

技術資料

반응고성형기술과 마그네슘합금에의 응용

김영인, 이정수, 김광배

SSM Forming Technique and Applications for Magnesium Alloys

Y. I. Kim, J. S. Lee and K. B. Kim

1. 서 론

액상과 고상이 공존하는 온도영역에서 금속재료를 성형하는 기술인 반응고금속성형기술(semi solid metal forming)은 1970년대 초반 미국 MIT대학의 Flemings가 Pb-Sn합금의 'Hot tearing' 현상을 연구하기 위한 실험으로 원뿔형 고온 Viscometer를 제작하여 Pb-Sn합금의 응고도중 덴드라이트의 변형 및 파괴되는데 필요한 전단강도 계산의 방법으로 한개의 뿔과 그 외측에 위치한 보다 큰 뿔형 용기 사이에 형성된 환형공간에 Pb-Sn합금을 용해하여 주입하고 외측 뿔형 용기를 회전시켜 그 회전력을 이용해서 응고중인 반응고 Pb-Sn합금의 고온 점도를 측정하던 중 실험전의 예상과는 달리 반응고 Pb-Sn합금의 점도가 용해된 액상일 때 보다도 크게 저하되지 않는 현상을 우연히 발견함으로써 초기개발의 계기가 되었다[1].

이와 같은 현상은 원통용기의 회전에 의해서 반응고 Pb-Sn합금의 덴드라이트 조직에 전단응력이 가해져서 덴드라이트 조직의 성장이 억제되며 미세하고 구형인 고상입자들이 형성되고 이러한 구형의 고상입자들이 나머지 액상에서 원통용기의 회전에 의해 미끄러짐으로써 점도 저하를 초래한 것으로 밝혀졌다.

반응고상태에서 이러한 Thixotropy특성(변형 속도에 따라 반응용상의 조직이 변화하며, 이러한 조직변화가 점도의 변화를 일으키는 것)을 이용하여 변형을 진행시키면 '점도증가의 둔화'로 인해 적은 응력변화로도 우수한 성형성을 유지할 수 있다[2].

2. 반응고금속의 조직 및 성형조건

반응고성형은 해당금속에 대해서 액상과 고상이 공존하는 온도영역에서 이루어지므로 상태에서 액상선(liquidus)과 고상선(solidus) 사이의 온도영역이 넓게 분포해야만 우수한 성형성과 성형공정의 편의도에 있어서 유리하다. Flemings의 우연한 발견에서도 알 수 있듯이 반응고금속 성형을 위한 금속은 덴드라이트상이 아닌 구형의 고상이 액상에 비해서 미세하고 균일하게 분포되어야 함이 필수적이다. 해당금속의 미세조직이 구형의 고상조직을 갖지 못하면 반응고영역에서의 마크로편석, 열간균열 등과 같은 결함이 발생하기 쉽다[3,4].

이러한 반응고금속의 조직형태에 따라 성형시의 변형저항의 차이가 발생하므로 원료금속의 조직제어는 필수적이다. 일반적으로 금속조직이 구형일수록, 또 액상의 비율이 증가할수록 반응고 상태에서의 점도가 감소한다. 성형금속의 점도감소가 지나치면 우수한 성형성을 얻을 수는 있으나 취급에 어려움이 따르고 점도증가가 지나치면 변형저항이 급격히 증가하여 우수한 성형성이 기대될 수 없으므로 성형금속에 대한 성형시의 적정점도의 파악이 필요하다.

현재까지의 연구결과에 의하면 덴드라이트의 성장을 억제하고 미세한 구형의 고상조직을 얻기 위해서는 전단변형속도, 교반시간을 증가시키고, 냉각속도를 감소시키는 것이 유효한 방법으로 보고되었다[5,6]. 다음 그림 1에 평뿔대에 의한 Al-Cu합금결정형상에 미치는 냉각속도, 교반속도

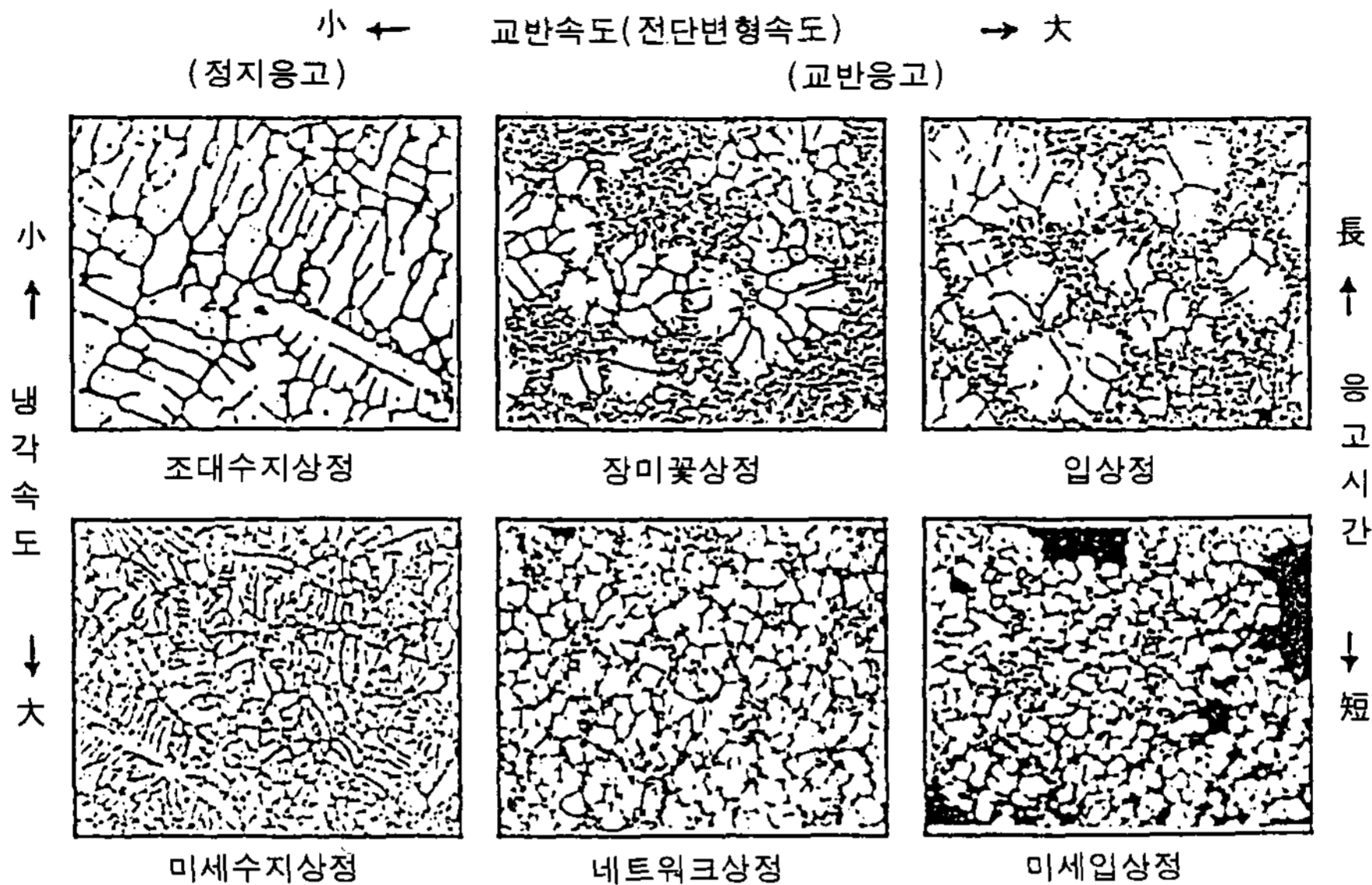


그림 1. Al-Cu합금 결정형상에 미치는 냉각속도 및 교반속도의 영향

의 영향(Al-10%Cu)을 보였다.

이와같은 반응고금속의 미세조직에서 교반에 따른 결보기 점도를 표현한 식을 다음 식 (1)에 보였다[7].

Mori(森)등의 현탁액의 점도식을 기본으로 한 점도식

$$\eta_a = \eta_{La} \left[1 + \frac{d \cdot S_r}{2 \left(\frac{1}{f_s} - \frac{1}{f_{SCR}} \right)} \right] \quad (1)$$

η_a : 반응고금속의 결보기 점도(Pa·s)

η_{La} : 액상의 결보기 점도(Pa·s)

d : 현탁입자의 평균지름(m)

S_r : 현탁입자의 비표면적(표면적/체적)(1/m)

f_s : 중량고상율(-)

f_{SCR} : 유동한계중량고상율(-)

3. 반응고 성형기술의 종류

합금의 반응고상태를 응용한 process에는 MIT 대학의 Flemings등이 개발한 레오캐스트법이나 일단 고상을 입상화한 상태에서 냉각된 소재를 반응고온도로 재가열해서 성형하는 Thixocasting 법, 소재를 높은 고상률의 상태로 금형내에 고압 성형하는 SSF법 등이 있다. 또, 반응고상태에서 섬유나 입자를 첨가해서 복합재료를 성형하는

process를 콘포캐스트법이라 부르고, 고상의 물리적인 교반 작용에 의한 첨가물의 균일한 분산이 용이한 것이나 비교적 저온인 것들에 의해 matrix와 첨가제의 계면반응 억제가 가능하다고 할 수 있다. 표 1에 일반적인 반응고성형법의 특징과 이점을 간략히 보였다.

특히, 마그네슘합금은 알루미늄합금과 함께 주로 다이캐스트법에 의해 반응고성형되고 있다. 그러나 용탕을 고속으로 금형내로 사출한 결과 성형체 내부로의 가스의 혼입이나 균열 등의 구조결함이 발생되기 쉽기 때문에 제품의 신뢰성이 떨어지는 경우가 있었다. 일반적인 주조공정이 까다로운 마그네슘합금의 경우 여러가지 반응고 성형법을 이용한 가공법이 모색되고 있다[8-14]. 다음 그림 2에 마그네슘합금의 다이캐스팅의 모식도와 그림 3,4에 마그네슘합금의 성형에서 Stir-Cast Chip과 Strain-Induced Bulk를 사용한 실험공정을 보였다.

4. 반응고성형금속의 제조법

상기한 바와같은 반응고금속 특유의 미세조직을 얻기 위해서는 특수한 공정이 필요하다. 대표적인 반응고 금속의 제조방법은 다음과 같으며 표 2에 반응고 금속의 제조방법과 성형법을 간

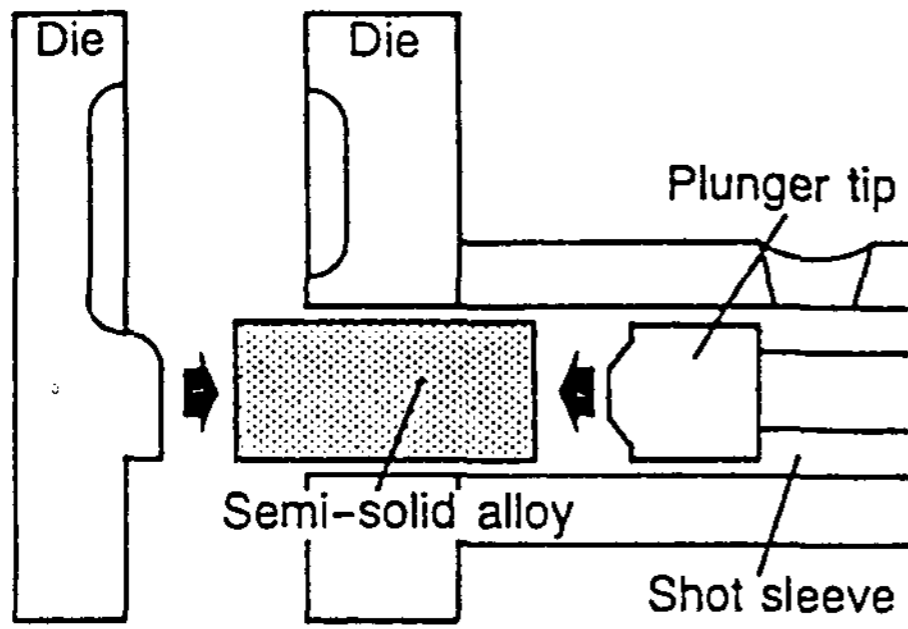


그림 2. 마그네슘합금의 반응고 다이캐스팅의 개략도

략히 보였다.

4.1 전자교반방식[15-17]

전자교반방식에 의한 반응고금속의 연속제조 기술은 알루미늄합금에 있어서는 공업적인 수준으로 달성되었다. Rheo Tech에 있어서는 주로 동합금, 철합금의 고용점금속을 대상으로 하여 연구가 진행되고 있다. 전자교반방식의 실험장치를 그림 5에 보였다.

용탕은 턴디쉬에서 전자교반용 코일을 장착한 교반·냉각조를 경유하여 배출 노즐에서 연속적

표 1. 반응고성형 프로세스의 특징 및 기대효과

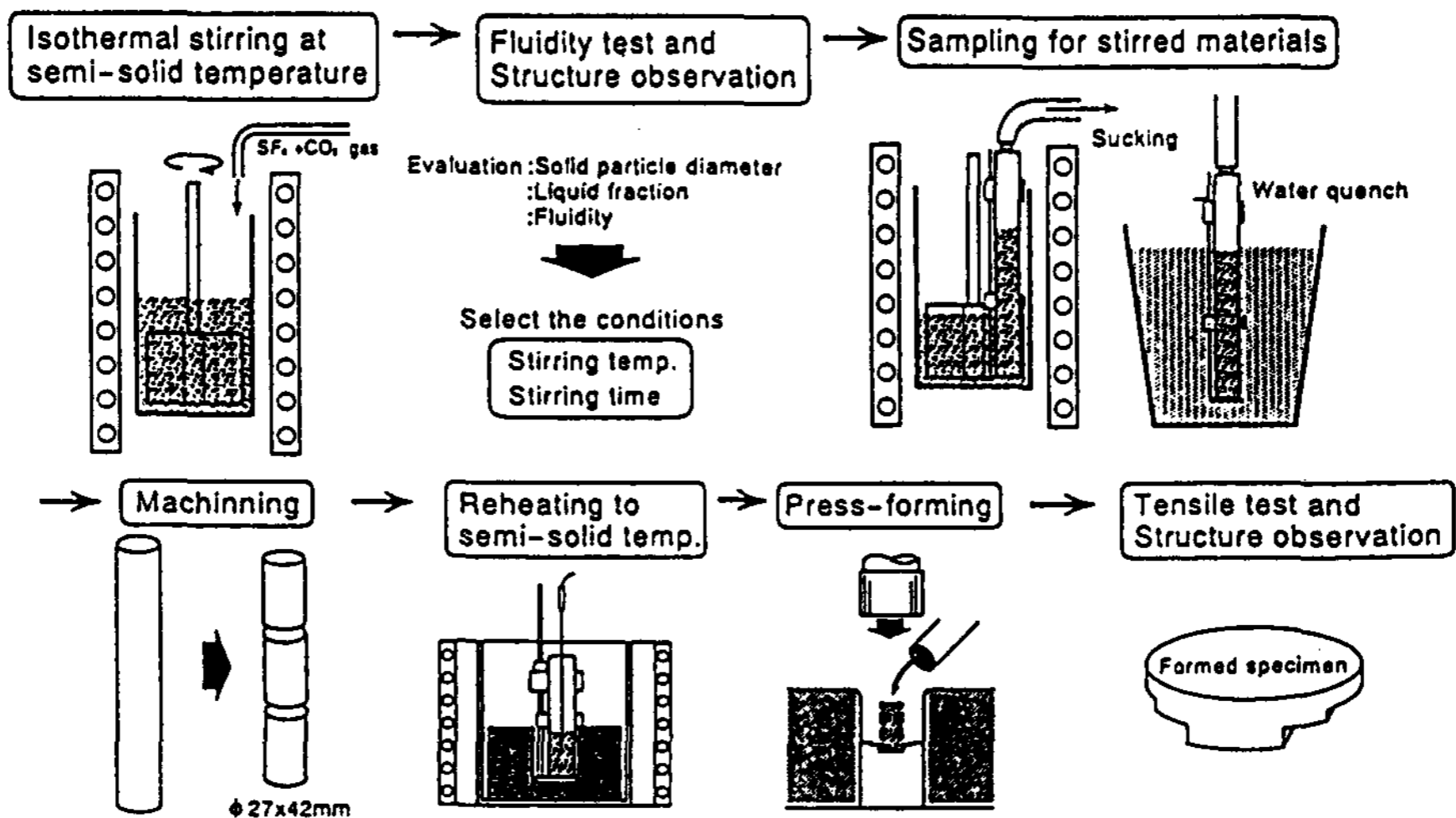
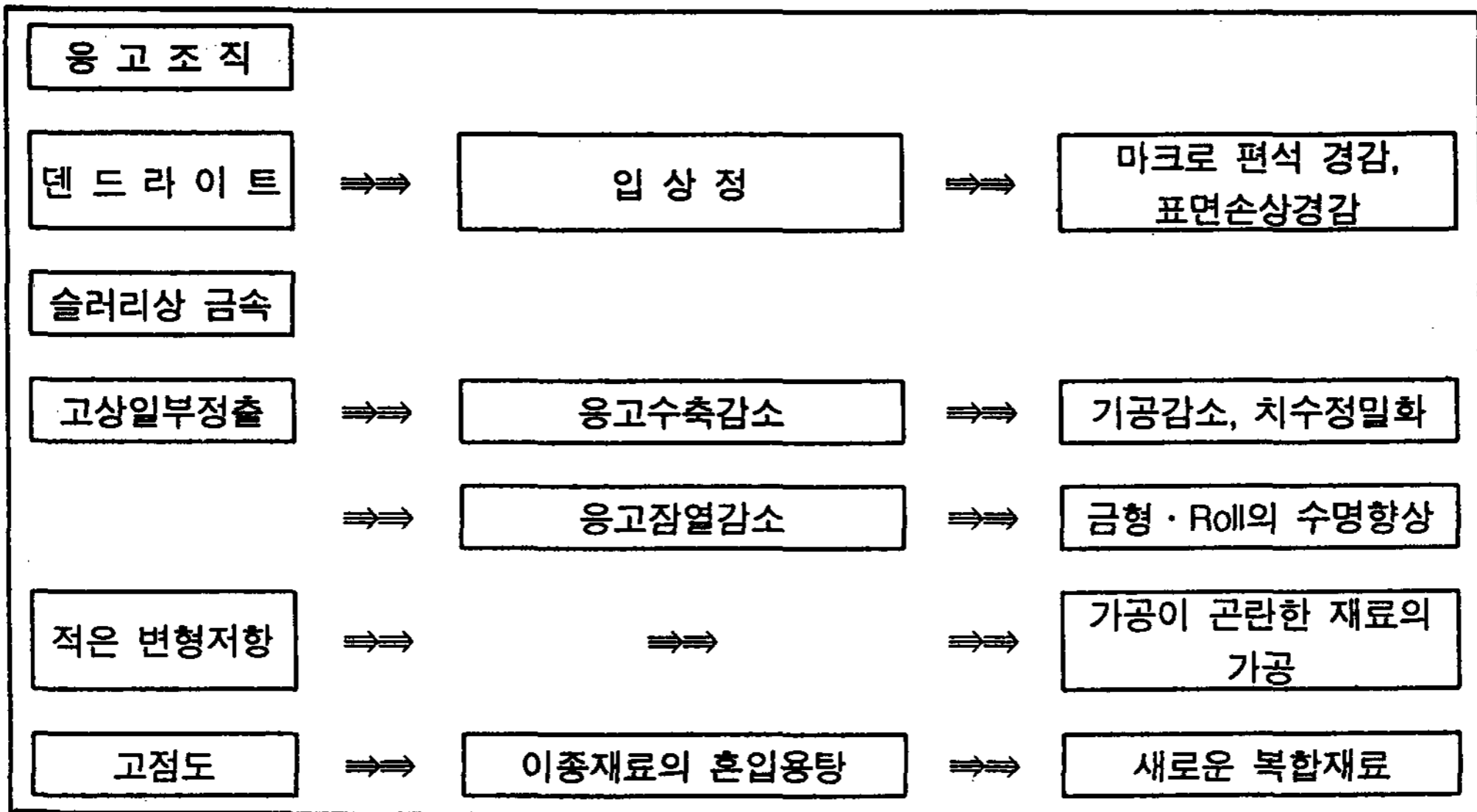


그림 3. Stir-Cast Chip을 이용한 SSM Forming 실험공정도

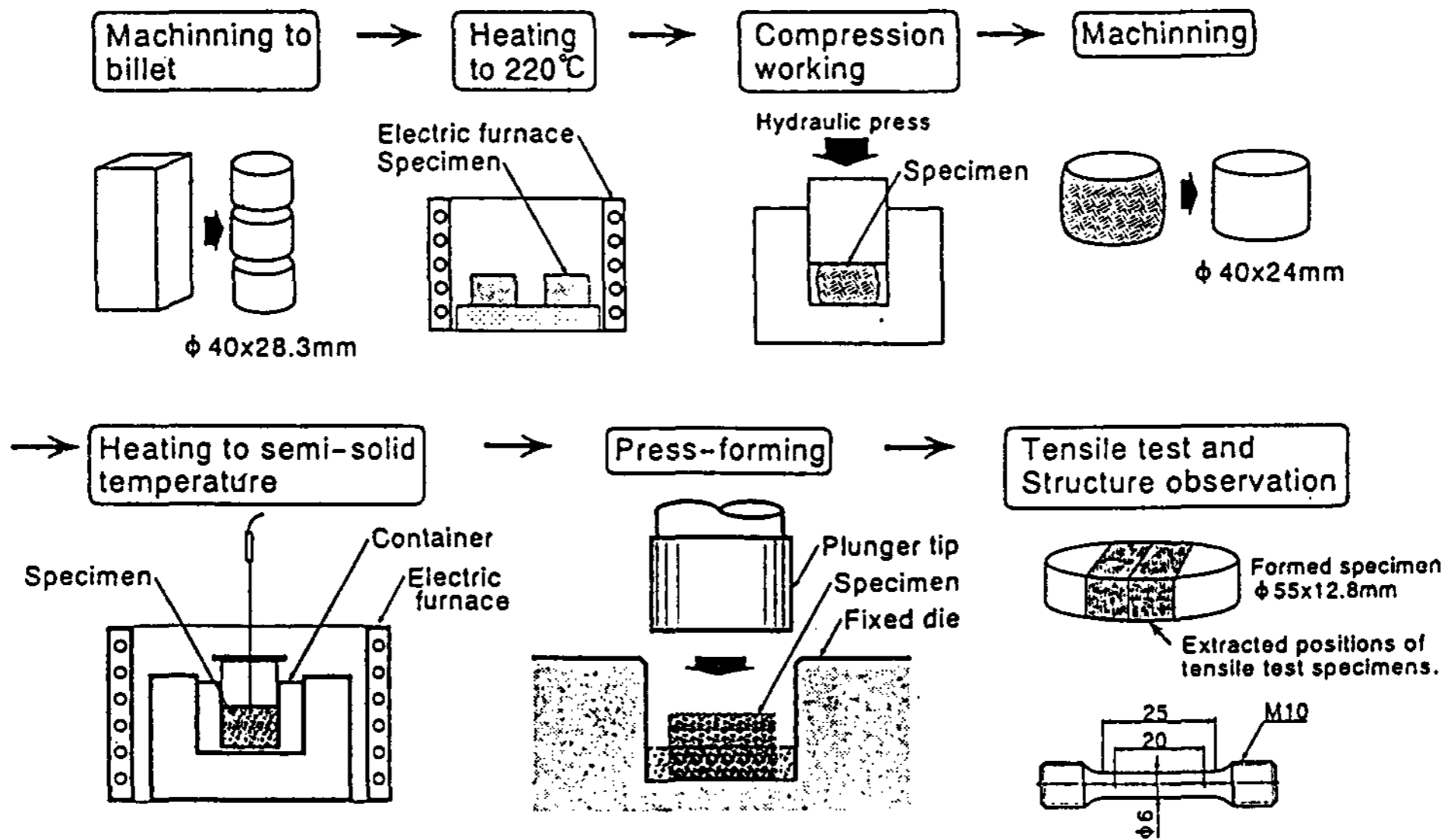
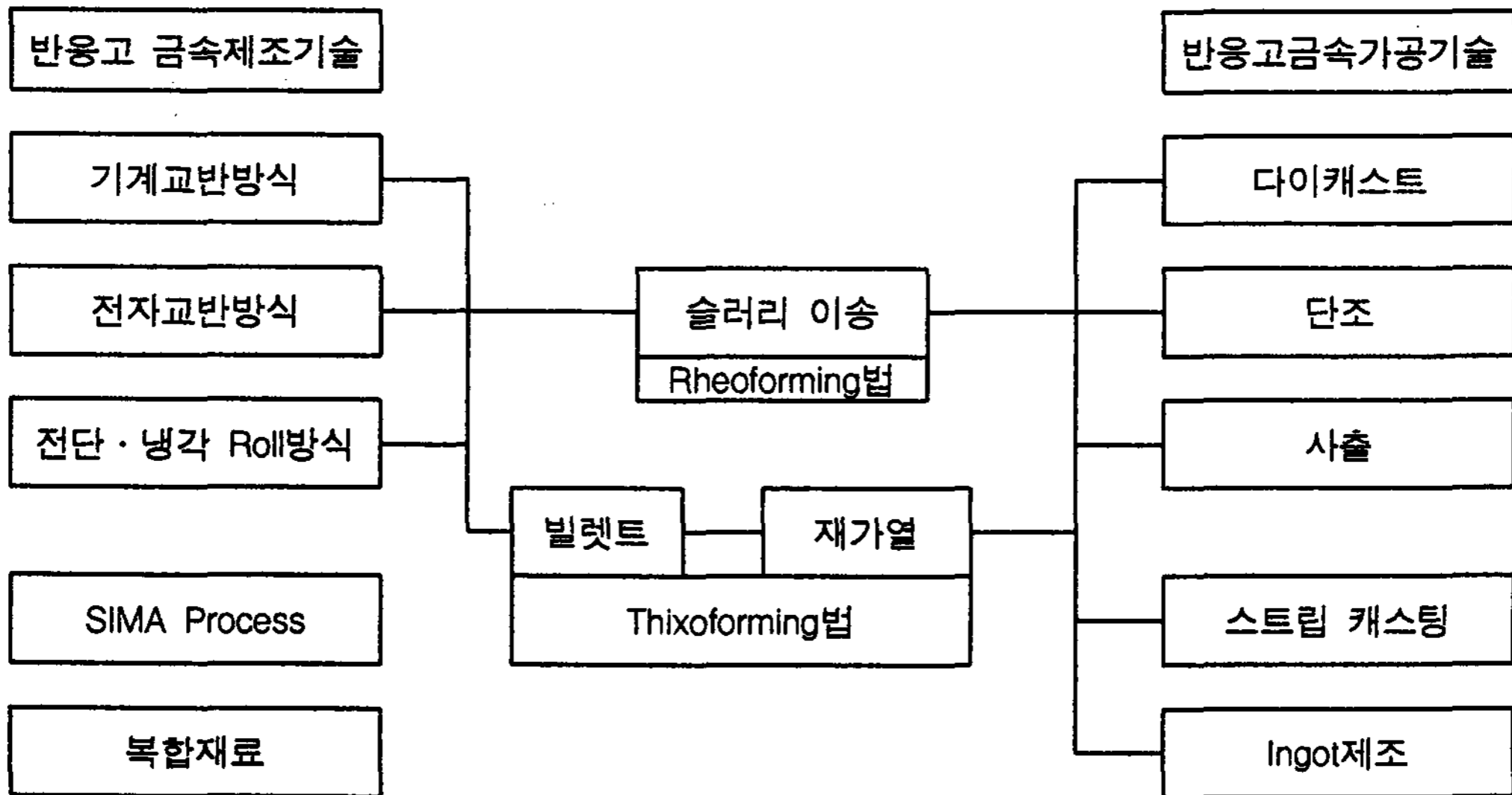


그림 4. Strain-Induced Bulk를 이용한 SSM Forming 실험공정도

표 2. 반응고금속의 제조 및 가공기술



인 반응고금속 슬러리가 배출된다. 용탕이 고속 회전에 의해서 벽면을 따라서 예리한 입상이 되고, 대기 등과의 접촉면적이 증가하는 것을 막기 위해서 용탕이 통과하는 단면적을 작게하고 냉각 속도를 상승시킨다. 다시 말해 노즐에서의 배출 유량을 제어하기 위해서 내화물재의 코어를 겸비한 것이 이의 특징중의 하나이다.

이 방법에 의해서는 고상율이 0.3정도까지 연속적인 제조가 가능한 것으로 확인되었다. 고상

율이 0.3이상되면 회전속도가 급격히 저하되고 슬러리의 걸보기 점도가 상승해서 노즐에서의 연속적인 배출이 힘들어진다. 따라서 이 방법의 고상율의 한계는 0.3정도로 생각된다.

4.2 기계교반방식[18]

교반의 기계적인 방식에 있어서는 그림 6에 보인 장치를 이용하여 조사·연구가 이루어졌다. 이 방식의 특징 중의 하나는 낮은 고상율에서 높

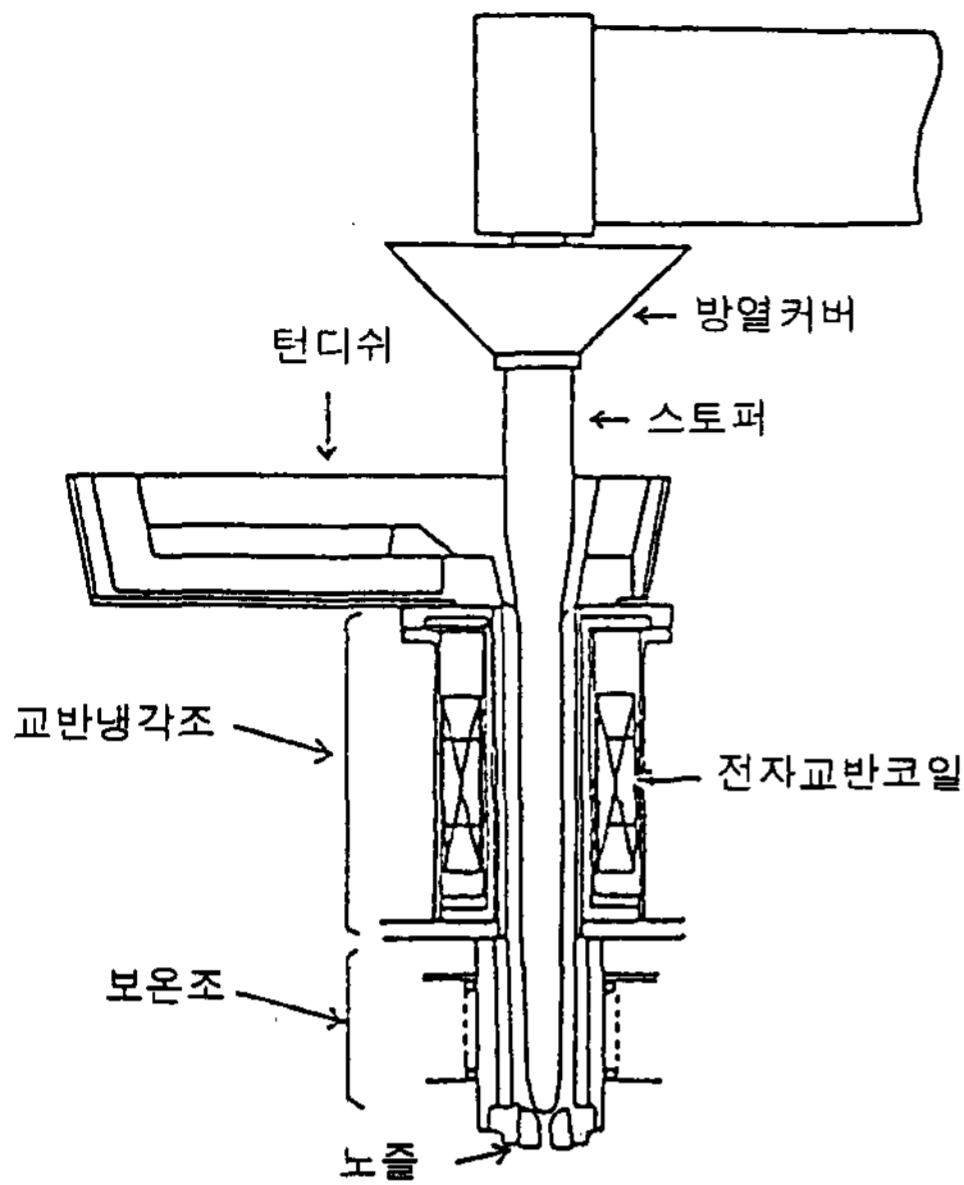


그림 5. 전자교반방식 반응고금속 제조장치

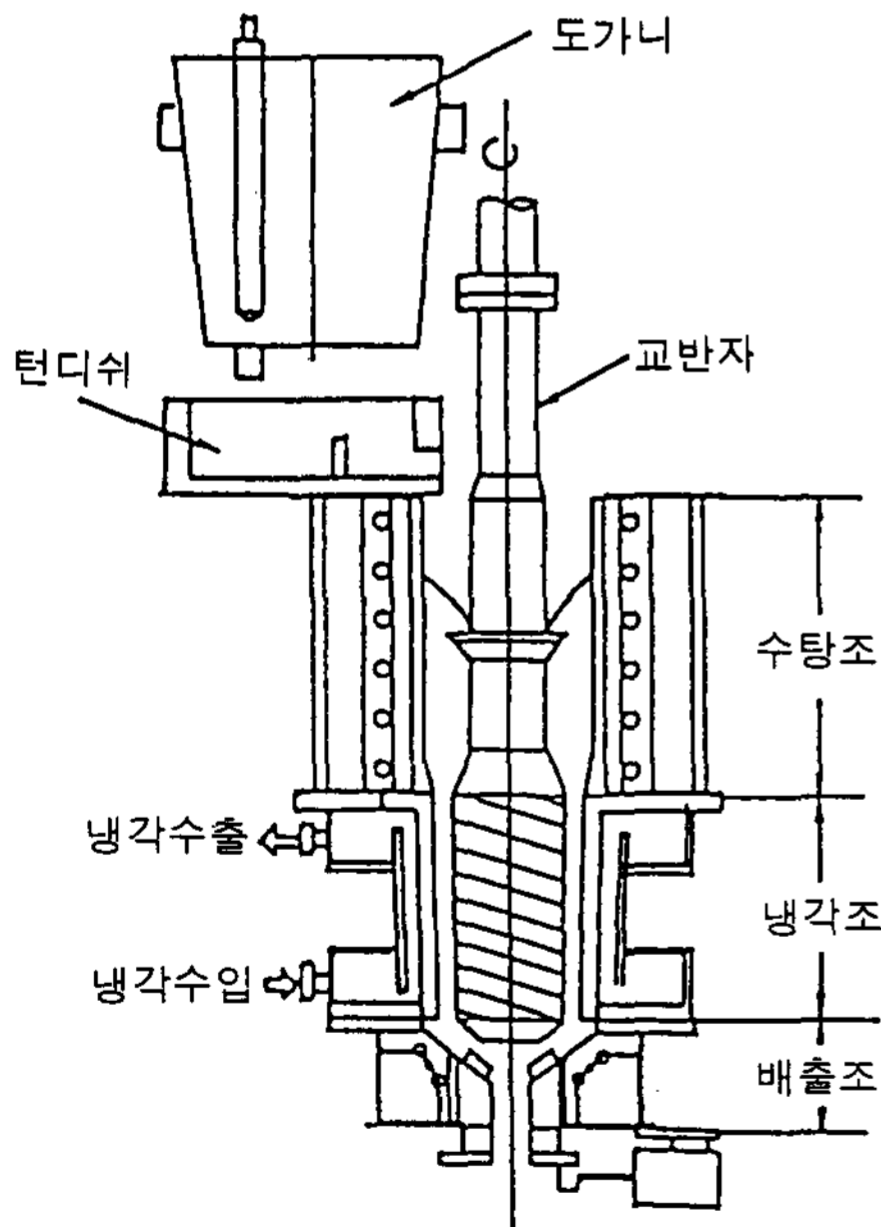


그림 6. 기계교반방식 반응고금속 제조장치

은 고상율까지 광범위한 반응고금속의 제조가 가능하다는 것이다.

슬러리중의 초정의 구형화는 전자교반방식에 비해 우수하거나 동등하다. 알루미늄합금에서는 고상율 0.5까지의 연속제조가 가능한 것으로 확

인되었고, 고융점금속의 동합금에 있어서도 고상율 0.5까지 연속제조가 가능한 것으로 실증되었다.

반응고금속의 고상율 제어는 슬라이딩·게이트의 개폐에 의해 슬러리의 배출속도를 제어하는 방법으로 이루어진다. 고상율이 높은 슬러리(≥ 0.3)의 배출속도제어에는 교반자를 스크레바상으로 해서 생기는 배출압을 이용하는 것이 필요하다. 또한 높은 고상율의 슬러리를 연속·안정제조하기 위해서는 냉각조의 냉각면에 생성하는 응고 Cell의 두께를 제어하는 것이 중요하고 이를 위해서 냉각면의 추출열 속도를 적절한 수치로 하는 것이 필수적이다.

Cell의 두께, 추출열속도, 전단변형속도, 고상율의 관계를 해석해서 적절한 조업조건을 찾아야 한다.

4.3 전단냉각 Roll방식[19]

기계적 교반방식의 일종으로, 높은 고상율, 빠른 냉각속도에서 반응고금속의 제조를 위한 새로운 고안인 전단냉각 Roll방식에 대해서 기초연구가 있었다. 그림 7에 보이듯이 용탕은 냉각 Roll에 의해 냉각되고 고정판 사이에 전단력이 가해져서 슬러리상에서 이송되어 나온다.

이 방식에 있어서는 Roll표면에 생성된 응고 Cell의 두께제어법이 주요기술로서 중요한 것중의 하나이다. 응고 Cell의 두께가 두껍게 성장하면 스크레바에 의해 그 Cell이 손상되어 얻어진다. 이를 방지하기 위해서는 제조한 반응고금속 슬러리의 고상율에 적절한 Roll의 냉각면의 추출열속도와 Roll의 회전속도를 선정하는 것이 필수적이며, 전열해석에 의한 각 합금에 대한 적정조건을 파악해야 한다.

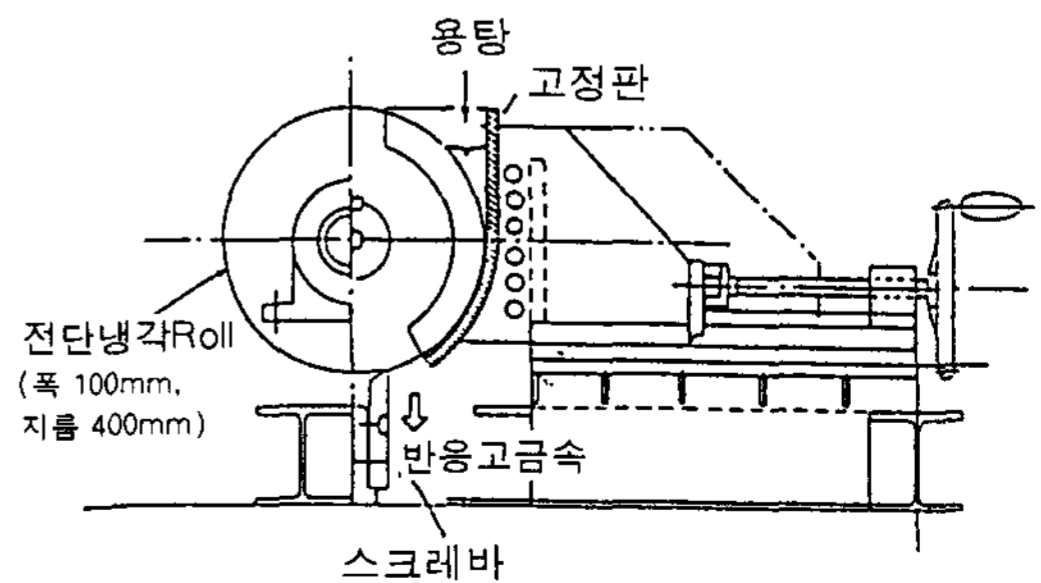


그림 7. 전단냉각 Roll방식 반응고금속 제조장치

이 장치를 이용해서 Al-10%Cu합금의 실험에서 얻어진 냉각속도와 초정입의 환산입경(슬러리중의 초정입이 응고완료까지 단순성장한다고 가정했을 때의 입경)의 관계를 그림 8에 보였다. 이 방식을 이용하면 다른 방식에 비해 빠른 냉각속도에서 보다 미세한 초정을 함유한 반응고금속을 제조할 수 있다.

또한 고상율은 Roll회전수를 변화시킴으로써 슬러리의 배출속도를 조정·제어하는 것이 가능하며, 최고 0.5의 고상율까지 연속제조가 가능하다. 동합금, 2.5%C주철에서도 같은 결과가 얻어진다.

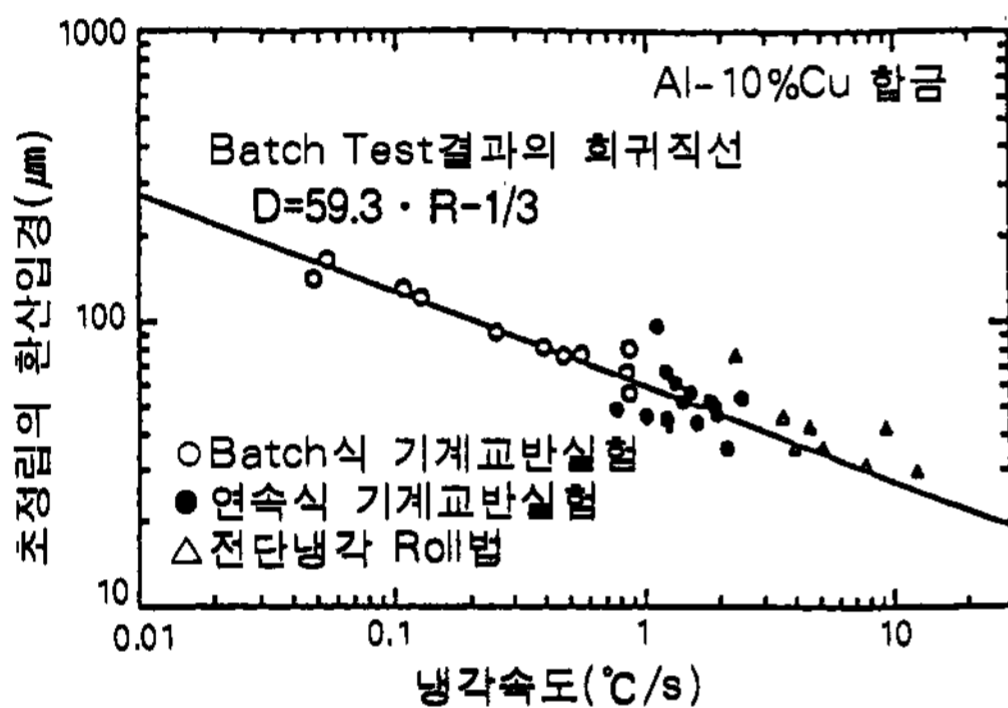


그림 8. 냉각속도와 환산입경과의 관계

4.4 SIMA (Strain Induced Melt Activated)[20]

SIMA공정은 용탕에 교반으로 인한 전단력을 부가함으로써 덴드라이트조직을 구형화하는 일반적인 교반법과는 달리 고상합금에서 직접 반응고금속을 제조하는 기술이다.

고체상태의 합금에 열간 혹은 냉간가공을 하여 과도한 소성변형을 가해준 후 액상-고상의 공존 온도영역으로 합금을 가열하여 덴드라이트 조직을 구형화된 입자조직으로 변형시키는 방법이다.

한편, SIMA공정에서는 소재에 압연등의 가공을 추가할 때에 도입되는 가공응력이 그 후의 가열에 의해 덴드라이트내에 미세한 재결정을 촉진해서 고상선온도를 넘으면 액상이 그의 재결정입계에 침투한 결과 등축이 액상중에 분산한 조직이 얻어지는 것을 이용하고 있다. 특히 이 방법은 개발(1984년) 이래로 상용화가 일찍 이루어져서 알루미늄 및 구리합금에 대해서 소형부품제조를 위한 반응고금속소재 제조에 사용되고 있다.

5. 반응고성형법을 이용한 마그네슘합금의 성형 예

마그네슘합금 반응고성형이 신기술인 Thixomolding법과 실용화가 이루어지고 있는 SSM Diecasting에 대한 실례를 기술한다.

5.1 Thixomolding법

5.1.1 Thixomolding법의 개요와 특징

Thixomolding법은 그 원리가 plastic의 사출성형법과 동일한 방법이다. 즉, 원료 chip을 hopper로서 투입하여 실린더로 반응용상태를 거쳐 금형내로 사출, 응고한 후 성형체를 취출하는 것이며 안전성과 생산성이 우수하다.

일반적인 응고의 경우에 형성되는 덴드라이트는 그 형상에서 추출될 수 있듯이 용탕의 유동성을 저해한다. 따라서 다이캐스트에서는 액상온도에서 충분한 과열도를 갖는 상태에서 주입한다. 그러나 Thixomolding에서는 고상과 액상이 공존하는 온도범위에서 주입한다. 이 온도에 있어서도 해당금속은 비교적 구형의 고상으로 존재하기 때문에 슬러리 전체의 점성이 낮고 결과적으로 유동성도 우수하다. 단 이 점성은 전단속도 의존성을 갖고 있고 본 process의 명칭은 이 성질에서 유래된 것이다.

Thixomolding법에는 다음과 같은 특징이 있다.

우선 첫번째로 원료의 용해가 실린더내에 한정되므로 작업자의 안전성이나 공장의 수명연장에 바람직하다. 또 일반적인 다이캐스트법에 비해 용탕온도를 100°C정도 감소시킨 결과 금형에서의 Burning된 부분이 적고 금형수명이 연장됨과 동시에 이형재의 사용량도 감소가 가능하며 장치에 용해로가 필요하지 않으므로 전체의 설비비도 저렴하다.

한편 성형체 품질에 관해서도 고상과 액상이 공존한 상태에서 사출하기 때문에 가스의 혼입이 적고 열처리 후에 Blister도 발생되지 않으며 기계적 성질의 향상도 기대할 수 있다. 또 용탕온도가 낮기때문에 균열 등의 응고결함이 적고 사이즈정도가 높으며 휘어짐이 적은 등의 장점이 있다. 또한 스크류에 의한 교반효과에 의해 과거에는 고가이며 제조가 복잡하던 금속기 복합재료

표 3. Thixomolding 프로트의 성능

기 종		JML 450-Mg
사출	스크류 직경(mm)	66
	사출 압력(kg/cm ²)	1260~590
	이론 사출율(cm ³ /s)	12990
	이론 사출용량(cm ³)	1094
장	스크류 회전수(rpm)	High Torque 155{129}
	{ }는 50Hz인 경우	Low Torque 200{166}
치	노즐 형상 · 총입량(mm)	SOV φ10×R25, 총입량 75
	노즐 터치력(t)	14506
형	형체력(t)	450
	다이라이트(mm)	1550
체	형반 스트로크(mm)	800
	금형 두께(mm)	380~750
장	타이머 간격(mm)	810~810
	형반 치수(mm)	1175~1175
치	로켓 링 경(mm)	φ150
	형 개폐 속도(m/min)	형폐 15.5 형개 13.1
기	인젝션 스트로크(t×mm)	17×100
	기계 중량(t)	25.0
	기계 치수(t)	9.13×2.42×3.77~3.89
타	작동유 탱크 용량(t)	760

제조 process에의 응용도 가능하다.

5.1.2 Thixomolding에 이용되는 JSW기의 구조와 성형법

일본 제강의 경우 1993년 7월, 독자적인 process개발과 고객에의 전시를 목적으로 450t의 Thixomolding용 프로트기를 제작해서 히로시마 제작소 내에 설치했다. 장치의 주요한 성능을 표 3에 나타냈다.

Thixomolding용 Mg합금 원료(AZ91D THIXO-MAG™ CHIP)는 잉고트에서 전용장치로 기계적으로 Chipping한 후 적절한 크기로 분급한 것이므로 장축이 5-6mm 정도의 미립상이다. 이 Chip은 화약원료용으로 이용되는 미립상의 Mg과 다르고 자연발화 등의 염려가 없고 소방법에 정해진 위험물에는 해당되지 않는 것으로 확인되었다. 현재 다우케미칼社에 의해 일반의 다이캐스트용 합금으로서 사용되고 있는 AZ91D외에도 AM60B, AM50A, AS41A, AE42X1 등의 Chip이 공통적으로 사용가능하다.

그림 9에 장치의 개략도를 나타냈다. 원료 Chip은 plastic 사출성형원료인 Billet와 같이 흡

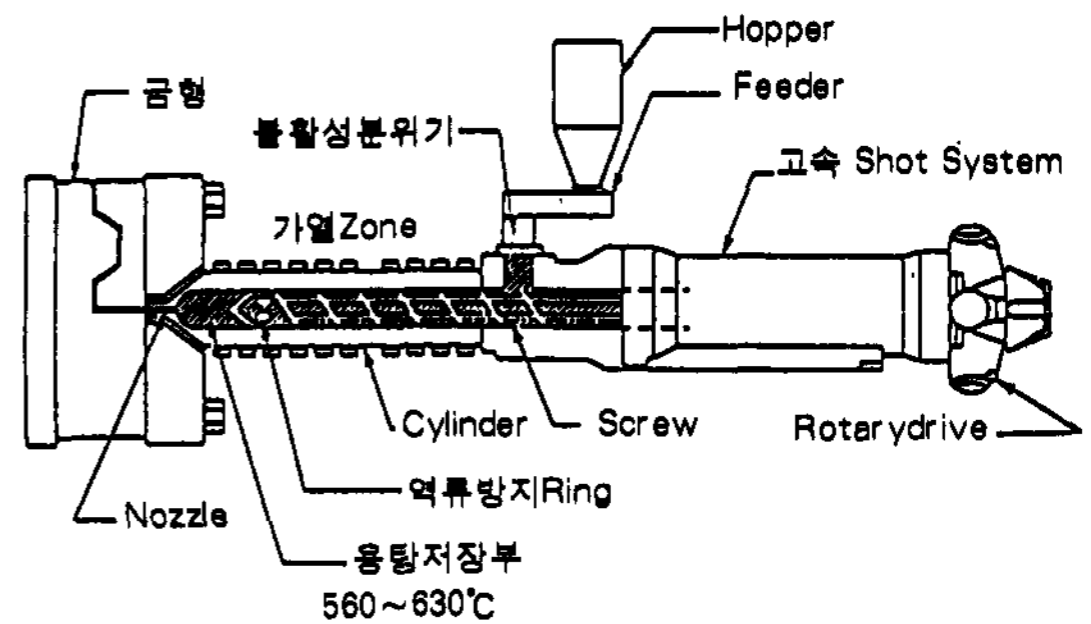


그림 9. Thixomolding장치의 구조도

인식의 rotor에 hopper로 자동공급될 수 있다. 더욱이 hopper에는 2축의 용량 Feeder가 부착되어 있어 성형체에 대응한 원료 공급량이 억제된다. 그때 불활성 가스인 아르곤을 일정량 흘려보내서 원료 용융시의 산화를 방지하고 있다. 따라서 일반적인 용해로에 사용하는 보호 가스인 고가의 SF₆나 용탕반송장치등은 일체 필요없다. 운송량을 정밀하게 억제하기 위해서 스크류는 일정 속도로 후방으로 당겨져 계량한다. 공업적인 cycle time은 이의 계량시간에 거의 비례한다. Chip은 고체 운송부에서 급속한 가열을 받고 연

화해서 밀도가 상승함과 동시에 부분적인 용융이 진행된다. 다음에 압축부에서는 반응고상태에서 전단을 받고, 역류방지링을 통과해서 용탕저장부로 이동한 후, 노즐을 통해서 금형내로 고속 Shot System에 의해서 사출된다.

사출직전에는 노즐선단에서 이전에 사출된 후, 자연냉각하여 형성된 응고 프라그가 Shut off Valve의 역할을 하고, 노즐에서의 슬러리의 누수를 방지한다. 또 이 프라그는 다음의 사출시에 금형내의 프라그켓처에 포획되며, 응고층이 제품부에 혼입하는 것을 방지해 준다. 일반적인 사출 압력은 80~120MPa, 사출속도는 0.5~2.5m/s이다.

실린더에는 세라믹밴드 히터와 열전대가 복수 부착되어 있으며, 원료재질이나 제품중량에 따라서 여러가지의 온도 프로파일이 설정되었다.

그때 최고 630°C 정도의 고온으로 가열되는 경우가 있으므로, 실린더 뿐만아니라 스크류, 역류방지링, 노즐에 쓰이는 구조재료는 고온강도나 Creep 저항성이 우수한 재질이 선택되어야 한다. 또 슬러리에 대한 화학적 용손이나 기계적인 마모에 대해서도 충분한 저항특성을 갖추는 것이 필요하게 된다.

5.1.3 Thixomolding에 의한 반응고 마그네슘 슬러리의 물성

고상과 액상 공존상태의 슬러리를 연속적으로 교반하면 액상 단독으로 존재하는 경우와 같이 점성이 저하되는 Thixotropy 특성은 그 미세구조에 원인이 있다. 앞에 설명한 바와같이 덴드라이트는 유동성의 저해원인으로 되기때문에 어떤 방법으로 등축정을 생성시킬 것인지가 중요하다. 그 경우 반응용인지 반응고인지에 따라 등축정의 생성기구가 다르다.

대부분의 경우 반응고, 즉 완전액상에서 고상과 액상의 공존상태로 전환되는 경우에는 기계적인 교반작용을 필요로 한다. 과거에는 하기모토(萩原) 등이 회전도가니 내벽에 고정된 스크레바를 설치해서 응고 편석을 개선한 연구가 있었다[22].

또 Flemings 등은 기계적인 교반에서 시작해서 현재는 전자교반을 이용해서 등축정 잉고트를 제작하고 있다. 이러한 어느 것도 덴드라이트를

기계적으로 분쇄해서 고상의 구형화를 피하고 있다.

또 절삭에 의해 제작된 마그네슘 칩에는 역시 가공응력이 도입되어 있고, 반응용온도에서 가열하는 것만으로 등축결정조직이 얻어지는 것을 마쓰이(松井) 등이 확인하였다[12].

한편, Thixomolding에 있어서는 원료칩의 제작방법에서 SIMA와 같은 등축정생성이 진행된다고 생각된다. 따라서 스크류회전은 전단에 대한 덴드라이트의 분쇄효과를 노리는 것에는 없고, 오히려 슬러리의 열확산을 용이하게 하는 혼합용해효과라고 생각된다. 실제, 유도가열이나 적외선가열 등을 전혀 사용하지 않고, 실온의 원료가 Hopper로부터 투입되어 금형내에 사출될 때까지의 시간은 10분이내로 고속이다.

이 Thixomolding법에 있어서 반응용상태 슬러리의 유동성을 평가하기 위해서 스파이럴식의 금형(두께 3mm, 축 15mm)을 써서 고상율과 사출속도 및 금형온도를 파라메타로 한 경우의 유동길이(외관상 충전불량이나 균열이 생기지 않는 부분까지의 길이)의 측정을 하였다. 또 원료로는 AZ91D를 사용했다.

우선 그림 10에는 고상율과 사출속도의 영향을 보였따. 사출속도의 상승에 따라 유동길이는 증가하지만 고상율의 차는 거의 인정되지 않는

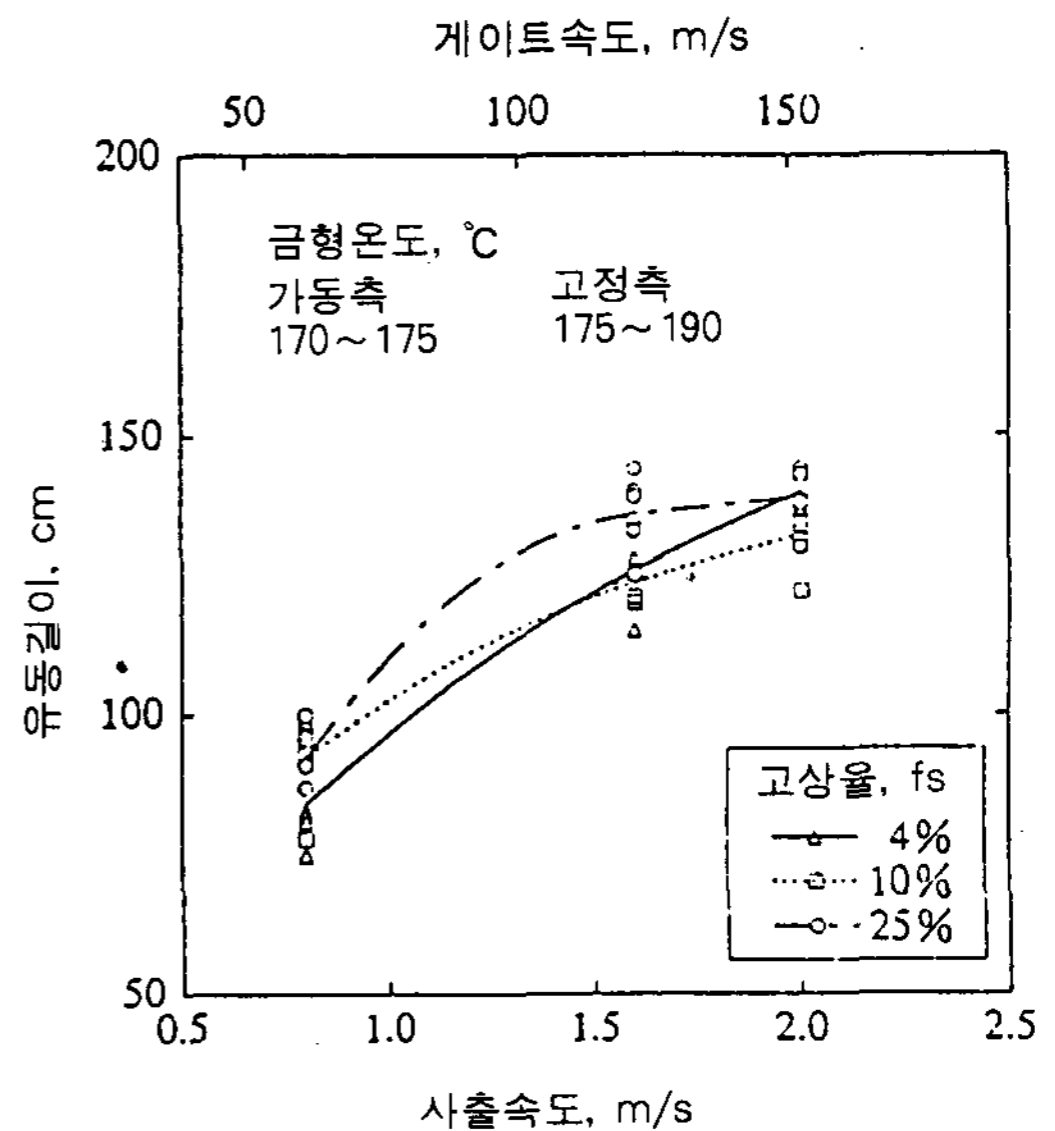


그림 10. Thixomolding에서의 고상율과 사출속도의 영향

다. 다음에 고상율을 거의 일정하게한 온도 프로파일이며 사출속도와 금형온도의 영향을 나타낸 것을 그림 11에 보였다. 그림 11로부터 알 수 있듯이 약 50°C의 금형온도의 상승은 슬러리의 유동성을 10~25% 향상시킨다.

Ghosh등은 고온점도계를 사용한 실험으로부터 고상율이 30% 정도이하에서는 전단속도의 겉보기 점성에 미치는 영향은 거의 없고 일정하다고 보고되어 있다. 고상율은 4~25%였던 것에 의해 유동성에도 차가 없었다고 생각된다[23].

한편 Benett는 금형내 Cavity에 압입된 용탕의 응고시간에 관한 식을 제안하였는데, 이것을 표시하면 다음과 같다[24].

$$t \propto 1/(T_m - T_d) \quad (2)$$

여기서 T_m 은 용탕온도, T_d 는 금형표면온도이다. 지금 용탕온도를 590°C로 해서 금형표면온도가 180°C와 230°C의 경우의 응고시간의 비율을 계산하면, $t_{230}/t_{180} = 1.139$ 로 된다. 따라서 금형온도 50°C의 상승에 따라 응고시간이 14% 정도 길게되는 것이 예상된다.

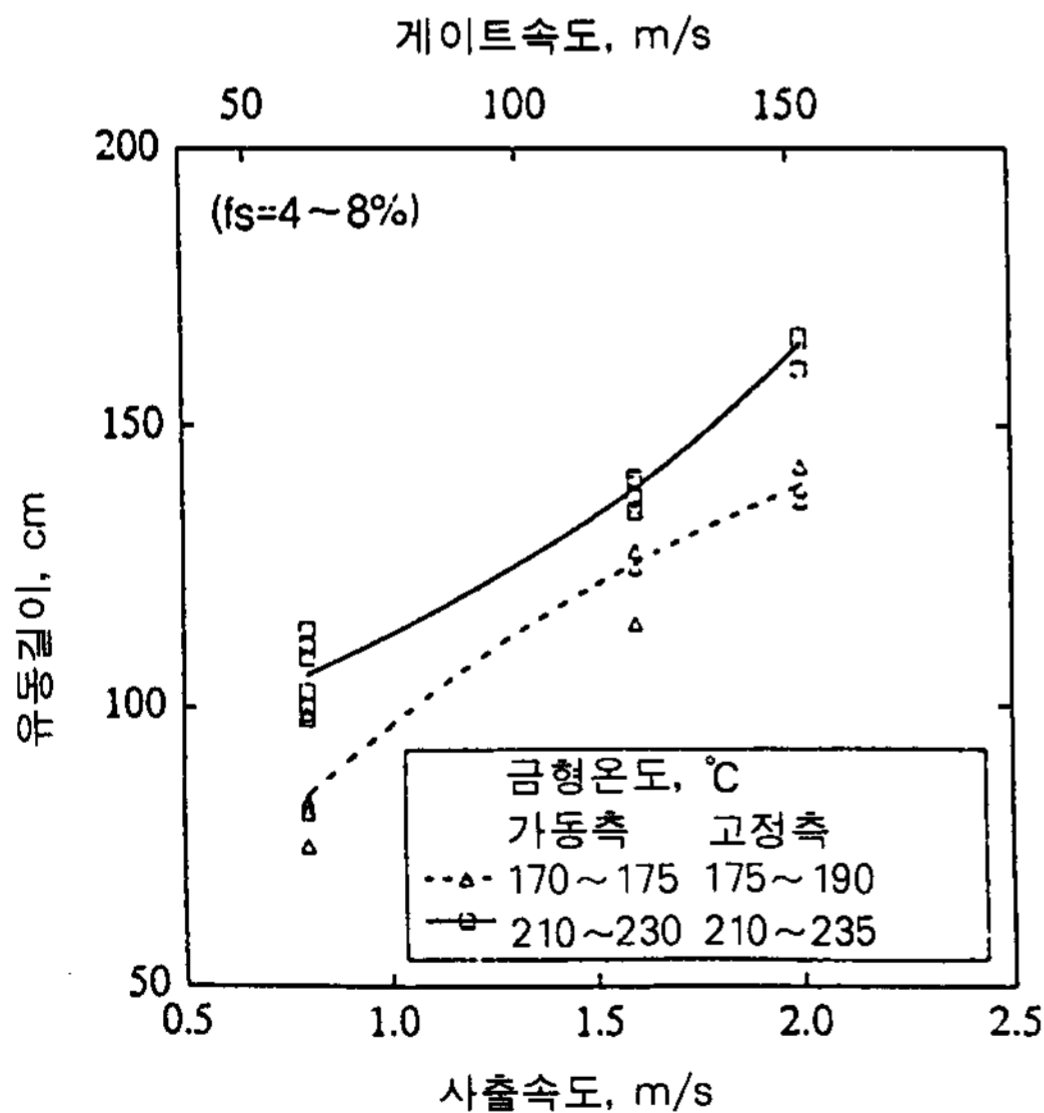


그림 11. Thixomolding에서의 사출속도와 금형온도의 영향

5.1.4 Thixomolding에 의한 반응고 마그네슘 성형체의 물성

Thixomolding법을 이용한 마그네슘합금 성형

체의 밀도 측정 결과를 그림 12에 나타냈듯이 어느 시료도 다이캐스팅으로 성형된 것보다 높고 기공율도 1.5% 이내로 양호한 값을 나타내고 있다.

또 X선 투과검사에서도 육안으로 관찰되지 않는 한은 결함으로 생각되는 것은 발견되지 않았다. 이 결과로부터 Thixomolding에서는 가스의 혼입이 상당히 적었다는 것이 확인되었다.

기계적 성질의 측정결과를 그림 13에 나타내었다. 사출속도가 상승함에 따라서 인장강도, 연신율도 함께 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 또 같은 두께(2mm)의 다이캐스팅부품과 비교하면

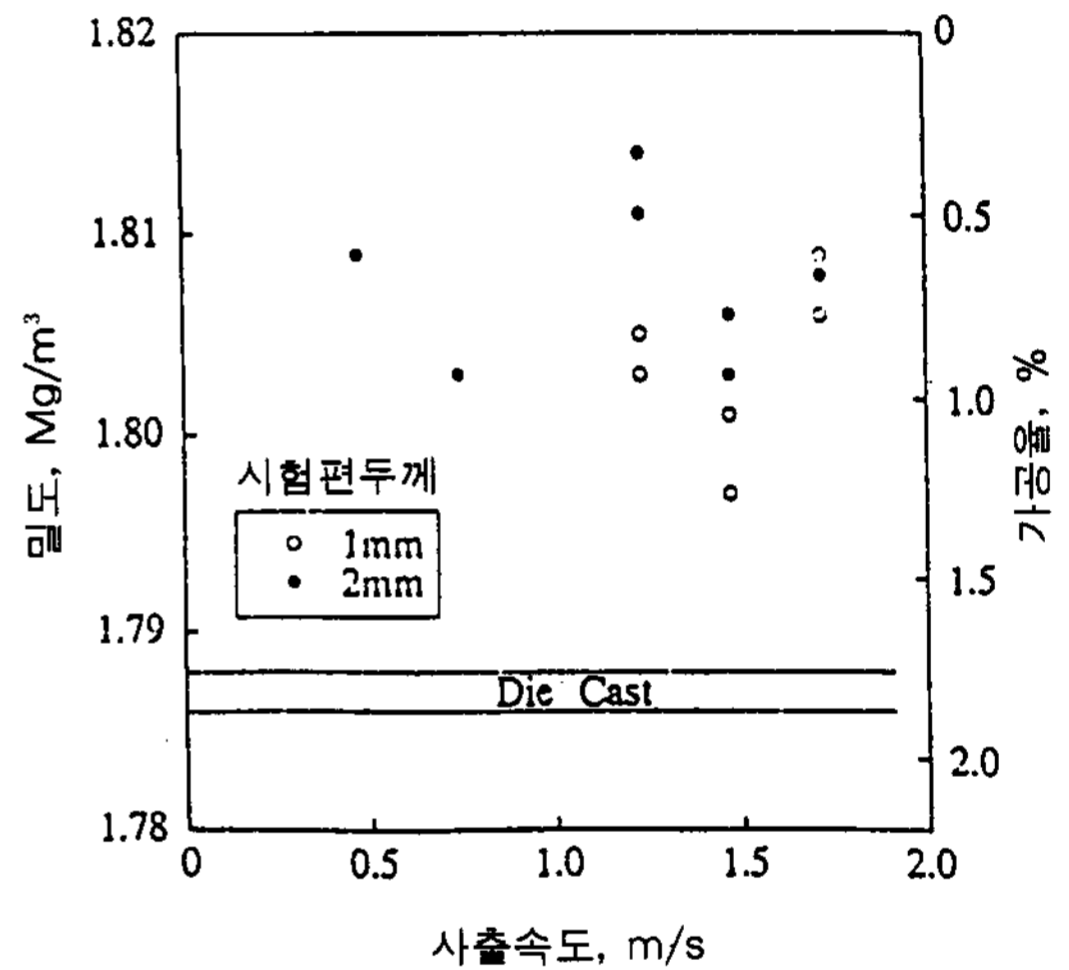


그림 12. 성형체의 밀도에 미치는 사출속도의 영향

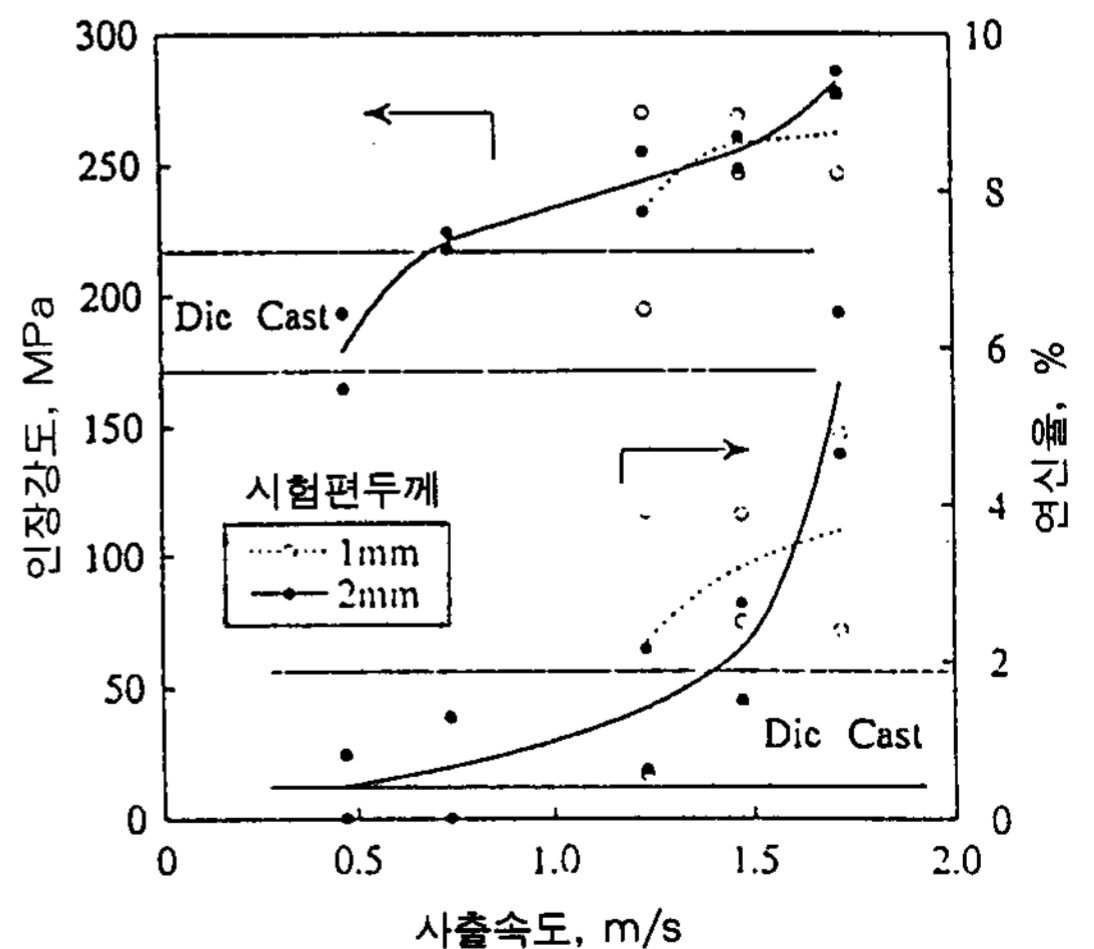


그림 13. 성형체의 기계적성질에 미치는 사출속도의 영향

사출속도가 1.5m/s(gate 속도 : 28m/s)이상에서 인장강도와 연신율의 어느 것에 대해서도 상회한 결과를 얻었다. 이와같이 기계적 성질에 관해서도 과거방법보다는 우수한 성능을 갖고 있는 것을 알 수 있다.

Thixomolding과 다이캐스팅에 의한 마그네슘합금의 미세조직을 비교해보면 Thixomolding에서는 사출 전부터 고상이었던 수십 μ m 정도의 α 상입자가 과포화고용체 α 와 금속간 화합물 β 와의 matrix내에 분포되어 있음을 알 수 있었다. 한편 다이캐스팅은 그 α 상입자가 없는 것외에는 거의 동일 조직으로 되어있지만 과포화고용체 α 의 형상이 몇가지 덴드라이트와 같이 관찰되었다.

또한 기계적 성질은 사출속도의 상승에 의해서 향상되지만 그 원인을 조사하기 위해 matrix의 경도를 측정해 보면 상당한 변동은 있었지만 사출속도가 클수록 경도도 증가하고 있다. 그 이유는 금형에서의 충전시간이 짧을수록 냉각속도가 크며 matrix의 조직이 치밀화되었기 때문이라고 생각된다. 또 다이캐스팅에 비해서 경도가 높은 것은 α 상입자는 고용점의 Mg고용체이며 상대적으로 액상부의 알루미늄의 농도가 상승한 결과로 matrix에 높은 정도의 β 상의 비율이 많아지게 되었기 때문이라고 추측된다. 이상의 자료의 상관 분석결과를 표 4에 정리했다.

우선 기계적 성질은 사출속도와 높은 상관관계가 있고 Mg합금의 변형거동이 균일연신을 나타

표 4. 상관관계 분석결과

상 관 변 수		상 관 계 수	P 값
사 출 속 도	밀 도	-0.082	0.7674
사 출 속 도	인 장 강 도	0.834	<0.0001
사 출 속 도	연 신 율	0.747	0.005
사 출 속 도	고 상 율	0.420	0.1066
사 출 속 도	경 도	0.532	0.0327
밀 도	인 장 강 도	-0.090	0.7462
밀 도	연 신 율	-0.056	0.8410
밀 도	고 상 율	-0.208	0.4457
밀 도	경 도	0.016	0.9537
인 장 강 도	연 신 율	0.870	<0.0001
인 장 강 도	고 상 율	0.282	0.2967
인 장 강 도	경 도	0.666	0.0038
연 신 율	고 상 율	0.223	0.4129
연 신 율	경 도	0.735	0.0007
고 상 율	경 도	0.203	0.4573

내기 때문에 인장강도와 연신율의 상관계수도 높다. 또 기계적 성질과 matrix의 정도에는 비교적 강한 상관관계가 인정되며 이것은 냉각속도의 차이가 원인이라고 생각된다.

5.2 SSM 다이캐스팅에 의한 마그네슘합금부품의 실용화

반응고용탕(SSM=Semi-Solid Metal)주조법은 1970년대에 최초특허되었지만, 최근까지 잉고트 및 신뢰성이 있는 생산시스템이 없었기에 상업적인 개발이 저해되어 왔다. 그러나, 현재 몇가지의 새로운 잉고트 생산시스템과 생산회사 시스템이 시장으로 들어오고 Buhler社의 SC모형다이캐스팅 시스템이 알루미늄과 마그네슘합금의 반응고용탕주조의 신뢰될 수 있는 시스템으로서 발표되었다.

5.2.1 SSM 다이캐스팅을 이용한 마그네슘합금의 성형과 이점

반응고용탕주조를 할 때에는 잉고트의 용해는 필요없고 가열처리만이 필요하며, 성분분석의 보충은 빌렛트 공급자측에서 하며 주조시의 용탕처리 Loss는 없다. 이 장점은 용해에 필요한 기본적인 설비를 철저히 삭감하는 것을 가능케하고 그리고 특히 마그네슘의 SSM주조에서는 마그네슘 용탕다이캐스팅에 있어서 마그네슘 용탕처리의 가격요소를 생략할 수 있다.

현재 사용되고 있는 일반적인 SSM의 가열은 유도가열을 이용하는 방법이며, 이것은 변화하는 조건에 신속하게 대처할 수 있고, 오염이 적고 제어가 간단한 방법이다. 필요로하는 에너지는 비교적 적고, 경험적 수치를 거론하자면 알루미늄에서는 1kW·h/1kg이다.

용탕의 취급이 완전하게 불필요하다는 특수한 제조방식의 우수성 외에 더욱 SSM다이캐스팅에는 기술적인 이점이 있다. 합금이 반응고상에서 주조될 때에는 주조온도는 일반적 방법보다 100℃ 또는 그 이상 낮고, 또 Slag는 유연한 고체의 상태이므로 Slag이 공급과 체결동작이 동시에 이루어지고 그 후 재료는 사출력으로 주형에 충전된다. 이것은 또 금형에 대한 열부하가 본질적으로 감소하는 것을 의미한다. 금형의 열 흡수능은 것 뿐만 아니고(최대 50% 감소), 제품사출후의 금형온도를 정상으로 하기위해 스프레이를 감소하는 것도 필요하게 된다.

사출시에 합금의 약 60%가 고상이므로 응고시의 수축공의 발생이 적고, 그리고 주조수축공 경향도 적다. 그러므로 사출충전 사이클의 마지막에는 높은 Cavity압력이 수축에 대한 보급과 본질적으로 Cavity가 없는 부품을 제조하는데 필요하다.

시장에 있어서 SSM다이캐스팅부품은 전통적인 고품질부품에 대해서 가격적으로 경쟁가능하고 또 기계가공의 삭감, 보다좋은 품질과 그의 안정성으로부터 제조에 걸리는 전체가격을 실질적으로 개선하는 것도 가능하다.

일반적으로 기계가공되는 주조부품의 여러가지 특색은 SSM제품의 허용범위로서 주조될 수 있다. 표 5는 SSM다이캐스팅제품의 가격과 경쟁하는 다른 제품과 인건비, 에너지비, 보수비 등 비교가능한 수치를 써서 비교계산한 결과이다.

표 5. SSM 다이캐스트와 경쟁공정과의 비교

Types of Casting	Relative Material Cost # Purchase Price # Recycling # Yield	Pounds per Part	Relative raw Part Cost	Potential to reduce machining
SSM Cast	1.7	0.65	1.1	High ----- Moderate
Permanent Mold Cast	1.0	1.0	1.0	
Squeeze Cast	1.4	0.9	1.2	

그러나 표 5에서는 공정의 안전성의 개선, 하나의 금형과 한 대의 주조기와 주변기기로부터 가능한 모든 제품에 있어서 필요한 품질관리항목을 절감하는 것에 대한 평가는 할 수 없었다. 마그네슘합금에 대한 같은 계산의 경우에 있어서도 마그네슘의 용해공정이 불필요하다는 것을 고찰하지 않더라도 상당한 경제적 이익을 얻는 것을 나타내고 있다.

5.2.2 SSM 다이캐스팅에 이용되는 스퀴즈캐스팅(SC) 주조기의 구조 및 성형법

일반적인 다이캐스팅기의 설계와 비교하면, 과거에는 아큐레터와 증압기구를 조합, 사출실린더의 헤드측에서 제어(Meter in)해 왔지만, SC시스템은 커다란 사출헤드실린더를 풋트측에서 제어(Meter out)해서, 실린더에 직접 조립된 위치·속도 센서로 계측하고, 속도를 제어한다. 증압기능은 사출사이클의 마지막에 사출실린더의 풋트 혹은 헤드측의 압력변환기를 사용해서 직접압력을 제어한다.

반응고용탕 다이캐스팅에서는 유도가열된 Slag을 로봇으로 사출스리프에 장전, 주조한다. 그때의 고상율은 60%, 액상율은 40%이다. Slag가 유연한 상태에서 체결동작과 Slag삽입을 동시에 실시한다. 이것과 금형에서의 열이 적은 것에서 스프레이를 감소시킬 수 있도록 하며 일반적인 다이캐스팅과 비교하면 사이클 시간은 20% 단축될 수 있다. Buhler社의 주조기 H-630SC를 기초로 한 대표적인 SSM주조설비를 그림 14에 보였다.

Buhler社의 수평형 SC주조기에 의한 새로운 주조기술, 반응고용탕주조는 금형주조제품이나 경우에 따라서 단조제품의 가격과 품질에 대해 양면에서 경쟁할 수 있는 알루미늄부품을 제조할 수 있으며 마그네슘합금에 대한 반응고성형의 실

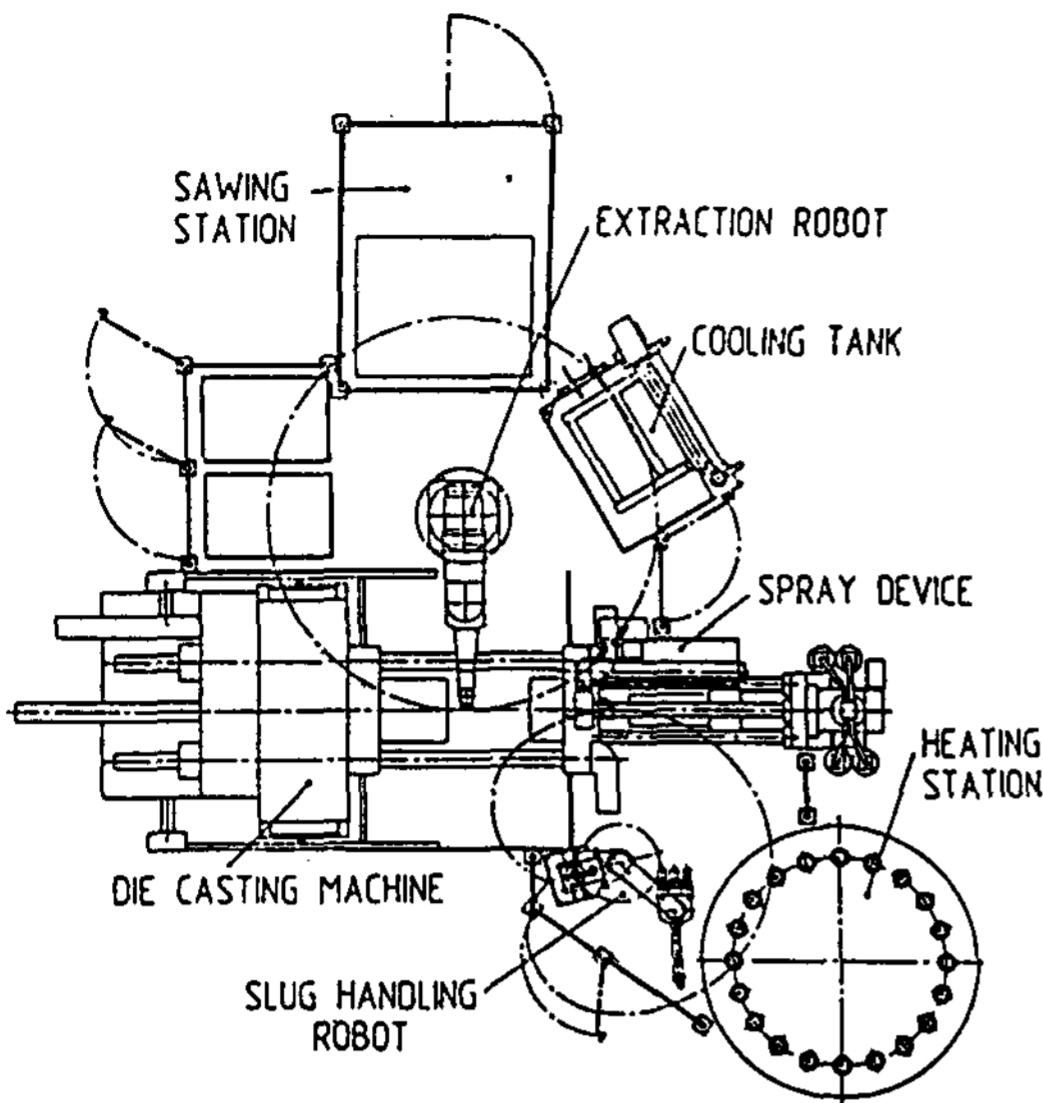


그림 14. SSM-casting설비의 개략도
(250kg/h, Buhler Co.)

용화에도 효과적인 기술이다.

6. 결 론

최근 선진국에서는 반응고성형기술을 이용한 마그네슘합금의 성형의 실용화를 위해서 집중적인 기술개발과 투자가 이루어지고 있으며, 상기한 바와 같은 반응고성형을 통해 주조나 단조로 인한 결함을 최소화할 수 있는 제품의 생산이 가능할 것이다. 알루미늄합금의 경우에는 자동차부품 등에 상당수가 이미 실용화에 성공하여 제작되고 있는 상황이며, 마그네슘은 물론 고융점금속에 대한 반응고성형기술의 개발에 적극적이다.

이에 비해 우리나라의 기술적인 현황은 초보적인 공정연구, 이론연구수준이므로 보다 활발한 기술개발과 상업화 연구를 위해서는 외국의 경우와 같이 관련주조업체 적극적인 참여와 투자가 있어야 국제경쟁력을 키워나갈 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

[1] D. B. Spencer, R. Mehrabian and M. C. Flemings : Metall. Trans., Vol.3 (1972) 1925

[2] 木内 學 : 日本金屬學會會報;, 21 (1982) 687
 [3] P. A. Joly and R. Mehrabian : J. Mater. Sci., Vol.11 (1976) 1393
 [4] M. C. Flemings, R. G. Riek and K. P. Young : Mater. Sci. Eng., 25 (1976) 103
 [5] 平居正純, 竹林吉浩, 山口陸二, 吉川雄司, 平城 正, 守脇 廣治 : 材料とプロセス, 3 (1990) 369
 [6] 平居正純, 竹林吉浩, 吉川雄司, 山口陸二 : 鐵と鋼, 78 (1992) 902
 [7] 森 芳郎, 乙竹 直 : 化學工學, 20 (1956) 488
 [8] S. C. Erickson : Proceedings of 44th Annual World Magnesium Conference, Tokyo, International Magnesium Association, (1987) 39
 [9] 人見高久, 由淺 明, 鎌土重晴, 小島 陽 : 輕金屬, 42 (1992) 504
 [10] 鎌土重晴, 由淺 明, 人見高久, 小島 陽 : 輕金屬, 42 (1992) 734
 [11] 由淺 明, 松田伸司, 鎌土重晴, 小島 陽 : 輕金屬, 44 (1994) 9
 [12] 松田伸司, 關原一敏, 鎌土重晴, 小島 陽 : 輕金屬, 45 (1995) 15
 [13] 關原一敏, 大西 智, 鎌土重晴, 小島 陽 : 輕金屬, 45 (1995) 516
 [14] 關原一敏, 大西 智, 鎌土重晴, 小島 陽 : 輕金屬, 45 (1995) 560
 [15] K. P. Young : Solidification Processing of Advanced Materials, Japan-U.S. Cooperative Survice Program Seminar. (1989) 181
 [16] 吉川雄司, 竹林吉浩, 森谷尙玄, 藤川安生,, 岩田至弘, 難波明彦 : 材料とプロセス, 4 (1991) 687
 [17] 吉田千里 : 鐵と鋼, 80 (1994) 65
 [18] 山口陸二, 竹林吉浩, 平居正純, 藤川安生,, 難波明彦 : 材料とプロセス, 3 (1990) 1666
 [19] 木内 學, 杉山澄雄 : 材料とプロセス, 4 (1991) 691
 [20] R. D. Doherty, H. I. Lee and E. A. Feest :

- Mater. Sci. Eng., 65 (1984) 191
- [21] 附田之欣, 武谷健吾, 齊藤 研: 鑄物, 67 (1995) 936
- [22] 萩原 巖, 高橋 忠義: 日本金屬學會紙, 29 (1965) 637
- [23] D. Gosh et al.: Proceedings of The 3rd International Conference of PROCESSING OF SEMISOLID ALLOYS AND COMPOSITES: Tokyo, June 13-15, Edited by M. Kiuchi. (1994) 85
- [24] 日本ダイカスト協會: ダイカスト技術ハンドブックハンドブック
- [25] K. P. Young and R. Fitze: Proceedings of The 3rd International Conference on PROCESSING OF SEMISOLID ALLOYS AND COMPOSITES: Tokyo, June 13-15, Edited by M. Kiuchi, (1994) 155
- [26] K. P. Young: 鑄物, 67 (1995) 943

國內外鑄物關聯行事

1997

1월 25일~1월 27일

Foundry Exhibition '97

Mumbai, 인도

4월 14일~4월 18일

China Diecasting '97

북경, 중국

2월 11일~2월 15일

Manufacturing Africa '97

Johannesburg, 남아프리카

4월 20일~4월 23일

101차 미국구조대회

Seattle, 미국