기술자료

마그네슘 주조성형기술의 개발동향

김현식 · 예대희 · 강민철[†]

한국마그네슘기술연구조합

Development Trend of Magnesium Casting Technology

Hyun-Sik Kim, Dea-Hee Ye, and Min-Cheol Kang[†]

Korea Magnesium Technology Research Association, Changwon 641-831, Korea

Abstract

Magnesium alloys have many advantages such as light-weight, high machinability, damping capacity, etc. So magnesium alloy parts have been used in transportation, mobile phone, military industries. Because of HCP atomic structure, Magnesium is very difficult in plastic deformation process, so most of magnesium products are fabricated by casting process. Magnesium alloys have low heat-capacity, high fluidity and low Fe solubility. For these reasons it is more suitable than aluminum in mass-production by casting. And various casting technologies have been developed. So casting technologies for magnesium developed recently is discussed in this paper.

Key words : Magnesium, Diecasting, Semi-solid casting, Twin-screw, Mg-plus.

1. 서 론

마그네슘합금은 우수한 경량화효과 외에 치수안정성, 기계가공성, 진동흡수능, 전자파 차폐성 등의 특성이 뛰어나 자동차 등의 수송기계 및 전자부품 등의 구조, 기능성 재료로서 많은 주목을 받고 있다. 그러나 마그네슘은 고온 특성이 나쁘고 마그네슘 자체가 높은 산화성을 가지고 있어 항상 화재의 위험성을 가지고 있다[1-5]. 또한 해수 및 대기중에서 내식특성이 불량하여 그 사용에 한계를 보이는 부품들이 있다. 이러한 단점에도 불구하고 마그네슘은 현재 전세계적으로 차세대 경량화 재료로서 각광을 받고 있고 전자산업분야, 국방소재분야, 항공분야 등으로 적용 범위가 확대되고 있다[8,9]. 특히 연비향상을 위한 자동차 산업 및 휴대기기용 경량화 부품에 대한 적용량이 확대되고 있고 철강 및 알루미늄의 경량화 대체소재로 각광받고 있다. 그러나 마그네슘은 원자구조가 조밀육방정(HCP) 구조로서 상온에서 소성가공성이 불량하여 상온가공이 가능한 알루미늄소재에 비해 경쟁력이 떨어진다. 이에 반해 마그네슘은 소재의 열용량이 낮고 금형과의 반응성이 없어 금형수명이 향상되며 유동성이 우수해 다이캐스팅 등의 주조방식으로 제품을 생산하는 경우 같은 주조재인 알루미늄, 아연 소재에 비해 많은 잇점을 가지고 있고 이에 따라 마그네슘 부품생산에는 대부분 주조성형 방식이 적용되고 있다[9-11]. 이렇듯 주조성형방식에 적합한 마그네슘의 경우 해외의 경우에는 제품 목적에 따라 다양한 주조성형방식이 개발되고 있고 몇몇 방식은 국내에서도 적용중에 있다.

따라서 본고에서는 국내외에서 최근까지 개발된 다양한 마그

네슘 주조 성형방법에 대한 원리 및 특징을 소개하고자 한다.

2. 국내 적용중인 마그네슘 주조 성형기술

마그네슘 주조방식은 크게 중력주조 방식과 가압주조방식으로 구분할 수 있고 중력주조방식에는 사용되는 몰드의 형태에 따라 사형주조와 금형주조로, 가압주조방식의 경우 가압력 및 용탕상태에 따라 저압주조, 고압주조, 반고상주조로 나눌 수 있다. 여기서 반고상 주조는 칩소몰딩(Thixomolding)과 네오캐스팅(Rheocasting)으로 다시 구분할 수 있다[5,10].

국내 마그네슘 주조산업의 경우 중력주조방식보다는 가압주조방식인 다이캐스팅방식을 통해 대부분 제품생산을 하고 있고 이러한 다이캐스팅 방식 중에서도 고압 다이캐스팅(HPDC, High Pressure Die Casting)방식이 주로 사용되고 있다. 앞서 언급한 전자제품케이스나 자동차부품의 경우에도 대부분 고압 다이캐스팅을 통해 제품이 생산된다. 전자제품 분야의 경우 일본, 중국과 더불어 한국의 주조기술이 매우 높은 면모를 보이고 있으며 지난해의 경우 전자제품분야에만 10,360톤이 사용되어 국내 총 수요의 65%를 차지할 정도로 매년 급속한 수요 증가 추세에 있으며 주된 제품은 스마트폰 및 태블릿PC의 내장용 브라켓이다. 자동차 부품의 경우 국내에서는 스티어링 휠코어, 시트 프레임, 헤드램프 하우징 등과 같이 제품무게 2 kg 미만의 중소형부품에 대해서만 개발 및 양산이 집중되어 있는 실정이고 국외에서 적용중인 인스트루먼트 패널이나 트랜스미션 케이스와 같은 대형 부품들의 경우 국내 개발은 이루어졌고 양산 적용

[†]E-mail : mkang@krnt.or.kr

을 검토중에 있다[10,11].

다이캐스팅방식은 생산 자동화율이 높고 생산속도가 빠르기 때문에 부품 제조원가의 절감효과를 얻을 수 있고 주조된 제품의 치수정밀도 및 표면조도가 우수한 특징을 가지고 있기 때문에 부품의 경량 박육화에 적합한 생산방식이며 높은 생산성과 고품질을 겸비하고 있어 다양한 부품제조에 활용되고 있다. 이러한 다이캐스팅방식은 주조방식에 따라 세분화될 수 있는데 국내에 적용되고 있는 다이캐스팅 방식에는 핫챔버(Hot chamber), 콜드챔버(Cold chamber), 스퀴즈캐스팅(Squeeze casting), Mg-plus, 멀티슬라이드 다이캐스팅(MSDC, Multi Slide Die Casting), 칵소몰딩(Thixomolding) 등이 있다[10]. 이들 방식중 핫챔버와 콜드챔버 다이캐스팅의 경우 국내외에서 보편화된 기술로서 아연(Zn)재질은 핫챔버방식, 동(Cu)과 알루미늄 재질은 콜드챔버 방식을 많이 사용하고 있고 마그네슘은 두 방식 모두 사용되나 2t 이상의 후속제품에는 콜드챔버, 박육제품은 핫챔버를 주로 사용하고 있다. 이들 제조방식의 경우 국내에서도 다양한 형태의 설비를 제작할 수 있을 정도로 보편화된 기술이나 Mg-plus, 칵소몰딩 등과 같은 주조성형방식의 경우 국내에 널리 사용하는 기술은 아니지만 국내에서 양산을 활발히 진행하고 있다.

2.1 스퀴즈캐스팅(Squeeze casting) 성형방식

스퀴즈캐스팅이란 금형의 캐비티(Cavity)에 저속충진한 용탕에 추가적으로 기계적 외력으로 고압을 가하고 주조 응고시키는 주조법을 말하고 1966년에 개발된 어큐라드(Acurad)법을 개선시킨 성형방식이다. 이 성형법은 금형내에 가스유입을 방지하기 위해 용탕이 충류를 유지하도록 하여 충류 한계내에서 금형 캐비티를 충전하고 용탕의 선단으로 가스를 배출시키는 방식으로 일반적인 다이캐스팅에서 사용하는 게이트 속도에 비해 1/5이하의 낮은 게이트 속도가 특징이다[8].

알루미늄 합금에는 보편적으로 사용되나 아직 마그네슘 합금에는 많이 사용되지 않는 주조성형 방식인 스퀴즈 다이캐스팅 공법은 금형내에 액상이나 반고상의 용탕을 공급하고 금형내에 공급된 용탕에 높은 압력을 가압하여 유지하는 공정으로 용탕 단조법, 액상단조법, 반용융 단조법이라고도 불린다. 이 방법의 경우 일반 다이캐스팅제품에 비해 용탕을 인젝션하는 과정에서 높은 가압력이 작용하기 때문에 제품 내에 기포와 수축공 등의 주조결함을 제거할 수 있고, 균일한 조직을 얻을 수 있기 때문에 일반적인 다이캐스팅 방법보다 기계적 특성이 뛰어나고 피로강도가 양호한 특징이 있다.

아직은 마그네슘 합금을 이용한 스퀴즈 다이캐스팅에 대한

Fig. 1. Squeeze casting system.

개발사례가 없으나 현재 국내에서 개발을 추진하고 있는 자동차부품인 엔진 마운팅 브라켓(Engine mounting bracket)의 경우 높은 기계적 특성이 요구되기 때문에 기존의 다이캐스팅 공법이 아닌 스퀴즈 다이캐스팅공법을 이용한 제품개발을 진행중이다.

2.2 Mg-plus 성형방식

Mg-plus 설비는 플라스틱 사출기 전문제조사인 일본의 소딕(Sodick)사에서 2002년에 개발한 장비로 국내의 경우 2개업체에서 도입하여 휴대폰 케이스 등의 전자제품 생산에 적용되고 있다[5,9,10].

Mg-plus 설비방식은 기본적으로 콜드 챔버 설비와 유사한 설비구조를 가지나 원천적으로 용해로를 이용한 용탕공급방식을 사용하지 않는다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 사용되는 재료는 일반적으로 사용되는 마그네슘 잉곳을 사용하지 않고 $\Phi 50 \sim 90$ 의 봉재를 사용하는데 상부의 1차 실린더에 장입되면 용해잠열이 낮은 마그네슘합금은 좌측부분이 히터(Heater)에 의해 국부적으로 가열되면서 용해된다. 그러면 우측의 반응용부위는 열팽창에 의해 2차 실린더를 완전히 채우게 되면서 자동적으로 실링되는 효과가 발생하고 이미 용융된 마그네슘 용탕은 아래의 2차 실린더인 사출실린더로 이동된다. 적정량의 용탕이 이동되는 경우 사출시 용탕이 1차실린더로 다시 이동되지 않도록 스톱퍼(Stopper)가 작동하고 사출실린더 내의 플런저가 가압하여 용탕을 노즐 및 금형내로 채워주는 형태이다. 이후 1차 실린더의 플런저가 후퇴 이동하여 추가의 봉재를 1차 실린더에 채워면서 1 cycle이 완료되게 된다. 이 설비방식의 경우 일반적인 다이캐스팅 공법에 필요한 마그네슘 용해로가 없고 설비자체의 밀폐형 용융존(melting zone)에서 소량씩 마그네슘의 용해가 이루어지는 방식이므로 별도의 용탕보호가스가 필요 없고 부분적으로 Ar gas를 이용하여 용탕의 산화를 방지한다. 이에 따라 용해로의 유지보수, 마그네슘 용탕 산화문제, 보호가스의 유출 등에 대한 문제가 발생하지 않는 장점이 있다.

그리고 최종 성형품의 성형량의 과약하여 적정량만 용융하여 성형하기 때문에 재료손실 및 전력소비량이 줄어들게 된다. 그러나 아직은 소재로 사용되는 봉재의 가격이 기존 다이캐스팅

Fig. 2. Schematic structure of Mg-plus.

에 사용되는 잉곳에 비해 가격이 다소 비싸고 고온에서 작동하는 스토퍼 및 사출실린더의 내구성에 문제가 발생할 수 있으며 아직은 300ton 미만의 설비만 개발되어 있어 대형 부품 생산에는 한계를 보여 현재는 소형제품의 제조에 사용되고 있다.

2.3 칩소몰딩(Thixomolding) 성형방식

플라스틱 사출장비를 주로 생산하던 캐나다의 Husky사에서 개발한 성형방식으로서 액상이 아닌 고상과 액상이 공존하는 반응고(Semi-solid) 상태의 슬러리(Slurry)를 이용하여 제품을 성형하는 방식이다[6,9,13,15].

칩소몰딩은 마그네슘 잉곳을 이용한 용탕을 사용하지 않고 원재료로서 3~5 mm 정도의 마그네슘 칩(Chip)을 사용한다. 원재료는 사출부의 상단에 위치하고 있는 호퍼(hopper)에 장입되고 필요량만큼 사출부로 이송된다. 이송된 마그네슘 칩은 사출부내에 설치되어 있는 스크류(Screw)에 의해 전진운동을 하게 되고 전진운동을 하면서 국부적으로 용해되어 금형내로 장입되기 직전에는 반응용 상태로 되어 금형 내에는 반응용 상태의 용탕이 장입되는 구조이다(Fig. 3). 칩소몰딩 성형 방식의 경우 액상이 아닌 낮은 온도인 반고상상태의 용탕을 사용하기 때문에 Fig. 4에 나타난 바와 같이 제품내부의 조직이 치밀하고 미세기공이 현저히 줄어들며 콜드챠버 방식에 비해 스크랩 발생이 작고 금형의 열충격이 적어 금형수명이 향상되고 때문에 기계적 특성과 치수정밀도가 높은 특징이 있다.

이 방식의 경우 별도의 용해로가 필요 없기 때문에 고가의 육불화황(SF_6) 가스를 사용할 필요가 없고 사출부위의 반응용 용탕을 보호하기 위해서는 아르곤(Ar) 가스를 사용하기 때문에 비용 및 환경규제문제를 해결하는 방식으로 볼 수 있다. 그러나

(a) Mg mobile part by cold chamber

(b) Mg mobile part by thixomolding

Fig. 4. Comparison of optical microstructure.

낮은 온도의 슬러리를 이용하여 사출하기 때문에 용탕의 유동성을 확보하기 위해 일반 다이캐스팅 방식에 비해 높은 금형온도

Fig. 3. Thixomolding and Mg chip feeding system.

Table 1. Comparison for various Mg diecasting method

	Hot chamber	Cold chamber	Mg-Plus (Sodic)	Thixomolding
용융방식	용해로	용해로	가열 cylinder	가열 cylinder+ screw
용해온도 (°C)	640-670	640-670	585-660	585-670
보호가스	SF6	SF6	초기준비시 Ar	Ar
재료형태	잉곳	잉곳	Rod	소립 Pellet
다이체결력 (ton)	max 800	max 4500	40-260	75-1600
사출압력 (MPa)	250-350	400-800	60	62-103
사출속도 (m/sec)	2-3		2-3	3-4
생산성	4-5EA/min	1-2EA/min	3-4EA/min	4-5EA/min
스트랩 발생량	中	大	大	中

가 필요하고 유동성이 떨어지는 슬러리를 이동시키기 위해 고압 성형이 필요하므로 사출부위의 고가 부품인 스크류의 마모가 심하고 마그네슘 잉곳 대신 칩형태의 재료를 사용하기 때문에 재료비가 다소 높은 점이 단점이다.

이와 같이 다양한 성형방식이 국내에서 사용중에 있고 이들 성형방식에는 각각의 장/단점을 보유하고 있는데 이들 방식의 장/단점은 아래의 Table 1과 같이 정리할 수 있다.

3. 국외 개발중인 마그네슘 주조 성형기술

국내에서 사용중인 여러 성형방식 외에 다양한 성형방식이 최근까지 개발되었다. 이들 성형방식중 일부는 국내에서 기술개발중인 것도 있으나 아직은 국내에서 제품 생산에 직접적으로 적용되지 않은 방식들로서 대부분 유럽지역에서 완성차 업체와 협력하여 개발한 공법으로 고품질 자동차부품생산을 위해 주로 개발되었다. 이들 고품질 부품 성형방식은 대부분 반응고 성형방식을 통한 제조방식으로 특히 고품질 반응고 슬러리를 제조

Fig. 5. Rheocasting using cooling channel.

하는 방식이 주를 이룬다.

기존의 슬러리 제조방식은 칩소몰딩 주조시에 사용되는 방식인 미세 칩을 가열하여 균일한 반응고 슬러리를 제조하는 방식이 있고 그 외로는 Fig. 5에 나타난 것과 같이 액상을 용탕을 냉각 채널(channel)에 통과시켜 간단하게 반응고 슬러리를 제조하는 방식이 있다. 마그네슘 칩을 사용하여 반응고 슬러리를 제조하는 방식은 품질이 우수하여 현재에도 칩소몰딩에 주로 사용하고 있는 방식이나 냉각채널을 통한 슬러리 제조방식의 경우 균일한 슬러리 제조가 어렵고 온도제어가 힘들어 마그네슘의 경우 잘 사용하지 않는 방식이다[8].

이에 따라 비교적 간단하게 고품질의 슬러리를 제조할 수 있는 제조법에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.

3.1 봉재를 이용한 칩소몰딩 성형법

독일의 RWTH aachen 대학에서 개발한 성형방법으로서 국내에서 적용중인 마그네슘 칩을 원료로 하는 칩소몰딩이 아닌 봉재를 원료로 사용하는 칩소몰딩 방법이다. 이 방식은 연속주조 형태로 봉재를 연속적으로 주조하고 1회 주입량에 맞게 필요한 길이만큼 절단하여 별도의 가열설비에서 고액공존영역까지 봉재를 가열한 후 다이캐스팅 설비의 슬리브에 장입 및 사출하여 금형내에 주입하는 방식이다[8].

기존의 마그네슘 칩 방식에 비해 균일한 조직을 얻을 수 있고 일반적인 콜드챔버와 유사한 형태의 주조기를 사용함으로써 고가의 스크류가 필요 없어 보다 높은 가격경쟁력을 가질 수 있는 장점이 있으나 공급되는 봉재의 균일성 확보와 슬러리의 온도제어가 상당히 어려워 경제성을 확보하기가 어려운 단점이 있다.

3.2 트윈스크류(Twin screw)를 이용한 레오캐스팅 성형법

한단계 진보한 반응고 성형법으로서 영국의 BCAST (Brunel Centre for Advanced Solidification Technology at Brunel University)에서 개발한 방법이다. 이 방식은 냉각 채널을 통해 슬러리를 제조하던 기존의 레오캐스팅 방식에서 슬러리 제조법을 진보시킨 방법으로서 보다 우수한 슬러리를 손쉽게 제조할 수 있다 [8,14,15].

슬러리 제조장치는 회전하는 2개의 스크류가 장착되어 있고

Fig. 6. Thixomolding system using Mg rod.

Fig. 7. Rheocasting system using twin screw.

Fig. 8. DCRC Process.

이 스크류들은 서로 정확하게 맞물려 회전하면서 슬러리가 스크류 사이에 남지 않고 통과하도록 정교하게 만들어져 있다. 최초에 용탕은 1회 주조만큼만 슬러리 제조기에 주입되고 용탕이 이들 스크류를 통과하면서 높은 전단응력과 난류조건하에서 점차 우수한 특성의 슬러리로 변화되고 이렇게 만들어진 슬러리는 배치(Batch) 방식으로 일반적인 콜드챔버 다이캐스팅 설비에 20-30초마다 공급된다.

이러한 트윈 스크류를 활용한 레오캐스팅 성형법의 경우 다음과 같은 다양한 장점을 가지고 있다.

첫째, 주조품 전체가 미세하고 균일한 미세조직을 얻을 수 있다.

둘째, 0.5vol% 이하의 매우 낮은 기공율을 가질 수 있어 열처리가 가능하다.

셋째, 미세한 구형의 석출물들이 전체적으로 분산되어 기계적 특성이 좋아진다.

넷째, 주조성이 떨어지는 다른 합금이나 소성가공재의 성형도 가능하다.

다섯째, 용접이 잘되고 높은 금형수명, 짧은 cycle time 으로 인해 제조원가가 저렴하다.

3.3 트윈 스크류 방식을 활용한 빌렛 주조법

트윈스크류를 이용하는 DCRC (Direct Chill Rheo-Casting)) 프로세스는 반응고 슬러리를 제조하는 트윈스크류를 빌렛 주조 턴디쉬(Tundish) 양쪽에 설치하여 지속적으로 반응고 슬러리를 중앙부의 턴디쉬로 공급하고 공급된 슬러리는 턴디쉬 내에 설치되어 있는 스크류를 회전시켜 강제로 빌렛 주조 몰드로 공급하는 방식이다[14].

액상의 용탕을 이용하여 주조하는 일반적인 DC (Direct

Fig. 9. Microstructure from the cross section of 80 mm diameter billets produced by the DC and the DCRC process.

Chill) 주조법에 의해 생산되는 경우 120 μm 이상의 불균일한 결정립사이즈를 보이는 데 비해 DCRC 방식을 통해 빌렛을 제조하는 경우 Fig. 9에 나타난 바와 같이 결정립사이즈가 50 μm 이하의 균일한 미세조직의 빌렛을 얻을 수 있고 기존의 DC 주조법에 비해서 합금성분들도 균일한 특성을 보이고 있어 이러한 고품질의 빌렛을 활용하는 경우 15%정도 강도와 인성이 향상된 압출재 생산이 가능하다.

4. 결 언

우리나라의 마그네슘부품생산은 실질적으로는 1996년 이후부터 이루어졌다고 볼 수 있고 약 15년의 역사를 가지고 있다. 이러한 짧은 역사에도 불구하고 국내 연구소, 학계, 업계의 많은 노력으로 인해 해외 선진국에 비해 일부 기술을 제외하고는 동등한 수준의 기술력을 보유하고 있다. 여러 제조 공정기술 중 마그네슘 제련, 소성가공기술 및 일부 대형품에 대한 사형주조 기술 및 다이캐스팅기술에 대해서는 선진국의 여러 업체에 비해 기술력이 많이 떨어지는 것은 사실이나 그 기술의 격차는 점차 줄어들고 있는 상태이고 그간 전량 수입에 의존하고 있는 마그네슘 잉곳의 경우 포스코에서 기술개발을 완료하여 2012년부터 국내 공급이 가능해짐에 따라 그간 침체되어 있던 국내 마그네슘 시장도 활발한 성장세를 보일 것으로 예상된다. 특히 세계적으로 환경적이 문제가 중요해짐에 따라 경량 자동차부품군의 수요가 기대되며 스마트폰, 태블릿 PC 등의 성장세에 힘입어 경량 마그네슘 부품 케이스 등의 전자부품수요도 증가할 것으로 기대된다.

이러한 국내의 마그네슘 시장규모의 성장에 따라 많은 제조공정기술, 특히 고급화 제조기술이 개발되어야 하나 국내의 경우 정부출연연구소, 대학 등에서 지속적인 R&D를 하고는 있으나 실질적으로는 각 해당업체에서 자체적으로 해결해야 하는 실정이다. 물론 국내의 마그네슘업체들이 해외의 업체들과 같이 규모가 커서 R&D에 대한 투자가 원활하게 이루어지는 업체들인 경우 문제는 없으나 국내는 대부분 중소기업 주도로 마그네슘 제품이 개발되는 만큼 해당업체에서는 개발자금에 대한 압박을 느낄 수 밖에 없다. 따라서 향후 여러 산업에서 주도적인 역할이 기대되는 요소기술 개발에 대해 대만이나 중국과 같이 정부의 전폭적인 지원이 있어야만 해외 우수기업들과의 경쟁력을 가질 수 있고 점차 증가하는 세계 마그네슘 부품시장에서 대등한

지위를 얻을 수 있을 것이다.

국내는 물론 국외의 많은 전자제품업체 및 완성차업체에서 마그네슘 제품의 적용이 점차 확대되고 있고 보다 더 경량화, 고급화를 추구하는 시대이니 만큼 우리나라의 마그네슘부품산업이 세계시장을 주도적으로 이끌어 가기 위해서 향후 치열하게 펼쳐질 마그네슘시장을 어떻게 준비하느냐가 정부는 물론 관련업체가 풀어나가야 할 과제이다.

참고문헌

- [1] "Magnesium and Magnesium Alloys", ASM Specialty Handbook, (1999)
- [2] "Hand book of advanced magnesium technology" JMA(2000), p.33-53
- [3] "59th Annual World Magnesium Conference", IMA, (2002)
- [4] KMTRA homepage : www.kmt.or.kr
- [5] M. C. Kang, D. H. Ye, K. Y. Sohn: J. Kor. Foundrymen's Soc, "Recent Trend of Magnesium Fabrication Technology", 23(6) (2003) 306-311
- [6] HK-hightech homepage : www.hkhigh-tech.co.kr
- [7] www.cct-bw.de
- [8] "Magnesium alloys and processing technologies for lightweight transport applications - a mission for Europe", Global Watch Mission Report (DTI, 2004), p10-24
- [9] M. C .Kang, "The trend and prospect of world magnesium industry", 4th advanced magnesium technology workshop (KMTRA, 2005)
- [10] H. S. Kim, "The trend for advanced magnesium diecasting machine", 6th advanced magnesium technology workshop (KMTRA, 2007)
- [11] O. S. Kim, "Thin-walled & integrated automotive parts by HPDC", International Magnesium Symposium for Advanced Industry Trends (KMTRA, 2010)
- [12] S. Tzamtzis, H. Zhang, "Melt conditioned high pressure Diecasting of Mg alloy", Magnesium Technology (TMS, 2009) p91-96
- [13] Magnesium Injection Molding (Springer), p124-130
- [14] S. M. Zhang, Z .Fan and Z. Zhen: Mater. Sci. Tech, "Direct chill rheocasting(DCRC) of AZ31 Mg alloy", 22 (2006) 1489-1498
- [15] H. V. Atkinson : Mater. Sci. Tech, "Semisolid processing of metallic materials", 26(26) (2010) 1401-1413