

반응고 금속 성형기술의 현황

이 상 용 (KIMM 재료공정연구부)

- '81 고려대학교 금속공학과(학사)
- '82-'84 고려대학교 금속공학과(석사)
- '85-'86 독일 Aachen공대 용접연구소 연구원
- '87-'93 독일 Aachen공대 금속공학 및 금속물리연구소 연구원(박사)
- '94-현재 한국기계연구원 선임연구원

송 인 혁 (KIMM 재료공정연구부)

- '90 고려대학교 금속공학과(학사)
- '92 고려대학교 금속공학과(석사)
- '92-현재 한국기계연구원(연구원)

안 중 호 (안동대학교)

- '81 성균관대학교 금속공학(학사)
- '84 벨지움 LOUVAIN대학 금속공학과(석사)
- '88 벨지움 LOUVAIN대학 금속공학과(박사)
- '89-'95 한국기계연구원 선임연구원
- '95-현재 안동대학교 재료공학과(부교수)

이 정 환 (KIMM 재료공정연구부)

- '80 한양대학교 정밀기계공학과(학사)
- '82 연세대학교 기계공학과(석사)
- '95 홍익대학교 기계공학과(박사)
- '82-현재 한국기계연구원 선임연구원

한 유 동 (KIMM 재료공정연구부)

- '79 서울대학교 공과대학 요업공학과(학사)
- '81 한국과학기술원 재료공학과(석사)
- '85-'90 미국 Polytechnic Univ. 재료공학과(박사)
- '81-현재 한국기계연구원 책임연구원

1. 서 론

일반적으로 복잡한 형상의 부품은 주단조를 통해 제조하는 것이 이상적이나 주조품은 기공 등 많은 미세조직상의 결함을 가지고 있기때문에 기계적 특성에 있어서 한계가 있고, 반면에 열간단조, 열간압출등과 같은 고체상태에서의 성형가공은 주조품의 미세결함을 제거하여 기계적 특성을 향상시킬 수 있는 장점은 있으나, 정밀·복잡 부품의 성형은 성형압력이 높아지는 난점이 있으며 절삭등의 후가공으로 인한 생산성·경제성에 있어서의 손실이 뒤따른다.

반응고 금속성형기술(Semi Solid Metal Forming), 즉 액상과 고상이 공존하는 온도 영역(mushy zone)에서 금속재료를 성형하는 기술은 1970년대 초반 MIT 연구진에 의하여 반응고 상태에서의 독특한 점도(viscosity)특성이 발견됨^(1,2)으로서 시작되었으며, 기존의 주조와 단조 공정의 장점만을 취할 수 있는 공정으로 알려져 있다.

반응고 금속성형기술은 초기에는 미국을 중심으로 기초연구가 수행되었으며, 1981년 이후 일부 상용화가 시작되어 그 우수성이 입증되었고, 지난 10년 사이에는 미국 뿐만아니라 유럽, 일본에서도 본격적인 실용화를 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며 또한 특허등을 통한 기술보호의 추세가 가속화되고 있는 실정이다.

2. 반응고금속 성형기술의 원리

반응고 금속성형에서 금속재료는 주조에서와 같이 액상에서 또는 단조에서와 같이 고체상태에

서 성형되는 것이 아니라, 액상과 고상이 공존하는 온도영역 즉 상태도에서 볼때 고상선(solidus)과 액상선(liquidus) 사이의 온도영역에서 성형제조된다.

반응고 금속성형이 성형성, 성형제품의 특성면에서 의미를 갖기 위해서는 성형하는 순간에 그림 1과 같이 수지상 조직이 아닌 구형의 고상(solid phase)조직이 액상(liquid phase)에 미세하고 균일하게 분포되어 있어야 한다. 이러한 조직을 갖춘 상태에서만이 반응고 영역에서 편석(macrosegregation), 균열(hot crack)등과 같은 결함이 존재하지 않는 이상적인 성형이 이루어 질 수 있다. 일반적으로 주조법에 의해 응고된 조직은 수지상 조직(dendrite structure)의 형성을 피할 수 없다. 수지상 조직이 존재하면 반응고 성형시 수지상 조직 사이의 액상이 밀려나가 조직적으로 불균일한 분포가 생기고, 액상이 존재하지 않는 영역에서는 고상 조직간의 상호작용으로 변형저항이 커지며 액상만이 존재하는 영역에서는 성형시에 균

열 발생지점이 되기 쉽다.

수지상 조직을 없애고 구형의 반응고 조직을 만들기 위해서는 여러가지 방법이 있으며, 가장 많이 응용되고 있는 방법은 용탕교반법이다. 즉 용탕이 응고되고 있는 동안에 교반을 통한 전단 응력에 의해 수지상 조직을 파괴시켜 구형의 응고 조직을 갖게하는 방법이다. 여기서 수지상 조직의 성장을 억제하면서 구형의 고상 조직을 얻을 수 있는 가능성은 전단변형속도(교반의 강도)를 증가시킬수록, 교반시간을 증가시킬수록, 냉각속도를 작게 할수록 커진다⁽³⁻⁵⁾(그림 2).

반응고 상태에서의 조직의 형태가 중요한 이유는, 어떠한 조직을 갖느냐에 따라 반응고 소재의 점도 즉 변형저항이 달라진다는 점이다. 일반적으로 조직이 구형일수록 반응고 상태에서 점도가 낮아지며, 액상의 비율이 높을수록 점도가 낮아진다. 지금까지의 많은 연구에 의하면 액상이 너무 많으면 점도가 낮아서 성형성은 좋은 반면 취급이 곤란하고, 고상이 너무 많으면 점도가 급격히

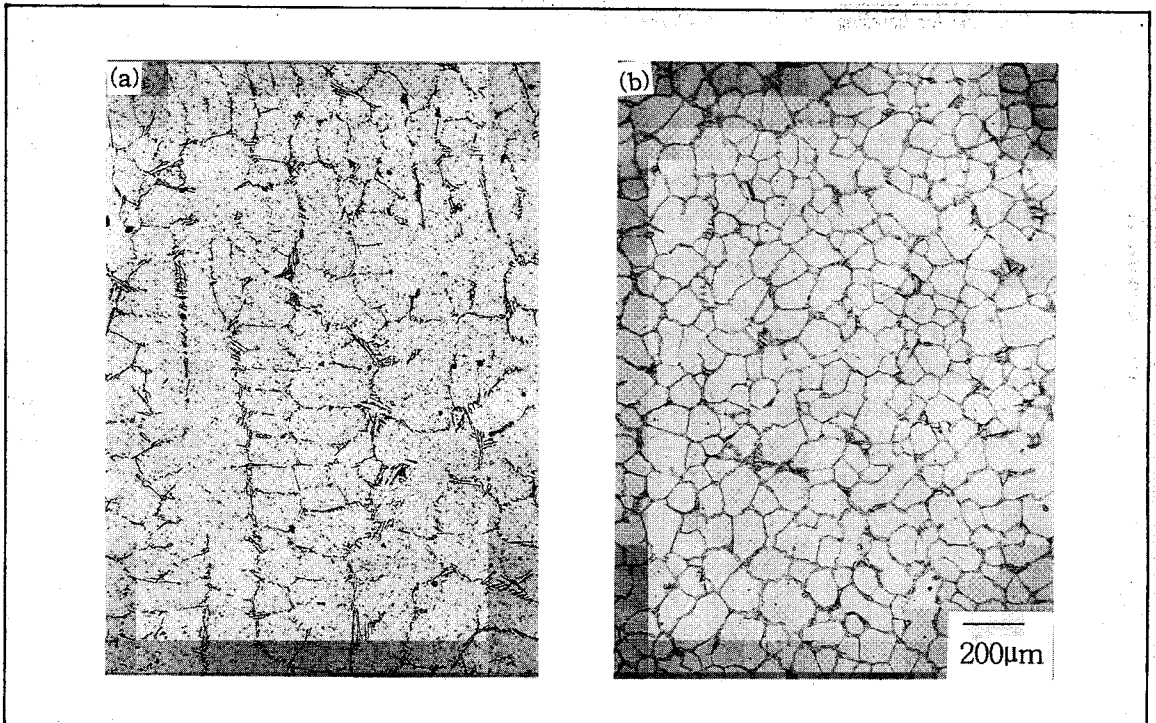


그림 1. Al-4wt.%Si 합금의 응고조직 (a) 수지상조직 (b) 구상조직

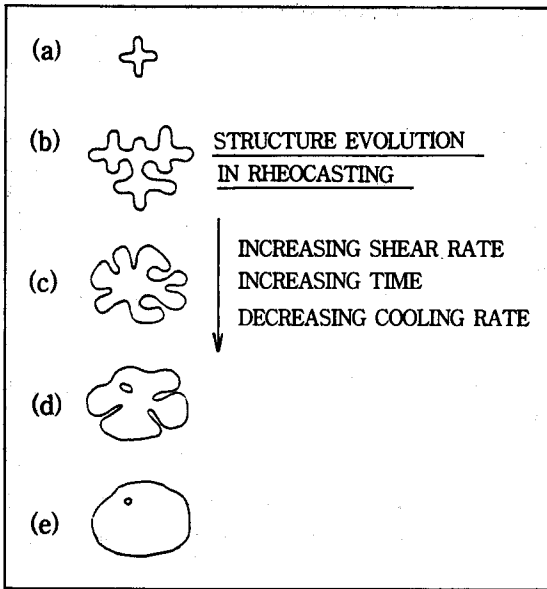


그림 2. 용탕의 응고시 교반에 의해 조직이 변화하는 과정의 예

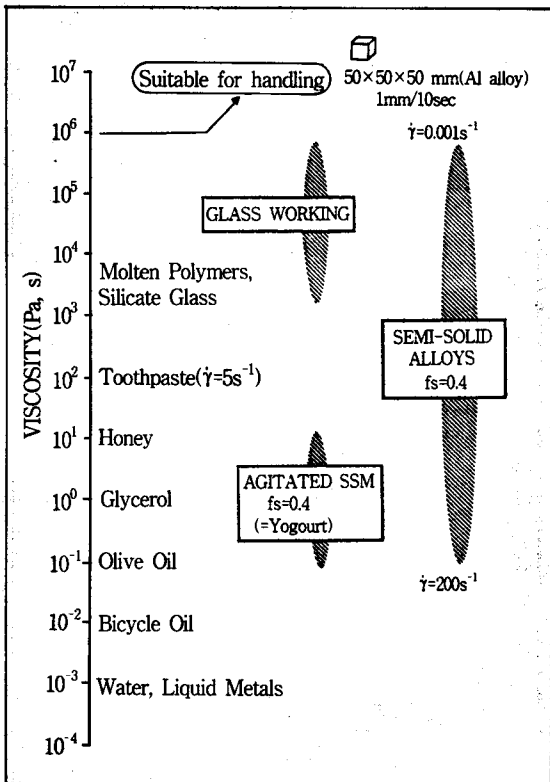


그림 3. 여러가지 재료의 점도

높아져 변형저항도 급격히 증가하고 반응고 성형의 장점인 성형성 향상을 기대하기 어렵기 때문에 0.6-0.8의 고상율이 반응고 성형에 적당한 것으로 알려져 있다. 그림 3은 여러가지 일상재료와 반응고 합금의 점도를 비교해 주고있다. 주목할만한 것은 반응고 합금은 일정한 고상율에서도 변형속도에 따라 점도가 크게 변화하고 있음을 보여주고 있는데, 이는 반응고 상태 조직의 또 하나의 중요한 특징인 점도의 '시간의존적'(thixotropic) 특성이다. 시간 즉 변형속도에 따라 조직이 변화하며, 조직의 변화는 점도의 변화를 초래한다. 반응고 상태의 조직에서는 변형이 진행될수록 '점도의 증가가 둔화되어' 적은 응력변화로도 우수한 성형성을 유지할 수 있는것이 특징이다.⁽⁶⁻⁸⁾

3. 반응고 금속 성형기술의 분류 및 장·단점

반응고 금속 성형기술은 크게 rheocasting과 thixoforming으로 구분할 수 있다(그림4). 반응고 금속의 변형유체적(rheological)특성을 이용해 응고 중에 성형하는 기술을 'rheocasting'이라 부른다. Thixoforming이 rheocasting과 다른 점은 교반한 반응고합금을 응고도중에 직접 성형하지 않고, 일단 상온으로 냉각한 후 이것을 다시 고상-액상 공존온도구간으로 재가열하여 성형한다는 점이다. 일단 냉각되었던 반응고합금은 고상-액상 영역으로 재가열을 해도 원래의 낮은 점도를 회복하는 데는 시간이 소요되기 때문에 취급하기에 적절한 점도를 유지하게 된다. 즉, rheocasting한 반제품은 일반적으로 너무 점도가 낮아 취급이 곤란하여 자동화공정에 적합하지 않은 경우가 많은데 비하여 thixoforming에서는 이러한 문제가 없다. Thixoforming에서도 소재의 재가열 이후 성형하는 방법에 따라 thixocasting, thixoforging, thixoextrusion, thixorolling등으로 구분할 수 있다.

Rheocasting과 외견상 유사한 공정으로 die casting 공정이 있다. 그러나 rheocasting이 die casting

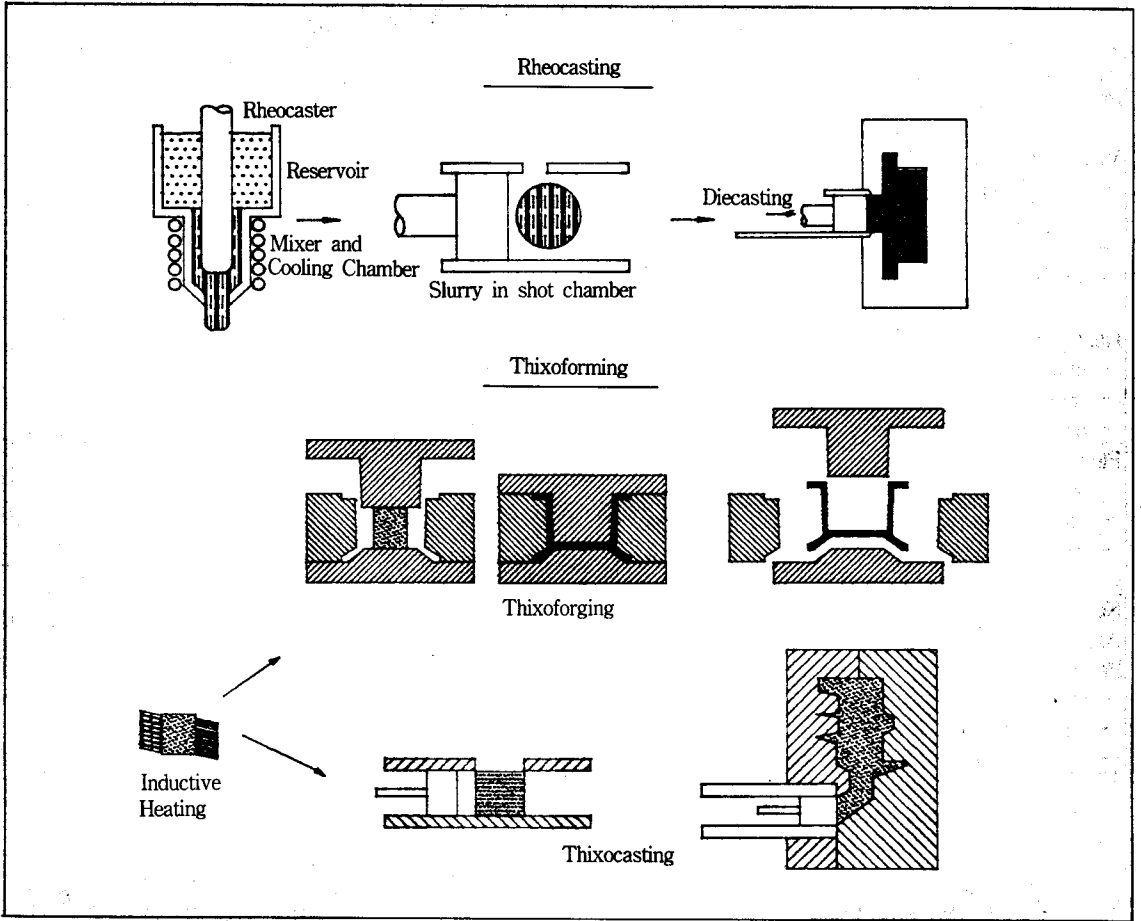


그림 4. 반응고 금속성형기술의 분류

과 근본적으로 다른 점은 주조온도 보다 훨씬 낮은 액상-고상 공존영역에서의 공정이라는 것, 그리고 이같이 낮은 온도에도 불구하고 심한 교반을 병행하여 합금의 점도를 용탕과 유사한 값으로 강하시켜 성형을 용이하게 할 수 있다는 점을 들 수 있다.

반응고 금속 성형의 대표적인 경합공정인 주조 및 단조 공정과의 기술적, 경제적 측면에서의 비교를 표1에 요약하였다. 먼저 반응고 금속 성형이 주조에 대해 가지는 장점으로는 상대적으로 낮은 온도에서 행해지기 때문에 에너지의 절감, mold수명의 증가, 기공이나 shrinkage와 같은 주조결함의 극소화를 통한 품질향상을 들 수 있다.

단조에 비하여 반응고 성형법이 갖는 장점은

반응고 상태에서 얻을 수 있는 낮은 응력하에서의 우수한 성형성으로 인해 복잡한 형상을 갖거나, 고체상태에서 성형이 어려운 소재를 1회 공정으로 최종제품에 근사한 형태로 성형할 수 있다는 점이다. 경제적인 측면에서 반응고 성형법이 갖는 장점은 소재의 수율(소재의 이용 효율)이 높은 점, 기공생성 억제를 통해 진밀도가 높은 제품을 얻을 수 있다는 점, 자동화를 통하여 생산성이 주조법에 비하여 향상된다는 점, 높은 공정의 안정성 혹은 확실성이 높다는 점 등을 들 수 있다. 그러나 반응고 금속 성형기술은 아직까지는 고가의 특수장비가 요구되며, 특수한 조직을 갖는 소재가 필요하다는 것이 주조 및 단조에 비하여 단점이라고 할 수 있다. 또한 단조에 비하여 일정한

표 1. 반응고 금속 성형기술의 기존공정과의 비교

장 점	경 합 공 정	단 점
Productivity ↑ Viscosity ↑ - mold filling ↑ - gas entrapment ↓ - surface finishing ↑ - quality ↑ Heat content ↓ - mold erosion ↓ - energy consumption ↓ - high m.p materials ↑	Casting	Equipment cost ↑ Special materials
Flow stress ↓ - intricate part forming ↑ - forming speed ↑ - mold life ↑ Near-net shaping ↑ Automation ↑ Process step ↓ - productivity ↑ - energy consumption ↓ - material consumption ↓	Hot forging	- Solidification time - Mechanical property ↓ - Tool life ↓ - Special heating - Special materials

응고시간이 성형 후 필요하기 때문에 성형자체는 빠르게 진행되지만 전체적인 공정 cycle은 길어질 수 있다는 것이 단점으로 지적될 수 있다. 또한 반응고 성형법에 의해 제조된 제품의 기계적 특성은 현재 고체상태에서 단조성형된 제품에 비해 떨어질 가능성이 있기 때문에 이와 같이 부족한 제품의 기계적특성을 보완하기위해 고체 상태에서 추가적인 성형공정이 필요할 수도 있다.

4. 연구개발 현황 및 응용 예

반응고합금 제조기술은 1970년대 MIT의 M. C. Flemings 연구그룹에서 Pb-Sn 합금의 'hot tearing' 현상을 연구하던 중 우연히 발견하게 된 것이 그 시초이다. 이들은 Pb-Sn합금의 응고도중 성장하는 수직상 조직이 변형, 파괴되는데 요구되는 전단강도(shear strength)를 알아보기 위해 원뿔형 고은viscometer를 제작하여 실험을 하였는데, 실험

험중 특이한 현상에 직면하게 되었다. 즉, 한개의 뿔과 그 바깥 쪽에 위치한 보다 큰 원뿔형 용기 사이에 형성된 환형(環形) 공간에 Pb-Sn합금을 용해하여 붓고 외측원뿔용기를 회전시키어 회전력으로 응고중인 반응고(半凝固)합금의 점도를 측정하던 중, 예상과는 달리 반응고합금의 점도가 액상일때에 비해 크게 높아지지 않음을 알게 되었다. 더구나 응고중의 온도가 고상 분율 0.5이상으로 상당히 낮은 경우에 있어서도 점도가 매우 낮았다. 이와같은 반응고합금의 점도 저하는 원뿔용기의 회전에 기인하는 것으로 판명되었다. 즉, 회전에 의해 반응고합금에 전단응력이 가해져 수직상 조직의 성장이 억제되고, 대신 구형화 된 고상입자가 형성되었고 액상 사이에서 구형의 고상입자들이 미끄러짐으로 인해 점도가 낮아지게 된 것이다.

이상과 같이 MIT 그룹에 의해 발견되고 개발된 rheocasting이나 thixoforming기술은 초창기에

는 특허의 보호를 받으며 미국 Defence Advanced Research Projects Agency 등의 지원하에 수천개의 부품을 생산하게 되었다. 반응고합금을 이용한 최초의 상업화된 제품이 생산된 것은 1981년으로, 그 후 많은 대학, 연구기관, 기업에서 이 분야에 관심을 가지고 연구개발에 착수하게 되었다. 특히관계로 1980년대의 연구는 주로 대학을 중심으로 공정과 반응고합금의 기초물성에 관한 연구가 이루어졌다. 예를 들면, 영국의 Sheffield대학, 불란서의 École de Mine de Paris, Grenoble의 INPG, 화란의 Delft대학, 독일의 Aachen 공대, 미국의 MIT를 비롯, Ohio주립대, Cincinnati대학, Illinois 대학, Connecticut 대학, 캐나다의 École Polytechnique de Montréal 등 많은 곳에서 활발한 연구를 하고 있다. 이러한 연구의 결과, 특히 1991년 이후 반응고합금의 상용화가 급격히 증가하는 추세에 있다.^(9,10) 먼저 미국의 경우, Amax Inc.의 자회사인 Alumax Engineered Metal Processes(AEMP)는 많은 종류의 Al계 반응고합금 부품을 생산하기 시작했으며, Thixomat Inc.는 반응고합금의 injection molding기술 특허를 가지고 Mg합금 부품을 생산하고 있다. 또 ITT Cannon Div. Corp.도 Al계 electrical connector를 생산하

고 있다(표 2).

유럽, 일본의 경우는 상용화가 다소 늦어졌으나 근래에 들어와 유럽에 있는 다수의 알루미늄 제조 및 가공업체 그리고 많은 연구기관에서도 체계적인 반응고 성형용 소재 제조 공정개발 및 반응고 성형을 이용한 부품 제조 기술에 박차를 가하고 있다(표 3). 따라서 멀지않아 유럽에서도 저렴한 가격으로 반응고 성형용 소재가 제조 공급되고 이를 반응고 성형기술을 통해 양산제조된 부품들이 제공될 것이 기대되고 있다. 이에 대한 간단한 예로서 1992년 6월 이탈리아의 Weber사에 의해 Lancia 자동차를 위해 개발되고 소개된 "Fuel Rail" (1992년 10월 양산이 시작됨)을 들 수 있다. 또한 이탈리아의 Stampal사에서는 비슷한 부품에 대해 Ford사를 위해 1993년 부터 일간 3500개를 제조 할 계획으로 있는 것으로 알려져 있다. 불란서의 Péchiney S.A., 스위스의 Buehler GmbH 등도 반응고합금의 상용화 단계에 접어들고 있다. 일본에서는 수 년전 부터 Mitsubishi Heavy Industries, Nippon Steel, Kawasaki Steel 등이 'Rheotech'이란 consortium을 형성하여 반응고합금의 상용화 준비를 하고 있다. 그림5는 반응고 성형기술로 제조된 제품의 형상을 보여 주고 있

표 2. 반응고 성형기술에 의해 실용화 된 알루미늄 제품 예

제 품	합 금	수 량	제조회사	수요회사
Compressor part for car air-con.	Al-7%Si-Mg	8,000 12,000	AEMP(USA) AEMP(USA)	Ford Chrysler
Brake cylinder cap	Al-7%Si-Mg	25×10 ⁶	AEMP(USA)	Bendix
Brake cylinder	Al-7%Si-Mg	> 1×10 ⁶	A.Teves (Germany)	Diff. Automobile Companies
Compressor piston	Al-7%Si-Mg	15×10 ⁶	AEMP(USA)	Ford
Fuel rail part	Al-7%Si-Mg	Mass prod. Since 1992	Weber/ Magneti Marelli(Italy)	Lancia
Electrical connector part	Al-1%Mg-Si-Cu	> 1×10 ⁶	ITT/Cannon (USA)	Aero. & Space

표 3. 반응고 성형용 소재제조를 위한 유럽 및 일본에서의 연구개발 현황

연구기관 (국가)	공정	합금	비고
Aluisse (Switzerland)	EM	Al-7%Si-Mg	φ 3''(size)
AMAG (Austria)	EM	Al-7%Si-Mg	φ 3''
Alures (Italy)	EM+M	Al-7%Si-Mg	-
Pechiney (France)	EM	Al-7%Si-Mg	Vertical stirring
SAG (Austria)	EM	Al-7%Si-Mg	φ 3''
Stampal spa (Italy)	EM+M	AlCuMg, AlSi, AlMgSi, AlMg, AlZnMg	φ 90-110mm
Weber/ Magneti Morelli (Italy)	M	Al-Alloy	φ 45-110mm
EFU GmbH (Germany)	EM+GR	Al-alloy	φ 100-230mm
IBF/RWTH Aachen (Germany)	SIMA	Al-alloy	-
THRUST (England)	?	Al, Steel, Stellite, MMC	-
Ecole des Mines (France)	?	Al, Mg	-
Rheotec (Japan)	EM+other Processes	Al-alloy High M.P alloy	-

EM : Electro Magnetic Stirring

M : Mechanical Stirring

GR : Addition of Grain Refining Elements

SIMA : Strain induced melt activated

고, 그림 6에서는 그림5의 제품에 대해 기존 공정에 대한 반응고 성형공정의 기술적, 경제적 특성을 비교한 결과를 소개하였다.

지금까지 공개된 응용예의 대부분은 알루미늄 합금 주조품을 대체하기 위해 pressure die casting machine을 이용하여 rheocasting 또는 thixocasting한 경우이다. 이것은 기존에 존재하는 금형 및 설비에 대해 비교적 적은 수정을 통해 실현이 가능하기 때문에 반응고 성형법의 응용이 용이한 경우라고 볼 수 있다. 그러나 반응고 단조 성형(thixoforging)의 경우에는 고강도 합금에 대해 기존의 고체상태에서의 성형법을 대체하거나 또는 확대적용하는 것이 우선 가능 할 것으로 보

인다. 이때 전제조건은 특정한 고상비율을 얻는데 필요한 온도구간이 thixocasting에 비해 매우 작아지기 때문에 이를 실현하기 위해서는 경우에 따라서 고난도의 공정기술이 필요하다는 것이다. 또한 많은 Alwrought 합금은 열간성형시 hot crack이 발생하기 쉬운데 hot crack을 방지 할수 있는 대책은 thixocasting 보다는 thixoforging의 경우가 더 쉽게 얻을 수 있다. 즉 hot crack을 방지하기 위해서 thixoforging에서는 성형압력을 성형 소재의 전체 단면적에 비교적 균일하게 가하는 것이 가능하나, thixocasting의 경우에는 성형 소재의 전체단면적에 대해 균일하게 압력을 높이는 것이 용이하지 않다.

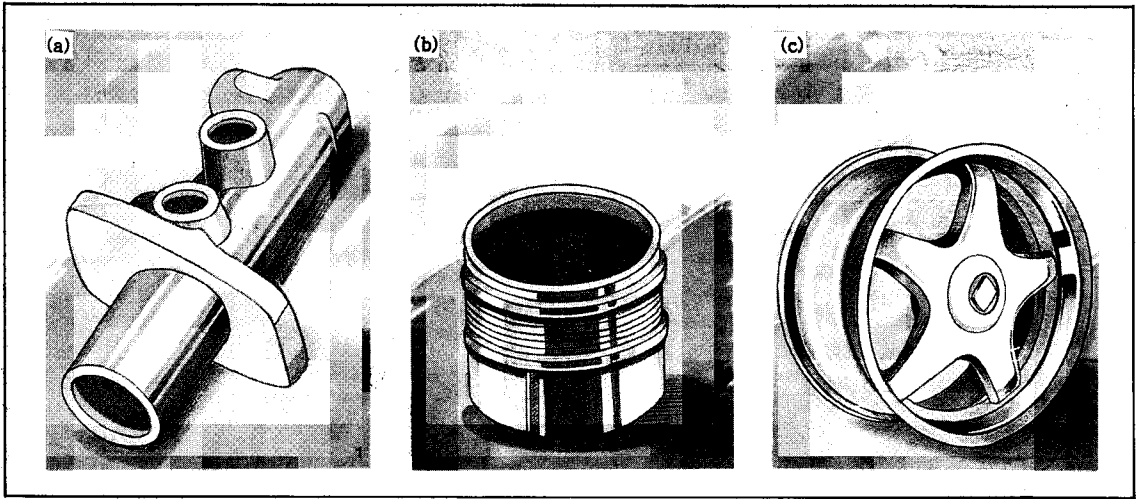


그림 5. 반응고 금속성형의 응용예
 1) Brake cylinder 2) Electrical connector 3) Car wheel

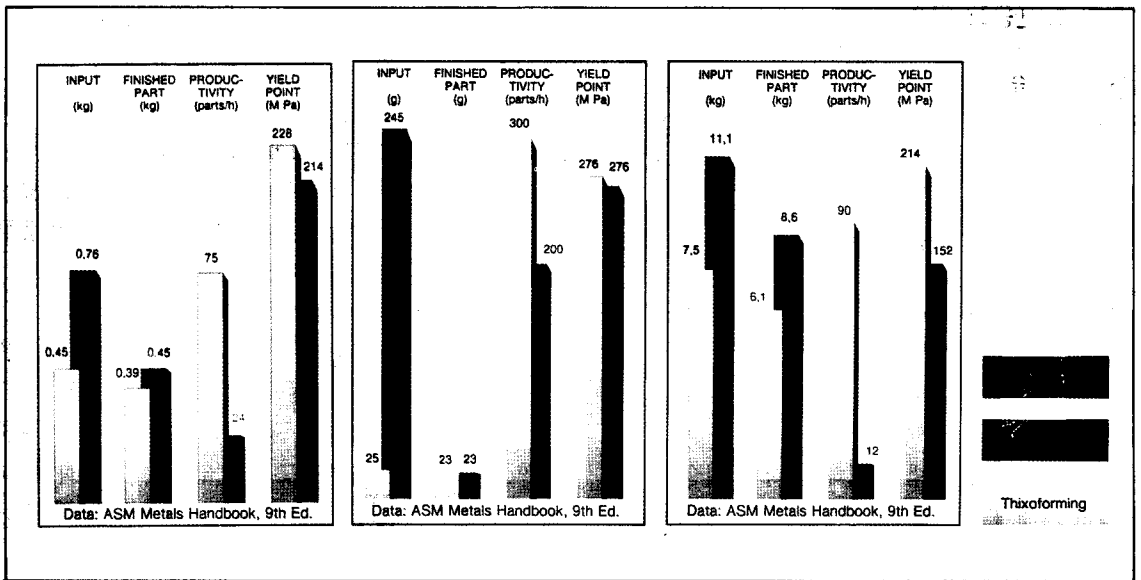


그림 6. 반응고 성형과 주조 및 기계가공과의 비교
 a) Brake cylinder b) Electrical connector c) Car wheel

5. 반응고 금속의 성형성에 미치는 인자

반응고 금속성형기술의 장점을 살리기 위한 가장 중요한 요건은 주조에 버금가는 우수한 성형성을 유지하면서도 성형제품의 기계적 특성 또한 고체 상태의 성형결과에 크게 떨어지지 않아야

한다는 것이다. 이를 위해서는 반응고 성형에 적절한 초기조직을 갖추어야 함은 물론 성형시의 공정조건도 매우 정밀하게 설정되고 제어되어야 한다. 그림 7에는 반응고 금속의 성형성에 크게 영향을 미칠수 있는 인자들을 thixoforging(특히 thixoforging)의 경우를 예로 하여 정리하였으며,

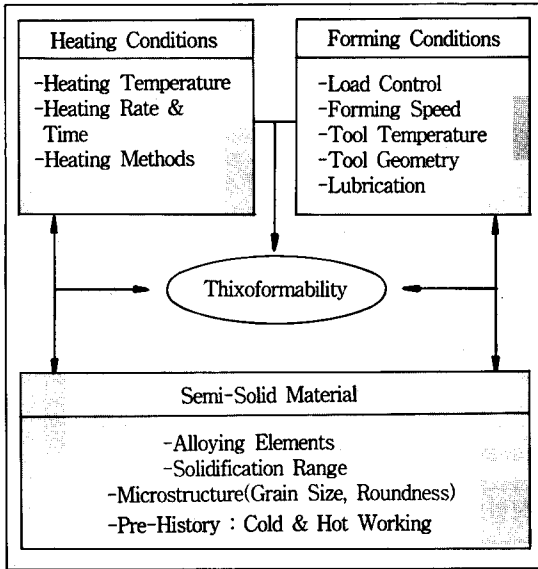


그림 7. 반응고 금속의 성형성에 미치는 인자들

반응고 금속의 제조방법의 소개 및 각각의 공정 조건들이 성형성에 어떻게 영향을 미치고 있는가를 아래에서 고찰해 보고자 한다.

5.1 반응고 성형용 소재 제조

반응고 성형용 소재가 갖추어야 할 조건은 미세하고 균일한 구상조직과 제조공정이 저렴하고 대량생산에 적합해야 한다. 아래에는 응고조직을 미세하고 균일한 구상조직으로 만드는 여러가지 방법중 대표적인 방법에 대해 간략히 기술하였다.

(가) 기계적 교반법

기계적 교반법은 용탕을 응고 도중에 graphite와 같은 rotor를 이용하여 교반시켜 줌으로써 수지상 조직의 생성을 억제시키고 구형의 응고조직을 얻도록 하는 방법이다. 기계적 교반법은 간단한 원리로 높은 전단력을 낼 수 있고 구형화조직을 쉽게 얻을 수 있는 등의 장점은 있으나, 교반 rotor의 마모, 불순물의 개입, 품질의 저하, 공정의 제어의 난이성, 경제성 등의 측면에서 제약이 있다. 또 rotor와 교반용기 사이에 형성된 제한된 공간으로 인해 slurry의 유동성이 낮아 현실적으로 연속주조가 힘들다. 기계적 교반법은 고상분율이

0.6 이상 이면 교반이 용이치 않으며, 반대로 0.3 이하면 유동성은 개선되나 응고중에 수지상 조직이나 과도한 입자성장의 가능성이 커진다. 일반적으로 기계적 교반법으로 얻어지는 Al합금의 고상구형입자 크기는 100-400 μ m 정도이다.

(나) 전자기적 교반법

전자기적 교반법 (electro-magnetic stirring 또는 magneto-hydro-dynamic stirring)은 몰드주위에 유도전류를 흐르게 하여 이로 인한 전자기적인 힘으로 용탕을 교반하는 방법으로 기계적 교반법의 단점을 보완하기 위해 개발되었다. 전자기적 교반법에는 AC 유도교반법, DC 자장을 이용하는 방법, 2극 혹은 4극 다상의 motor stator를 회전하여 교반하는 방법 등, 많은 장치들이 최근까지도 특허로 발표되고 있다.⁽¹²⁻¹⁵⁾ 이 방법은 gas, 불순물, 산화물 등의 개입을 억제할 수 있고, 정확한 전단력과 열의 제거를 예측, 제어할 수 있는 장점이 있다. 또, 제조된 Al계 반응고합금의 고상입자의 크기도 기계적 교반법에 비해 작은 30 μ m 정도이다. 따라서 현재 상용화되고 있는 rheocaster의 대부분은 전자기적 교반을 이용한 MHD rheocaster 들이다.

(다) SIMA Process

SIMA(strain induced melt activated) 공정은 입자의 구형화를 위해 고체상태의 합금을 열간 혹은 냉간가공을 통해 충분한 소성가공을 가해준 후, 액상-고상 공존온도로 가열하여 구형화된 조직을 얻는 공정을 말한다. 즉, 용탕으로 부터 반응고영역으로 냉각시켜 얻는 것이 아니고 고상합금으로 부터 반응고합금을 제조하는 기술이다. 이 방법은 1984 최초로 창안된 이래,⁽¹⁶⁾ 특히 소형 Al 및 Cu계 반응고합금부품의 제조에 상용화되고 있다.

(라) Modified chemical grain refining method

여기서는 기존의 알려진 화학적 입자미세화를 위한 설비를 그대로 사용하면서 입자미세화를 위한 첨가원소의 양을 증가시켜 예비성형체를 주조하고 이것을 반응고 영역으로 재가열하여 짧은 기간 유지 시켰을때 반응고 성형에 적절한 미세

하고 균일한 구형입자를 갖는 조직을 만드는 방법이다.⁽¹⁷⁾ 이 방법은 Al-7%Si-Mg합금과 같은 조성을 갖는 소재에 대해서는 조직미세화를 위해 상당히 높은 양의 첨가원소가 요구되는 단점이 있으나, Al-wrought 합금소재에 대해서는 비교적 적은 양의 입자 미세화 원소를 첨가해도 충분한 효과를 볼 수 있기 때문에 이와 같은 소재에 대해서는 매우 적절한 방법이라고 볼 수 있다.

(마) 급냉응고법

응고속도가 빠를수록 입자가 미세하고 구형의 균일한 조직이 얻어진다는 점을 이용한 것으로 대표적인 것은 분말야금법, spray deposition과 같은 방법을 들 수 있다. 급냉응고법은 기존 주조법으로는 미세한 조직의 제조가 불가능한 합금의 제조에 효과적이다.

5.2 반응고 상태로의 가열

Thixoforming에 있어 소재의 반응고 영역으로의 재가열 및 반응고 성형중의 적정 온도 유지는 전체 반응고 성형공정에서 가장 중요한 공정단계에 속한다. 일반적으로 조직 및 합금조성에 따라 차이는 있지만 전체조직에서 액상이 차지하는 비율이 20-40%일때 성형하는 것이 좋은 것으로 알려져 있다. 따라서 이와 같은 상의 비율을 얻고 유지하기 위해서는 정밀하고 균일하며 재현가능한 소재가열 및 온도유지 방법을 사용하는 것이 핵심이다.

그림 8에는 합금종류에 따른 온도와 액상비율의 관계를 나타내었다. 7075 및 6082와 같이 Al-wrought 합금의 경우에는 액상의 비율이 40%에서 60%로 증가하는데 필요한 온도변화가 10°C인데 반해 Al-7%Si-Mg주조재(A356)의 경우는 액상을 변화의 온도 민감도가 작음을 알 수 있다. 또한 같은 Al-wrought 합금에서도 합금의 성분에 따라(7075, 6082) 반응고성형에 적합한 액상비율인 20%~40%를 유지하기 위한 온도범위가 차이가 있음을 보여주고 있다.

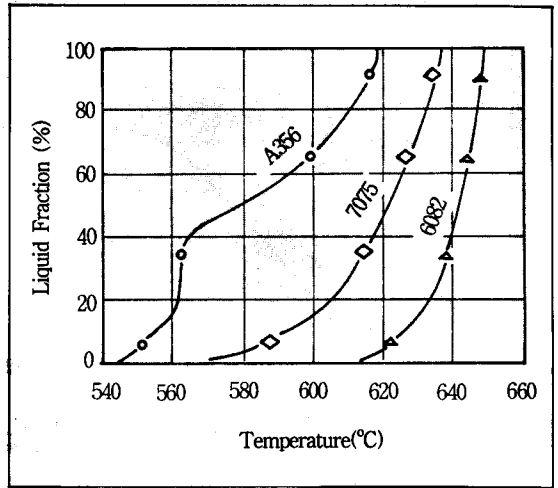


그림 8. 알루미늄 합금들에 있어서의 온도에 따른 액상율의 변화

균일하고 정밀한 소재가열과 함께 경제적, 금속학적인 측면에서 고려되어야 하는 것은 가능한 가열속도를 빠르게 해야 한다는 것이다. 따라서 반응고 성형에 있어 소재의 가열은 대부분 유도 가열법에 의해 이루어지고 있다. 여기서 가열초기에는 가열 및 용융시작을 위한 에너지 공급을 크게 해준 후 일단 용융이 되면 균일한 가열과 함께 고상과 액상비율을 정밀하게 조절하기 위해 에너지 공급을 낮추어 주는 것이 좋다. 실제 고상과 액상비율을 조정하기 위해서는 열전대 등에 의한 정확한 온도측정 및 조절이 필요하나, 이 방법은 대량 생산 체계에서는 실현하기 어려울 뿐만 아니라 이렇게 측정된 온도 신호는 국부적으로 관찰된 것이므로 실제 전체적으로 용융되는 상태를 정확하게 대변해주질 못하는 것으로 나타났다. 이와같은 문제점을 해결하기 위한 대안으로 가열중 소재의 전기전도도의 변화를 eddy current sensor를 이용하여 비접촉식으로 측정하는 방법이 연구개발중에 있다. 그림 9는 전기전도도의 변화를 측정하는 방법이 열전대에 대한 직접적인 온도 측정보다 합금이 용해되는 온도범위에서 더욱 민감하게 용해되는 과정을 추적할 수 있음을 잘 나타내주고 있다.

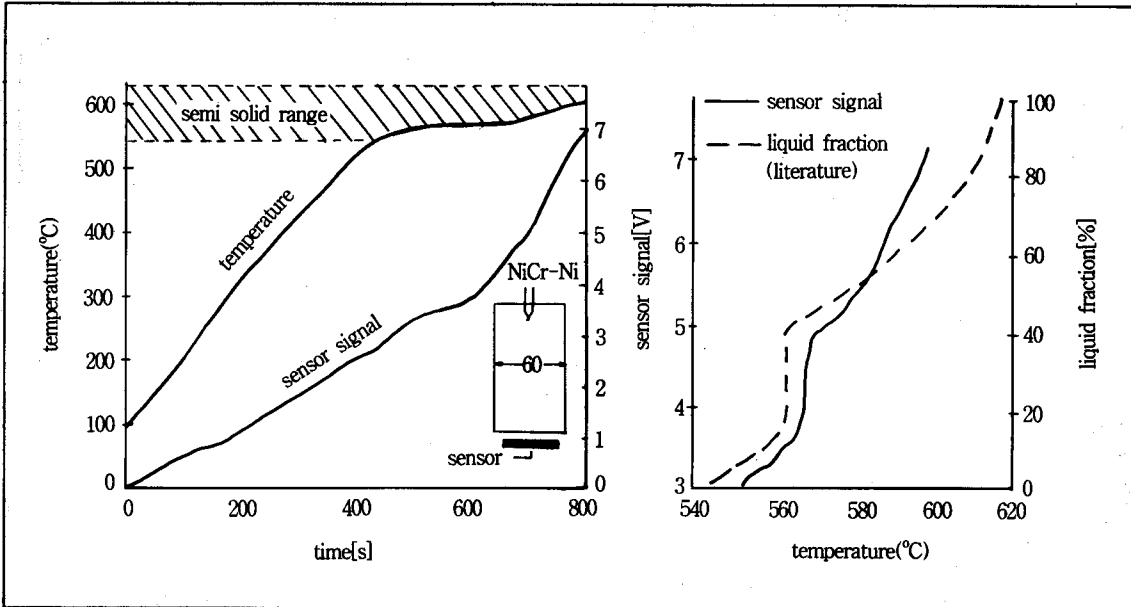


그림 9. 반응고 성형에서의 온도측정 및 제어

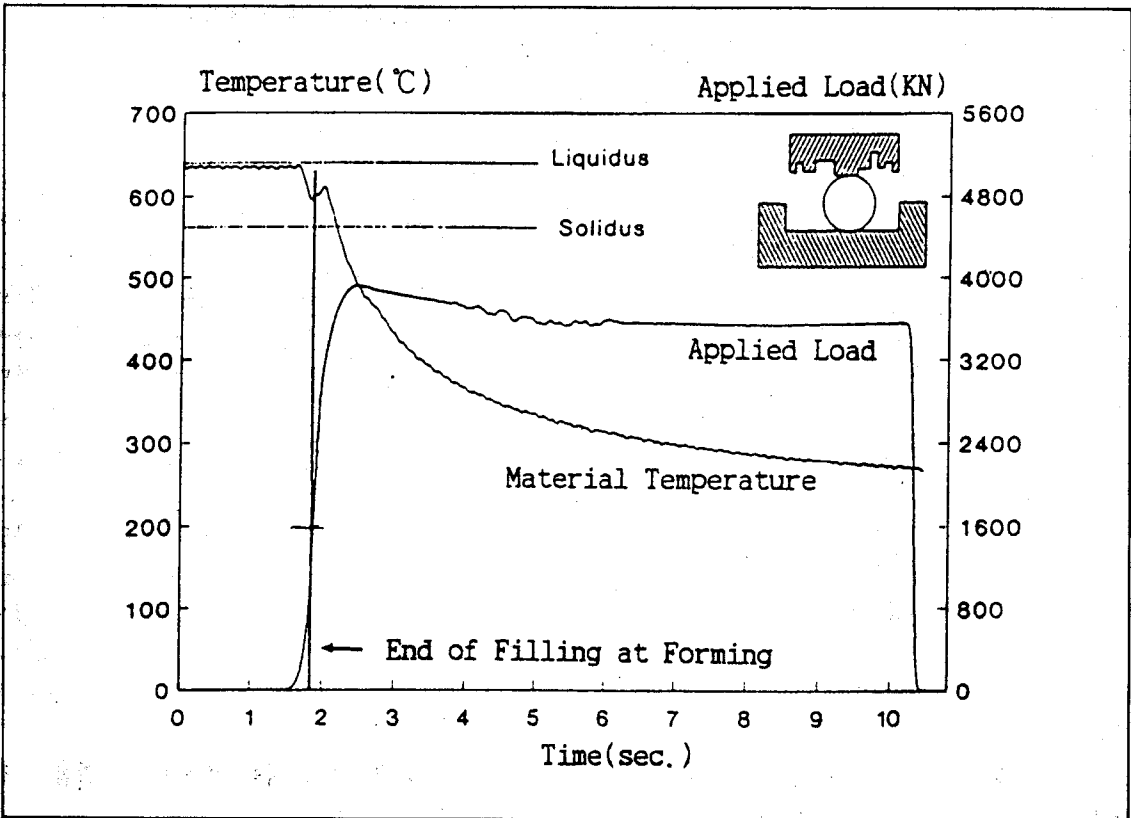


그림 10. Al 7075 합금의 반응고 성형에서의 성형하중 및 소재온도의 시간에따른 변화

5.3 반응고 상태에서의 성형

그림 10은 반응고 영역으로 가열된 Al 7075 합금을 반응고 상태에서 단조할때 소재의 온도와 성형하중의 시간에 따른 변화를 나타내 주고 있다(금형온도=300°C). 가압시 밀폐된 금형에 소재가 완전히 충전되는데에 소요되는 시간은 1초이내 이었으며 이때의 하중은 약 1600kN으로 적지 않음을 보여주고 있다. 이는 비록 성형초기에는 수 kN이하의 매우 적은 하중이 소요되지만, 금형과의 마찰, 성형시 조직의 변화에 따른 점도의 변화에 의해 하중이 매우 증가하고 있음을 알 수 있다. 금형에의 충전 후에도 일정한 수준으로 하중의 증가가 계속되는 것은 응고와 변형도중에 형성될 수 있는 결합을 제거하기 위해 필요하며, 중요한 것은 최대하중을 일정한 시간 유지해 주는 것이다. 이는 응고시 수축에 따르는 압력의 자연적인 감소를 감안하여 소재가 충분히 낮은 온도에 도달할 때까지 일정한 하중이 소재에 가해지도록 함으로서 성형체의 결합생성을 최소화 한다는데 있다.

이상과 같이 반응고 상태에서 성형시 적절한 성형하중, 성형속도, 금형형상, 윤활등은 소재의 성형특성에 크게 영향을 미칠 수 있는 인자임을 알 수 있다. 일반적으로 성형속도는 가능한 크게 하는것이 좋다. 성형속도가 클수록 반응고 상태에서의 온도에 따른 조직의 변화를 최소화 할 수 있고 또한 액상과 고상이 분리되는 현상을 방지함으로써 편석이 형성되는것을 방지하는 데에도 유리하다. 금형온도는 반응고 성형시 소재의 응고속도조절 측면에서 중요하다. 금형온도가 너무 낮으면 금형과의 접촉시 소재의 열손실이 커져 반응고상태의 성형성 유지에 어려움이 있다. 즉 성형시 소재온도변화에 따른 조직의 변화를 일으키고 따라서 변형저항도 조기에 증가시키는 단점이 있다. 금형온도가 너무 높으면 성형이 완료된 후 고온에서의 유지시간이 증가되어 조직의 열화가 일어날 수 있기 때문에 적절하게 유지하여야 한

다. 알루미늄 합금의 경우 300-400°C가 적절한 금형온도로 알려져 있다. 금형형상은 소재의 각 부위가 가능한 균일한 조건으로 변형 및 응고가 되게 하고, 표면의 산화를 방지하고, 기공등의 응고결합이 생기지 않도록 소재 각 부위가 가능한 균일한 압력을 받도록 설계하는 것이 중요하다. 윤활은 고체상태에서의 성형과 같은 역할, 즉 마찰을 줄이고 성형후 금형으로부터 소재의 분리를 용이하게 하는 역할을 한다. 알루미늄 합금의 반응고 단조에서는 일반적인 열간단조에서와 같이 water base graphite, boron nitride solution등이 효과적으로 사용될 수 있는 것으로 알려져 있다.

6. 결론

고상과 액상이 공존하는 온도범위에서 교반등의 각종 방법을 이용하여 수지상 조직을 제거한 후 성형하는 반응고 금속 성형기술은 앞으로 주조, 단조, 압출 등의 기존공정을 대체하면서 요소 부품의 첨단생산기술로 부각될 것이 예상된다. 왜냐하면 반응고 금속성형기술을 이용한 부품제조공정은 주조나 단조의 결점을 극복하면서 1) 정밀하고 복잡한 부품의 성형, 2) 절삭등 후가공의 생략 혹은 극소화와 이에 따른 원자재 절약, 3) 높은 생산성 및 자동화에 적합, 4) 저압성형인 관계로 금형수명 연장 및 에너지 절약, 5) 기계적 특성향상등을 꾀할 수 있기 때문이다.

최근의 선진각국에서의 상업화를 위한 집중적인 기술개발 투자, 특히 기업들의 적극적인 연구개발에의 참여로 부터 반응고 금속성형 기술에 의해 제조된 다양한 제품들이 향후 기존의 제조공정에 비해 경쟁력을 갖추고 적지않은 시장을 형성할 것이라는 것을 충분히 예측할 수 있다. 기술적으로 알루미늄합금의 반응고 성형 제품의 자동차 부품에의 응용이 우선적으로 이루어질 것으로 예측되고 시간이 흐를수록 고온점 금속에의 응용, 제품의 대형화를 위한 가능성도 기술 및 설비산업의 발전으로 큰 것으로 판단되어진다. 아울

러 공정 및 응용연구에 비해 상대적으로 발전속도가 뒤진 기초연구에 대한 구동력도 커질것으로 예상된다.

이에 비해 지금까지의 국내연구는 주로 대학에서의 기본적인 이론연구, 실험실규모의 공정연구(KIMM, KIST)를 하는 수준에 머물러 있는 실정이다. 국내에서도 상업화 연구는 집중적으로 해야 할 단계에 있다고 보여지며 이를 위해서는 지속적인 노력이 요망되어진다.

References

[1] D. B. Spencer: Ph.D. Thesis, Massachusetts Inst. of Technology, Cambridge, MA, (1971)
 [2] D. B. Spencer, R. Mehrabian and M. C. Flemings: Metall. Trans., vol.3, (1972), p.1925-1932
 [3] P. A. Joly, Ph.D. Thesis, Massachusetts Inst. of Technology, Cambridge, MA, (1974)
 [4] P. A. Joly and R. Mehrabian: J. Mater. Sci., vol.11, (1976) p.1393-1418
 [5] M. C. Flemings, R. G. Riek and K. P. Young: Mater. Sci. Eng., 25 (1976) p.103
 [6] V. Laxmanan and M. C. Flemings: Metall. Trans. A, vol. 11A (1980) p.1927-1937
 [7] M. C. Flemings: Proc. of 3rd Inst. Conf. on Processing of Semi-Solid Alloys and Com-

posites edited by Kiuchi Univ. of Tokyo, Japan, (1994).
 [8] P. Kumar, C.L.Martin, S.B.Brown: Proc. of 2nd Int. Conf. on Processing of Semi-Solid Alloys and Composites edited by S. B. Brown and M. C. Flemings, MIT, USA (1992)
 [9] S. B. Brown and M. C. Flemings: Adv. Mater. & Proc., No.1 (1993) p.36-40
 [10] Annual Report of EFU GmbH, Germany, No.1,(1994)
 [11] A. L. Tietmann: Ph.D. Thesis, RWTH Aachen, Germany (1993)
 [12] J. Winter, J. A. Dantzig and D. E. Tyler: UK Patent GB 2042 386 A (1980)
 [13] K. P. Young, D. E. Tyler, H. P. Cheskis and W. G. Wtson: U. S. Patent 4, 482, 012, (1984)
 [14] J. E. Kelley, K. E. Blazek and K. P. Young: U. S. Patent 5, 178, 204 (1993)
 [15] J. L. Meyer: U. S. Patent 5,219,018 (1993) 4, 482, 012, (1984)
 [16] R. D. Doherty, H. I. Lee and E. A. Feest: Mater. Sci. Eng., vol.65, (1984) p. 181-189
 [17] G. Hirt : ALUMINIUM, vol.70, (1994) p.344-351