

반응고 가공 프로세스의 개발(I)

-기본 원리 및 특징-

김도향, 한요섭, 이호인

Development of semi-solid state process(I)
-Basic principles and characteristics-

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

1. 서론

최근 재료성능의 다양화, 고도화가 요구되어짐에 따라 새로운 제조 기술이 많이 개발되어지고 있으며 그중 주목 받는것 중의 하나가 주조 공정과 열간 가공 공정을 복합시킨 새로운 금속재료 제조 방법인 반응고 가공 프로세스 (Semi solid state processing)이다. 반응고 가공 프로세스는 금속 용탕을 응고시키는 도중에 강력한 교반력을 가하여 고상과 액상이 미세하게 혼재된 상태를 만들며 이를 직접, 혹은 일단 응고 후 다시 고액공존 영역 온도로 가열한 뒤 성형 가공하여 제품을 생산해 내는 방법으로서 다음과 같은 특징을 갖고있다¹⁾

- 1) 응고 도중 고액 공존 영역에서 교반에 의해 기존의 덴드라이트 조직이 파괴되므로 통상의 주조품에 존재하는 조대한 덴드라이트 조직 대신에 거의 구형에 가까운 초정 입자들이 균일하게 분산된 미세한 조직을 얻을 수 있다.
- 2) 내부 결함, 편석등을 감소시키며 균일한 품질의 제품을 얻을 수 있다.
- 3) 응고 잠열의 대부분을 방출시킨후 주조되기 때문에 주조장치에의 열부하를 경감시키며 장치의 수명을 향상시키고 생산 능률의 대폭적인 향상이 가능하다.
- 4) 가공 장치에의 열부하를 감소시킴에 의해서, 직접 최종제품에 근접하는 형상의 가공이 가능하다.
- 5) 반응고 상태는 초정과 용탕이 혼합된 상태이므로 새로운 강화재료의 혼입이 가능하기 때문에

새로운 복합재료의 제조가 가능하다.

- 6) 통상의 주조법으로는 제조하기 힘든 비중차가 크거나 고용도가 작은 금속 원소가 균일하게 분산된 합금의 제조가 가능하다.

이상의 특징을 가진 반응고 가공 프로세스의 실용화에 의해서 1) 금속재료의 품질, 신뢰성, 기능이 향상되고, 2) 난가공성 및 고기능재의 제조 및 제품 양산시의 에너지 절약에 의한 비용 절감을 이루며, 3) 새로운 기능의 금속재료 및 복합재료의 제조가 가능하게 될 것이다. 본 기술 해설에서는 이와 같은 반응고 가공법의 기본원리 및 특징(I)를 알아보고 다음 편에 반응고 가공법을 이용한 실제 제조 공정의 개발예(II)를 알아보기로 한다.

2. 금속 합금 슬러리(slurry)의 제조

합금의 덴드라이트 조직으로 응고시 고액 영역을 반드시 통과하게 되며 이 영역을 통과할때 초정의 결정화 및 성장, 용질의 재분배, 덴드라이트 사이에서 용탕 유동 및 응고상의 이동등 여러 현상이 함께 진행되게 된다. 덴드라이트 조직은 응고시 고액 공존 영역에서의 위의 여러 인자의 영향을 받아 형성하게 된다. 특히 공존 영역에서 교반등에 의해서 용탕을 유동시키고 냉각속도가 늦어질 수록 초정 결정립은 구형에 가까워지게 되며, 이와 같이 하여 형성된 금속 합금의 슬러리는 통상의 덴드라이트 조직에서는 나타나지 않는 디소트로피(Thixotropy) 혹은 레오로지(Rheolgy)

성질을 갖게된다. 디소트로피 혹은 레오로지 성질이란 재료의 변형 속도에 지배되는 점성 즉 교반 등에 의해서 변형속도가 빨라지면 액상화가 진행되고 그냥 방치해두면 고상화가 진행되는 특성을 칭하며, 재료 변형율의 증가와 함께 재료의 점성이 감소되는 가소성 (pseudoplasticity)의 특성을 나타낸다. 금속합금은 고액 공존 영역에서 교반 및 응고 조건에 따라 합금 슬러리의 점성이 변하게 되며, 반응고 가공 프로세스는 디소트로피 혹은 레오로지 성질이 나타나도록 점성이 조절된 합금 슬러리를 이용하여 최종 제품을 성형하는 응고 가공 기술이다. 이와 같은 금속 합금 슬러리를 제조하기 위한 교반 방법으로는 크게 기계적 교반법과 전자기에 의한 교반법이 있다.^(1,2)

가. 기계적 교반법

금속 용탕의 응고 과정 중에 교반자등을 이용한 기계적 방법으로 회전 교반을 하여 디소트로피 성질을 갖는 합금 슬러리를 제조하는 방법이다. 반응고 가공 프로세스의 개발 이전에 이미 1960년대에 결정립을 미세화시키고 주물의 주조 결함을 감소시키며 주물의 균질화를 위한 목적으로 주형 회전 스크래퍼(Scraper)법으로 소개되기도 하였다.⁽³⁾ 주형 회전 Scraper법은 주형을 약 100rpm의 속도로 회전시키면서 주형벽 근처에 위치한 고정봉으로 하여금 응고계면을 이루며 성장하는 덴드라이트 조직을 파괴시키도록 하여 결정의 미세화를 이루는 주조법이다. 더욱 결정립의 미세화를 효과적으로 도모하기 위해서 주형을 고정시킨 대신 주형 근방에 설치된 교반봉을 최고 450rpm 정도로 회전 시켜 주형 벽으로 부터 성장하는 덴드라이트 조직을 파괴하는 Scraper회전 응고법이 고안되기도 하였다.⁽³⁾

1970년대에 들어서면서 미국 MIT의 Flemings 등에 의해서 반응고 가공 프로세스를 위한 합금 슬러리를 제조하는 방법이 본격적으로 개발되기 시작하였으며 개발 초기 레오 캐스팅 (Rheocasting) 법으로 칭해졌다.^(4,5) Joly 등은 그림1에 보인 것과 같은 동심 이중 원통내에 금속 용탕을 위치시키고 안쪽의 원통은 고정시키고 바깥쪽의 원통을 합금의 고액 공존 온도 영역에서 회전 시킴으로서 강력한 회전 교반을 시킨 합금 슬러리의 조직과 이와 관련된 레오로지 특성을 알루미늄 합금, Sn-Pb합금, 청동, 주철, 스테인레스 강 및 초합금에 대하여 조사하였다⁽⁵⁾ 그 예로

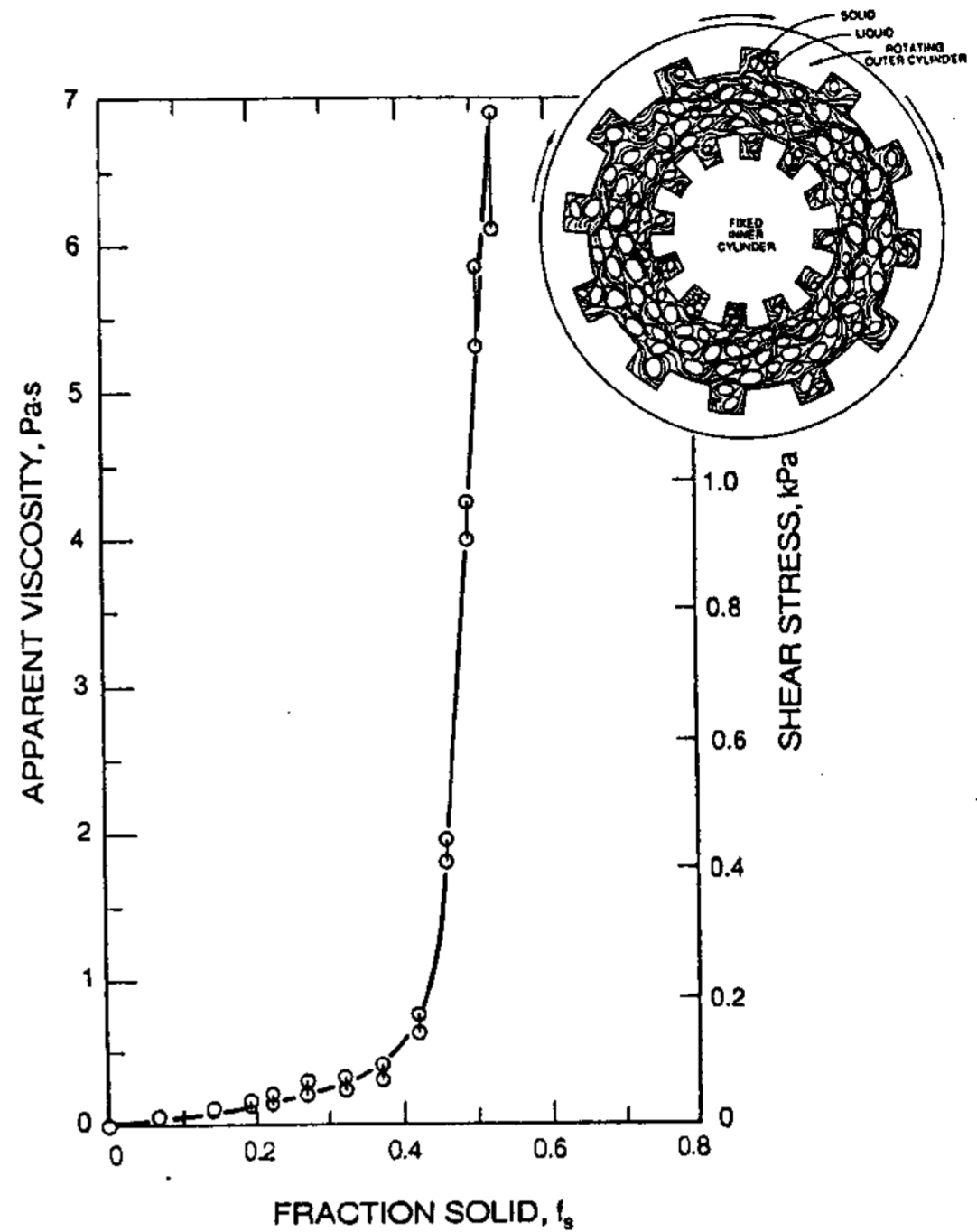


그림1. 변형속도 $200s^{-1}$, 냉각속도 $0.006Ks^{-1}$ 의 교반 조건에서 Sn-15%Pb 합금의 고상 초정율 (fs) 변화에 따른 점성도의 변화 (합금 슬러리의 교반 방식은 우측 상단에 도식적으로 나타내었음)

Sn-15%Pb 합금에서 조사된 점성과 체적 고상율과의 관계를 그림1에 나타내었다. 고액 공존 영역에서 나타나는 점성은 체적 고상율이 일정한 조건에서는 초정 입자 크기의 감소에 따라 저하되었다. Sn-15%Pb합금의 반응고 슬러리는 체적 고상율이 30%이상에서 레오로지 특성이 나타났으며 같은 합금을 항온 유지 시킨 경우 슬러리의 점성과 변형속도와와의 관계는 거의 직선적으로 변형속도가 증가함에 따라 점성이 감소하였다.

그림 2(a)와 (b)는 기계적 교반법에 의한 반응고 금속의 제조 방법을 도식적으로 보여주고 있다⁽²⁾. 그림2(a)는 초기에 개발된 배치 타입 레오캐스터(batch type rheocaster)를 보여 주고 있으며 그림2(b)는 기계적 교반에 의해서 반응고 합금 슬러리의 제조를 연속적으로 행하는 연속 레오캐스터(countinuous rheocaster)를 보여주고 있다. 연속 레오캐스터를 이용하면 높은 교반 속도가 가능하고, 교반이 용탕 표면 깊숙한 곳에서 진

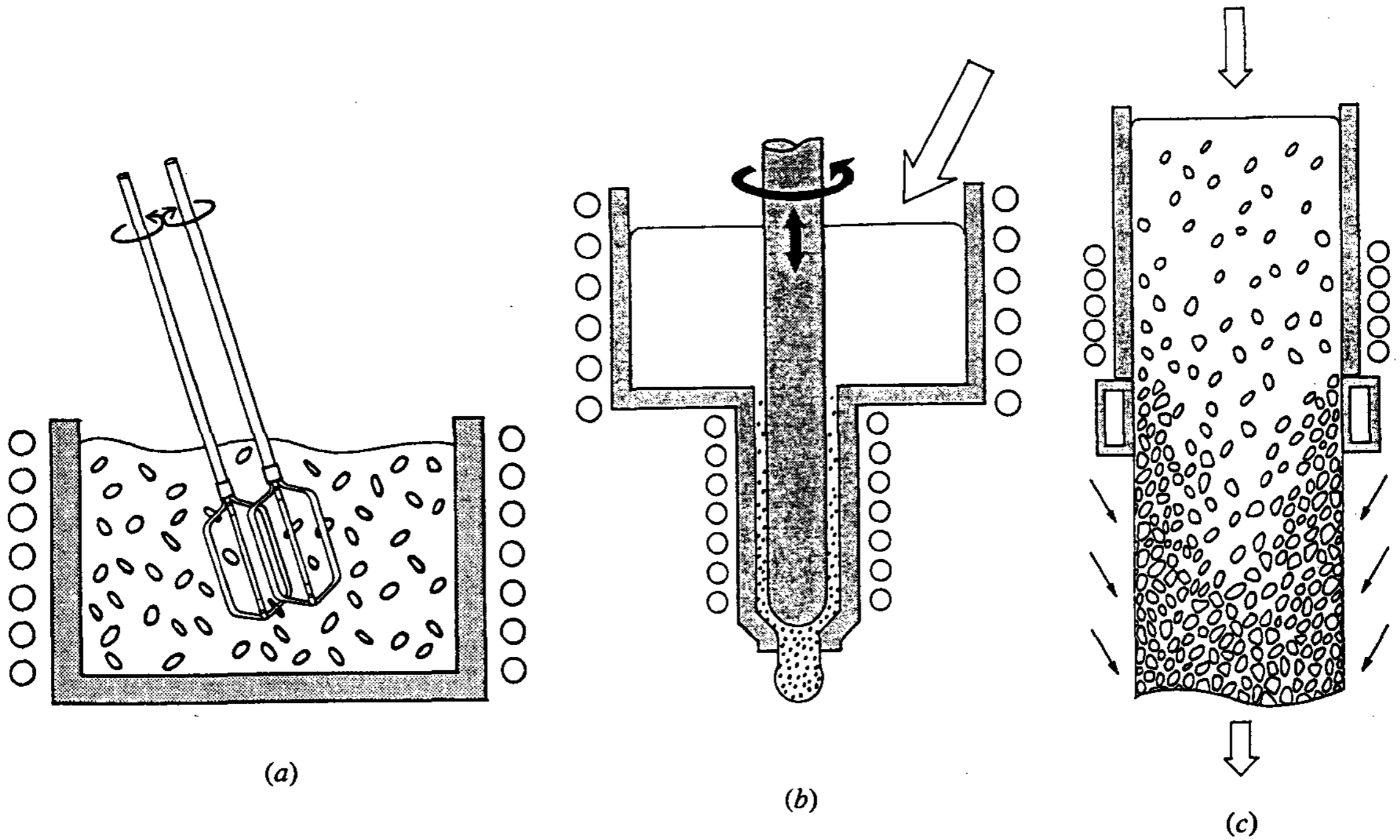


그림2. 합금 슬러리 교반 방법:(a)배치식 기계적 교반 방법 (b)연속식 기계적 방법; (c)전자 교반 방법

행이되며 냉각속도가 빨라 미세한 조직의 반응고 합금 슬러리를 얻을수 있는등 배치타입 레오캐스터에 비해서 많은 장점을 가지고 있으며, 반응고 금속합금을 바로 프레스등으로 연속적으로 성형하여 산화물등의 혼입을 방지하며 고품질의 열처리 가능한 제품을 연속적으로 제조할 수 있다.

1980년대에는 이러한 기계적 교반법을 이용한 반응고 가공 프로세스의 개발이 본격화하기 시작하였으며, Cheng등은 실용화에 근접한 연구로서 터빈 디스크용 Ni기 초합금인 IN-100에 레오캐스팅법을 적용한 연구를 진행하고 있다.⁽⁶⁾ 통상의 레오캐스팅법은 회전 교반 용고시 기체의 혼입에 의한 기공의 형성을 방지하기 위해서 회전자의 회전 속도가 약1000rpm이하로 억제되었으며,⁽⁷⁾ 이 때문에 덴드라이트 결정의 파괴가 불완전하여, 생성되는 초정입자도 비교적 조대하고 규칙성이 결여되는 것이 일반적인 경향이었다. 최근 Ichikawa등에⁽⁸⁾ 의해서 종래 레오캐스터의 냉각방법과 교반 회전자의 속도 및 형상을 변형시킨 방법으로서 진공중에서 1000rpm이상으로 회전자의 회전이 가능토록 한 프로세스가 개발되어 현저한 결정립 미세화의 효과가 얻어졌으며, 고기능재의

제조를 위한 프로세스중 하나로 평가되고 있다.

이상에서 보듯이 기계적 교반법을 이용한 반응고 가공 프로세스의 연구는 약 20년 이상의 역사가 있으며 대부분이 실험실적 규모의 장치에 비교적 취급하기 용이한 저융점 합금에 거의 한정되어 있는 실정이었다. 그러나 1980년대 후반에 들어서면서 기계적 교반법을 이용한 디소 몰딩(Thixomoulding), SSM Forming (Semi solid metal forming)등^(9,10) 본격적인 공업화를 위한 시도가 점차 이루어지고 있다.

나. 전자교반법

기계적 교반법외에 반응고 합금의 제조를 위해 사용할 수 있는 방법이 그림 2(c)에 나타낸 것과 같은 전자기에 의한 교반 방법이다. 즉, 용융 금속내에 전자유도를 통하여 교반을 행하는 기술로서 등축정율을 증가시켜 편석을 방지하기 위한 방법의 하나로써 철강의 연속 주조 프로세스등에 이미 적용되어지고 있으나, 주조전 혹은 주조중에 반응고 금속 슬러리를 만들어 초정을 미세화시키기 위한 목적으로는 아직 충분히 활용되어 지지않은 단계이다. 기계적 교반시 교반자의 내구성등의

무제를 해결하기 위해서 Winter등이 유도 전자 교반법을 제안하였으나,⁽¹¹⁾ 이 방법은 용융 금속 중앙부의 교반 효과가 현저하게 저하되기 때문에 좋은 특성의 금속 슬러리를 얻기 위해서는 변형 속도가 충분히 커야하며 따라서 큰 자기의 발생을 필요로하여 전자 교반 장치는 필연적으로 대형, 고가가 되어야하는 단점이 있다.

3. 반응고 가공 합금의 특성

가. 응고 조직

일반적으로 고액 공존 영역에서 교반후 급냉시킨 반응고 주조품의 마이크로 조직은 그림 3에 보였듯이⁽¹²⁾ 덴드라이트 조직이 파괴되면서 생성된 구상 혹은, 장미꽃 형상의 초정 입자와 그 주위에 액상영역이 급냉되어서 형성된 미세한 덴드라이트 혹은 공정 조직으로 구성되어 있다. 그림 4는⁽²⁾ 이와 같은 조직의 형성과정을 도식적으로 보여 주고 있다. 또한 반응고 슬러리 합금의 응고조직은 혼합 교반 작용에 의해 통상의 주조 조직과는 달리 주괴 전체에 높은 균질성을 보이고 있다.

그림 3에 보인 것과 같은 구상 혹은 장미꽃 형태의 초정입자 크기와 형태는 냉각속도, 변형 속도 및 고상 초정입자 분율등의 세가지 변수에 의해 결정되어 진다. 고상의 초정입자 분율이 일정하면, 초정입자의 크기는 냉각 속도가 빨라질수록 감소하게 된다. Joly등은⁽⁵⁾ Sn-15% Pb 반응고 주조재에서 초정 입자의 크기는 냉각 속도가 커짐에 따라서 점차 감소함을 관찰 하였으며, Murty 등⁽¹³⁾도 Cu기 905합금, 440C 스테인레스강 Co기-X40 등의 합금에 대한 고액 공존 교반 후에 수

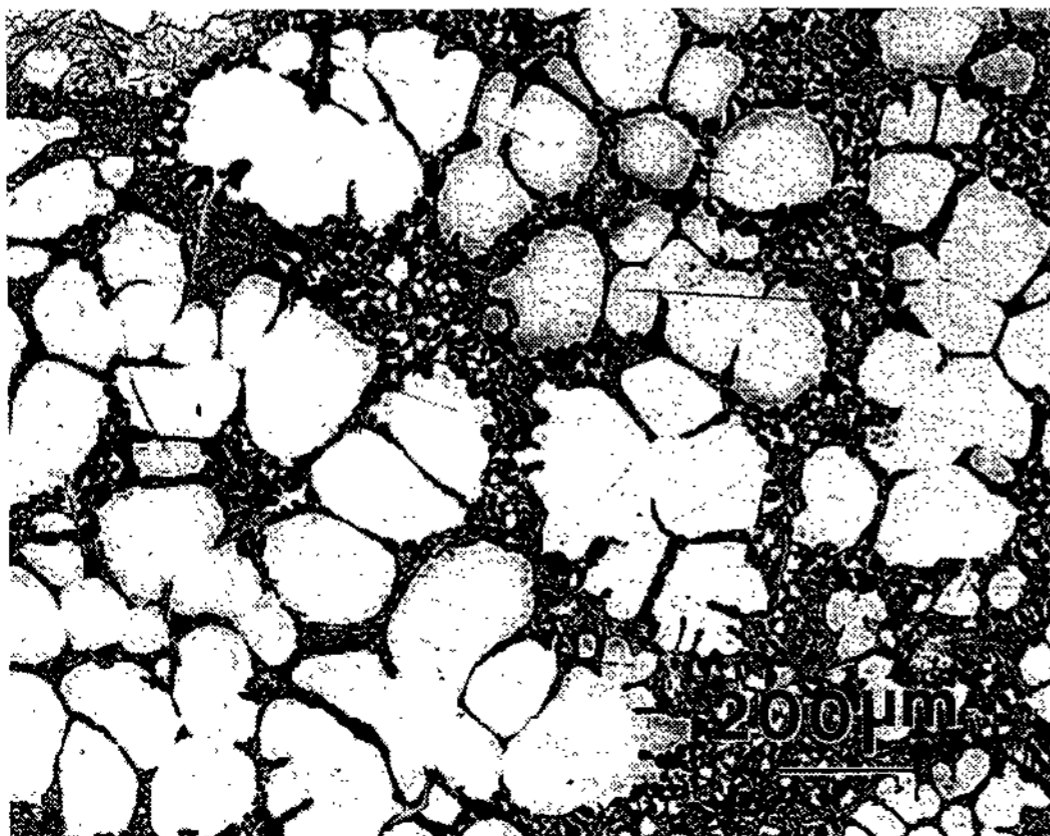


그림 3. Al-15wt%Cu 합금 슬러리의 응고조직⁽¹²⁾

냉 및 서냉을 행하여 반응고 주조합금의 초정 입자 크기를 지배하는 주된 인자는 응고중의 냉각속도임을 관찰하였다. 즉 위의 Cu기 905 합금, 440C 스테인레스강 및 X-40합금을 회전 교반 후 급냉하면 초정입자와 그 주위에 미세한 덴드라이트 조직이 형성되는 이중구조를 갖게되나, 단열 주형내에서 회전 교반후 서냉시키면 초정 입자는 응고후 조대화 현상이 나타나서 위의 이중 구조는 더이상 형성되지 않았다. 같은 고상 입자 분율하에서 변형 속도의 변화는 초정 입자의 크기에는 위의 응고중 냉각 속도처럼 큰영향을 미치지 않으나, 오히려 입자의 형태 변화에 비교적 큰 영향을 미친다. 즉 변형 속도가 커질수록 표면의 굴곡이 없어지며 점차 구형에 가까운 입자가 형성되게 된다. 이와 같은 변화의 메카니즘은 아직 정확히 밝혀지지 않고 있으나, nucleation mechanism, dendrite fragmentation mechanism 그리고 remelting mechanism 등 여러 메카니즘이⁽¹⁴⁻¹⁷⁾ 제안되었다.

나. 디크스토로피(Thixotropy)

Spencer 등은 위에서 언급하였듯이 응고중의 합금을 교반을 시키면 수직상 조직이 파괴되어 초정 입자가 균일하게 분포되어 있는 조직을 갖게 되며, 또 한가지 중요한 특징중의 하나가 교반 및 응고 조건에 따라 합금 슬러리의 점성이 변화하는 것이며 이와 같은 현상은 앞서서도 언급되었듯이 pseudo-plasticity 혹은 thixotropy 등으로 알려져 있다. 합금 슬러리의 점성은 그림 5, 6에 보였듯이 교반 속도가 증가할수록 또 냉각속도가 감소할수록 급격하게 감소하며 이와 같은 변화의 원인은 그림 3, 4에 보인바와같이 합금 교반에 따른 합금 조직의 비가역적 변화에 기인된다 할 수 있다. 즉 교반 속도를 증가시키고 냉각속도가 감소될수록 초정 입자의 형태는 점차 가깝게 되어 유동성이 양호하게 된다.

다. 기계적 특성

반응고 주조재의 기계적 특성은 반응고 가공에 의해서 여러가지 조직의 최종 제품이 만들어 질 수 있기 때문에 간단히 설명되어질 수는 없다. 통상적인 응고의 경우에는 덴드라이트 조직이 형성되며 응고가 진행됨에 따라 응고 수축을 보완하기 위해 덴드라이트 사이를 통하여 용탕 공급되어지며 응고 말기 이러한 유동이 제한을 받음에 따

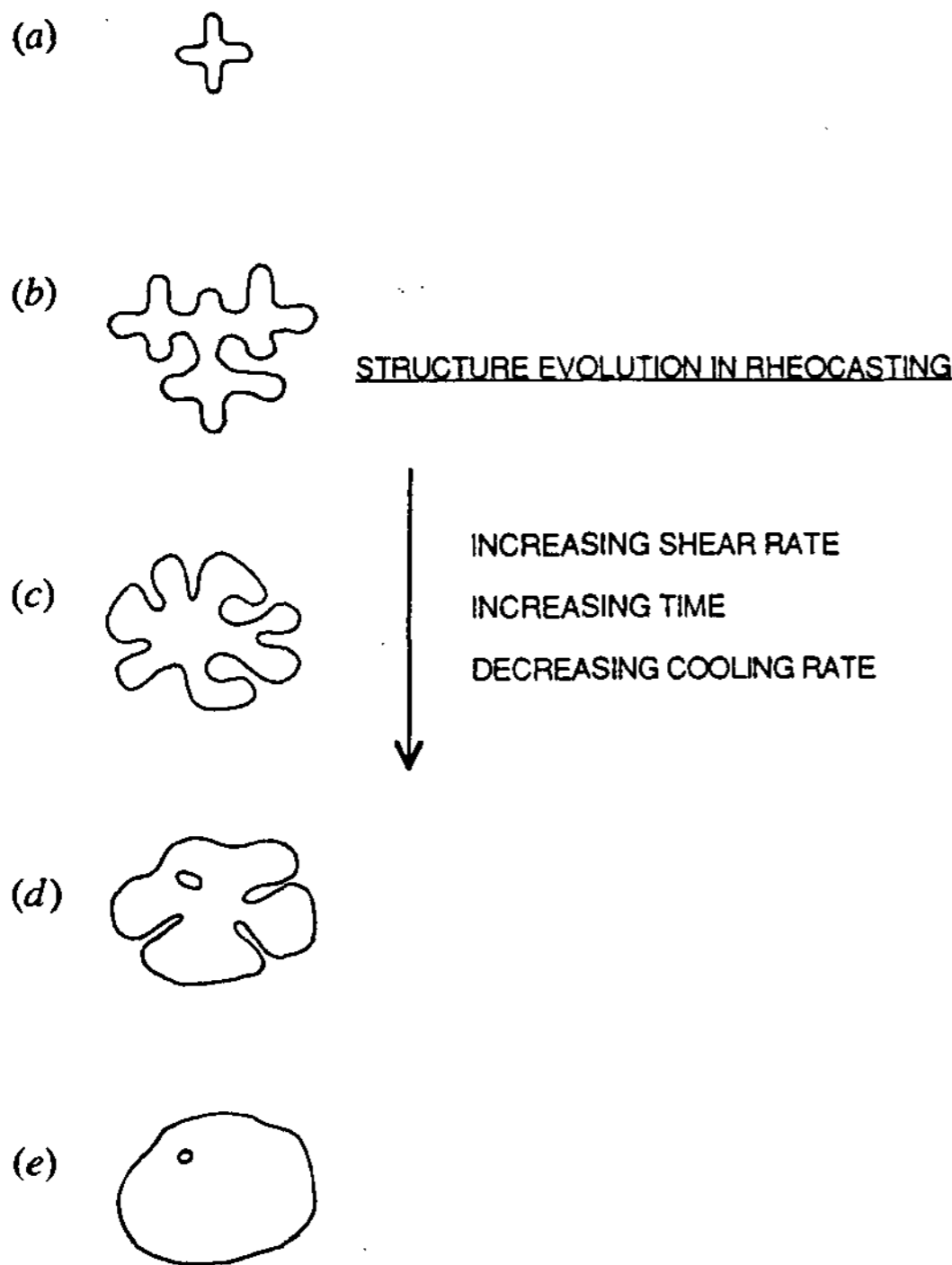


그림4. 교반에 따른 합금 슬러리 조직의 형성단계를 보여주는 도식적인 그림

라 수축공동의 주조 결함이 발생되게 된다. 그러나 반응고 가공프로세스의 경우에는 잔존 용액은 비교적 자유로이 이동이 가능하여 응고 수축을 보완하기 위한 용탕의 공급이 신속히 이루어지게 된다, 그러므로 내부의 주조 결함은 억제되며 반응고 주조품의 품질은 건전한 상태를 유지하게 된다. 표1은⁽¹⁹⁾ 반응고 가공 프로세스에 의해 제조된 몇몇 합금의 기계적 성질을 보여 주고 있으며 통상적인 주조법에 의해 주조재와 거의 비슷한 인장 특성을 보여주고있다. 또 반응고 주조법의 결정립의 미세화에 의해서 표1의 인장 특성외에 압축 강도, 초소성등의 향상이 이루어 질 수 있다. 초소성 현상은 Ichikawa등에 의해⁽¹⁰⁾ 제조된 반응고 가공재에서 관찰 되어 졌으며, Taha와 Mahallawy는⁽²⁰⁾ 반응고 가공 스테인레스 합금의 경우 인장 특성은 통상 주조법에 의한 합금과 대동 소 이하나 압축 강도 및 압축시의 연성은 통상 주조 재보다 약 3-4배 향상됨을 관찰되었다. 반응고 가공 합금의 기계적 성질에 영향을 주는 인자중의 하나가 마이크로 기공(micro porosity)이다.

표 1. 각 가공법에 의한 인장 특성의 변화

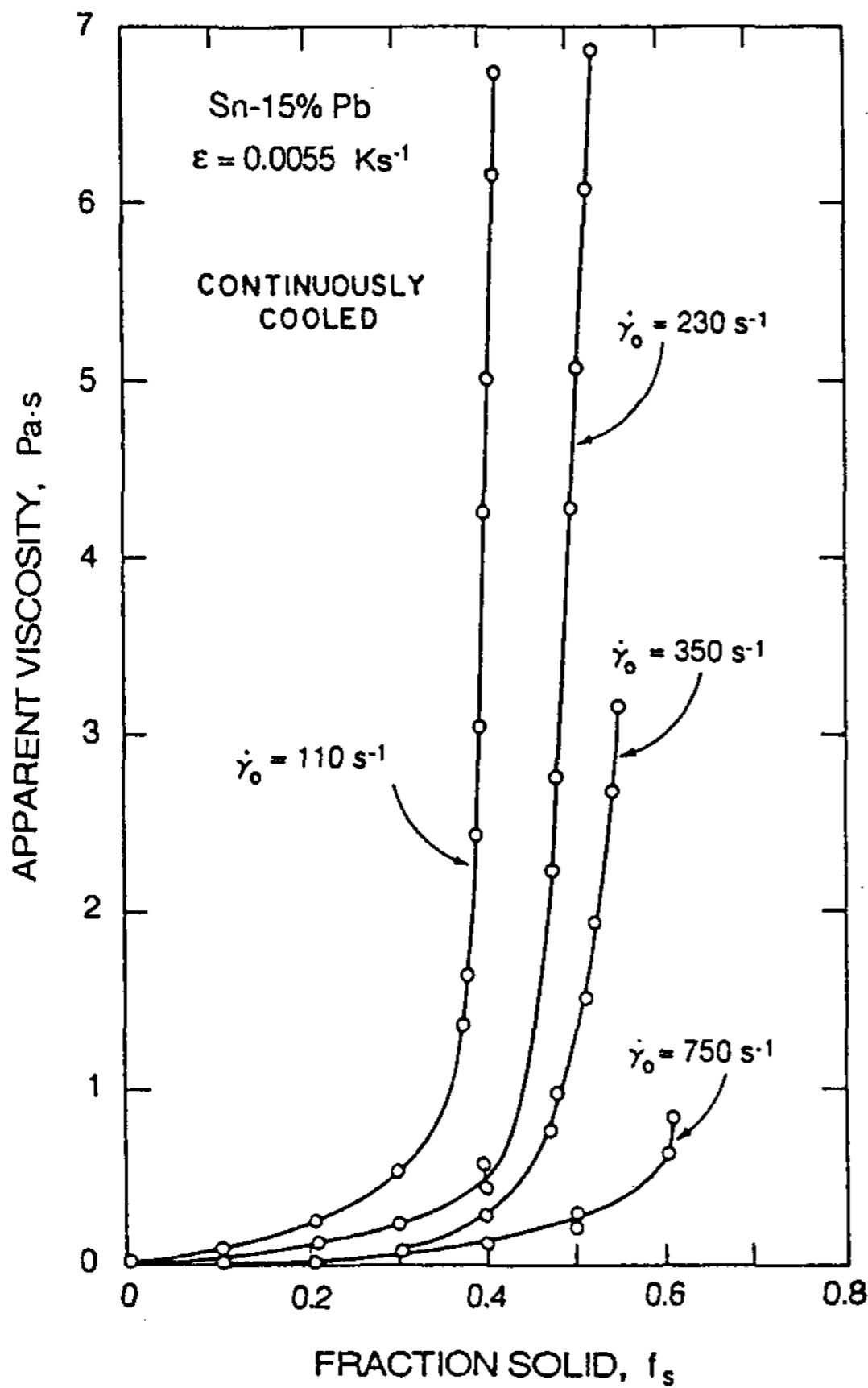
Material	UTS (MNm ⁻²)	0.2%YS (MNm ⁻²)	Elongation (%)
6061Al-alloy(HT T6 condition)			
Rheocast ingot	207	165	4
Thixofoged, die temp 450°C	214	152	7
Thixofoged, die temp 500°C	252	172	18.5
Squeeze cast	252	200	9
2024 Al-alloy			
Thixocast	464	347	11.2
Squeeze	483	362	13.4
Wrought	485	400	10
Copper alloy CDA905			
As rheocast	324	131	30
Rheocast and homogenised at 770°C for 20hrs	305	155	23
Conventional dendritic cast alloy	310	151	25
Thixocast	281	155	7
Sand cast	390	152	30
X-40 cobase alloy			
Rheocast	662	531	3
Investment cast	745	524	7
Design minimum	572	345	4
AISI 304			
Thixocast	660	276	19
Investment cast	516	274	30

Assar등은⁽²¹⁾ Al-Cu 레오캐스트 합금에서 마이크로 기공을 관찰하였으며 마이크로 기공은 기지(matrix)내 기공, 입계 기공 및 집적 입자간 기공 등으로 분류된다. 마이크로 기공의 발생 원인은 회전 교반 응고 과정에서 격하게 발생하는 와류에 공기가 혼입되어 발생하게 되며 공기중에서 고속 회전 교반하는 경우 쉽게 형성되며 실제 교반 중 마이크로 기공의 형성이 되지 않도록 주의해야 한다.

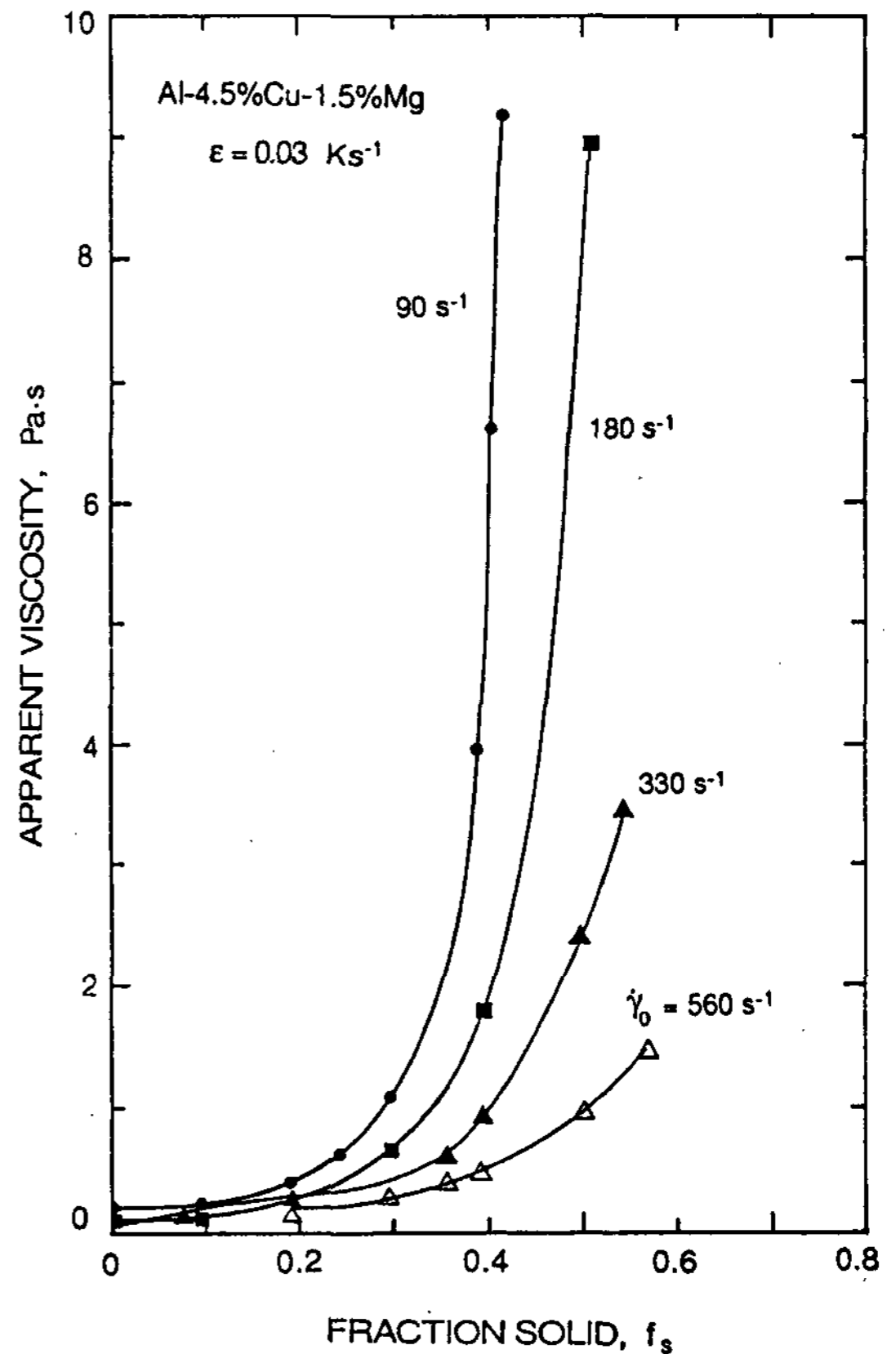
4. 가공법

가. 레오 캐스팅법(Rheocasting법)

레오캐스팅 법은 위에서 언급되었듯이 배치 타입 혹은 연속 적으로 제조된 반응고 금속을 바



(a)



(b)

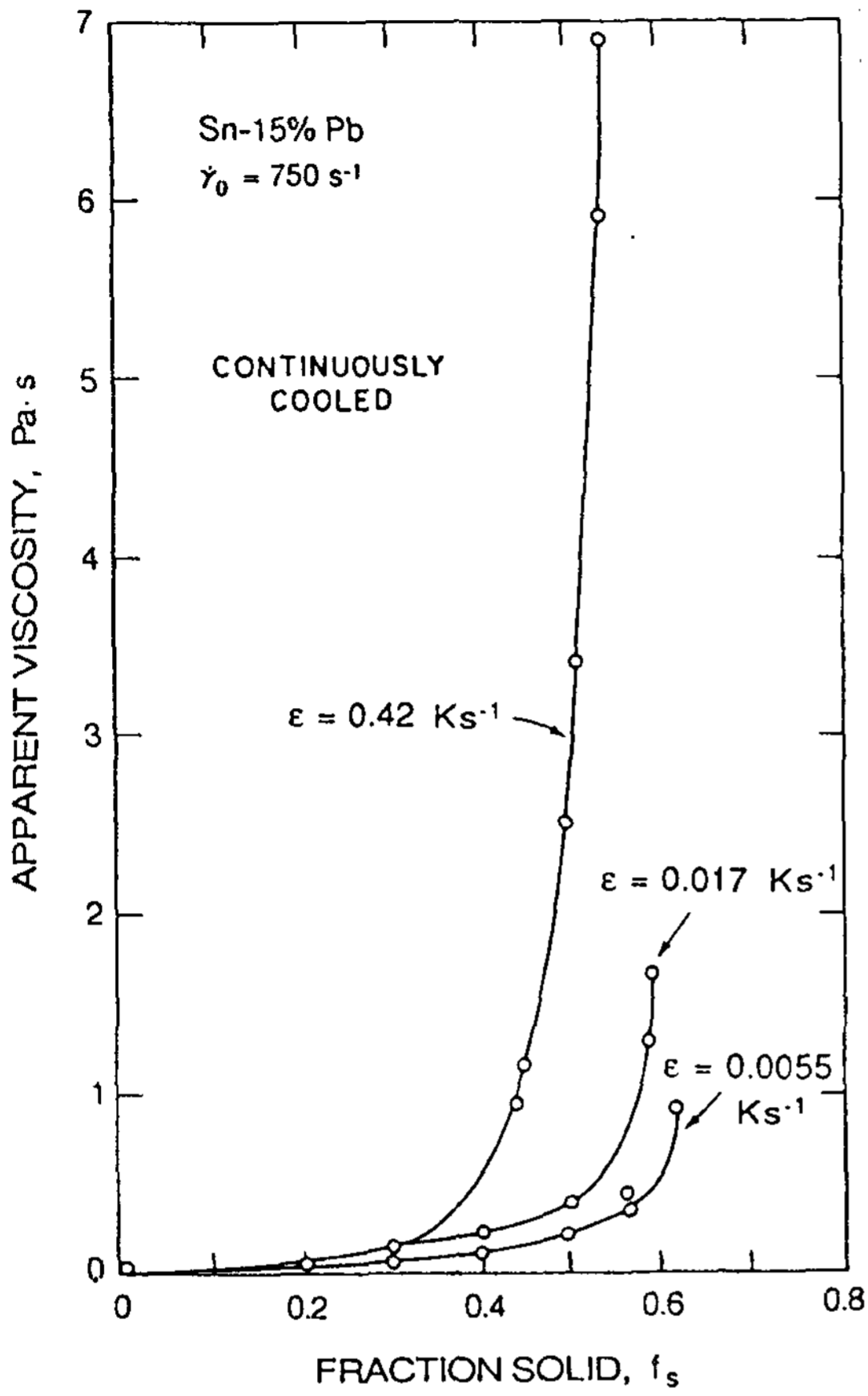
그림5. 반응고 합금에서 점성도에 대한 변형 속도의 영향:(a) Sn-15%Pb;(b) Al-45wt% Cu-1.5wt% Mg⁽²⁾

로 프레스등으로 성형하는 방법을 칭하며 이 방법을 응용한 프로세스로는 배치 타입 교반기에서 제조된 반응고 합금을 원심 주조 방식에 의해서 바로 주형에 주입하는 GIRCAST법과 플라스틱등의 사출 성형법을 응용한 덕소 몰딩(Thixomolding)법등이^(22,7) 있다. 특히 덕소 몰딩법은 연속적으로 반응고 합금 제품을 제조해낼 수 있는 상업적인 방법으로 최근 각광을 받고 있다.

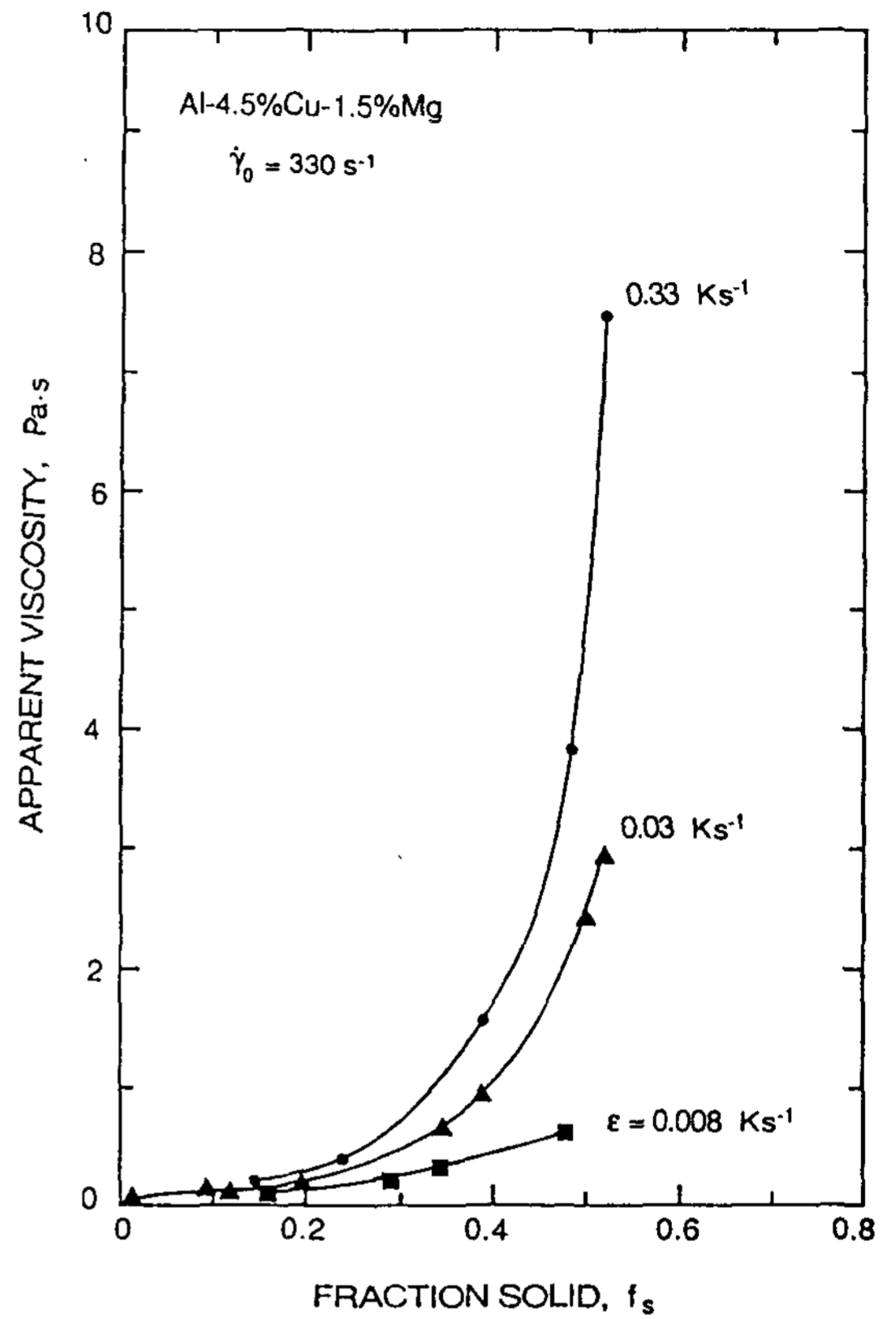
나. 덕소캐스팅법 (Thixocasting법)

반응고 금속 슬러리는 점성이 변형 속도에 의해 지배되는 특성을 나타내며 덕소캐스팅법은 그림 6의 개략적인 그림에 나타난 바와같이⁽²⁾ 고액 공존 영역에서 교반 응고시킨 합금을 다시 고액 공존

영역으로 가열하여 성형을 행하는 가공 기술이다. 그림 7에 나타난 제조 공정은 다이캐스팅법(Die casting) 법, 그리고 그림 8에 나타난 제조 공정은 기존의 형단조법(Closed die forging)과 유사하다. 또한 압출이나 압연등도 이와같은 반응고 금속을 이용하여 행할 수 있다. 이 덕소캐스팅법을 이용하여 통상적인 다이캐스팅법보다 높은 정확도가 요구되어지는 제품을 단조-기계가공등의 제조방법보다 낮은 가격으로 제조할 수 있으며 레오캐스팅법과 비교하여 주된 특징으로는⁽¹⁾ 1)공액 공존 교반 응고시킨 고상을 40%에 상당하는 온도까지 재가열해도 완전한 고상 상태의 강성을 그대로 유지할 수 있으며 고상과 동일한 처리가 가능하며; 2)반응고 금속 제조장치에서 얻어지는



(a)



(b)

그림6. 반응고 합금에서 점성도에 대한 냉각 속도의 영향:(a) Sn-15wt%Pb (b) 5wt%-1.5wt% Mg⁽²⁾

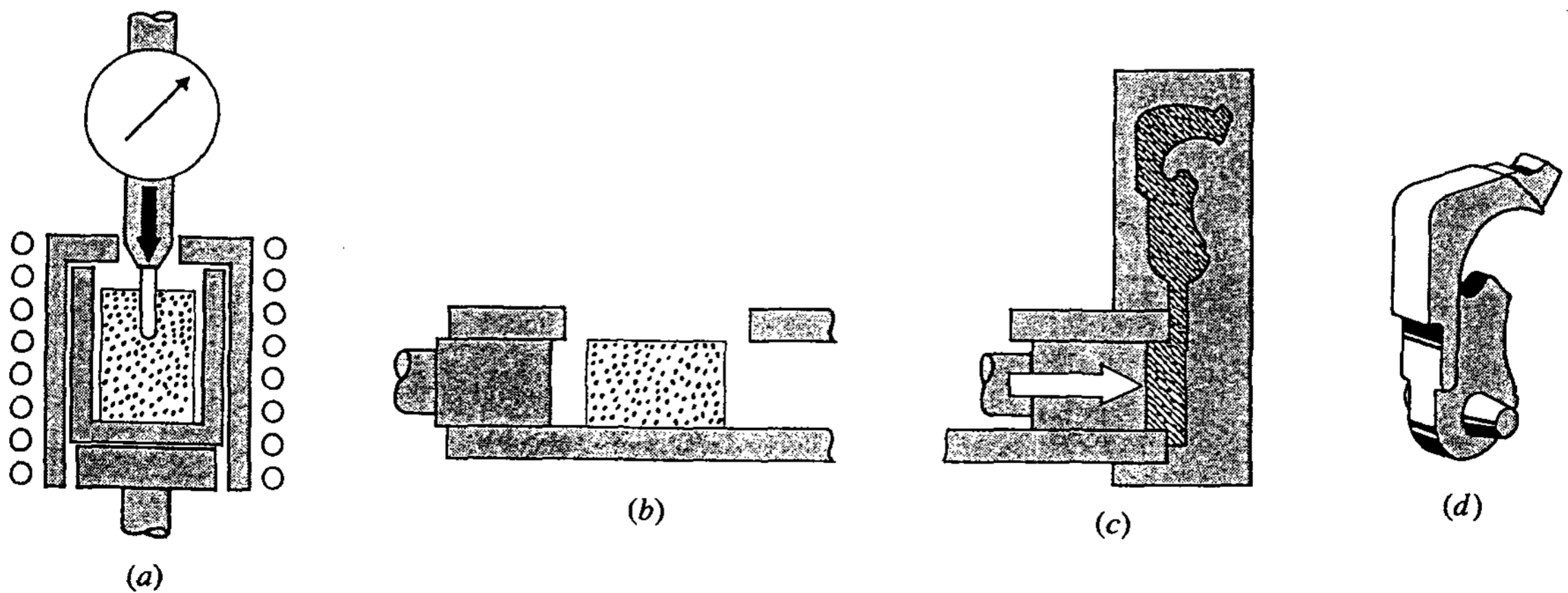


그림7. 디소캐스팅의 공정 예:(a)고액 공존 온도까지 가열;(b)주조기에 장입;(c)다이캐스팅;(d)최종 제품

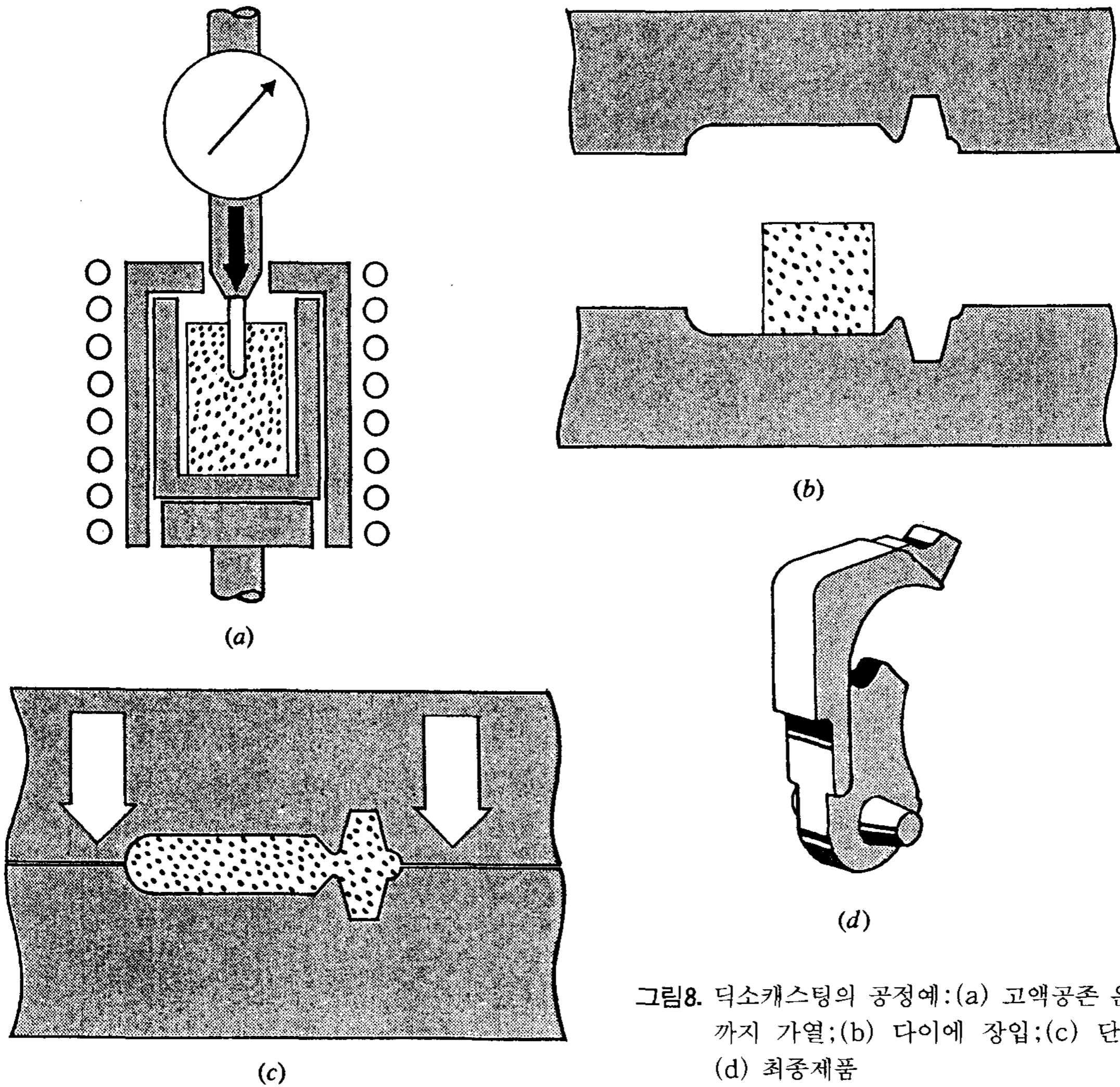


그림 8. 덩소캐스팅의 공정에: (a) 고액공존 온도 까지 가열; (b) 다이에 장입; (c) 단조; (d) 최종제품

재료의 레오로지적 특성을 후 성형을 위해 시간적, 공간적으로 그대로 유지하기 때문에 제조 프로세스가 다양화 되어질 수 있으며, 압연, 압출 등의 가공도 반응고 합금을 이용하여 가능한 점등을 들 수 있다. 이 방법을 응용한 프로세스로는 SSM forming 등이⁽⁸⁾ 있다.

반응고 가공법은 위에서 살펴 보았듯이 고품질의 제품을 얻기 위한 새로운 주조법으로서 현재 개발되어지고 있는 새로운 응고 가공 방법중의 하나이다. 표 2는 반응고 가공법의 특징과 그에 따른 응용을 요약하고 있다. 전반적으로 반응고 가공 프로세스는 아직 실험실 규모의 연구가 행해지는 곳이 대부분이며 대규모 공업화를 위해서는 여러

과제들이 해결되어야 한다.

그러나 최근 이러한 문제점들은 거의 해결되어져 가고 있으며, 덩소 몰딩법, SSM forming 법등이 실제 실용화 되어 알루미늄 합금 및 마그네슘 합금제 자동차 부품등이 생산되고 있으며 점차 그 적용범위가 확대되어질 것으로 예상되어진다.

표 2. 반응고 가공 프로세스의 특징 및 응용

CHARACTERISTIC	POTENTIAL BENEFIT OR APPLICATION
1. Lower heat content than liquid metal	<ul style="list-style-type: none"> Higher speed part forming Higher speed continuous casting

	<ul style="list-style-type: none"> · Lower mold erosion · Ferrous part forming · Forming of other high-melting-point materials · Forming of reactive metals
2. Solid present at time of mold filling	<ul style="list-style-type: none"> · Less shrinkage voids · Less feeding required · Less macrosegregation · Fine grain structure · Heat process(e.g. strip casting)
3. Viscosity higher than in liquid metals and controllable	<ul style="list-style-type: none"> · Less entrapped mold gases · Reduced oxides- improved machinability · Less mold attack · Higher speed part forming · Improved surface finish · Automtion · New processes
4. Flow stress lower than for solid metals	<ul style="list-style-type: none"> · Forming of intricate parts · High speed part forming · Lower cost part foring · High speed forming of continuous shapes (e.g. extrusion) · New processes
5. Ability to incorporate other materials	<ul style="list-style-type: none"> · Composites
6. Ability to separate liquid and solid	<ul style="list-style-type: none"> · Purification

참 고 문 헌

1. 難婆 明彦, 市川 例 :金屬 (1989) 2 No.2 54
2. M.C. Flemings: Met. Trans., 22A (1991) 957
3. 萩原 巖, 高橋忠義 :日本金屬會誌, 29 (1965) 637
4. M.C Flemings, R.G Riek and K.P

- Young;Mat.Sci Eng, 25 (1976) 103
5. P.A.Joly and R. Mehrabian: J. Mater. Sci., 11 (1976) 1393
6. J.A. Cheng ,D. Apelian and R. D. Doherty: Met. Trans., 17A (1986) 2049
7. A.Vogel R. D. Doherty and B. Cantor: Soliification and Casting of Metals, The Metal Society (1979) 518
8. 市川 例, 木何好可, 島村昭治:日本金屬學會誌, 48 (1984) 626
9. P. S. Frederick N. L. Bradley and S. C. Eeickason: Asvanced Materials and Process, 134 (1988) 53
10. K. P. Young:Extended abstrsct book of Semi-Solid Procressing of Alloys and Composites, Ecole Nationle Superieure des de Paris and Societe Francaise de Metallurgie (1990)
11. J, Winter D. E. Tyler and M. J. Pryor: U. S. Patent No. 4229210, Oct. 1980
12. 김도향:unpublished work
13. Y.V. Murty D. G. Backman and R. Mehrabian :Proc Workshop on Rheocasting, Army Materianice Research Center (1977) 95
14. T. Z. Kattamis :J. Crystal Growth 34. (1976) 215
15. F.J. Kievtis and K.V. Prabhakar :Proc Int, Symposium on Quality Contorl of Eng. alloys and the role of Met. Sci., Delft Univ (1977) 203
16. 이호인; 박사학위 논문 (1982) Sussx Univ.
17. J. Campell :Int. Met. Rev., 2 (1981) 71
18. D. B. Spencer. R. Mehrabian and M. C. Flemings :Met. Trans., 3 (1972) 1925
19. D.G. Kirkwood and P. Kapranos:Casting Tech. (1989) Jan., 16
20. M. A. Taha and N. A.Mahallawy:Proc of 456th Int. Foundry Cong., 1979 paper No. 15
21. A. Assar N. A. EI-Mahallawy and M. A. Taha :Met. Technol ., 9 (1982) 165
22. J. Collot:U. S. Patent No. 4510897, April 16, 1985