

技術資料

반응고 가공 프로세스의 개발(Ⅱ)

- 실용화 현황 -

한 요 섭*, 김 도 향*, 이 호 인*

Development of semi-solid process(Ⅱ)

- Examples of Actual Applications -

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

1. 서론

반응고 가공 프로세스의 개발은 최근 공업화의 단계에 이르고 있다. 초기의 기계적인 교반으로 얻어지는 반응고 소재들의 단순한 응고 또는 이차 성형가공에서 벗어나 생산성과 품질 및 가격 경쟁력이 있는 공업제품 제조 프로세스로서 반응고 가공법의 개발과 응용이 추진되고 있다. 여기서는 그중에 대표적인 3가지 반응고 가공 프로세스를 살펴보았다.

2. 틱소몰딩법(Thixomolding)

2.1 틱소몰딩 프로세스

틱소트로피(Thixotropy)는 반응고 재료에 전단력이 가해지면 매우 유동적인 상태가 되는 것을 말한다. 틱소몰딩(Thixomolding)은 고상 합금을 반응고상태로 가열하여 전단(shear) 및 사출 성형(injection molding)을 하는 프로세스이다. 이 프로세스는 플라스틱산업에서 사용되고 있는 사출성형에 가까운 것으로 금속에 대해서 다이캐스팅기술과 조합시켜 Dow Chemical회사가 개발한 제조법이다. 그림 1은 개략적인 이 프로세스의 구성들을 보여주고 있다. 금형 체결은 300톤 다이캐스팅 기기와 비슷하다. 사출 시스템은 고온 스크류와 바렐로 구성되어 가열된 합금을 전진과 전단하는 구동시스템과 결합되어 있다.

시스템의 가열은 저항 과 유도 요소를 복합하여 상온 소재를 어큐머레이터구역에서 적정 온도가 되게 한다. 마그네슘의 경우 $580 \pm 2^\circ\text{C}$ 가 된다.

가열은 바렐에서 공급된 피드가 스크류가 20초의 회전과 전진압축 작용을 하는 운전 사이클 동안에 이루어진다. 한번 장입하여 축적되면 고속 사출이 스크류의 운전 사이클 동안에 이루어진다. 이어서 고속 사출시스템이 스크류 유출구로 약 65%의 고상율인 틱소트로픽 슬러리(slurry)를 고속 고압으로 금형에 충전시킨다. 틱소몰딩의 설계과제는 사출동안 급속한 7인치 스트로크로 부터 온도차를 보상하는 것이다. 주어진 량의 피드가 약 200°C 낮은 새로운 위치로 급격히 가게 된다. 컴퓨터 모델링과 유도가열은 이 보상에 효과적이다. 바렐 설계와 합금 선택도 적절한 바렐온도와 기울기를 유지하는 데 중요하다. 또 다른 설계요소는 사출 시스템의 유압특성이다. 금형 충전은 정확한 유입 이동과 함께 약 1000-3000 psi 압력으로 약 20milliseconds의 특성을 요구한다. 여기서 정확한 유입 제거는 노즐에 과다 응력이나 금형의 분리를 크게 감소시킨다. 이 틱소몰딩기기는 컴퓨터화 되어 있고 30초 사이클로 연속 16시간 즉 2000 쇼트 생산 규모의 설비가 제작되고 있다. 현재 운전은 3명으로 양산시는 한 명이 3개 장치를 다루고 각 장치는 년 600,000 lbs 제품을 제조할 수 있다.

마그네슘을 대상으로 하여 다른 주조법과 비교한 틱소몰딩의 장점은

- 1) 일반 마그네슘 주조설비에 대한 투자 제거
- 2) 청정 주조가 가능
- 3) 주물당 10-39% 제조비 절감
- 4) 높은 생산성
- 5) 스크랩 감소와 재사용 가능

- 6) 가열에너지 감소
- 7) 플럭스의 불필요
- 8) 편리한 운전 시작과 중단
- 9) 신속한 합금 교환
- 10) 사용자 공장에 대한 유연성 있는 즉석 재배치

2.2 제품의 특성

틱소트로픽 성질을 가지기 위해 합금의 온도와 조성은 상태도상의 고-액 중간이어야 한다. 공정 응고를 하는 Mg-A1 합금계의 AZ91D 합금을 틱소몰딩한 미세조직이 그림 2에 나타나 있다. 이는 강한 교반으로 수지상정의 끝들이 분리되어져 수지상정 보다 결합성이 작은 구상의 고체 입자들이 되었다. 여기서 밝은 구상입자들은 A1이 낮은 고상이고 검은 부분은 A1이 높은 부분으로 공정 반응에 의해 미세한 2상으로 금형에서 응고한 것이다.

이러한 조건하에서 M.I.T.의 Fleming과 Mehrabian의 초기 연구⁽¹⁾에서 발견한 바와 같이 점성은 고상율에 비례하여 커지며 전단속도에 반비례하여 감소한다. 정확히 준비된 슬러리는 고속충진의 선두가 거의 분산이 적은 것을 불연속 사출 실험으로 확인하였다. 응고는 보통 다이캐스팅의 열에너지 방출의 1/3정도로 수 milliseconds에서 이루어진다. 따라서 금형의 열충격과 제품의 변형도 수축과 함께 작아진다.

틱소몰딩한 마그네슘 제품은 다이캐스팅보다 다음의 장점들이 있다.

- 1) 복잡형상에서 보다 치수정밀성 향상
- 2) 기포 감소
- 3) 높은 피로 수명
- 4) 고력 합금에서 박육제품 제조
- 5) 고강도와 연성을 위해 열처리 가능

표 1은 기계적 성질을 비교한 것이다. 아연이나 알루미늄 다이캐스팅에 비해 마그네슘 틱소몰딩 제품은 동일 크기의 부품일때 41과 34% 원가 절감을 가져오고 있다. 더우기 금형 수명은 증가하고 일반 다이캐스팅보다 생산 사이클이 빠르게 나타

났다.

피드 재료는 Dow나 다른 제조업체에서 공급이 가능하다. 원자재는 합금에 따라, AZ91B나 AZ91D를 NO 8 입도(1/4"chip)로 바렐로 선적하고 있고 가격은 10cents/1b.정도가 예상이다. 수량이 증가하면 저렴한 재료가 나타날 것이다. 틱소몰딩기기에 장입은 자동화가 가능하다. 분산 재도 이 장치에서는 첨가가 용이하며 고속 혼합이 되어서 실제적으로 저렴하게 MMC를 제조할 수 있다.

2.3 공업 제품 개발

Dow는 1970년대 Battelle 연구소의 후원으로 틱소트로픽 주조를 연구하기 시작하였다. 1980년대에 이것을 플라스틱 사출 성형기술에 접속하여 계속 연구하였다. 그 결과 매우 성공적으로 연습용 자전거 하우징, 바람막이 와이퍼 하우징, 핸드드릴 하우징 캡등의 시제품을 만들었으며 마침내 2000개 시작품을 16시간 연속제조할 수 있게 되었다.

틱소몰딩법의 제품 대상은 기존의 마그네슘 다이캐스팅 시장이 중심이 되고 있다. 마그네슘 다이캐스팅은 수십년간 미국, 일본, 유럽의 자동차 산업에서 적용되고 있다. 폭스바겐의 Beetle은 대당 43 lbs을 Hood로 사용하고 있다. 피아트는 내외장재로 65 lbs를 사용하고 있다. 여러 유럽 자동차 업체에서 마그네슘 휠을 표준으로 채택하고 있다. 이들 자동차, 소비재 설비, 사무실 비품, 스포츠 용품등에 마그네슘 다이캐스팅이 사용되고 있어 고품질의 틱소몰딩제품이 대체될 수 있다. 게다가 이들 응용 분야들은 고품질의 마그네슘 틱소몰딩이 아연, 알루미늄 주물 또는 고성능 플라스틱 사출 성형재를 대체할 수 있어 확대될 수 있다. 이러한 점에서 표 2는 각 분야에서 부품별 특정 응용 품목을 조사한 것이다.

3. 반응고 금속 성형법(Semi-Solid Metal Forming)

표 1. 마그네슘 합금(AZ91D)의 틱소몰딩과 고압 다이캐스트 프로세스의 비교

종 류	기공율(%)	항복강도(ksi)	인장강도(ksi)	신율(%)	부식도(mils/year)
다이캐스트	3.2	23.1	30.5	3.3	< 10
틱소몰딩	1.7	23.4	30.6	3.9	6

표 2. 마그네슘 제품의 분야별 종류와 예상 응용 품목들

<u>Auto</u>	
Oil filter adaptor	Cluch housings
Manual transmission housings	Cooling fan clutch
Air cooler covers	Louvers
Headlamp covers	Rocker arm covers
Supercharger housings	Automatic brake blocks
Oil pump housings	Fuel system parts
Wheels	Conrods & pistons(MMC)
<u>Office Machines</u>	<u>Sports Equipment</u>
Typewriters	Archery bow handles
Computer housings	Snowshoes
Dictating machines	Snowmobiles
Adding machines	
Postage meters	
Calculators	
<u>Consumer Appliances</u>	
Chain saws	Portable saws
Drills	Grinders
Lawn mowers	Vacuum cleaners
Mixers	Floor polishers
Blood pressure testers	Silde & movie projectors
Cameras	Tape recorders
Radar indicators	Motor end frames
Carpenter levels	Sewing machines
Solar cells	Luggage

3.1 SSM 프로세스

반응고금속 성형법(Semi-Solid Metal forming: SSM)은 Alumax에서 개발한 (2,3)한 완제품에 근사한 알루미늄제품을 제조하는 프로세스로 1970년대 초기에 M.I.T의 M.C.Flemings에 의해 개발된 레오캐스팅에 기원하고 있다. SSM 성형법은 그림 3에 개략적인 공정이 나타나 있다. 현재 SSM 프로세스는 미국과 유럽에서 Alumax 라이선스로 자동차와 항공기용 부품들을 생산하고 있다. SSM제품의 품질과 프로세스는 가장 엄격한 안전 규격을 요구하는 자동차와 군사 규격에 대해서 철저히 검증을 거쳤다. 생산에 들어가기

위해 SSM 프로세스는 신뢰성과 품질 관리가 된 원소재를 필요로 한다. 또한 통상적인 금속의 청정도, 표면 품질, 치수와 화학조성의 규격이외에 반응고 조건에서 적절한 재료 유동성을 인정할 수 있는 미세조직의 새로운 규격도 필요로 한다.

원래 M.I.T의 방식은 기계적 교반을 사용하였으나 실용화에 어려움이 있었다. 기계적 시스템은 자주 중단되기 쉬우며 교반장치의 마모로 오염이 될수 있다. 그러나 몇개의 대용량 개발기기는 시간당 1,000킬로그램 이상으로 조업하고 있다. 교반 장치를 단순화 하려는 노력은 교반도가 적게 되는 일련의 꼬인 수냉 통로를 통하여 유동을 시

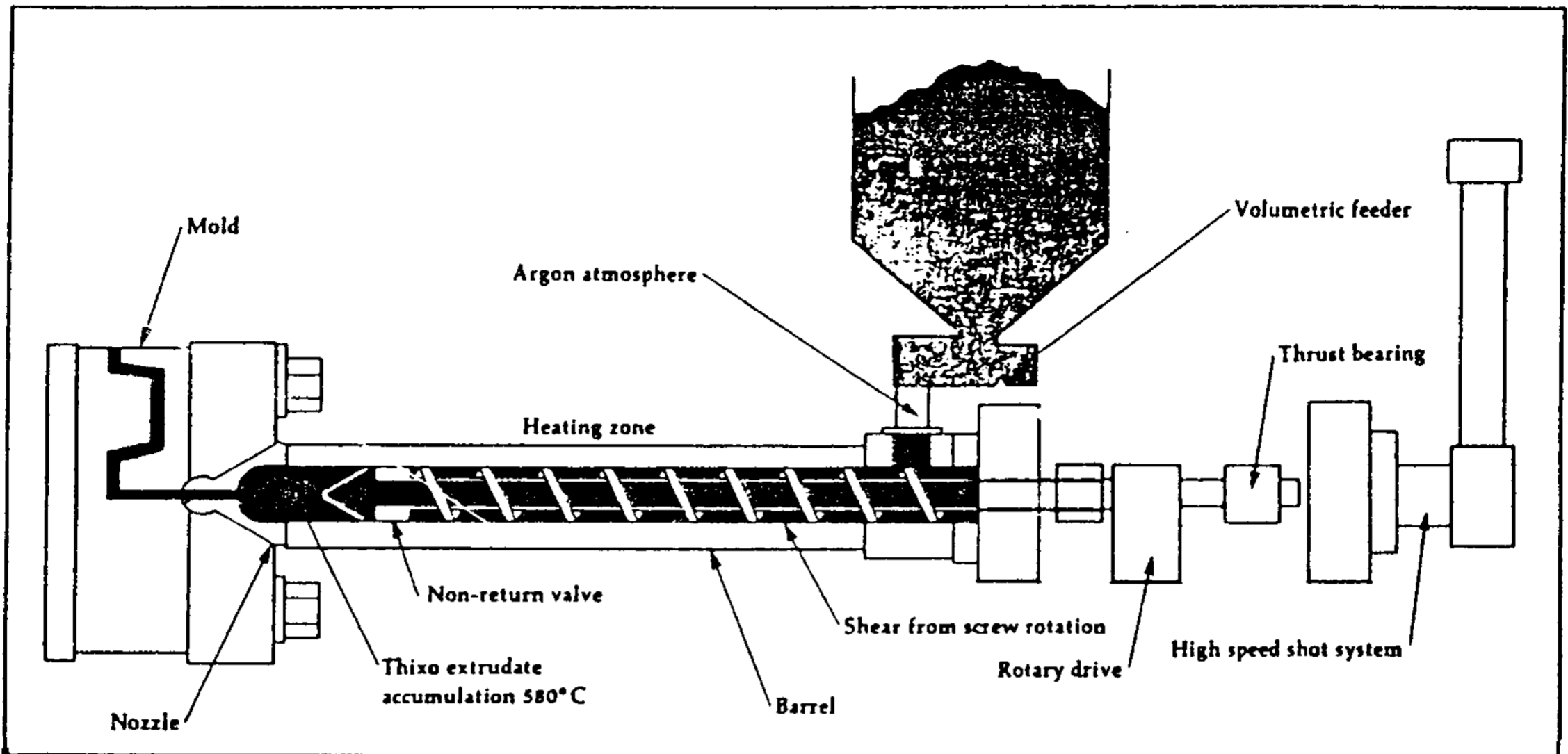


그림 1. 틱소트로픽 마그네슘 사출 성형기기

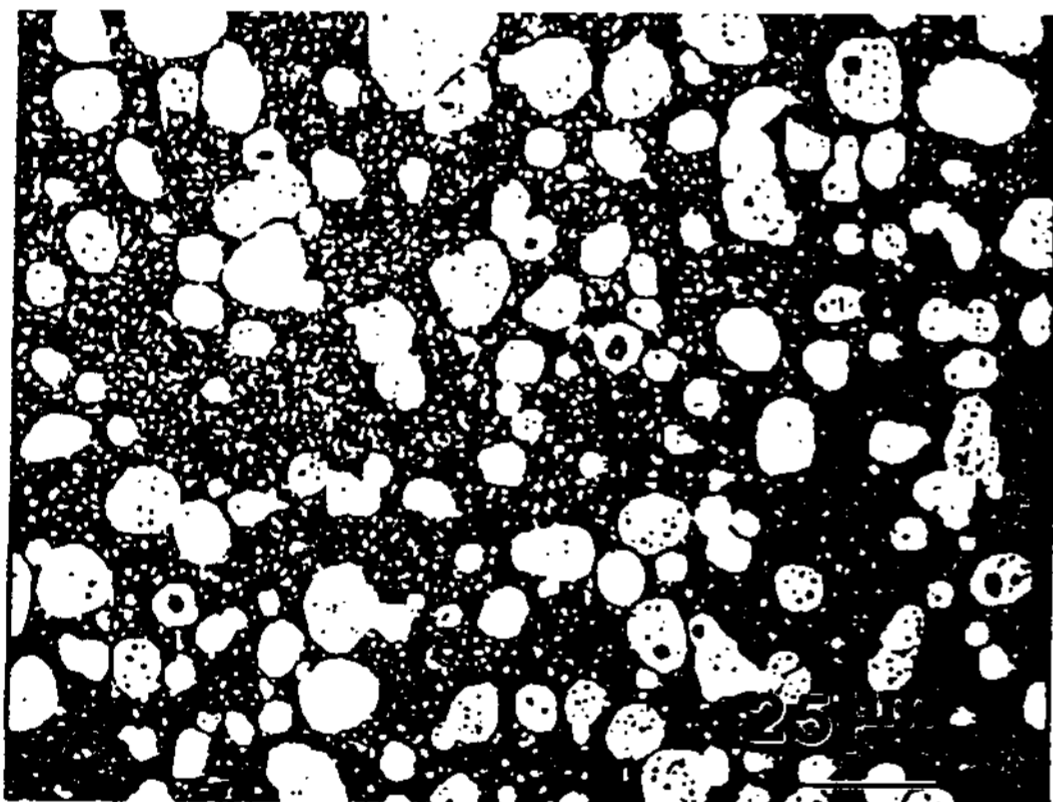


그림 2. 반응고 마그네슘 합금의 틱소트로피 미세조직.

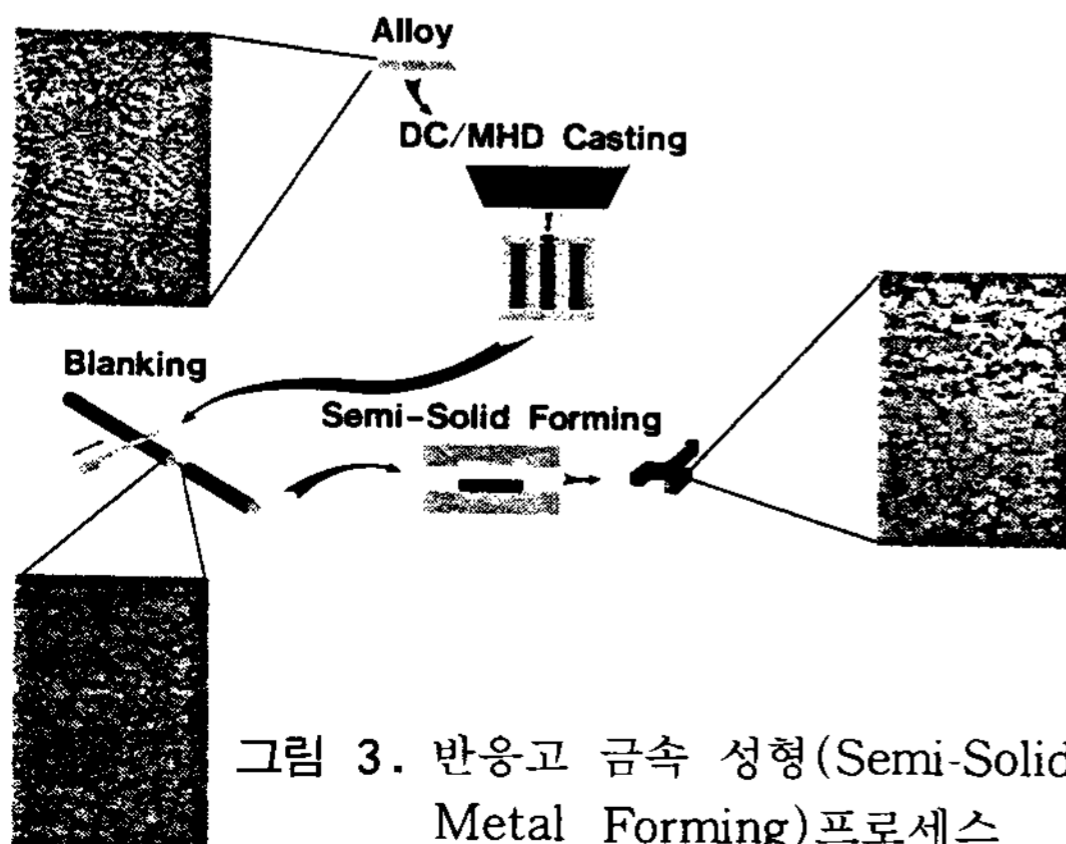
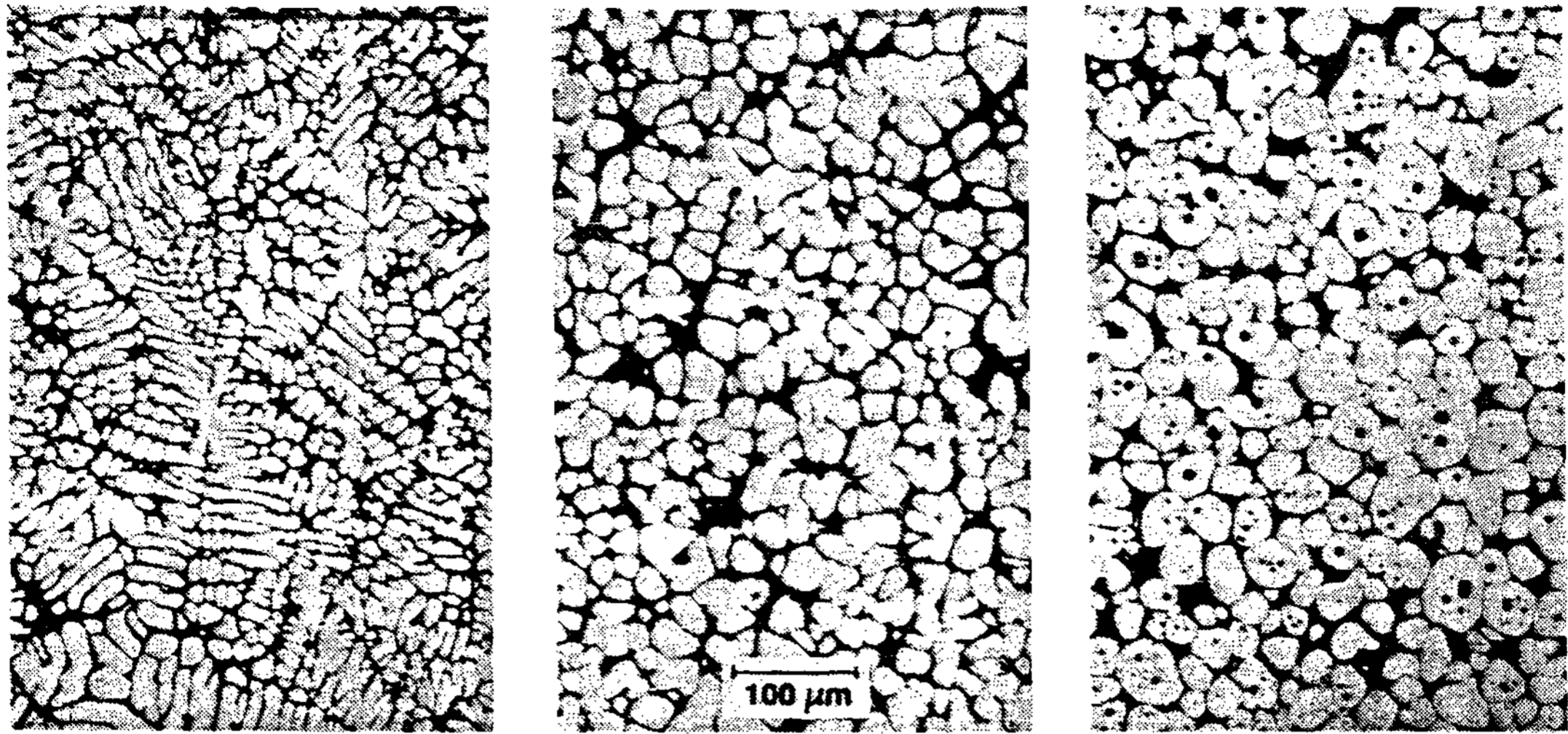


그림 3. 반응고 금속 성형(Semi-Solid Metal Forming) 프로세스

키는 이른바 passive stirring 방식도 고려되고 있다. 여기에는 전단속도와 응고속도의 상호 의존성에 의해 passive stirring 같은 시스템은 고품질의 SSM 성형제품을 보증하는 최적 미세조직을 제조하기에는 매우 생산성이 낮다. 대표적으로 이들은 반응고 슬러리 흐름을 방해하는 조대한 불규칙 형상의 초정을 만들기도 한다.

알루미늄 SSM 피드소재를 만들기 위해 두가지 방식이 상용화되고 있다. 첫째는 특수 설계한 자장 수력학(magnetohydrodynamic : MHD) 교반법을 D.C. 주조법과 결합한 것이다. M.H.D 방식은 높은 국부적 전단구역을 발생하여서 자연적으로 작은 응고시간의 D.C. 주조법과 결합하여 SSM에 적합한 미세한 구상의 미세조직을 만든다. 그림 4에 나타난 MHD 주조 알루미늄 봉의 결정립은 약 30-50 μ m이며 SSM 성형성의 미세조직 표준에 해당된다. 생산 크기는 50-150mm 직경까지이다.

둘째, 작은 직경의 피드재료의 제조는 1980년대 초기 acronym SIMA(Strian Induced Melt Activated)으로 알려진 방식이 있다. 이 프로세스는 고상온도 이상에서 유도 가열하여 입계 용해를 시켜 미세한 구상 입자 조직을 얻은 것이다. 그림 5에 SIMA 처리 알루미늄재료는 결정립경이 20-30 μ m으로 30mm 직경으로 제조되고 있다. 표면 가열 현상은 열이 표면에서 내부로 적절한 속도로 흘러야 하되 손상이 되지 않을 정도의 온

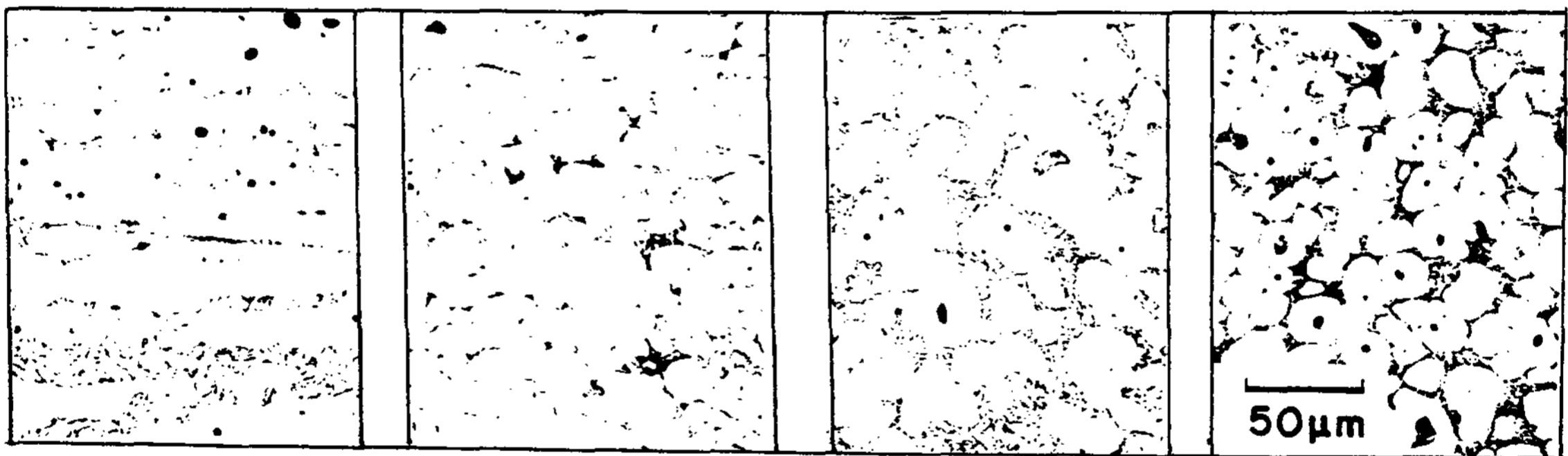


(a) 일반 주조

(b) MHD D.C. 주조

(c) SSM 성형

그림 4. Al-7 wt% Si 합금의 프로세스에 따른 미세조직 변화



(a)

(b)

(c)

(d)

그림 5. SSM 미세조직 개발의 하나인 SIMA (Strain Induced Melt Activated) 프로세스의 Al-7 wt% Si 합금의 조직특성. 변형이 증가함에 따른 조직 변화 SSM (a)→(d)

도기울기를 유지하여야 한다. 적절한 온도 기울기는 보통 단조에서의 값보다 다소 작은 상태이다. 열전달 문제는 때로는 국부 용해를 일으켜 효과적인 열전달의 장애가 되기도 한다. 그러나 SSM 가열 속도는 시간 당 500 파운드 만큼으로 현재 개발 시스템의 생산량의 몇배에 달한다. 그림 6에 나타난 각 제조법의 제조 에너지 비교를 보면 이 방식이 일단 주조보다 큰 에너지 절감이 되고 있다. 또한 대량의 용탕을 유지하기 위한 에너지와 산화와 개재물 손실을 고려하면 그 장점은 더욱 커진다.

한번 가열이 되면 SSM법은 기계적으로 반응고 장입재를 취급할 수 있는 것이다. 이것은 높은 자동화를 가능케하며 주조작업에 비해 보다 정밀하게 금형으로의 재료 위치를 제어할 수 있다. 아울러 가압력에 의해 SSM 재료가 점성 유체 같이 유동이 되므로 정밀 제어가 성형 과정의 전반적으로 이루어진다. 금형 설계상으로는 각 성형 과정이 전체적으로 안정 작업이 되도록 가스 빼기의 정확한 위치의 명시와 기타 요인들을 고려하여야 한다. 점성 금형 충전 거동을 하므로 제조조건들을 신뢰성 있게 관측하고 성형 제품의 품질에 큰

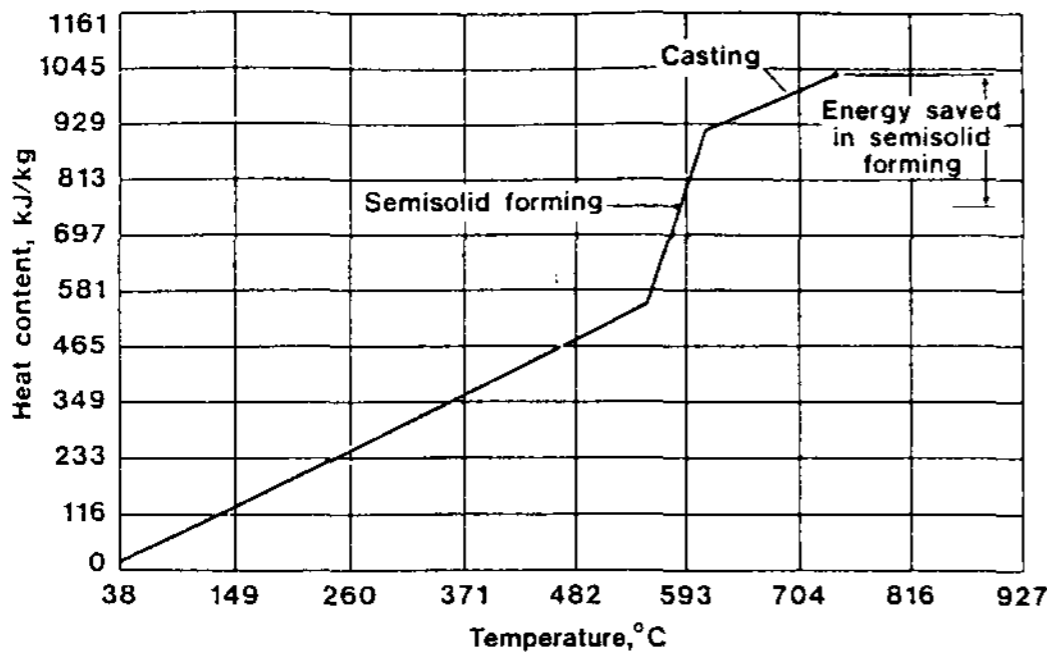


그림 6. 주조와 SSM 성형에 대한 알루미늄 합금의 가열에 필요한 에너지 비교

확신을 줄수 있다.

한편 금형 충전에 필요한 압력은 낮으나 연속되는 응고 수축을 보상하고 건전 제품을 bisucit 얻기 위해 고압 유지가 필요하다. 주물의 web나 bisucit는 사출시 다른 부위로 유동을 위해 설계에 주의가 필요하다.

3.2 제품의 특성과 공업제품 개발

SSM 프로세스는 T6과 T5 조건에서 표 3에 나

타난 고 기능성, 기계적 성능을 제공할 수 있다. 이러한 물성들은 SSM 알루미늄 제품으로 압출 및 기계가공한 정밀주조품이나 금형주조품을 대체할 수 있게 한다. 또한 강화된 철강 금형을 사용하면 다이캐스팅 이상의 치수 정밀성을 얻을 수 있다. 최근 시험에서 부품간의 치수 변동이 1%이내로 얻어지고 있다. 그림 7은 SSM으로 제조된 자동차용 브레이크 마스타 실린더류를 보여주고 있으며 이들은 제품으로 가공후 내압성시험을 만족하였다. 그림 8은 정밀주조와 기계가공으로 제조되던 항공기 브라켓을 이 방법으로 완제품에 가깝게 만들 수 있음을 보여주는 실례이다.

이상에서 SSM은 대부분의 상용 합금에 적용이 가능한 범용 기술임이 입증되었고 특히 점성의 성질을 고려하여 금속기 복합재의 완제품화에 적절한 방식이었다. 새로운 MMC응용들이 현재 개발되고 있으며 그중 대표적으로 그림 9에서 나타난 MHD주조/SSM 성형법이 되고 있다. 실례로 이 방식으로 약 40%의 높은 체적율을 첨가한 타이타늄 카바이드 강화 알루미늄 복합재로 복잡한 형상 제품의 제조가 되고 있다. 표 4는 이들의 기계적 성질로 강성은 179KPa×10⁶psi 되고 열팽창은 12ppm°C⁻¹으로 낮다.

표 3. 알루미늄 부품의 중력 금형주조품과 대체 반응고주조품의 성질 비교

	Weight (as forged or cast) kg	Weight finish machined) kg	Aluminum alloy	Heat treatment	Ultimate tensile strength MPa	Yield strength MPA	Elongation %
Semisoid forming	0.45	0.39	357	T5	303	228	8
Permanent mold casting.....	0.76	0.45	356	T6	290	214	8

표 4. SSM 성형한 알루미늄 / 타이타늄 카바이드 MMC의 기계적 성질

	Ultimate Tensile Strength Mpa	Yield strength Mpa	Elongation %	Young's Modulus KPa×10 ⁶
Al-6-Cu-40 vol% TiC	362	298	1.6	179
Al-40 vol% TiC	253	225	2.6	179
Al-25 vol% TiC	530	403	2.0	118

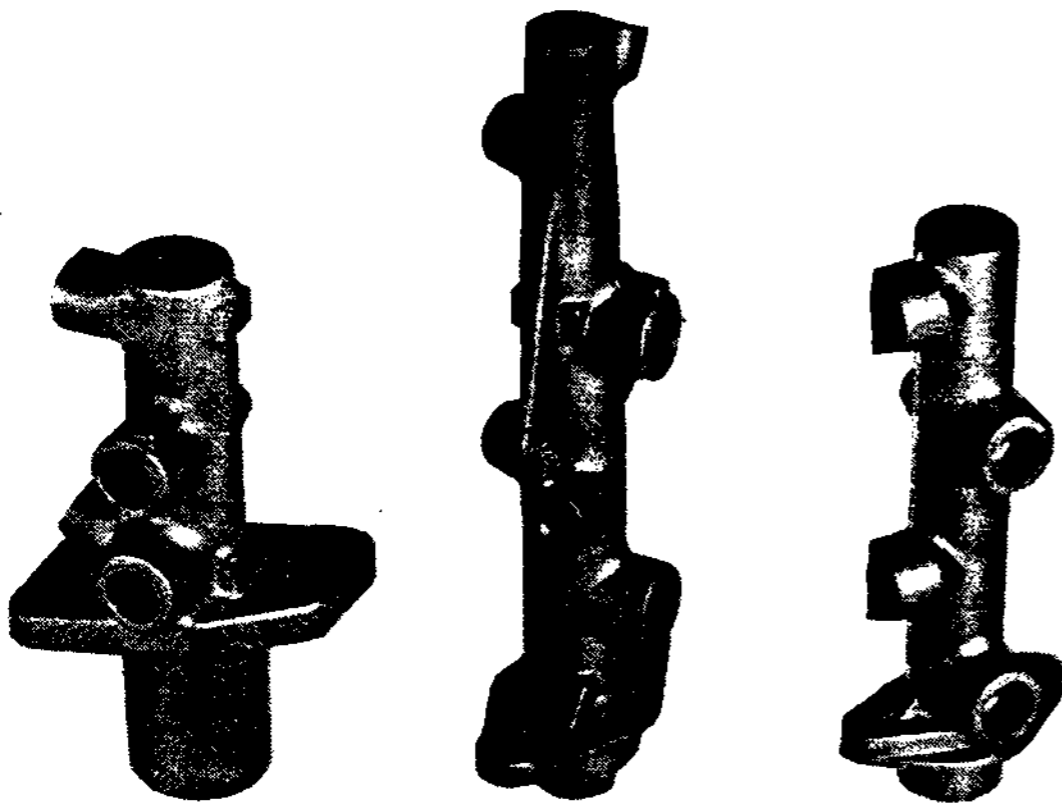


그림 7. SSM 성형으로 제조된 Al-7 wt% Si 합금의 자동차용 브레이크 마스타실린더류

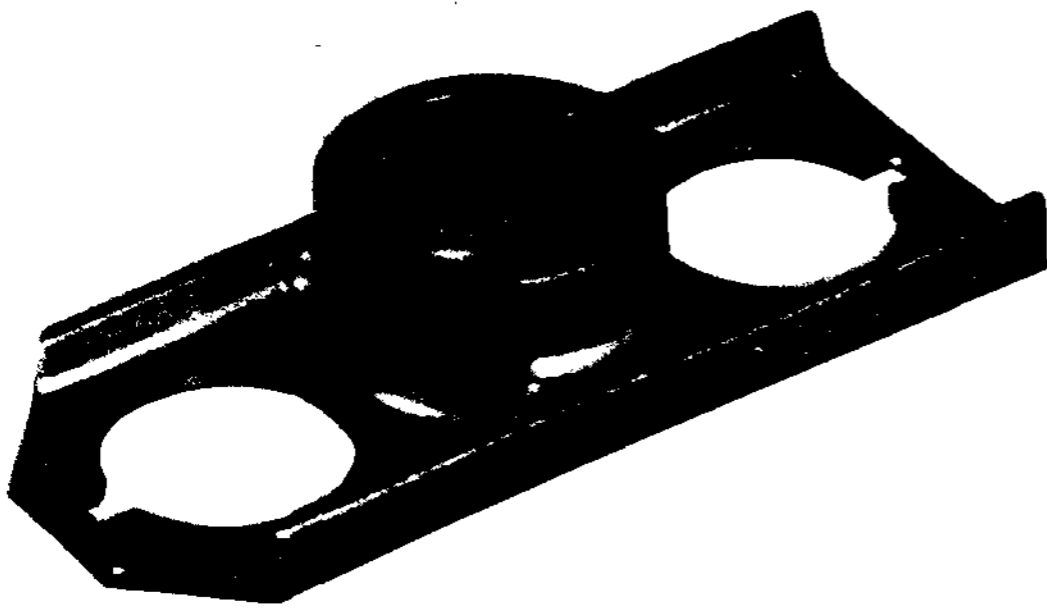
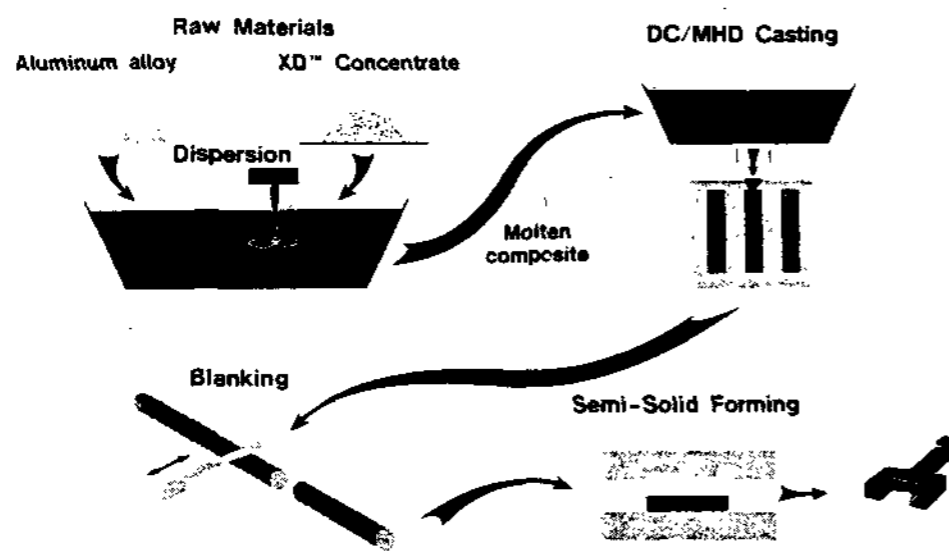


그림 8. 정밀주조와 절삭 가공으로 제조되던 항공기 브라켓을 SSM 성형으로 완제품에 근사하게 제조.



XD is a trademark of Martin Marietta Corporation

그림 9. 입자 강화 금속기 복합재에 적용되는 SSM프로세스

4. GIRCAST 법

4.1 GIRCAST 프로세스

GIRCAST는 1978년 부터 프랑스 파리대학의 CEMEF 연구소에서 수행한 반응고 주조법의 연

구(4,5)에서 개발된 프로세스이다. 이 방법은 금속 슬러리를 얻기 위한 반응고 합금을 기계적으로 교반하는 공정을 포함하여 인고트나 제품 주물의 제조를 하는 것이다. 여기서 반응고 제품의 고상율이 각 공정에 중요한 제조 조건이며 성형품의 조직과 기계적 성질에 큰 영향을 미치고 있다.

그림 10은 GIRCAST의 주요장치의 개략적인 모습을 나타낸 것이다. 이 장치로 직접 텍소트로피 상태로 된 합금에서 최종형상에 가까운 부품을 만들수 있다. 유도 가열과 기계적 교반으로 반응용 슬러리를 준비하고 적정온도로 가열을 하면서 원심력에 의해 비수지상정의 합금들이 금형을 충전하게 된다. 이때 용융도가니를 주형으로 하여 액체 가스를 분사시켜 반응고 주조품을 얻는다. 이 경우 종래의 텍소캐스트처럼 중간 냉각과 재가열이 필요없다. 이 때문에 얻어지는 장점으로는

- 텍소캐스팅에 사용 가능하다.
- 회전중에 주형에 액체 질소를 분사하여 조직을 급냉시킬수 있다.
- 진공이나 제어 분위기하에서 조업할수 있다.

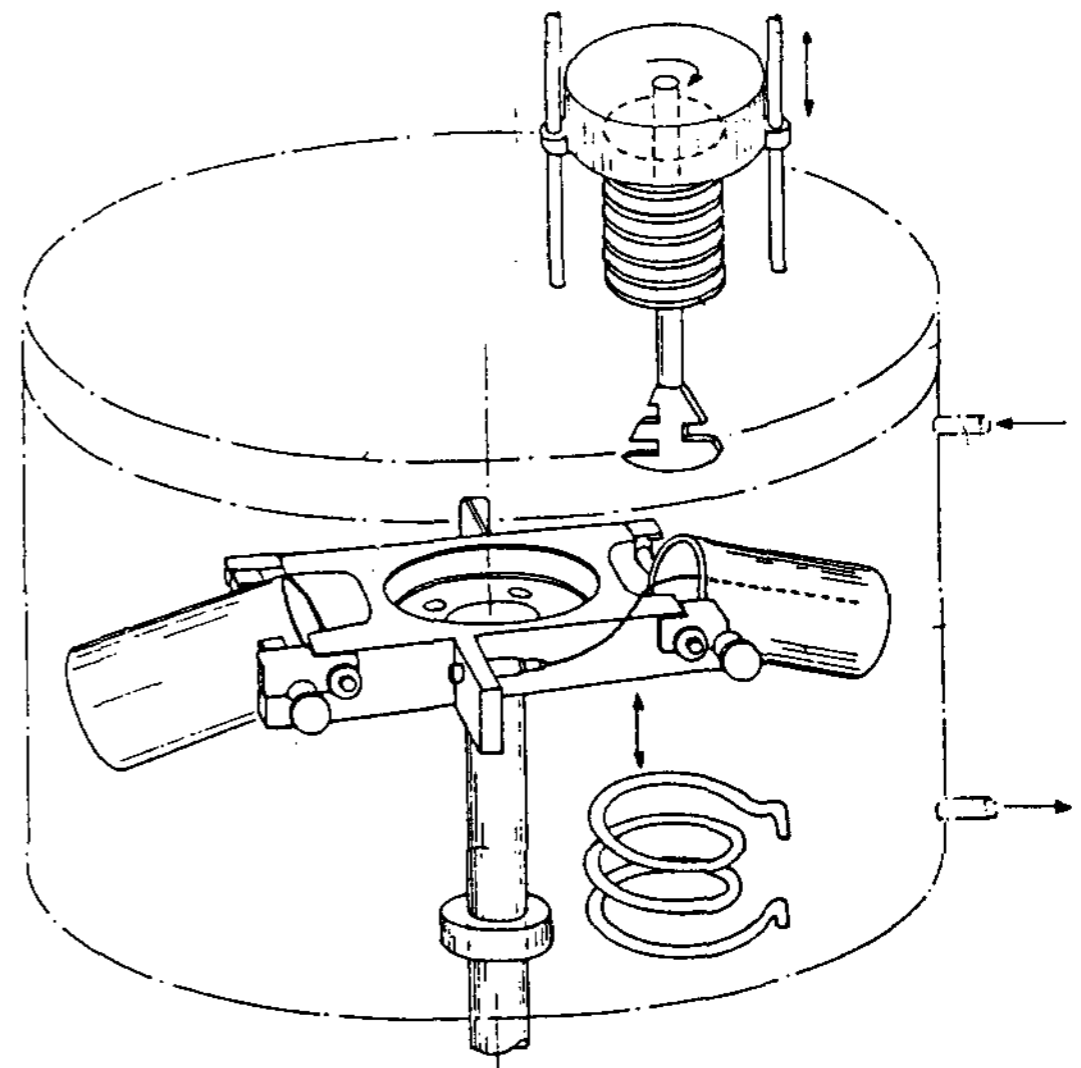


그림 10. GIRCAST 장치의 개략도

4.2 제품의 특성

GIRCAST 방식에서는 뒤틀림과 인장 소형률과 주조성 시험을 직접 주조할수 있다. 그림 11의 주조성 측정에서 고온 주형과 낮은 고상율로 100% 주조성을 얻을 수 있었다. 원심력하에서는 다이캐스팅보다 훨씬 작은 약 0.1MPa (Cu-11%Sn 에서는 0.13MPa)의 주조압으로

된다. 따라서 이 방식은 처음 방식의 재가열이나 운반에 따른 문제가 없어 낮은 고상율로서 최적 주조가 되고 있다. 액상선온도 보다 약간 낮은 온도로 주형을 예열하고 여기서 다음의 기계적 성질들이 개선되었다.

-Zn-27% Al(ZA27) 합금은 동일 온도로 주조된 수지상 조직은 인장 파단율이 3%이나 480°C(액상선 487°C)에서 얻어진 슬러리는 8%가 되었다.

-969°C로 제조된 Cu-11%Sn은 뒤틀림 성질이 보다 향상되었다.

낮은 고상율의 슬러리에서는 미세조직이 보다 작아졌다. 이 방식으로는 낮은 제조압력과 낮은 고상율로 레오캐스팅이 가능하지만 텍소캐스팅처럼 높은 고상율의 인고트는 제조할 수 없다. 또한 이 경우 원심력으로 냉각중에 가압을 하여서 텍소캐스트보다 인고트의 미세화 및 조대 기포를 억제할 수 있다. 이 방식은 Mg-9%Al-1%Zn(AZ91)와 Mg-9%Al-5%Zn(AZ95)합금의 텍소트로피 슬러리 인고트를 만들수 있다. 마그네슘 합금에 적용할때 일반 다이캐스트에서는 약 700°C로 조업을 하지만 그보다 발화 위험이 작은 530°C(AZ95)로 슬러리 인고트를 얻을수 있다.

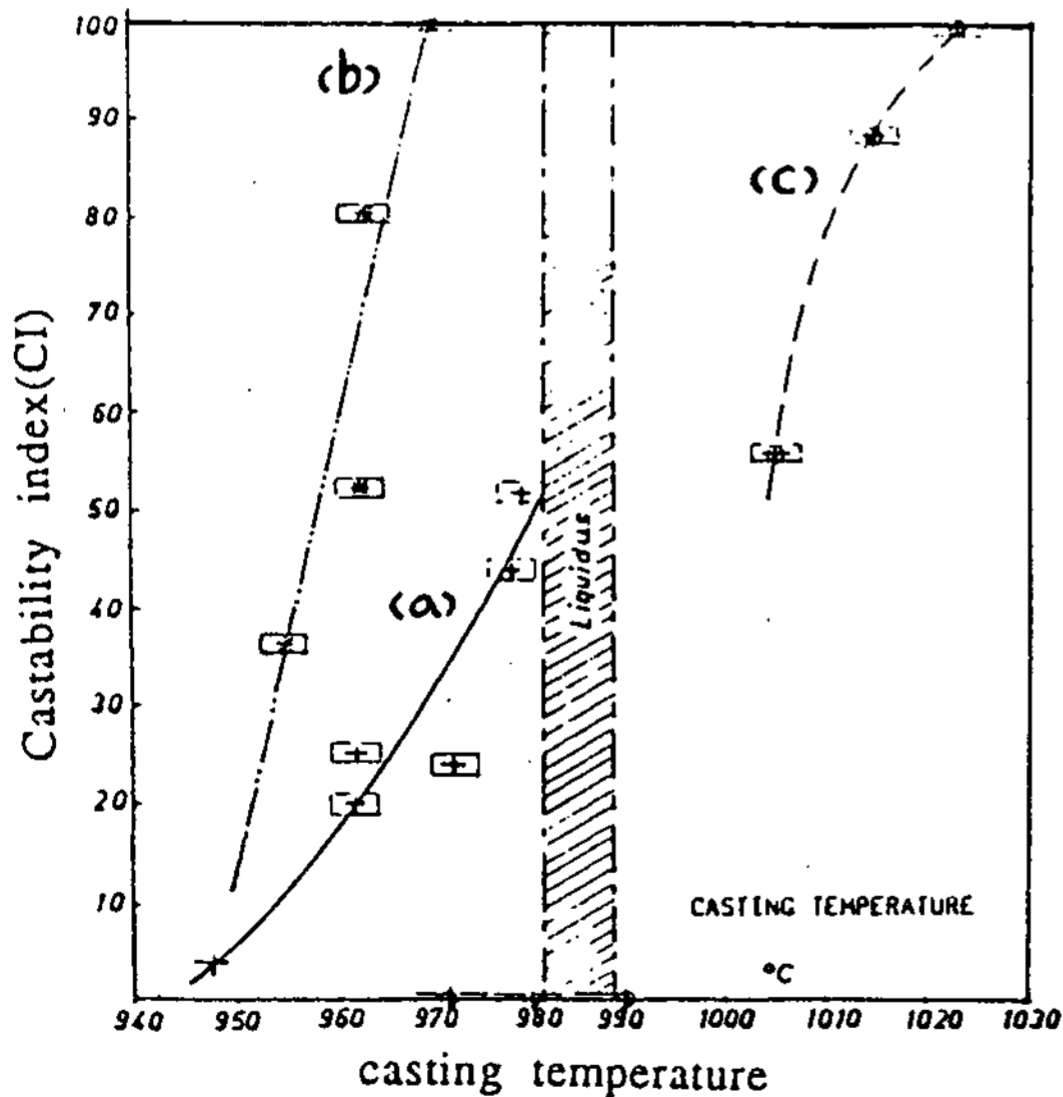


그림 11. Cu-11%Sn 합금의 주조온도와 주조성 지수의 관계

(a) 상온 주형에서 교반 (850rpm) (b) 고온 주형 (750°C)에서 교반(850rpm) (c) 고온 주형(750°C)에서 주조

GIRCAST의 또다른 장점은 원심주조 이전에 교반 토크를 기록할수 있다는 것이다. 이 자료는 텍소트로피 성질이 토크에 의해 감소하는 원심 냉각의 적기를 선택할수 있게 한다. 액상선온도 아래에서 냉각속도의 영향이 미세조직의 제어에 중요하다. 즉 냉각속도가 큰 $T_1=22.5^\circ\text{C}/\text{mm}$ 이면 교반에 의한 구상 입자의 변형이 방해되어 조대화가 빨라져서 고상입자의 상호 작용으로 점성이 높아진다. 반면 낮은 냉각속도 $T=15.7^\circ\text{C}/\text{mm}$ 에서는 고상입자가 교반에 의해 변형이 되어 상호작용으로 고상 연결이 되지 않게 되고 토크가 일정하게 되어 안정된 제조가 이루어질 수 있다.

4.3 공업제품 개발

텍소트로피 슬러리의 주조 및 가공처리공정의 하나인 GIRCAST법은 기존의 텍소캐스팅과 레오캐스팅의 제품을 제조할수 있었다. GIRCAST는 높은 고상율(40%)과 텍소트로피 조직의 인고트를 제조할수 있었다. 이 인고트는 재가열과 고압(100MPa)으로 압력주조하여 텍소캐스팅 방식으로 제조할수 있으며 낮은 고상율과 낮은 제조압력(수 0.1MPa)으로 완제품에 가까운 형상으로 직접 주조(레오캐스팅)할수 있었다. 이 기기는 진공이나 분위기로 작업할수 있어 대량의 마그네슘 합금 슬러리도 제조 할수 있다.

참고 문헌

1. M. C. Flemings : Proceedings of the Workshop on Rheocasting, Army Materials and Mechanics Research Center, Feb. 3-4, 1977, p. 3-10
2. M. P. Kenney, J. A. Courtois, R. D. Evans, G. M. Farrier, C. P. Kyonka, A. A. Koch, and K. P. Young : Metals Handbook, 9th. ed. ASM International. 1988 vol. 15 p327-38
3. P. S. Wilcox : Abstract, 1st Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Apr. 4-6, 1990
4. J. Collot : U. S. Patent No. 4510987, April 16, 1985
5. Y. Combres and J. Collot : Materials Science and Engineering, vol 85, 1987, L5-L8