다는 높아 비교적 높은 온도에서도 사용될 수 있지만, 강도 저하가 현격하여 EA55RS 및 EA65RS합금의 인장강도값이 100 ℃에서 350 MPa, 150 ℃에서 150 MPa정도로 나타난다. 그런데, 항공기엔진과 자동차엔진에 적용하기 위해

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of RS & conventional Mg-based alloys

Designation	Alloy composition (wt.%)	Density (g cm^{-3})	Yield strength (MP_a)	Ultimate tensile strength (MP_a)	Elongation (%)	K_q (MPa $m^{1/2}$)
EA65RS	Mg-5.0Al-5.0Zn-5.9Y	1.94	460	515	5.0	-
EA55RS	Mg-5.1Al-5.0Zn-4.9Nd	1.94	425	475	14.0	10
EA55RS[a]	Mg-5.1Al-5.0Zn-4.9Nd	1.85	360	435	15.0	17
AZ91HP	Mg-5.1Al-5.0Zn-0.2Mn[b]	1.81	131	276	5.0	30
ZK60A	Mg-5.4Zn-0.7Zr[b]	1.83	303	365	11.0	-

a: After an annealing treatment. b: Commercial ingot metallurgy alloys.

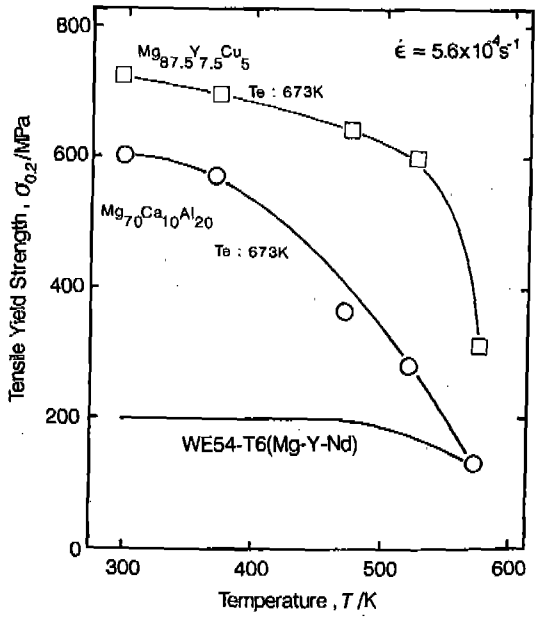

Fig. 2. Tensile yield strength of the Mg alloys at elevated temperature (Te: extrusion temperature).

서는 인장강도값이 각각 250 ℃에서 220 MPa, 200 ℃에서 240 MPa 이상인 Mg합금이 필요한 것으로 알려져 있으므로, Allied Signal Inc.에서 개발된 합금은 엔진용 경량합금으로 사용되기에는 미흡한 상태이다. 따라서, 최근에는 고온에서 더욱 우수한 강도를 유지하는 급냉응고합금의 개발에 연구의 중점을 두고 있다.

새로이 개발된 합금의 대표적인 것은 일본 동북대에서 연구된 것으로서, $Mg_{70}Al_{20}Ca_{10}$(at%)와 $Mg_{87.5}Y_{7.5}Cu_5$(at%) 합금은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 상온 항복강도가 각각 600 MPa, 740 MPa일 뿐만 아니라 250 ℃에서도 항복강도가 각각 300 MPa와 600 MPa의 높은 값을 나타내어 기존의 고온용 주조합금인 WE54(Mg-5.25Y-3Nd, wt%)보다 월등한 가능성을 보이고 있다. 이들 합금 중 Mg-Al-Ca 합금은 내식성도 뛰어난 것으로 분석된 반면, Mg-Y-Cu 합금은 염수에 약한 성질 등으로 인하여 개선되어야 할 문제점들을 갖고 있다. 이외에도 AZ합금에 Ca, Mn, Misch Metal 및 Sr 등의 원소를 새로 첨가하여 급냉응고재료를 새로이 개발하려는 연구와 함께 WE54합금을 Spray Forming 등의 급냉법으로 제조하려는 새로운 시도들이 추진되어 더 나은 특성의 부여가 가능한 것으로 예측되고 있다.

3. 앞으로의 전망

급냉응고분말을 이용한 Mg계 경량구조재료의 개발은 공정자체의 이점으로 인하여 경량재료연구분야에서 두드러진 성과를 거두고 있으며, 기계적 성질 및 내식성 향상 면에서 커다란 발전을 보이고 있다. 그러나 아직까지 까다로운 Mg분말제조 및 성형공정 기술이 일반화되어 있지 않고, 개발된 급냉응고합금의 creep성질 등 고온에서의 기계적성질이 미흡한 실정이므로 이에 대한 문제는 지속적으로 해결해야 할 것으로 보인다. 따라서 급냉응고재료의 실용화를 위해서는 새로운 합금의 개발과 아울러 대량생산공정이 개발되어야 하며, 내식성 향상을 위해서는 응고시 냉각속도를 높히는 방안과 부식방지용 코팅 기술과의 접목연구 등이 동시에 수행되어야 고온용 Mg합금에 대한 잠재된 수요를 충족시킬 수 있을 것으로 전망된다.