

## Al-Si합금의 반응고 합금 제조기술

윤중열, 송인혁, 한유동, 안중호\*

한국기계연구원 재료공정연구부

\* 안동대학교 재료공학과

### Process and Application of Semi-Solid Al-Si Alloys

Jung-Yeul Yun, In-Hyuck Song, Yoo-Dong Hahn, Jung-Ho Ahn\*

Dept. of Materials Processing, Korea Institute of Machinery & Materials, Changwon, Kyungnam, 641-010

\* Materials Research Center for Energy Systems, Dept. of Materials Eng., Andong National Univ.

#### 1. 서론

환경과 에너지 문제의 해결을 위한 저공해 배출공정기술의 개발 및 에너지 절약형 경량소재 개발과 함께 신구조용 금속재료 기술인 반응고 합금성형기술(semi-solid metalforming)은 새로운 금속 소재가공분야로서 세계적인 관심이 고조되고 있다. 반응고 합금성형기술은 고상과 액상이 공존하는 온도 영역에서 금속 또는 금속계 복합 재료를 성형하는 기술로서 1970년대 초 미국의 MIT대학연구팀에서 그 기본 원리가 확립된 이래 기존의 주조와 단조 공정이 가지는 단점을 최소화하면서 두 공정의 장점을 극대화 할 수 있는 제3의 성형기술로서 급속히 발전되어 오고 있다. 특히 복잡형상을 갖는 난성형 소재의 near-net shape성형이 가능하며 에너지 절약, 원자재 절약 및 높은 생산성 향상을 얻을 수 있으며 또한 제품의 design flexibility를 크게 높일 수 있는 장점이 있다. 이와 같이 반응고 합금성형기술은 초창기에는 특허의 보호를 받으며 미국 Defence Advanced Research Projects Agency 등의 지원하에 수천 개의 부품을 생산하게 되었다. 반응고 합금을 이용하여 최초로 상업화된 제품이 생산된 것은 1981년으로, 그후 많은 대학, 연구기관, 기업에서 이 분야에 관심을 가지고 연구개발에 착수하게 되었다. 특히 관계로 1980년대의 연구는 주로 대학을 중심으로 공정과 반응고 합금의 기초물성에 관한 연구가 이루어졌다. 예를 들면, 영국의 Sheffield대학, 불란서의 Ecole de Mine de Paris, 독일의 Aachen공대, 미국의 MIT를 비롯, Ohio주립대, Cincinnati대학, Illinois대학, Connecticut대학, 캐나다의 Ecole Polytechnique de Montreal 등 많은 곳에서 활발한 연구를 하고 있다.

그럼 1에 나타낸 것처럼 반응고 합금성형기술은 합금제조분야와 성형분야로 구분할 수 있다<sup>1-3)</sup>. 반응고 합금 제조법의 대표적인 몇가지를 설명하면 먼저 기계적

교반법의 경우 간단한 원리로 높은 전단력을 낼 수 있고 구형화된 조직을 쉽게 얻을 수 있다는 장점이 있으나, 교반시 교반자의 마모에 따른 오염, 공정제어의 어려움, 경제적인 측면에서의 제약이 있다. 그리고 전자기력을 이용한 교반법의 경우, 회전축과 용융금속이 접촉하지 않으므로 불순물의 개입을 방지할 수 있고 교반장도를 용이하게 조절할 수 있는 장점이 있는 반면, 전자기적 교반효과가 교반용기 안의 용탕내부까지 충분히 미치게 하기 위해서는 막대한 양의 전력소모가 요구되어 반응고 합금의 제조원가가 커지는 문제가 제기 되었다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 영구자석을 이용한 용탕의 교반법이 최근에 제시되었다. 이 방법은 교반을 위해서 단순히 영구자석을 회전시키는 방법으로서, 전자기적 교반장치와는 비교가 되지 않을 정도로 전력소모가 작으며, 부피가 작기 때문에 전기시설 및 장치자체가 간단해 지는 장점이 있다. 또한 교반방법을 사용하지 않고 가공 경화된 재료를 단순히 고액 공존 구간에서의 열처리를 통하여 반응고 합금을 제조하는 SIMA(Strain Induced Melt Activated) 공정법이 있다<sup>4-6)</sup>. 이 방법은 단순히 열처리 공정을 통하여 합금의 초정상을 구형화시키는 방법으로 앞으로 많은 연구가 요구되어지는 분야이다.

반응고 합금성형은 저온공정, 단시간 성형, near net shaping, 성형시간 단축, 자동화가 가능하며, 주조공정과 비교하여 소요에너지의 30%이상 절감 및 die 수명연장 등 장점을 갖고 있다. 또한 기존의 단조나 고압주조 장비에 적은 수정을 통해 쉽게 반응고 성형공정에 이용할 수 있다.

표 1에 반응고 합금성형이 가지는 장점에 대해 나타내었다.

본 연구에서는 기계적 교반법, 영구자석의 회전을 이용한 교반법, SIMA 공정법 등에 대해서 알아보고, 각 공정들을 Al-Si합금계에 적용하여 상호 비교해 보고자 하였다.

## 2. 국내외 연구 및 개발동향

반응고 합금 성형기술은 생산 기술 측면에서의 장점 때문에 초기부터 상업화를 위한 개발 노력이 기초 연구와 함께 병행되어 왔다. 특히 cost, 에너지 절약, 파급효과, 경량화 측면에서의 Al합금의 자동차 부품에의 응용이 활발해진 1980년대 중반이후 복잡형상의 Al합금 자동차 부품제조에의 적용노력이 우선적으로 이루어져 왔고, 그 결과 최근에는 거의 모든 선진 자동차 관련업체들이 반응고 성형기술의

독자 개발 또는 협동 연구개발을 통해 자동차 부품 제조에의 반응고 성형기술의 응용 확대를 꾀하고 있다<sup>7~8)</sup>. 따라서 반응고 합금 성형기술의 발전은 기초특성 이해 보다는 상업화와 관련된 연구가 앞서 발전하고 있다. 예를 들면 반응고 합금의 제조기술, 성형공정 개발, 설비 개발 측면에 대한 많은 노력이 기울어져 오고 있다. 반응고 합금 소재제조는 반응고 성형기술의 최대 걸림돌인 cost 문제 해결과 성형품의 특성 향상을 위해 다양한 방법이 소재 종류 및 제품의 특성에 맞게 개발되어 오고 있다. 성형 공정 측면에서는 기존의 주조에 대응하는 반응고 주조기술의 발전이 우선적으로 이루어져 왔다. 최근에는 반응고 단조, 반응고 압출, 반응고 압연과 같이 기존의 열간 압출, 열간 압연 기술을 대체할 수 있는 기술개발도 활발히 진행되고 있다.

일반적으로 많은 업체들은 반응고 합금성형을 위한 billet을 회사자체내에서 생산하여 적용하고 있지만 일부 회사에서는 반응고 합금 billet을 전문업체로부터 수입하여 부품생산에 적용하고 있다. 세계적으로 유명한 반응고 합금 billet 제조 및 공급업체를 표 2에 정리하였으며, 미국의 Alumax, Ormet, 유럽의 Pechiney, Alusuisse등 대부분 업체에서는 MHD casting법을 사용하여 Al계 합금을 생산하고 있다.

NADCA(North American Die Casting Association)에서 1994년에 조사한 바에 의하면 반응고 합금성형업체는 미국 내에서만 10여개의 업체가 관련되어 있고 반응고 성형 장치 제작회사들도 30여개 이상 관련되어 있다. 미국 뿐만아니라 유럽, 일본 등 여러 나라에서 반응고 합금 성형업체들은 활발히 부품생산을 하고 있다<sup>9~12)</sup>.

일례로 미국의 경우 Alumax Engineered Metal Processes(AEMP)사에서 compressor part, brake cylinder cap, compressor piston등 많은 종류의 Al합금계 반응고 부품을 생산하고 있으며, Thixomat Inc.에서는 반응고 합금의 injection molding기술특허를 가지고 Mg합금의 부품을 생산하고 있다. 또한 이탈리아의 Weber, Stampal, 프랑스의 Perchiney S. A., 영국의 Thurst, 독일의 EFU GmbH등 여러 반응고 합금제조회사들이 반응고 합금제조의 상용화단계에 있으며, 가까운 일본의 경우는 수년 전부터 Mitsubishi Heavy Industries, Nippon Steel, Kawasaki Steel등이 'Rheotech'란 consortium을 형성하여 반응고 합금의 상용화를 추진하고 있다.

국내에서는 1990년대초 이후 일부 연구기관(KIMM, KIST) 및 대학(포항공대, 부

산대, 한양대, 연세대)에서 연구에 착수하였으나, 기술개발 투자 규모가 매우 빈약하고 또한 기관별로 산발적 연구가 진행되고 있다. 반응고 합금에 대한 산업구조 및 부품생산의 예는 아직까지 없으며, 기본적인 이론 연구와 실험실 규모의 공정연구를 수행하는 수준이다.

### 3. Al-Si합금을 이용한 반응고 합금 소재 제조

본 연구에서는 기계적 교반법, 영구자석의 회전을 이용한 교반법, SIMA 공정을 중심으로 반응고 합금 소재제조에 관한 실험 예를 나타내었다.

#### 3.1 기계적 교반법에 의한 반응고 합금의 제조

기계적 교반에 의한 반응고 합금의 제조는 두가지로 나누어서 실시했다. 첫 번째는 소형mixer기를 이용하여 약 400rpm의 교반속도로 회전시켜 교반하였으며, 이때 교반은 850℃에서 공정온도 직상인 590℃까지 연속적으로 실시한 후 공냉하였다. 두 번째는 그림 2에 나타낸 기계적 교반기를 제작하여 590℃에서 약 500rpm의 교반속도로 등온교반을 실시한 후 공냉하였다.

그림 3은 A356합금을 사용하여 소형 mixer로 기계적교반을 실시한 경우의 조직사진이다. 교반하지 않은 (a)의 경우 수지상정조직이 매우 발달되어진 것을 관찰할 수 있었으나, 그림 3(b)에 나타난 교반후의 조직에서는 수지상정조직이 깨어져서 구형화가 이루어지는 모습을 관찰할 수 있었다.

그림 4는 Al-25%Si합금을 이용하여 소형 mixer로 동일한 기계적 교반 실험을 실시한 후의 조직사진이다. 교반을 하지 않은 경우 조대한 막대형의 초정 Si들이 관찰되었으나, 기계적 교반후에는 조대한 막대형의 초정 Si이 둥근 형상으로 뭉쳐지는 모습을 보이고 있다.

그림 5는 A356합금을 이용하여 자체 제작한 기계적 교반기로 590℃에서 각각 5분, 10분, 15분, 20분동안 등온교반후에 공냉한 조직사진이다. 그림 6은 등온교반시간에 따른 초정  $\alpha$ 상의 aspect ratio와 평균결정립크기를 나타내었다.

그림 5와 6에서 알 수 있듯이 교반시간이 증가함에 따라 초정  $\alpha$ 상은 구형화 되면서 미세해지는 경향을 볼 수 있다. 이는 기계적 교반에 의해 수지상정이 파괴되고 구형의 입자를 만들기에 충분한 전단 변형력을 가지고 있음을 나타내는 것이다. 또한 조직사진에서 검게 보이는 부분은 격렬한 기계적 교반의해 시편내에 형성된 기공의 모습이다.

그림 7과 그림 8은 각각 Al-25%Si합금을 이용하여 자체 제작한 기계적 교반기로 동일한 실험을 실시한 후의 조직사진과 등온교반시간에 따른 초정 Si의 aspect ratio 및 평균 결정립크기를 나타낸다. 교반시간이 증가함에 따라 파쇄효과에 의하여 초정 Si 조직은 초기의 길쭉한 막대형상에서 구형의 형상으로 변화되어지는 경향을 볼 수 있으며, 초정 Si 입자의 크기도 감소하는 경향을 볼 수 있다. 또한 교반시간이 증가함에 따라 연속적인 파쇄와 응집현상에 의하여 초정 Si입자내부에 많은 결함 들이 관찰되고 있다.

### 3.2 영구자석의 회전에 의한 반응고 합금의 제조

영구자석의 회전에 의한 용탕의 교반법은 최근에 프랑스 아비뇽(Avignon)대학 자기운동학연구소의 C. Vives에 의해 제시되었다. 이 방법의 가장 큰 장점은 교반을 위해 단순히 영구자석을 회전만 해주면 되기 때문에 MHD교반기보다 전력소모가 작다는 점이다.

그림 9에 C. Vives가 제안한 영구자석의 회전에 의한 반응고 합금제조장치를 나타내었다<sup>13)</sup>. 모터를 회전(0~3000rpm)시켜  $\omega_0$ 의 각속도를 가지도록 영구자석을 회전시키면, 용탕의 각 부분은 가변적 자장하에 놓이게 되며 따라서 전류가 유도된다. 이 전류의 주성분은 회전축 방향인  $J_z$ 이며 이  $J_z$ 와 radial성분의 자장  $B_r$ 간의 상호작용에 의해 azimuthal time-mean electromagnetic body force가 생기며 따라서 용탕이 회전하게 된다. 회전용 영구자석은 30×24×24(mm) 크기의 소형자석들이 8개의 수직열로 배열되었으며, 1열에 각각 10개씩 총 80개로 구성되어 있다. 각 수직열은 동극의 자석으로 되어 있으며, 회전기의 위에서 볼 때 N-S극이 교차하도록 되어 있는 총 4쌍의 자극으로 구성되어 있다.

그림 9에 나타낸 영구자석의 회전에 이용한 교반기를 제작하여 Al-Si합금으로 반응고 합금을 제조했다. 용해로에서 용해된 용탕은 교반장치의 윗부분을 통하여 지름 60mm의 원통형 교반용기로 주입되며, 주입된 용탕은 회전하는 영구자석에 의해 교반하게 된다.

#### 3.2.1 A356합금을 이용한 반응고 합금 소재제조 및 성형성 실험

그림 10은 A356합금을 영구자석의 회전에 의해 공정온도까지 교반후 공정온도에서 수냉한 조직이다. 수냉시 냉각속도는 약 7°C/sec이며, 영구자석의 회전속도가

증가함에 따라 수지상정 조직이 파괴되고 구형화되는 경향을 관찰할 수 있다. 이러한 수지상정에서의 구형화 조직으로의 변화는 소재의 성형성에 밀접한 연관이 있으며, 후속의 반응고 합금 성형에 있어서 매우 중요한 요인이 된다. 따라서 본 연구에서는 영구자석의 회전에 의해 제조된 반응고 합금소재의 성형성 실험을 시행하여 구형화조직화에 따른 성형성 향상에 대해 고찰해보았다.

본 연구에 사용된 성형장치는 0.5MPa의 air press, 성형시편을 고액공존영역으로 재가열하기 위한 고주파 유도가열기, 성형몰드로 구성되어있다. 성형몰드의 예열온도는 350℃이다. 그림 11은 성형성 실험시편의 개략도이다. 성형전 초기 시편은 직경 30mm, 길이 20mm인 원통형으로 되어 있으며, 성형 후 시편의 형상은 그림 11(b)와 같게 된다. 시편의 재가열온도는 580℃와 590℃의 두 조건으로 시행하였으며 성형성 시편의 시간에 따른 재가열 온도변화를 그림 12에 나타내었다.

그림 13은 교반을 하지 않은 시편(0rpm)과 영구자석을 3000rpm의 회전속도로 교반시켜 제조한 시편을 580℃로 재가열 하여 thixoforming하였을 때의 사진이다.

교반을 하지 않은 시편의 경우는 모서리 부분 등에 충분한 성형이 이루어지지 않았다. 그러나 3000rpm의 회전속도로 교반한 시편의 경우는 성형성이 향상되어 양호한 형상의 성형체를 얻을 수 있었다.

그림 14(a)는 3000rpm으로 제조한 반응고 합금을 580℃에서 thixoforming하여 비교적 양호한 형상의 성형체를 얻은 시편의 각 부위에 따른 미세조직 사진을 나타내었다. 그림 13에서 알 수 있듯이 무교반(0rpm)에 비해서 3000rpm으로 회전시킨 경우에 성형성은 양호해 졌음을 알 수 있지만 각 부위별 조직 사진을 살펴보면(그림 14(a)) 시편의 위아래 부분이 완전한 공정조직으로 이루어진 것을 볼 수 있는데, 이것은 소성 변형과정에서 액상이 주로 시편의 위아래 부분으로 이동하면서 성형된 것으로 생각된다.

그림 14(b), (c)는 각각 재가열온도를 590℃로 하여 교반을 하지 않은 시편과 3000rpm의 회전속도로 교반한 시편의 미세조직이다. 먼저 교반을 하지 않은 시편의 경우(그림 14(b))는 이미 발달되어 있는 수지상정 조직들로 인해서 성형시편의 위아래부분에는 공정조성의 액상들만이 빠져 나와 성형이 이루어졌음을 알 수 있으며, 3000rpm으로 교반한 경우에(그림 14(c))는 구형화된 초정  $\alpha$ 상이 액상과 함께 소성변형되어 성형이 이루어졌음을 알 수 있다.

이상의 결과에서 반응고 합금의 성형시 성형시편에서의 전체적인 조직균일화를

위해서는 적절한 재가열온도의 설정이 필요함을 알 수 있다.

### 3.2.2 영구자석의 회전을 이용한 Al-25%Si합금의 교반조직

그림 15는 Al-25wt%Si합금을 영구자석 회전에 의한 교반유무에 따라 관찰한 시편의 단면사진이다. 영구자석의 회전에 의한 교반을 하지 않고 공냉한 그림 15(a)의 경우 초정 Si입자들이 시편내에 고르게 분산되는 경향을 보여 주고 있는 반면, 영구자석의 회전에 의해 교반을 한 경우 그림 15(b)와 같이 초정 Si입자들이 재료의 바깥쪽으로 편재 분리되고 재료내부의 기공이 감소하는 경향을 보여주고 있다. 그림 16은 영구자석의 회전속도 변화에 따른 초정 Si입자 편재거동을 나타낸 조직 사진이다. 영구자석의 속도가 1000rpm에 비하여 2000rpm과 3000rpm으로 증가함에 따라 전자기유도력의 증가로 인하여 초정 Si입자가 편재되는 표면두께는 조밀화가 진행되는 경향을 보여 주고 있다. 또한 초정 Si입자가 편재된 부위에서의 초정 Si입자 크기는 바깥 벽면부위쪽이 내부 slurry 부위쪽에 비하여 작은 것을 관찰 할 수 있었으며, 회전속도의 증가시 초정 Si 내부에 slurry 회전방향으로 crack등의 결함이 증가하는 경향을 볼 수 있었다. 이것은 영구자석의 회전속도가 증가함에 따라 교반력의 증가로 인하여 초정 Si의 파쇄경향이 증가하기 때문으로 판단된다.

이렇듯 초정 Si입자의 분리현상은 반응고합금 구성성분의 자성 특성차이에 의한 분리로 판단할 수 있으며, 淺井滋生도 전자기력을 이용한 Al합금의 주조실험에서 유사한 현상을 보고하였다<sup>14)</sup>. 또한 초정 Si이 바깥쪽으로 물리는 현상은 표면의 내마모성 증가로 경량 내마모재료로서의 이용가능성을 내포하고 있다.

### 3.3 SIMA 공정에 의한 반응고 합금의 제조

SIMA공정에 의해 Al-8wt%Si합금으로 반응고 합금을 제조한 예를 그림 17에 나타내었다. 냉간압연을 통해 단면감소율이 10%이 되도록 가공하였으며, 가공된 합금은 부피 20cm<sup>3</sup>정도의 일정한 크기로 절단하여 mushy zone열처리 실험을 하였다. 열처리온도는 590℃, 대기 중에서 행하였으며 정해진 시간동안 열처리 후 시편을 급냉하였다. 그림 17는 냉간압연한 시편의 mushy zone열처리 실험을 한 미세조직 사진으로 열처리 시간이 증가함에 따라 고상입자의 구형화가 진행되어 30분 후의 조직을 살펴보면(그림 17(b)) 수지상정조직이 완전히 사라지고 고상입자들이 20~100 $\mu$ m크기로 구형화되었음을 알 수 있다. 이러한 SIMA공정은 가공의 종류, 열처

리 방법, 열처리 시간, 열처리 온도 등 많은 변수를 가지고 있으며, 아직도 많은 연구를 필요로 하고 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 최근 환경과 에너지 문제의 해결을 위해 대두되고 있는 신구조용 금속재료기술인 반응고 합금제조기술에 대해 제조방법과 각 제조방법의 적용예에 대해 살펴보았다. 반응고 합금제조 및 반응고가공기술은 종래 기술보다 대폭적인 품질 향상 및 생산공정 생략이 가능한 혁신적인 에너지 절약형 기술이다. 이러한 새로운 공정의 실용화가 이루어지면, 금속재료의 품질, 신뢰성 및 기능의 향상과 에너지 절감에 의한 대폭적인 생산원가의 절감이 가능하게 된다. 이 기술은 기반기술로서 그 응용분야가 광범위하여, 반응고 연속주조법에 의한 비릿트 및 스텔라브 제조, 반응고 가공법에 의한 주·단조품의 제조, 자동차용 엔진 및 브레이크 시스템의 경량부품소재, 새로운 특성을 가지는 금속재료 및 금속 복합재료의 제조 등 새로운 분야의 수요 창출이 기대된다.

지금까지 공개된 응용 예의 대부분은 알루미늄 합금 주조품을 대체하기 위한 것으로서 현재 사용되고 있는 금형과 설비를 소폭 수정하여 실현이 가능하다는 장점이 있다. 국외에서는 산업체, 대학교, 연구소에서 새로운 제품을 개발하고 있으며, 몇몇 업체에서는 AI합금계 자동차부품소재를 개발하여 판매하고 있는 반면, 국내의 경우 아직 반응고 합금에 대한 산업구조가 형성되지 않았고, 각 산업체나 연구소, 대학교 등에서도 기본적인 이론 연구 및 실험실 규모의 공정연구를 하는 수준에 머물러 있다. 반응고 합금 제조기술에 대한 앞으로의 수요가 점차적으로 증가할 것이 명확하며 이에 따른 대비책 및 국가 기술력 및 국제경쟁력의 향상을 위해 많은 연구와 투자가 이루어져야 할 것이다.



## 참고문헌

1. P.A. Joly and R. Mehrabian : J. Mater. Sci., vol. 11, (1976) pp. 1393-1418
2. P.A. Joly , Ph.D. Thesis, Massachusetts Inst. of Technology, Cambridge, MA, (1974)
3. M.C. Flemings, R.G. Riek and K.P. Young : Mater. Sci. Eng., vol. 25 (1976)
4. C. Vives : Metall. Trans. B, vol. 23B (1992) pp. 189-206
5. E.R. Cau, M.H. Robert : Proceedings of the Second International Conference on the Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, MIT, (1992) pp. 1-10
6. A. Damasco, M.H. Robert : Annual Conference of Metallurgists, Hamilton (1990) pp. 274-284
7. M.C. Flemings : Metal. Trans. A., Vol. 22A, (1991) pp. 957-980
8. D.B. Spencer, R. Mehrabian and M.C. Flemings : Metall. Trans., vol. 3 (1972) pp. 1925-32
9. Stephen P Midson : 4th International Conference of Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, sheffield, (1996) pp. 251-255
10. Curt Kyonka : 4th International Conference of Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, sheffield, (1996) pp. 256-259
11. Phelan, M : Aluminum Industries, (1996) pp. 42-44
12. R. Kopp, H-P Mertens and T. Bremer : 4th International Conference of Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, sheffield, (1996) pp. 263-268
13. Charles Vives: Metall. Trans. B, vol. 23B (1992) pp.189-206
14. 浅井滋生: 新素材, (1995) 7월호 pp.11-14

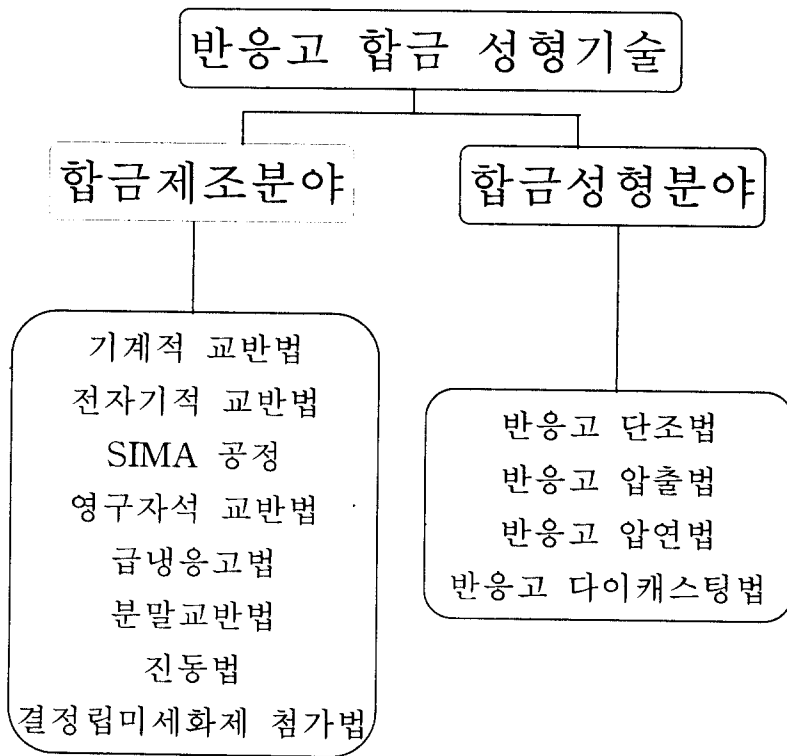


그림 1. 반응고 합금 성형기술의 분류

표 1 반응고합금이 주조나 단조에 비교하여 우수한 상대적인 장점

Characteristics	Advantages
Heat content (SSM<LM)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-lower mold erosion</li> <li>-lower energy consumption</li> <li>-high m.p. materials</li> </ul>
Viscosity (SSM>LM)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-improved mold filling</li> <li>-reduced gas entrapment</li> <li>-improved surface finishing</li> <li>-automation</li> </ul>
Presence of solid phase	<ul style="list-style-type: none"> <li>-less casting shrinkage, voids</li> <li>-macrosegregation</li> </ul>
Flow stress (SSM>SM)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-intricate part forming</li> <li>-higher forming speed</li> <li>-improved mold life</li> </ul>

표 2 반응고 합금 billet제조업체의 현황과 제조방법

업 체 명	제 조 방 법	합 금	비 고
Alumax (미국)	MHD casting SIMA Process	Al based alloy	1997년에 연간 5000만개의 forging 부품을 생산할 수 있는 공장 설립예정.
Ormet(미국)	MHD casting	A356, A357	NAFTA국가에 billet공급 licence획득
Pechiney(프랑스)	MHD casting	A356, A357, AlSi7Cu3Mg	Venthon공장에서 ALTHIX billet을 제작 판매중
Alusuisse(스위스)	MHD casting grain refinement	A356	1997년에 자동차부품생산예정
Stampal(이태리)		AlSi7Mg based alloy AlSi5Cu3Mg	각종 자동차 및 비행기부품에 적용
EFU(독일)	MHD casting SIMA Process	AlSi7Mg based alloy	현재 수직연속주조로 billet을 생산하고 있으며 수평연속주조공정을 개발할 예정



그림 2. 자체 제작한 기계적 교반기

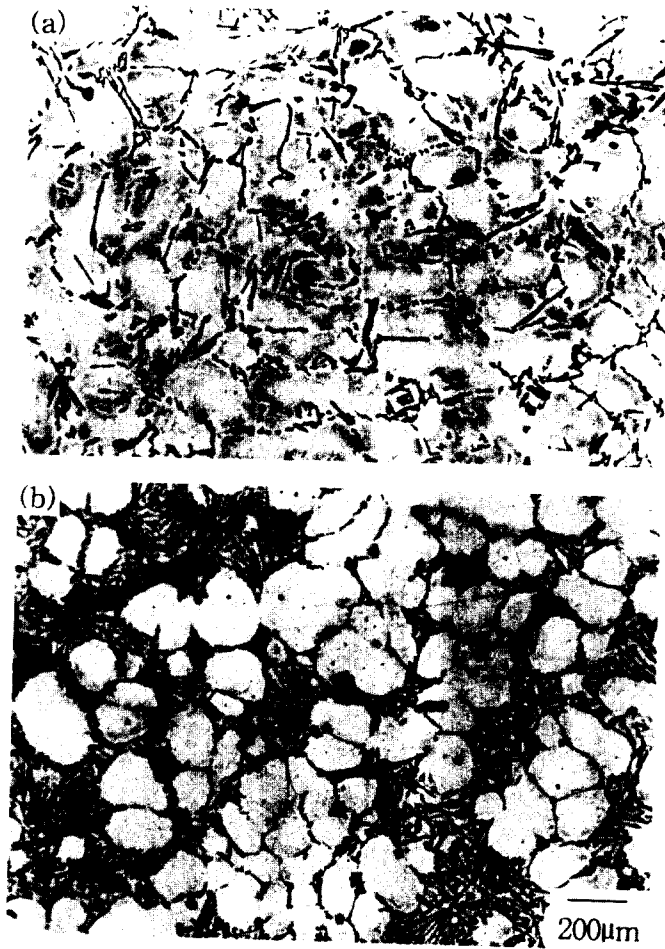


그림 3. A356합금의 기계적 교반에 의한 조직 사진  
(a) 교반전                      (b) 교반후



그림 4. Al-25%Si합금의 기계적 교반에 의한 조직사진  
(a) 교반전                      (b) 교반후

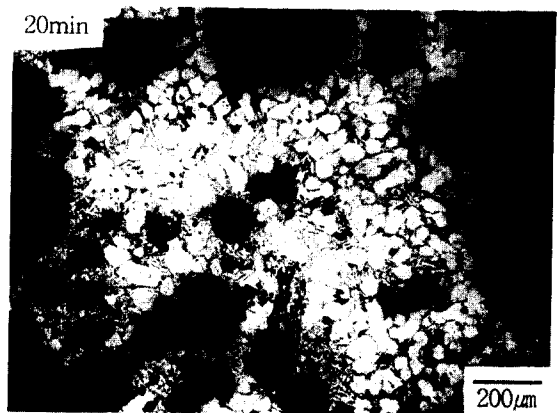
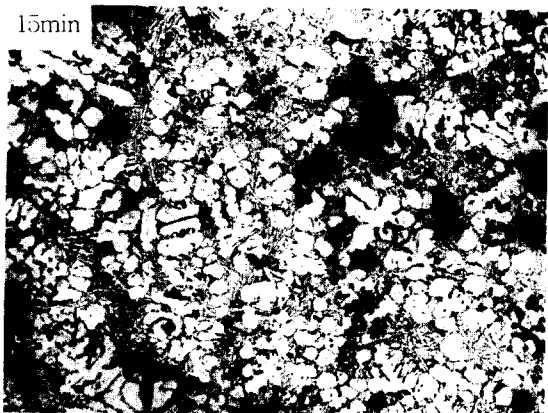
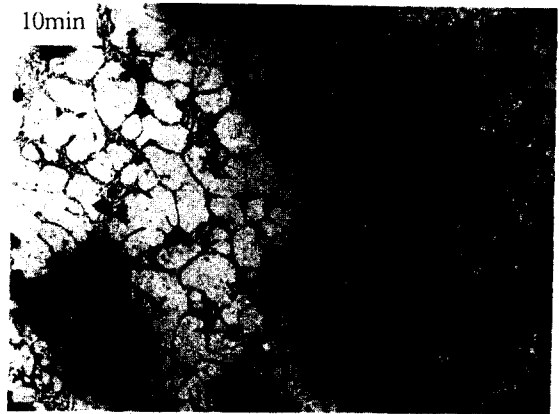
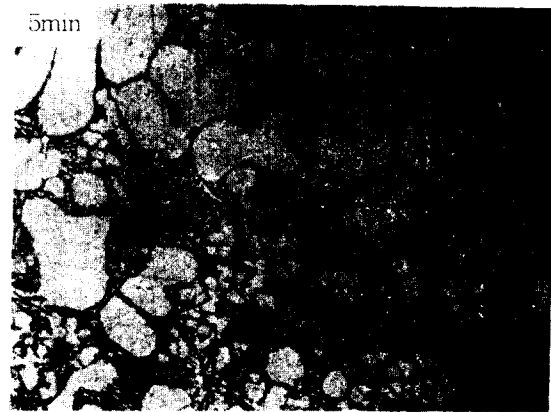


그림 5. A356합금의 기계적 교반시간에 따른 조직변화(공냉)



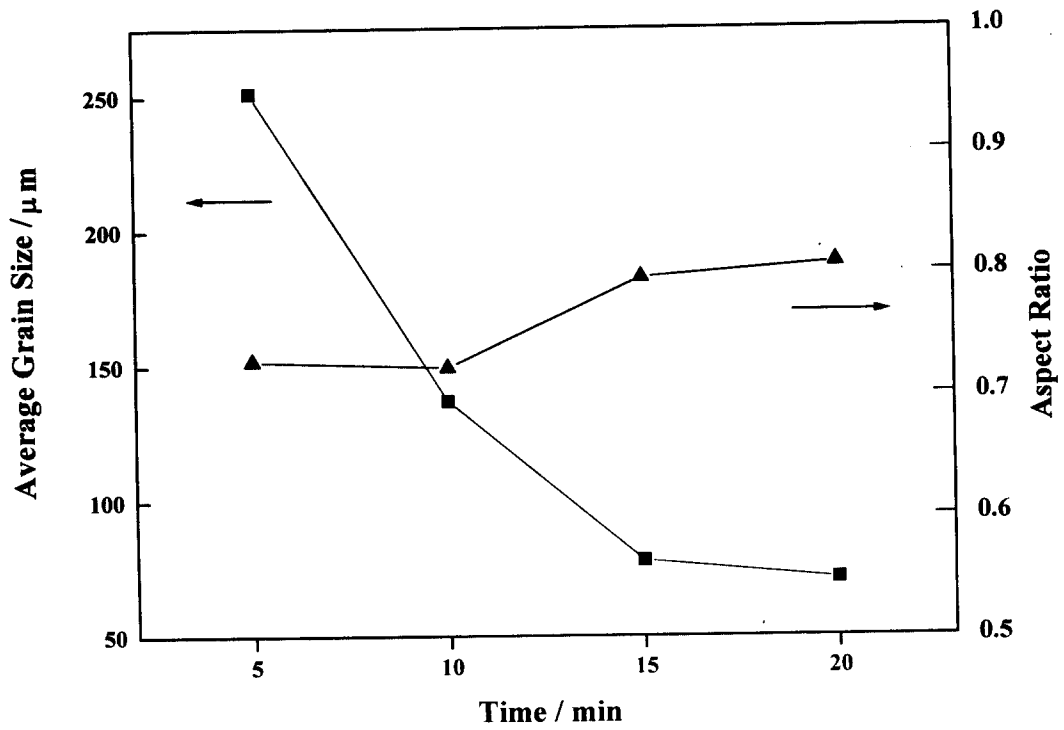


그림 6. A356합금의 기계적 교반시간에 따른 평균결정립크기변화

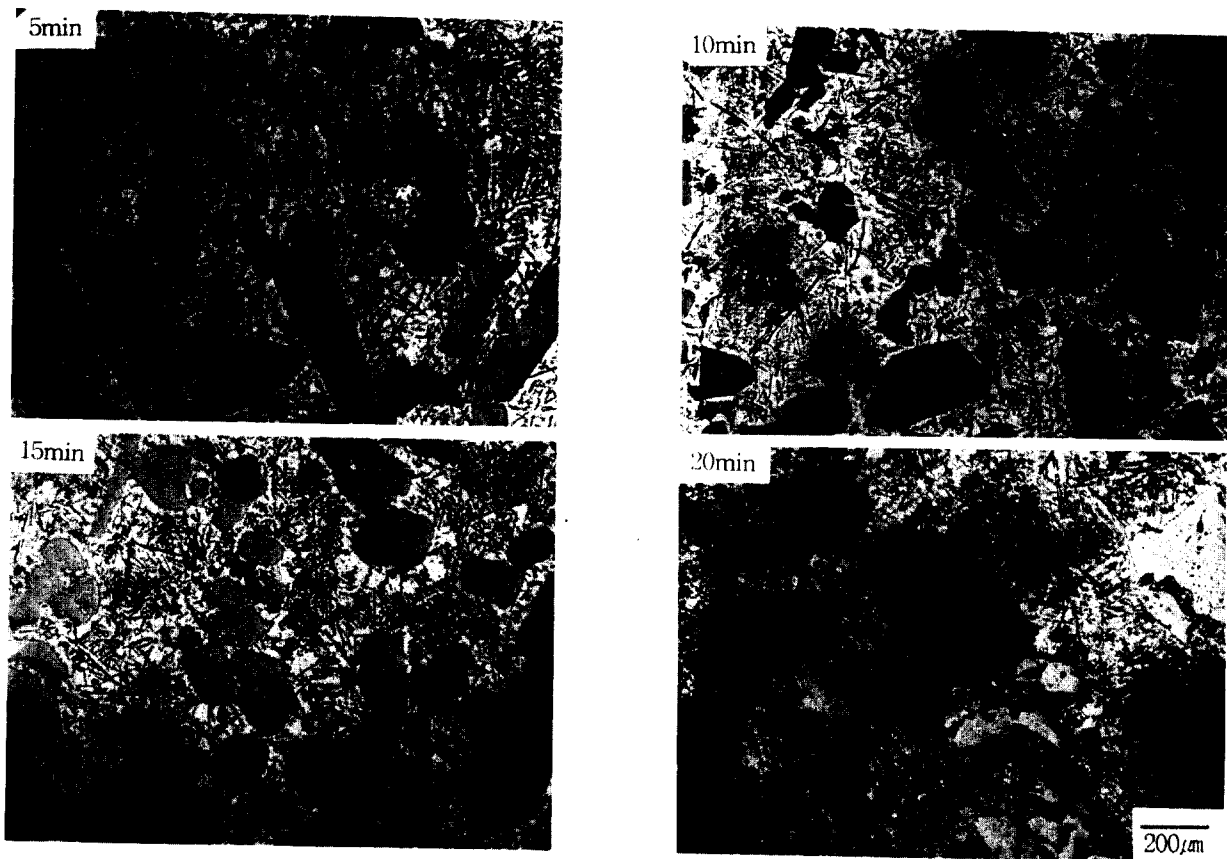


그림 7. Al-25%Si합금의 기계적 교반시간에 따른 조직변화(공냉)

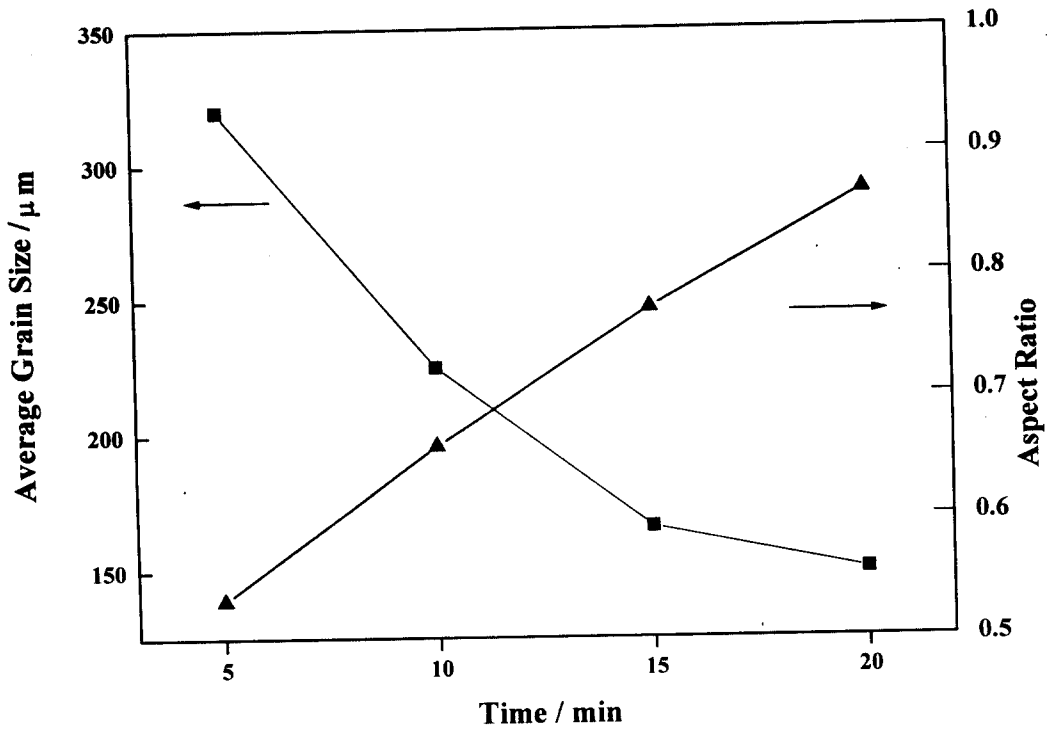


그림 8. Al-25%Si합금의 기계적 교반시간에 따른 평균 결정립크기변화

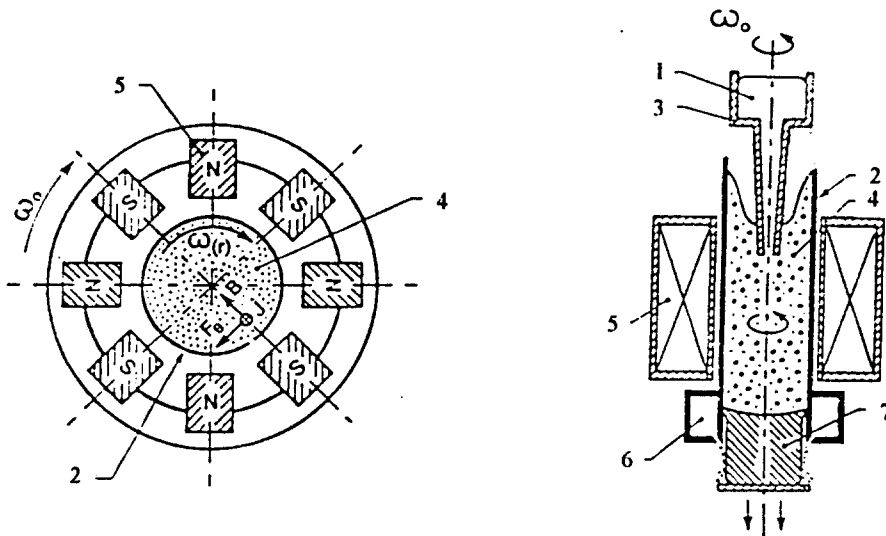


그림 9. 영구자석의 회전에 의한 반응고 합금제조용 교반기의 개략도

1. 용융금속, 2.Mold, 3.Spout, 4.반응고합금, 5.영구자석, 6.냉각수, 7.응고된 합금

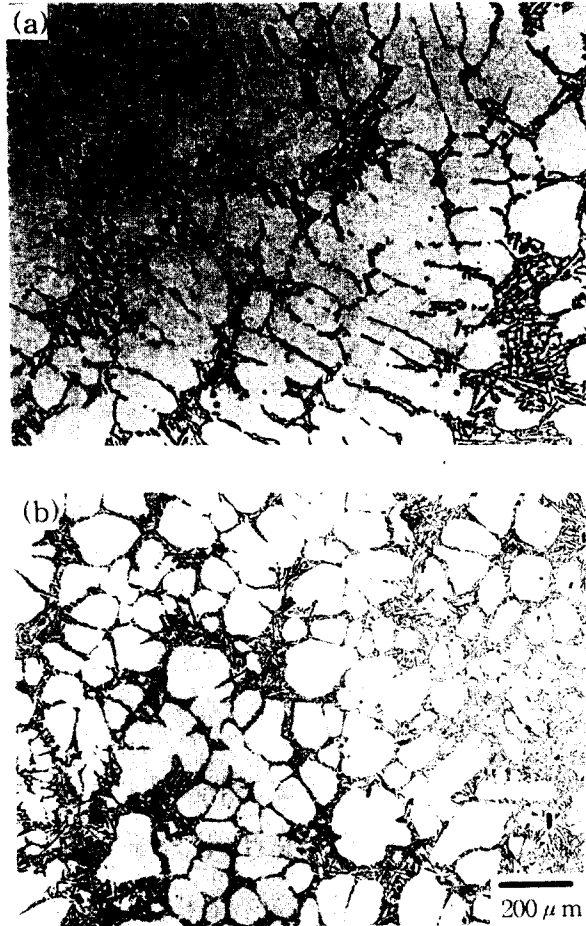


그림 10. A356합금의 영구자석에 의한 교반후 수냉한 미세조직  
(a) 교반전      (b) 교반후

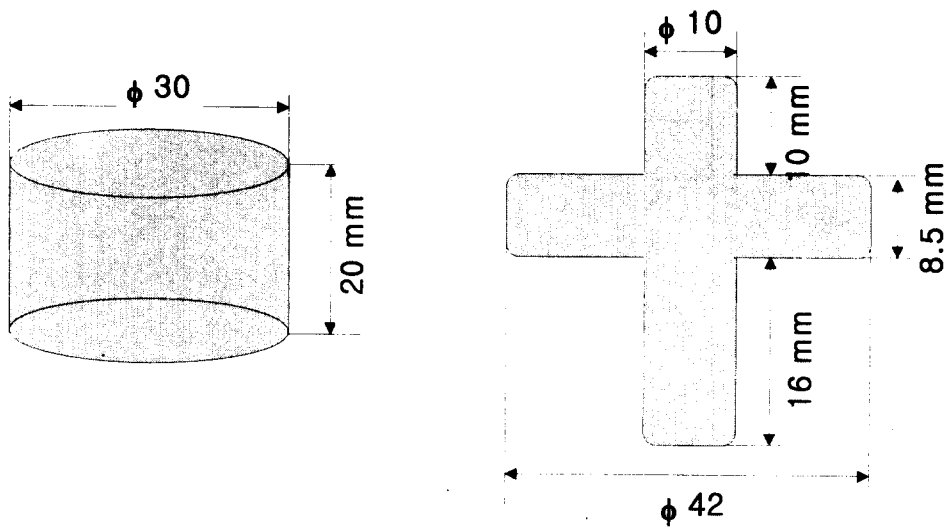


그림 11. 성형성 실험을 위한 시편의 개략도  
 (a) 성형전 시편형상 (b) 성형후 시편형상

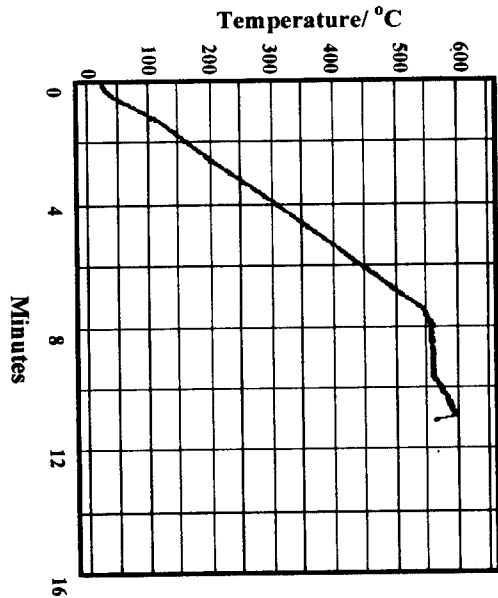
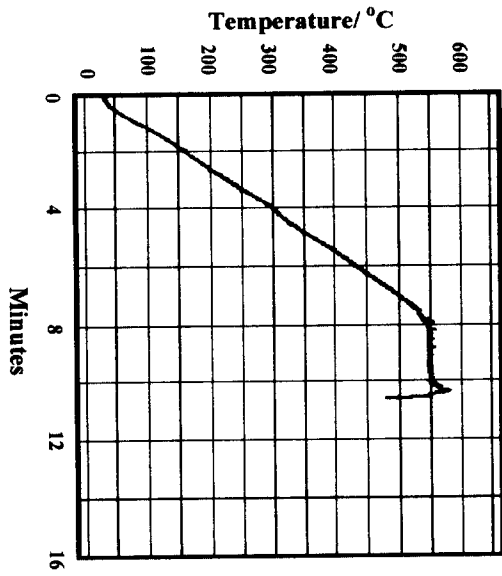


그림 12. 상형성 실험을 위한 시편의 재가열 온도  
 (a) 재가열 온도 : 580°C (b) 재가열 온도 : 590°C

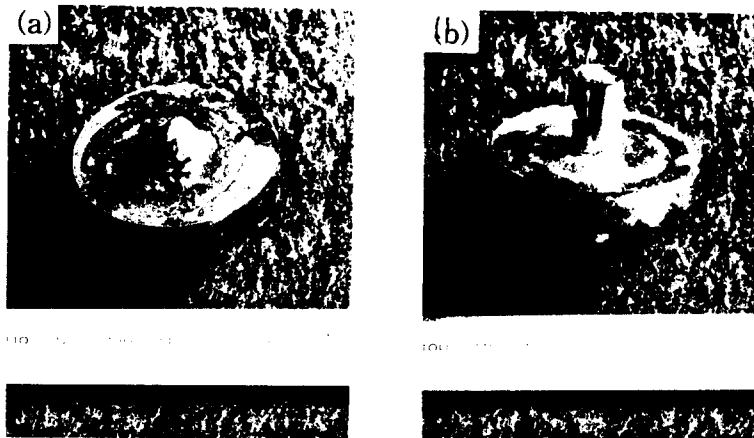


그림 13. A356합금의 성형성 실험 결과(재가열온도 : 580℃)  
 (a) 교반속도 : 0rpm      (b) 교반속도 : 3000rpm



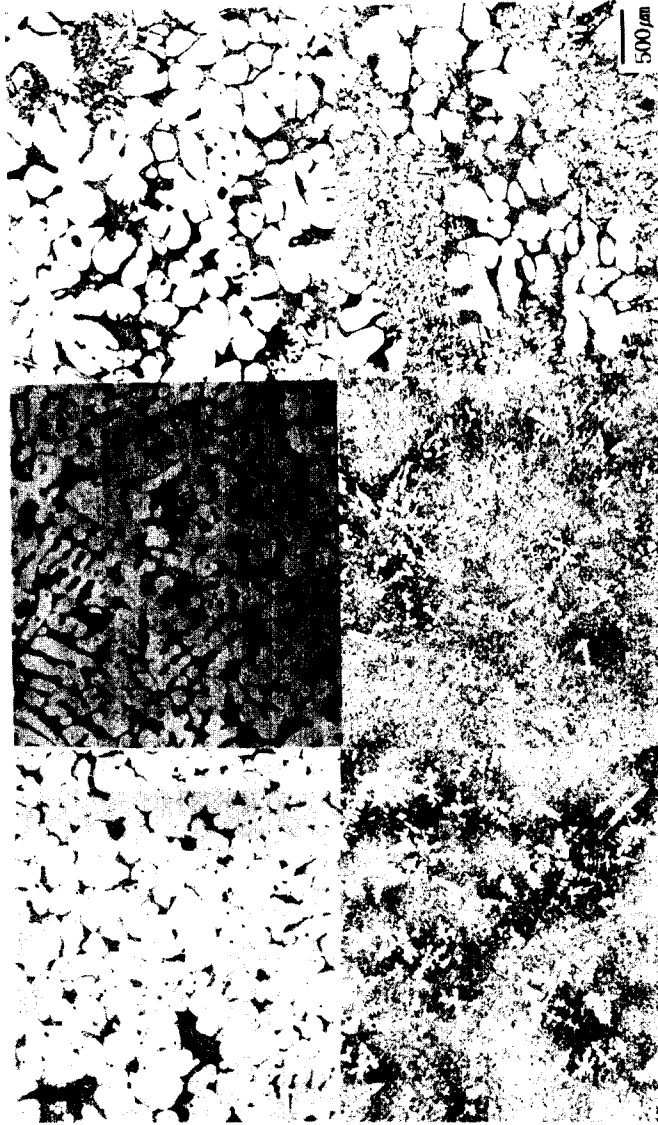
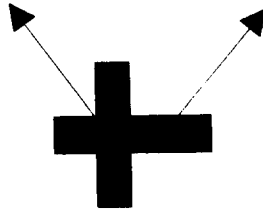


그림 14. A356합금의 성형성 실험에 의한 부위별 미세조직

(a) 재가열 온도 : 580°C, 3000rpm

(b) 재가열 온도 : 590°C, 0rpm

(c) 재가열 온도 : 590°C, 3000rpm



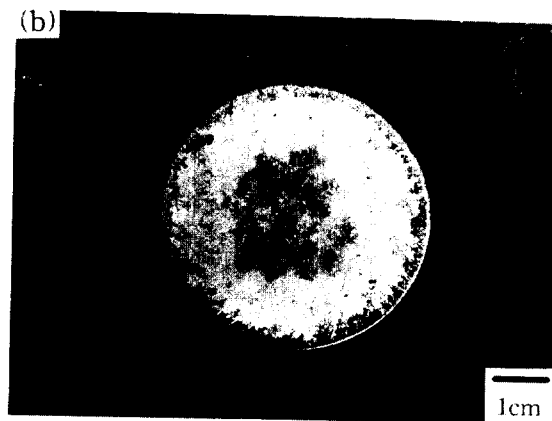
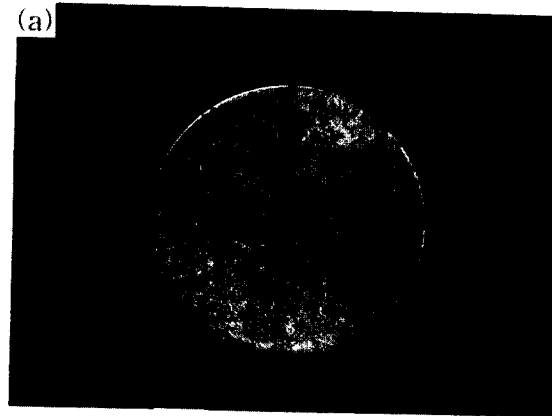


그림 15. Al-25%Si합금의 영구자석의 회전유무에 따른 시편의 단면사진  
(a) 교반전            (b) 교반후

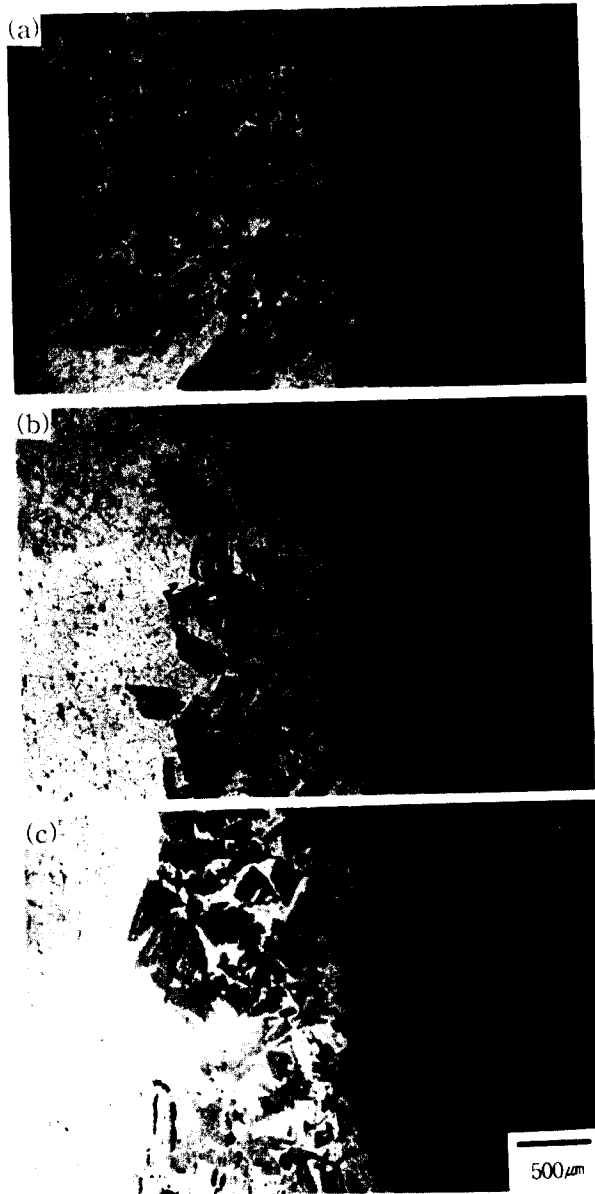


그림 16. Al-25%Si합금의 영구자석의 회전속도에 따른 초정 Si입자의 편재거동  
(a) 1000rpm      (b) 2000rpm      (c) 3000rpm

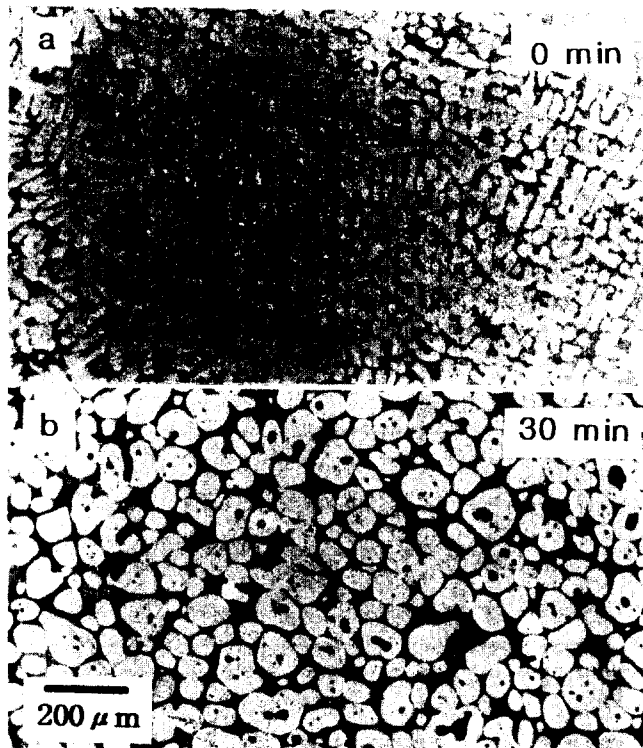


그림 17. 10%냉간가공한 Al-8wt%Si합금의 590°C에서 열처리한 미세조직