

금속점성과 반응기술방안

이 호 인
(한국과학기술연구원 금속공학부)

Metal Viscosity and Semisolid Forming Technology

Ho In Lee

1. 서 론

새로운 금속성형 기술중의 하나로서 반응고가공법 (semi-solid forming method)이 최근 세계적인 관심을 끌고 있다. 이 제조법은 고액공존영역에서 응고와 소성변형을 동시에 수행하여 실형상제품(near net shape product)을 생산할 수 있는 획기적인 성형방법으로 알려져 있다. 이 반응고가공기술의 특징은 한마디로 고액공존영역에서 액체와 같은 낮은 점성(viscosity)을 유지하는 슬러리(semisolid slurry)를 사용하여 주단조제품을 제조하는 것이다. 이 슬러리는 고액공존영역에서 교반에 의해 수지상정의 초정입자들을 파괴시켜 구형에 가까운 구상조직(spherical structure)을 만들어 줌으로서 고액공존상태에서 액체와 같은 낮은 점성을 유지할 수 있다. 이 낮은 점성을 가지는 고액공존의 슬러리를 금형내에 충전과 동시에 가압성형시킴으로서 내부결함과 기포가 거의 없는 균일한 제품을 얻을 수 있으며, 응고잠열의 대부분을 방출시킨 후 가압성형되기 때문에 장치의 열부하를 경감시켜 금형수명을 향상시키고 생산성의 대폭적인 향상이 가능하다. 다이캐스팅이나 저압주조법과 비교할 때 반응고가공법의 가장 큰 특징과 차이점은 층류성형(laminar flow)과 저온충진(semisolid temperature)이라고 하겠다. 이는 고액공존의 슬러리를 층류성형으로 금형내에 충진을 가능케 하여 고품질의 실형상제품을 생산할 수 있고, 또한 고액공존의 낮은 온도에서 가압성형을 수행함으로써 생산성, 불량률 및 정밀성 등이 우수하고 성형기계에 대한 열적 충격이 매우 낮기 때문에 금형과

기계수명의 향상이 가능하다는 점이다.

이 법은 1970년대 초에 미국 M.I.T.의 Flemings 그룹에 의해 금속도 고분자재료와 같이 rheology와 thixotropy 특성을 가진다는 기본원리가 제시된 이후 미국, 유럽, 일본 등에서 기초연구가 수십년동안 활발히 진행되어 왔다. 그런 후 1990년대 중반에 Alumax(미국), Stampal(이테리) Speed Star(일본) 등 많은 회사들이 경량부품소재의 양산에 성공적인 결과를 보였으며, Buhler(스위스), Ube(일본)사는 반응고성형용 양산장치를 개발하여 장치판매를 시작하였다. 대상제품은 주로 자동차용 경량합금소재 부품중에서 고기능/고품질을 요하는 주단조제품들을 중심으로 개발하고 있으며, 항공, 군수산업용의 각종 주단조제품에의 적용과 실용화에도 노력하고 있다.

본고에서는 반응고가공기술의 국내외개발동향을 먼저 살펴보고, 다음으로 반응고가공기술에서 중요한 핵심요소인 고액공존영역에서의 금속점(metals viscosity)에 대한 실험적 고찰을 하여 보도록 한다.

2. 반응고가공기술의 국내외 개발동향

반응고가공기술은 ①빌렛소재개발과 ②성형제품개발로 나누어 연구되어져 왔다.

2.1 반응고가공용 빌렛소재개발

일반으로 교반응고시 고액공존영역에서 점도(viscosity)는 고상율에 따라 0.01에서 10,000 Pars 정도로 변화되며



그림 1 반응고가공용 소재(고상율 약 70%)

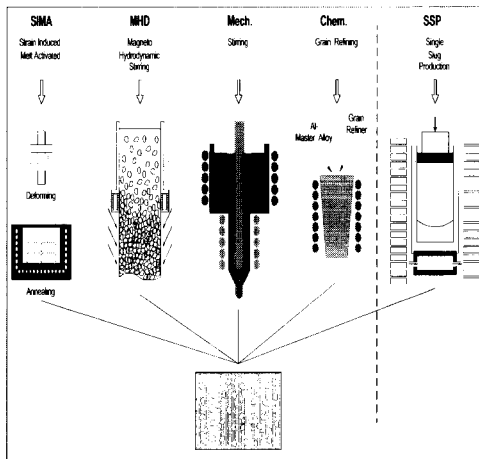


그림 2 반응고가공용 빌렛 제조방법

, 일반주조품에서 나타나는 수지상조직 대신에 구형에 가까운 초정입자들을 얻을 수 있어 고상율 0.6에서도 낮은 점성과 우수한 유동성을 가진다. 또한 구상조직의 금속재료는 고분자재료와 같은 의가소(pseudo plastic), 디소트로픽(thixotropic)성질의 특징을 나타내고 있으며, 고액공존상태(고상율 0.6이상)에서도 마치 고체처럼 빌렛트를 옮길 수 있다. 그림1에서 보는 바와 같이 고상율 0.6이상의 고액공존 빌렛트는 일상생활에서 자주 접하는 버터(butter)를 연상할 수 있고, 고상율이 0.5이하의 액상이 많은 고액공존 빌렛트일 경우는 썬칩(ketchup)을 연상할 수 있다.

고액공존영역에서 낮은 점성과 구상조직을 가지는 빌렛트소재를 얻기 위해서는 그림2에서 보는 바와 같이 여

러 가지 방법이 있다. 응고과정에서 기계적 또는 전자기적 교반을 통하여 구상조직을 얻는 MHD법과 같은 교반 응고방식이 있으며, 소성변형을 많이 받은 금속소재를 고액공존영역으로 재가열시켜 구상조직을 얻는 SIMA법과 같은 소성변형방식이 있다. 그러나 산업현장에서 구상조직의 빌렛트소재는 MHD교반방식으로 제조하는 것이 주류를 이루고 있으며 대표적인 제조업체로서 Pechiney회사가 있다. 국내에서는 두레어메탈(주)에서 직경 3인치와 4인치 알루미늄합금빌렛트(A356, A357)를 전자기 교반방식으로 생산하여 공급할 수 있는 단계에 있다. 기타 결정미세화, 가압응고교반 및 압출방법 등이 소개되고 있으나 아직 일반화되어 있지 못하다. 표1은 반응고가공소재의 제조업체들을 소개하고 있으며 고용점재료인 특수강, 철강판재 및 금속복합재료에서도 관심을 가지고 소재개발연구가 진행되고 있다.

표 1 반응고가공소재의 제조업체와 개발제품

| 산업분야 | 외국의 개발제품 및 업체명 |
|------|--|
| 소재 | 철강산업 -스텐레스강 박판재(Japan Rheotech) -특수강소재 (Sheffield, Aachen) |
| | 알루미늄 -알루미늄판재 염가제조(GM, Ford) -반응고빌렛트제조(Pechiney, Omet, Althix, Alumax, Aluswiss등) |
| 산 | 마그네슘 -Thixomold(Dow chemical, Thixomat) |
| 업 | 복합재료 -Al/Sic 복합재료(Duralcan, Osprey) Al/Si 복합재료(Osprey) |

한편 반응고성형용 빌렛트소재의 개발은 리오성형소재(rheo-forming materials)와 디소성형소재(thixo-forming materials)로 나누어 볼 수 있다. 디소성형소재는 고액공존영역에서 구상조직의 초정입자를 만들고 급냉하여 MHD연속주조방식으로 빌렛트를 생산하는 것으로서 가압성형을 위해서 재가열공정이 반드시 필요하다. 반면 리오성형소재는 고액공존영역에서 초정입자를 구상조직으로 만든 후 직접 가압성형을 수행할 수 있도록 슬러리를 제조하는 것으로서 재가열공정을 생략하고 가압성형을 할 수 있어 제조원가의 절감을 기할 수 있다. 그림 3은 리오성형과 디소성형의 제조공정에 대한 차이점을 보여주고 있다.

현재까지 알루미늄합금이 주류를 이루고 있으며 알루미늄

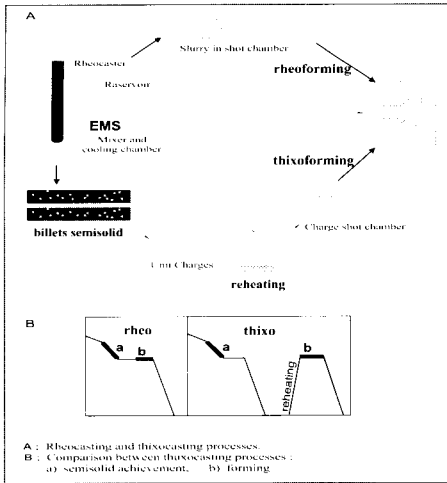


그림 3 리오성형과 디소성형의 제조공정 개략도

미늄합금소재는 전자기교반장치를 이용한 수직 또는 수평식 연속주조방식에서 빌렛형태로 제조되어 디소성형용 빌렛소재로 공급되고 있다. 디소성형소재의 제조업체로서는 Alusuisse-Lonza, Buhler, Stampal, EFU GmbH, Pechiney, SAG, Ormet, Alumax, Northwest Aluminium 등이 있으며, 소재생산판매업체는 유럽에서 Pechiney와 SAG가 있고 미국에서는 Ormet와 Northwest Aluminium이 상업적으로 공급하고 있다.

반응고성형기술의 개발연구는 처음에 디소성형기술개발로 출발하였으나, 제조원가절감의 측면에서 재가열공정을 생략할 수 있는 리오성형기술개발이 최근 많은 관심을 불러 일으키고 있다. 디소성형용 빌렛소재는 응고과정에서 수직상정 조직을 파괴하여 초정의 구상화 정도를 도모하는 방법인 반면, 리오성형용 슬러리스소재는 초정을 미세화시켜 고액공존영역에서 초정의 구상화를 도모하는 방법에 연구의 초점을 맞추고 있다. 양쪽 기술 모두가 압성형을 수행하기 전에 슬러리 또는 빌렛트의 고상율을 내외부위와 상하부위가 가능한 균일하도록 하는 것이 건전한 부품생산을 위해서 매우 중요한 요소가 된다. 초정의 미세화와 구상화를 위해서 용탕을 경사냉각판을 통하여 흐르게 함으로서 반응고슬러리를 제조하는 방법도 관심의 대상이 되고 있다. 리오성형의 원천기술을 확보하기 위한 연구가 한국과학기술연구원과 경상대학에서 활발히 진행되고 있다.

2.2 반응고성형 제품개발

반응고가공법은 적은 압력의 성형기기로 복잡한 형상

표 2 반응고가공제품의 해외개발동향

| 산업 분야 | 외국의 개발제품 및 업체명 |
|---------|--|
| 자동차산업 | - GDI Delivery Pipe (Alumax, Stampal) - Suspension Arms (Alumax, Stampal) - Brake Parts (Alumax, Stampal) - Mounting Brackets (Alumax, Stampal) - Master Cylinder (Alumax, Formcast) - Steering Knuckle (Stampal) - Rear Axle Components (Stampal) - Air Con. Scroll (Hitach, Honda) - Cylinder Case (Ashai Tech.) - Wheel (Speed Star Wheel) - Replacement of Forging Parts (HMW) - Recycling of Auto. Parts (USAMP) |
| 전기/전자산업 | - Actuator Arm (Formcast) - Cooling Fin (Formcast) - Mg Hard Disc & Notebook Case (Sony) - Mg Camera Case (Sony) - Al-Be Gear (Formcast) |
| 항공/방위산업 | - Submarine Actuator M/Bracket (CTC) - Missile & Aircraft Parts (CTC) - Tank Track Block (NCEMT) - Ti Valve Body (CTC) - Ti LPD-17 Amphibious Assault Ship (CTC) |

표 3 제조공정에 따른 기계적 성질

| A356-T6 | 중력주조 | 열간단조 | 반응고성형 |
|-----------|------|------|-------|
| 인장강도(MPa) | 262 | 340 | 320 |
| 항복강도(MPa) | 186 | 280 | 240 |
| 신율(%) | 3-5 | 9-11 | 11-12 |
| 경도(HB) | 80 | | 105 |

참고자료 : Stampal SpA (Italy), 4th conf. on SSM, Sheffield (1996. 6. 19-21)

의 제품을 제조할 수 있고 기포가 없는 균일한 금속조직을 얻을 수 있는 장점을 가지고 있어 자동차용 경량합금소재부품들을 중심으로 반응고가공 주·단조제품의 대량생산이 이루어지고 있다. 표2는 반응고가공제품의 해외개발동향을 보여주고 있다. 미국의 Alumax회사는 5천만 개/년 생산라인을 구축하고 양산에 들어갔고, 이탈리아의 Stampal회사는 포트제타엔진에 사용되는 fuel rail을 시간당 160개의 생산속도제조하고 있다. 또한 일본의 Speed Star Wheel회사에서는 초경량 알루미늄휠을 성공적으로 생산하였다. 자동차용 경량부품이외에도 전자부품에서 액투에터암, 냉각핀, 마그네슘 하드디스크 및 노트북케이스 등을 생산하고 있으며, 항공/방산제품에서도 성공적인 결과를 보이고 있다.

반응고가공법의 장점을 요약하면 (i)1mm두께의 제품까지 제조가능하여 복잡형상제품을 일체화성형할 수 있고, (ii)30% 금형수명의 향상과 후가공공정의 단축, (iii) 기계적 성질의 대폭적인 향상을 가져온다. 표3은반응고가공품의 기계적 성질을 주조품과 단조품 비교한 것이다. 표3에서 보는 바와 같이 반응고가공품의 인장강도와

신율은 일반주조품에 비해서 월등히 높으며 단조품에 비해서도 떨어지지 않는다. 더욱 중요한 것은 피로강도가 반응고가공품에서 대폭적인 향상이 있었다고 보고하고 있으며, 인장강도와 신율의 대폭적인 향상은 파괴인성의 대폭적인 향상을 의미할 수 있다.

반응고가공법은 가압성형장치에 따라 반응고다이캐스팅(thixocasting), 반응고단조(thixoforging), 반응고압출(thixotrusion) 및 반응고박판주조(rheo-strip casting) 등 다양한 제조공정으로 나누어질 수 있다. 그림4는 반응고가공공정의 개발흐름도를 보여주고 있다. 반응고다이캐스팅, 반응고단조 및 반응고압출은 알루미늄합금에서 많은 연구가 진행되었으나, 반응고박판주조는 알루미늄합금에서 보다는 스테레스강의 박판주조에서 많은 연구가 진행되었다. 국내에서도 포항제철과 한국과학기술연구원은 1996년부터 3년동안 304스테인레스강의 반응고박판 연속주조에 관한 연구를 수행하였으며, 이를 통하여 반응고박판제품의 냉간성형성은 일반 박판주조제품에 비해서 향상되었다는 점을 확인하였다. 알루미늄 반응고다이캐스팅제품 개발은NSC와 부산대학 및 성용하이텍과 한국기계연구원에서 활발한 연구가 진행되고 있으며, 마그네슘 반응고다이캐스팅제품개발은 대우통신과 서울대학에서 활발한 연구가 국내에서도 진행중에 있다.

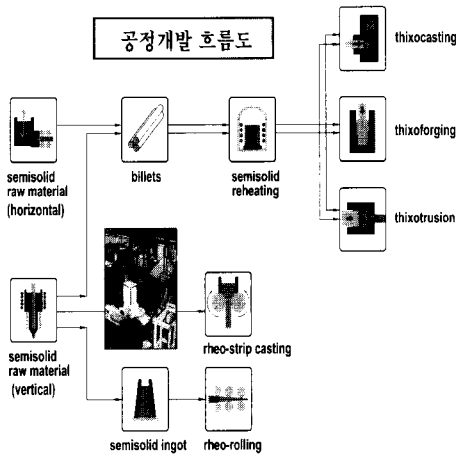


그림 4 반응고가공의 공정개발 흐름도

반응고가공법을 이용한 금속복합재료의 개발연구도 관심의 대상이 되고 있다. 현재 반응고금속의 특성 중 접합성이 양호한 클래드(clad)재의 제조, 접합강도가 양호한 적층형 복합재료의 제조 및 교반혼합성을 이용한 입자강화 복합재료의 제조 등이 제안되고 있다. 특히 입자강화 복합재료의 제조 프로세스의 개요와 특징은 다음과

같다. ① 반응용상태에서 가열한 모재(예: 알루미늄 합금)를 기계적교반하여 이 중에 강화입자(예: 세라믹입자)를 혼입한다. 강화입자는 부유, 침강, 응집 등의 방지가 가능하다. ② 또한 혼입되는 과정에서 교반하면서 적절한 냉각속도로 모재 및 혼입한 입자 전체의 온도를 저하시키는 것으로, 모재와 강화입자의 혼입분말을 제조하는 것이 가능하다. ③ 이러한 방법으로 복합화된 재료를 모재의 반응용상태 온도영역에서, 압출가공, 단조가공 등으로 관·봉·선재·기타 제품을 가공한다. 통상 복합재료는 강화입자의 비율을 높임과 동시에 급속한 경화 또는 취화하여 가공이 곤란하게 되는데, 이러한 경우 모재의 반응용상태는 액상성분의 효과에 의해 복합재의 변형저항이 현저히 낮아지고 변형능이 증가하므로 가공이 용이하게 된다. ④ 반응용상태로 가열한 모재를 기계적 교반하면서 냉각하는 것에 의해 분말화하고 강화입자와 혼합하여 복합분말로서 반응용가공하는 것도 가능하다. 이렇게 얻어진 입자분산강화(또는 단섬유강화) 복합재료와 통상의 합금재료를 반응용 접합하는 입자분산강화 적층 복합재료의 제조 및 2차 가공프로세스, 또는 다시 보통의 합금재료의 표면부를 강화입자에 의해 직접 강화하는 반응용 직접 복합화프로세스의 개발도 진행되고 있다. 반응고가공법에 의한 금속복합재료의 개발연구에서 중요한 요소는 기지합금과 강화재의 재료특성을 적절히 조화시켜 원하는 기계적 성질을 얻도록 재료설계(materials design)가 필요하다. 그림5는 원하는 기계적 성질을 얻기 위한 복합재료의 재료설계방법을 예시하고 있다.

소프트기지금속에 하드강화재를 복합화함으로써 강도 향상을 가져올수 있는 반면, 하드기지금속에 소프트 강

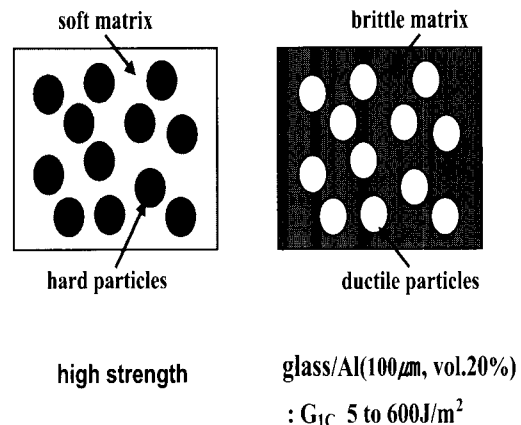


그림 5 금속복합재료의 합금설계에 따른 기계적 성질 변화

화재를 첨가함으로써 파괴인성의 향상을 가져올 수 있다는 점을 활용하여 원하는 제품의 기계적 성질을 고려하여 재료설계를 하는 것이 앞으로 중요한 연구과제가 될 것으로 사료된다. 한 예로서 하드유리기지(glass matrix)에 100마이크론 크기의 소프트 알루미늄을 체적비 20%를 첨가함으로써 파괴인성이 5J/m^2 에서 600J/m^2 로 대폭 향상되었다는 보고가 있다.

그림6은 Al-15%Cu합금을 고상율 0.5의 고액공존영역에서 2시간이상 교반을 시켰을 경우 초정이 거의 완전한 구상조직을 보이고 있다. 이 조직은 소프트한 구상의 초정과 하드한 기지금속이 조화를 이루어 파괴인성의 향상을 예측할 수 있다. 이와같은 방법을 이용하여 적절한 합금설계를 함으로서 원하는 기계적 성질을 가지는 제품 개발이 가능할 것으로 사료된다.

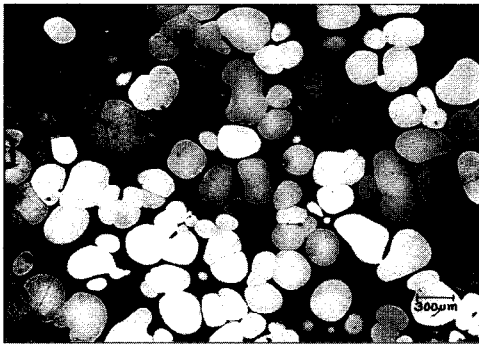
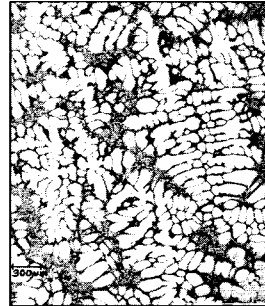


그림 6 등온교반시킨 Al-15%Cu합금의 반응고 조직

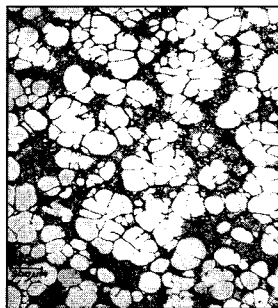
3. 반응고합금의 유변학적 특성

반응고가공법에 대한 기초연구로서는 리오로지 특성 및 미세조직과의 관계를 많은 연구자들에 의해 연구되고 있다. 주로 Pb-Sn, Al-Cu, Al-Si 2원계 합금에 대해 고액공존구간에서 교반에 의한 조직양상과 그 기구에 대한 연구들이 수행되었다.

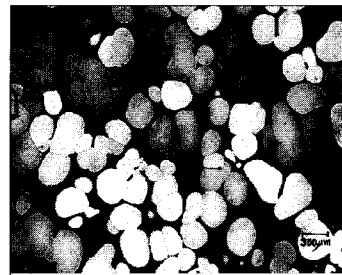
반응고교반시 텍스토프릭 성질이 나타나는 것은 Joly와 Mehrabian등에 의해 액상기질 내에서 고상입자들의 파괴(break down)와 응집(build up)에 의한 것이라고 제안되었으며, 이후 여러 보고자들에 의해 서로 다른 고상입자의 파괴기구가 제안되었으며, 재용해(remelting), 취성파괴(fragmentation by brittle fracture) 및 입계변형생성(grain boundary melting) 등이 있다. 이러한 이론들을 근거로 많은 연구자들에 의하여 고상입자들의 파괴기구들과 리오로지특성과 주요 공정변수인 고상율, 냉각속도 및 전단변형속도에 의한 영향들이 보고되고 있다.



(a)무교반 연속냉각



(b)교반, 연속냉각



(c)교반, 등온교반(2시간)

그림 7 연속냉각과 등온교반시 Al-15%Cu합금의 응고 조직

3.1 초정입자의 크기와 형상

고액공존영역에서 교반효과는 일반적인 수지상의 구조를 비수지상의 구상조직으로 변이시킨다. 초정입자들의 크기나 형상을 제어하는 인자는 크게 냉각속도, 전단변형속도 및 고상율 등의 3가지로 나눌 수 있다. 주어진 고상율에서 빠른 냉각속도는 작은 입자를 만들며, 전단변형속도를 크게하면 초정입자들은 좀 더 구형화되며 구상화되게 된다. 또한 구상화된 초정입자들은 수지상에 비하여 그 크기가 비교적 균일하며, 고상율이 높아짐에

따라 입자간 간격이 작아지며 좀 더 구상화되어지며, 교반시간이 증가함에 따라 고상입자들은 더욱 파괴(fragmentation)되고 더욱 매끄러운 입자표면이 얻어진다고 보고되고 있다. 그림7은 연속냉각교반과 등온교반시의 초정의 조직을 보여주고 있다. 연속냉각교반시는 로제트조직을 보이지만 등온교반을 오랫동안할 경우 구상조직으로 전환되는 상황을 보여주고 있다.

일반적으로 반응고교반시의 조직변화에 대한 변수는 전단변형속도, 냉각속도, 고상율이 있지만 Flemings 등은 입자의 크기는 오로지 냉각속도만이 변수로 작용한다고 하였으며, 즉 냉각속도가 빨라짐에 따라 입자의 크기가 작아진다고 하였다. 하지만, Ichikawa 등의 보고에 의하면 Al-4wt%Cu합금의 경우 전단변형속도가 증가함에 따라 입자의 크기가 작아졌으나, Al-10wt%, Al-24wt%Cu합금의 경우에는 전단도에 따른 입자의 크기의 감소는 확연히 들어나지 않았다고 하였다.

또한, Joly와 Mehrabian은 냉각속도의 증가에 따른 입자크기의 감소를 보고하면서 냉각속도가 큰 경우에는(25°C/min) 전단변형속도에 따른 입자크기의 변화는 없었으며 냉각속도가 느린 경우(0.33°C/min)에는 입자크기가 전단변형속도가 증가함에 따라 감소하였다고 보고하였다. 그리고, Prasad 등은 Al-10wt%Cu합금의 경우 고상율이 높아짐에 따라 입자크기가 작아졌으며, 전단변형속도의 증가에 따른 입자크기의 감소는 일어나지 않았으며, Al-6wt%Cu합금에서는 고상율에 따른 입자크기의 변화는 관찰되지 않았으며, 전단변형속도가 증가함에 따라 입자크기가 감소하였고, Al-4wt%Cu합금의 경우 고상율이 증가함에 따라 입자크기가 감소하였으며 전단변형속도의 증가에 따른 입자크기의 감소함을 보이면서 이러한 현상은 합금계에 따라 상변태에 기여하는 요인이 핵생성이나 핵성장애 따른 것이냐 하는 것에 따라 고상율이나 전단변형속도에 따른 입자크기의 변화가 달라진다고 보고하였다. 반응고교반시 제조변수에 따른 응고조직의 변화양상은 합금계에 따라 서로 다른 연구결과가 보고되고 있으며 이에 대한 명확한 해석은 아직 밝혀지지 않고 있다.

3.2 초정입자의 조대화

교반을 하게 되면 입자들의 응집이 가속화되는데 이에 대한 명확한 기구는 아직 밝혀지지 않았다. 일반적으로 초정입자의 조대화는 교반시 입자들의 응집에 의한 coalescence와 작은 입자들은 소멸하고 큰 입자들은 성장하는 ostwald ripening에 의한 기구로 설명할 수 있으며, 반응고교반시 초정입자의 조대화는 coalescence가 주류

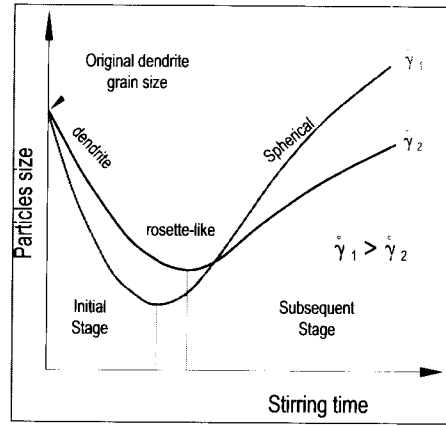


그림 8 전단변형속도와 교반시간에 따른 초정 입자의 크기 변화

를 이룬다고 할 수 있다. 그러나 Vogel 등은 입자들 사이의 잔류용질들이 교반에 의한 fluid flow에 의하여 이동이 가속화되며, 이에 의하여 조대화가 빠르게 진행된다고 보고하였다. 교반초기에는 교반속도나 시간이 증가함에 따라 입자의 크기가 감소하고 입자의 곡률반지름이 증가하며 마지막 조직형상은 높은 밀도의 구상입자로 이루어진다고 보고하고 있다. Wan과 Sahm 등은 입자크기의 변화를 두 단계에 의해서 설명하였다. 등온교반 초기에는 입자들의 파괴에 의한 크기 감소가 지배적인 요소로 작용하고 임계시간이후에는 Ostwald ripening에 의한 입자들의 조대화가 지배적인 요인으로 작용하며 전단변형속도에 대응하는 고상입자들간의 합체와 분리가 평형을 이룬다고 제안하였다.

Lee 등은 전단변형속도에 따라 교반초기에는 초정입자의 미세화가 진행되다가 임계시간 이후에는 입자들의 합체와 분리를 하면서 입자의 조대화를 가져오며, 임계점은 전단변형속도에 따라 달라진다는 점을 실험적으로 입증하였다. 그림8은 전단변형속도와 교반시간에 따른 초정입자의 조대화에 미치는 영향을 보여주고 있다.

3.3 유변학적 특성

교반응고시 초정의 구상화조직은 고액공존영역에서 낮은 점성을 가지며, 초정의 크기와 형상은 리오로지특성과 밀접한 관련성이 있다. 이는 금속의 리오로지특성분석을 통해 반응고성형의 공정제어를 정밀하게 할 수 있는 방안을 마련한다는 점에서 고액공존영역에서 금속의

유변학적 특성연구는 중요하다고 하겠다. 또한 바람직한 기계적 성질을 얻기 위해서 초정입자와 리오로지와 상관 관계를 잘 이해하여야 필요가 있다. 그림8에 보는 바와 같이 교반응고시 급속도 비뉴턴유체의 리오로지특성을 가지고 있다는 사실을 1970년대초에 Joly와 Mehrabian 이 Sn-15%Pb합금에서 처음 발표하였다.

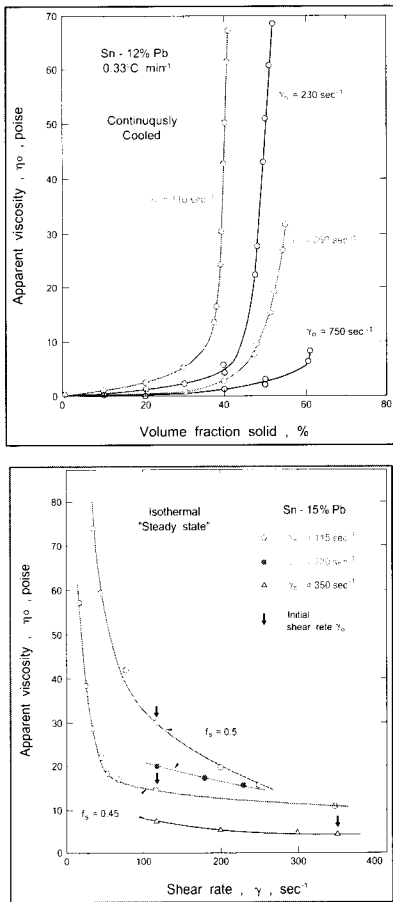


그림 9 Sn 15%Pb합금에서 연속냉각 및 등온교반시 점성의 변화양상

$$\tau = K\gamma^n$$

$$\tau = K\gamma^{n-1} \dot{\gamma}$$

$$\eta = K\gamma^{n-1}$$

그림 9는 비뉴턴유체에서 볼 수 있는 전형적인 pseud-o plasticity특성을 Sn-15%Pb합금에서 보여주고 있다. 뉴턴유체의 점성과 전단변형속도와 관계식은 다음과 같다.

여기서 t 는 토크, n 는 점성, r 은 전단변형속도 및는 상수이다.

그림9의 오른쪽 그래프에서 보는 바와 같이 점성은 전단변형속도의 증가에 따라 낮아지고 있으며, 이는 전형적인 비뉴턴유체의 거동에 해당한다. Joly & Mehrabian의 실험결과(그림9)를 보면 Sn-15%Pb합금에서 $n-1$ 지수 값은 음수인 -3 에서 -0.8 의 값을 나타내고 있으며 pseud-o plasticity거동을 보이고 있다. 그러나 $n-1$ 값은 연구자의 실험방법에 따라 차이가 있으며, 같은 Sn-15% Pb 합금계에서 Brian등은 $n-1$ 값을 -1.1 로 보고하고 McLella-nd는 $n-1$ 값을 -1.2 에서 -1.4 로 발표하고 있다. 한편 Lee등은 Al-6%Si합금에서는 $n-1$ 값은 -1.4 에서 -1.7 의 값을 가지고 Al-4%Zn-1%Mg합금에서는 -1.1 에서 -1.7 의 값을 가진다고 하였다. 결론적으로 합금종류와 연구자의 실험방법에 따라 $n-1$ 지수값이 약간의 차이를 보이고 있지만 대체로 $n-1$ 의 지수값이 음수를 보이고 있으며, 이는 금속재료도 교액공존영역에서 교반시 pseudo-plasticity의 특성을 가진다는 중요한 의미를 가지고 있다.

그림10은 Al-15%Cu합금에서 등온교반시 교반정지시간(rest time)과 전단변형속도의 변화에 따라 점성의 증가 또는 감소를 보이다가 일정 교반시간이 경과후 다시 정상상태로 환원하는 디스토트로피특성을 가진다는 실험결과를 보이고 있다. 이는 초정입자들이 응집과 분리가 등온교반과정에서 일어난다는 사실을 의미한다. 즉 교반하다가 일시 교반을 중지할 경우 초정입자들은 교반중지동안 응집과정을 보이게 되며 다시 교반을 시작할 경우 응집된 초정입자들을 분리하기 위해서 교반자에 토크가 걸리고 이는 점성의 증가를 의미한다. 그러나 교반시간에 따라 다시 점성은 낮아지고 정상상태의 점성을 가지게 된다. 그림10의 왼쪽 그래프는 고상율과 교반정지시간에 따른 디스토트로피의 유무를 나타내는 임계곡선을 나타내고 있다. 그림10의 오른쪽 그래프는 전단변형속도의 변화에 따른 디스토트로피의 유무를 나타내고 있다.

3.4 구성관계식

반응고성형기술의 점성에 관한 1상 구성관계식(one phase constitutive model)은 각 연구자들의 실험결과에

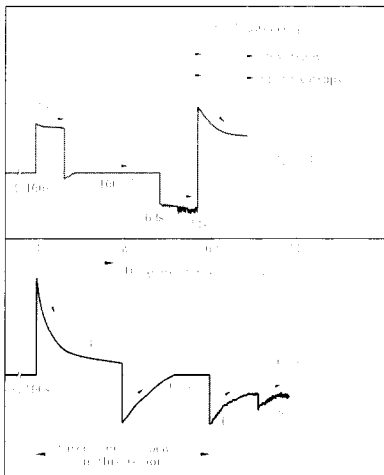
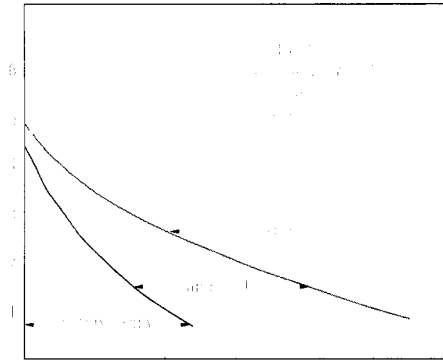


그림 10 Al-15%Cu합금에서 동온교반시 덕스토로피특성

이터를 비뉴턴유체모델식에 접목하여 해석하고 있으나 실험결과들이 연구자에 따라 차이를 보이고 있어 아직까지 일반화된 금속점성의 모델식이 도출되지 못하고 있다. 단지 금속재료도 의가소성의 리오로지특성을 가지고 있다는 사실만 확인되고 있으며 비뉴턴유체와 같이 이론적 해석을 하고 있다. 일반적으로 고상율 0.5이하에서는 점성기반모델에 입각하여 해석을 하고 있으며 고상율 0.6 이상에서는 변형기반모델을 도입하여 해석하고자 하는 경향이 있다. 점도기반모델식과 변형기반모델식을 다음에 요약하고 있다.

한편 2상 구성관계식(two phase constitutive model)은 점성과 조직과의 상관관계를 설정하고자 하는 것으로 이에 대한 연구는 많이 진행되고 있으나 아직까지 완성된 모델식은 없다. 더욱 3상 구성관계식(three phase constit

1상 구성관계식 (one phase constitutive model)

- # 점도기반모델 ($f_s < 0.5$)
 - Newtonian model : $\eta = \eta_0(1+2.5 f_s)$, at $f_s < 0.1$
 η_0 : 순수액체점도, η : 용체점도
 - Non-Newtonian model : $\eta = K \dot{\gamma}^n$ at $f_s < 0.6$
 Joly & Mehrabian 실험치: $\eta = A \exp(B f_s)$
 Kattamis & Piccone 실험치: $\eta_r = \eta_0 = 1 + A f_{(solid)} - B f_s (\dot{\gamma})^n$
 η_r : 용체 액체 상대점도
 - internal variable model : particle agglomeration
- # 변형기반모델 ($f_s > 0.6$)
 - viscoplastic model : $\sigma = A(f_s) \dot{\epsilon}^n$
 - porous solid model : $\sigma = K \dot{\epsilon}^n$

2상 구성관계식 (two phase constitutive model)

공정변수/조직과의 상관관계 구성방정식 설정?

3상 구성관계식 (three phase constitutive model)

공정변수/조직/물성과의 상관관계 구성식은 없음

-utive model)은 점성, 조직 및 물성과의 상관관계를 정립하는 것으로서 이에 대해서는 실험데이터마저도 거의 없는 상황이다. 앞으로 금속의 점성과 연계하는 구성관계식에 대한 기초연구가 활성화되어 반응고가공의 원천 기술을 확보하고 이 원천기술의 확보는 학문적 측면뿐 아니라 산업적 측면에서도 한차원 높은 반응고가공기술의 발전을 기약할 수 있다. 이 부문에 대해서는 추후 다른 지면을 통하여 좀더 자세히 논하기로 한다.

4. 결 론

- (1) 고액공존금속의 유변학적 거동연구를 통하여 반응고변형기구를 규명하고 각종금속의 점성데이터들을 확보하여 반응고성형용 신합금개발이 촉진되기를 기대한다. 한편 학술적 측면에서 고액공존금속의 변형기구해석에 점도(viscosity)개념을 도입하여 금속재료의 새로운 이론적 해석을 유도할 필요가 있다고 사려된다.
- (2) 산업적 측면에서는 (i)반응고빌렛제조장치, 재가열장치 및 성형장치 등 국산모델의 양산장치개발, (ii)유동해석과 정밀공정제어기술개발 및 (iii)반응고성형제품개발을 적극적으로 수행하여 반응고성형기술을 국내고유기술로 정착시키는데 노력하여야 할 것이다. 이를 위해서 산학연 컨소시엄을 구성하여 연구의 효율성을 높여 나갈 것을 제안한다.

참 고 자 료

- (1) D.B.Spencer, R.Mehrabian and M.C.Flemings : *Metal Trans.*, Vol.3, (1972) pp. 1925~1932.
- (2) P.A.Joly and R.Mehrabian : *J. of Mat. Sci.*, Vo.11, (1976) pp. 1393~1418.
- (3) R.D.Doherty, H.I.Lee and E.A.Feest : *J.Mat.Sci.*, Vol. 65, No.1, (1984) p. 181.
- (4) A.Vogel, R.D.Doherty and B.Cantor : *Proc. Int. Conf. on Solidification and Casting of Metals* Sheffield, Metal Society, (1979) p.518.
- (5) H.I.Lee : Ph.D. thesis, Sussex University, (1982)
- (6) J.I.Lee : Ph.D., thesis, Yonsei University, (1994)
- (7) Y.J.Ko : M.Sc., thesis, Hanyang University, (1998)
- (8) H.Garabedian and K.F.Strickland-Constable : *J.of Crystal Growth*, 22, (1974) p.188.
- (9) K. P. Young, R. G. Riek and M. C. Fleming : "Solidification Conference at Sheffield", *The Metals Society*, (1979) p.510.
- (10) M. A. Taha and N. A. Mahallawy, *Proc. 46th Int. Foundry Congr.Madrid* (1979), p.15.
- (11) F.J.Kievits and K.V.Prabhakar : *Proc. Int. Symposium on Quality Control of Eng. alloys and the role of Met. Sci.*, Delft Univ., (1977) p. 203.
- (12) T.Z.Kattamis and T.J.Piccone : *J. of Materials Science and Engineering*, A131, (1991), pp. 265~272
- (13) M.C.Flemings : *Metal. Trans. A*, Vol.22A,(1991) , p.957.
- (14) Kiyoshi Ichikawa, Yoshiji Kinoshita and Shoji shi-mamura : *GrainRefinement of Al-Cu Alloys by Rheocasting.*, *J. Japan Inst. Metals*, 48(6), (1984) pp. 626~632.
- (15) Priya R. Prasad, Subrata Ray, Jawahar L. Gaidhar, and Madam L. Kapoor : *Z.Metalkde.* Bd 80, H.6, (1989) p. 425.